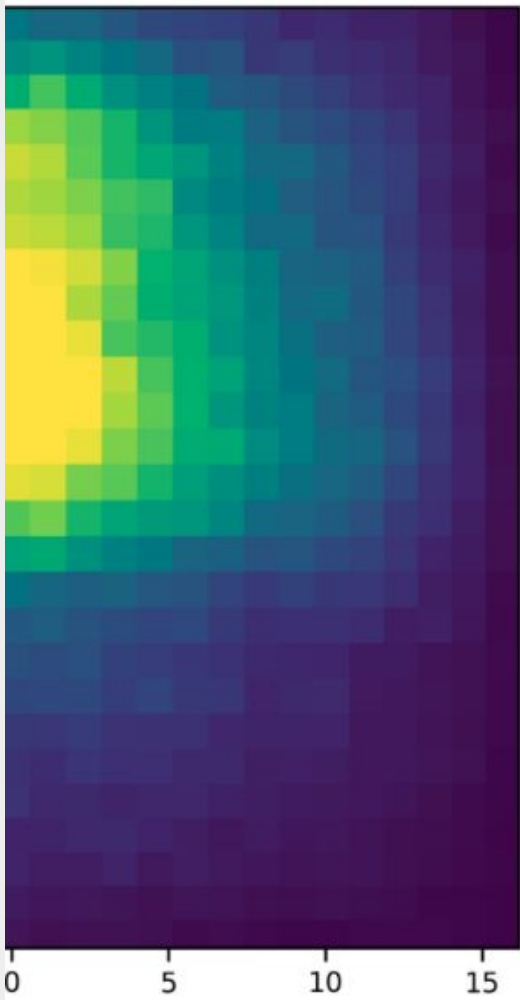


Aplicaciones de los rayos cósmicos

Christian Sarmiento-Cano

Universidad Autónoma de Bucaramanga
Laboratorio de Investigación en Detección de
Radiación y Astropartículas, LIDeRA
Bucaramanga-Colombia



Outline

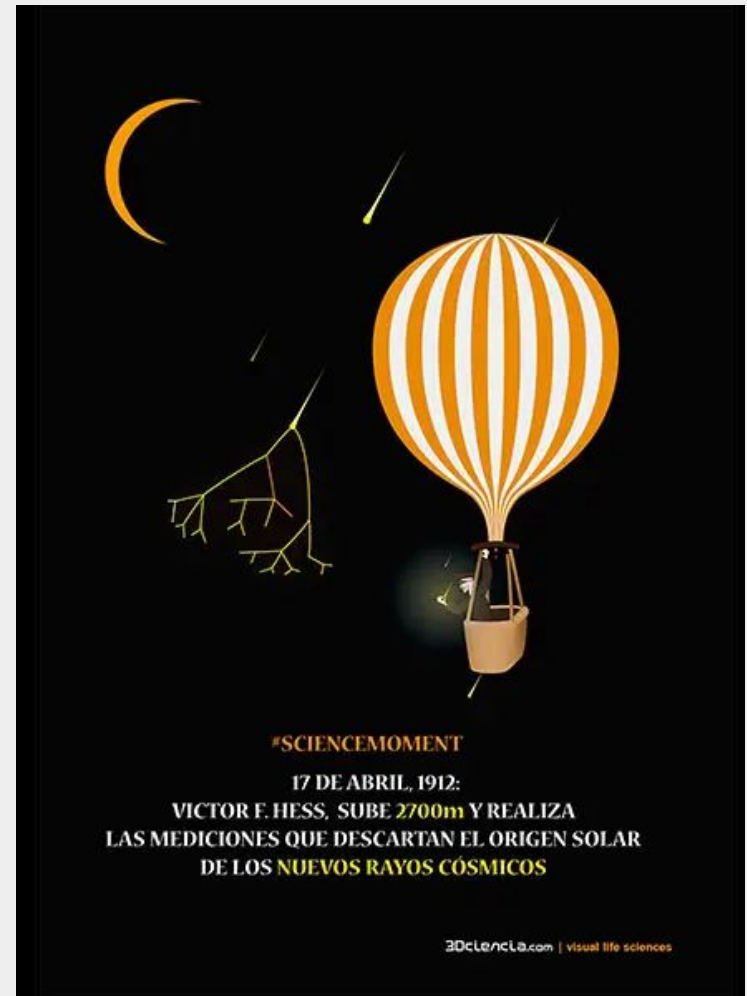
Introducción a los rayos cósmicos 01

Muografía 02

Detección de la humedad con neutrones 03

01

Los rayos cósmicos



¿Cómo se descubrieron los RC?

1912 → Victor Hess

Realizó un vuelo en globo para corroborar su hipótesis de que la radiación que estaba midiendo no provenía de la tierra sino del espacio exterior.

Luego de hacer mediciones en la torre Eiffel decidió elevarse a 5.000 m y medir la radiación en esa altura.

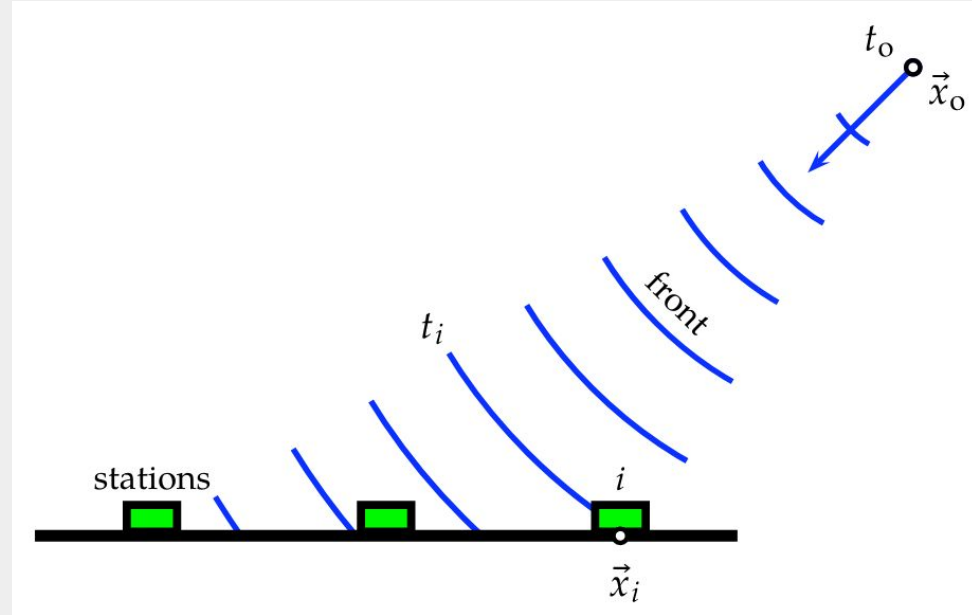


¿Cómo se descubrieron los RC?

1936→ Pierre Auger

Notó que los rayos cósmicos no llegaban todos a un mismo punto de observación, por el contrario se distribuían por el espacio. Por esta razón ubico detectores primero a 20 m, luego a 200 m, hasta aumentar esta distancia a 1500 m.

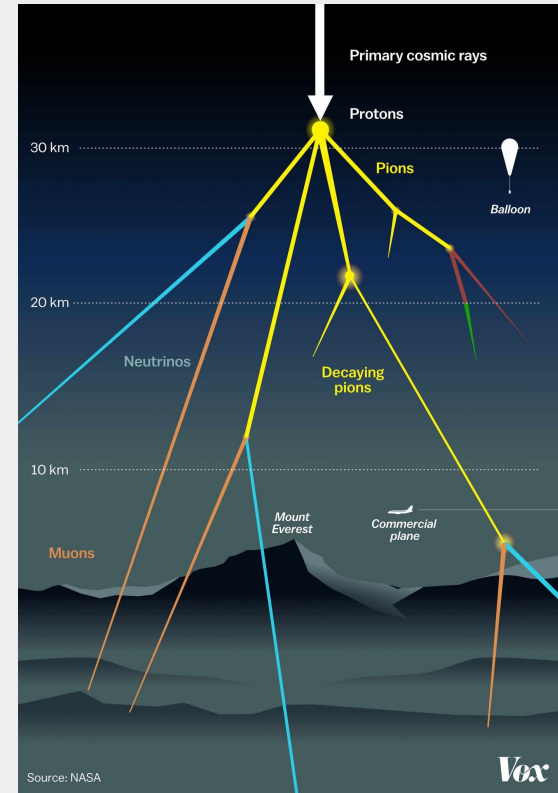
De esta manera definió lo que hoy conocemos como "Extensive Air Shower, EAS" o cascadas de partículas secundarias.



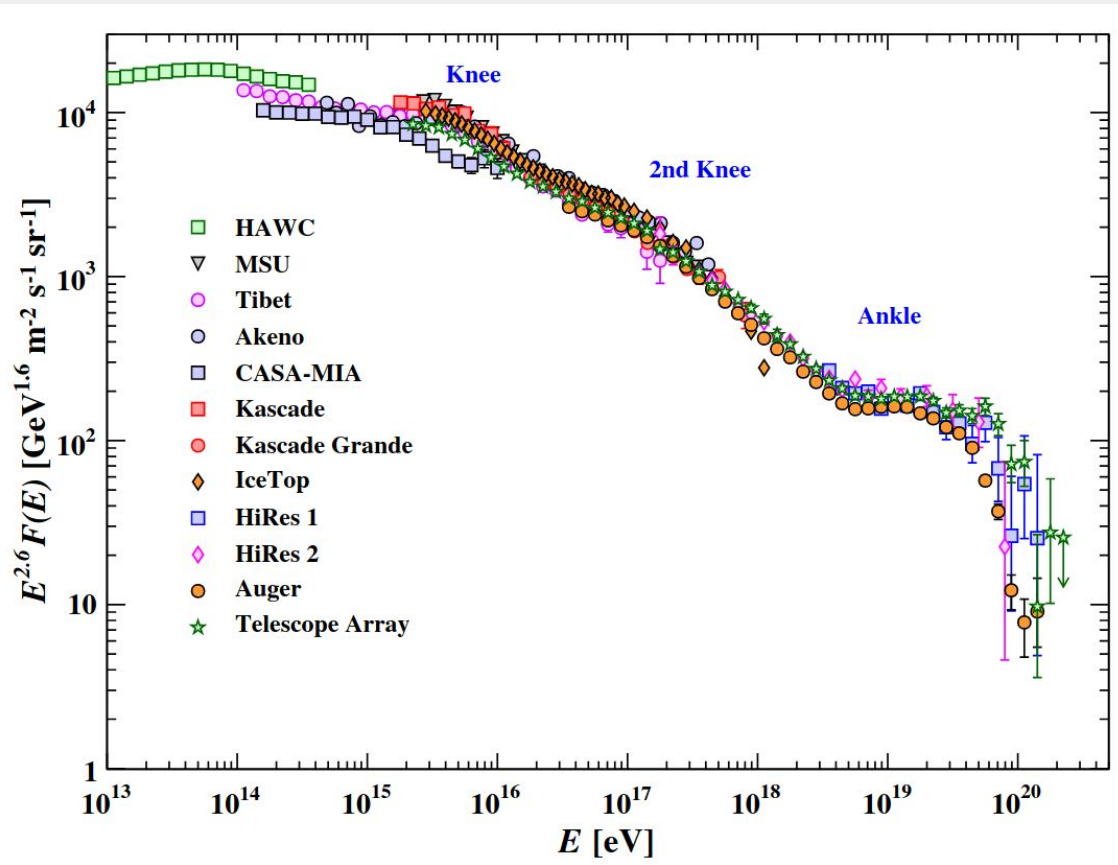
¿Qué son los rayos cósmicos?

Los rayos cósmicos se definen como las partículas elementales, núcleos y radiación electromagnética que ingresa desde el espacio exterior. El rango de energía de estos se encuentra entre 10^9 eV y 10^{21} eV. Las mediciones en Tierra han mostrado que su composición química:

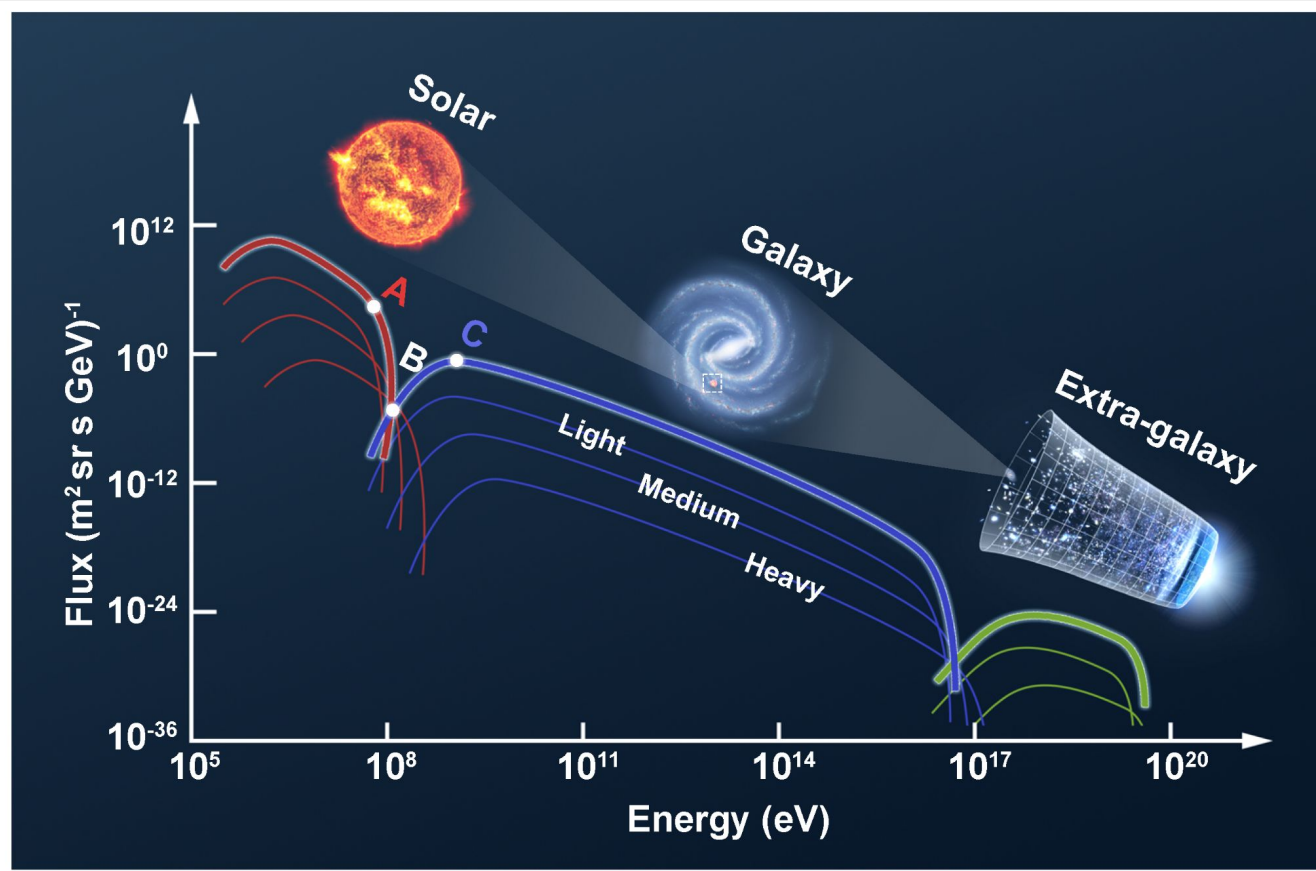
- Protones ~ 89 %
- Núcleos de Helio ~ 10 %
- Electrones y núcleos pesados ~ 1 %



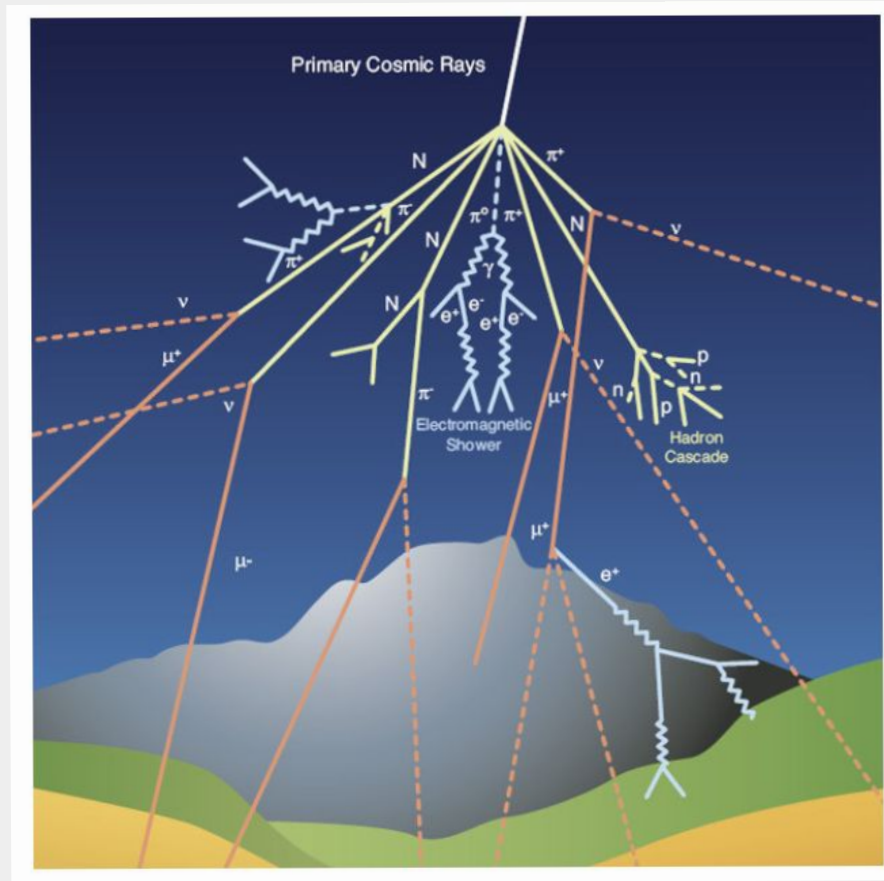
Espectro de rayos cósmicos primarios



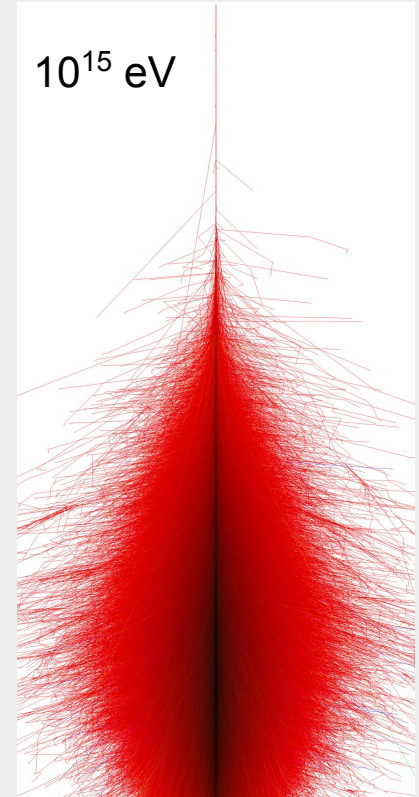
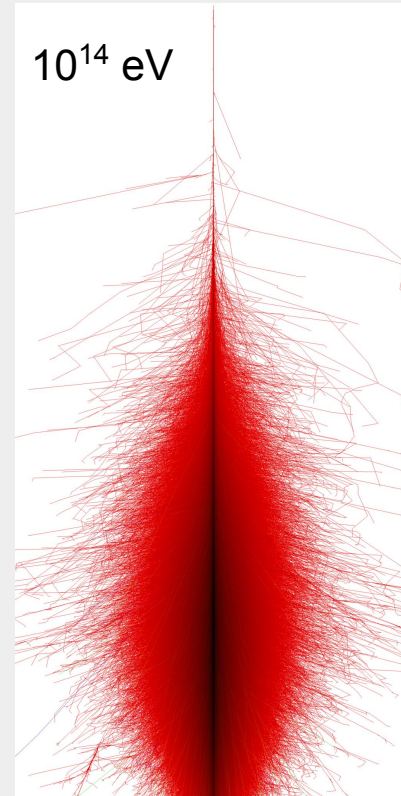
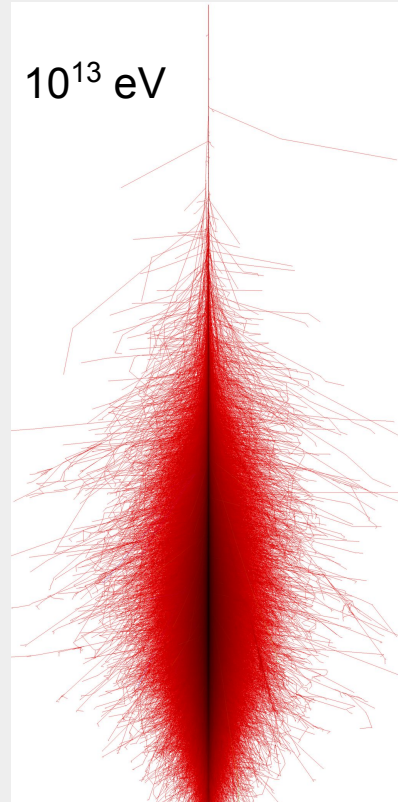
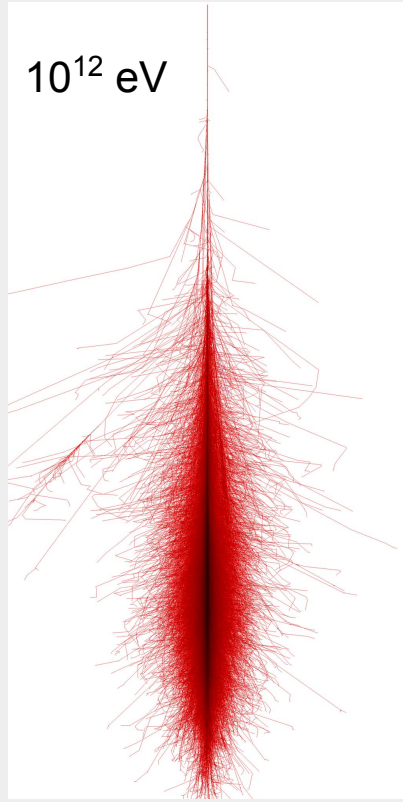
Espectro de rayos cósmicos primarios



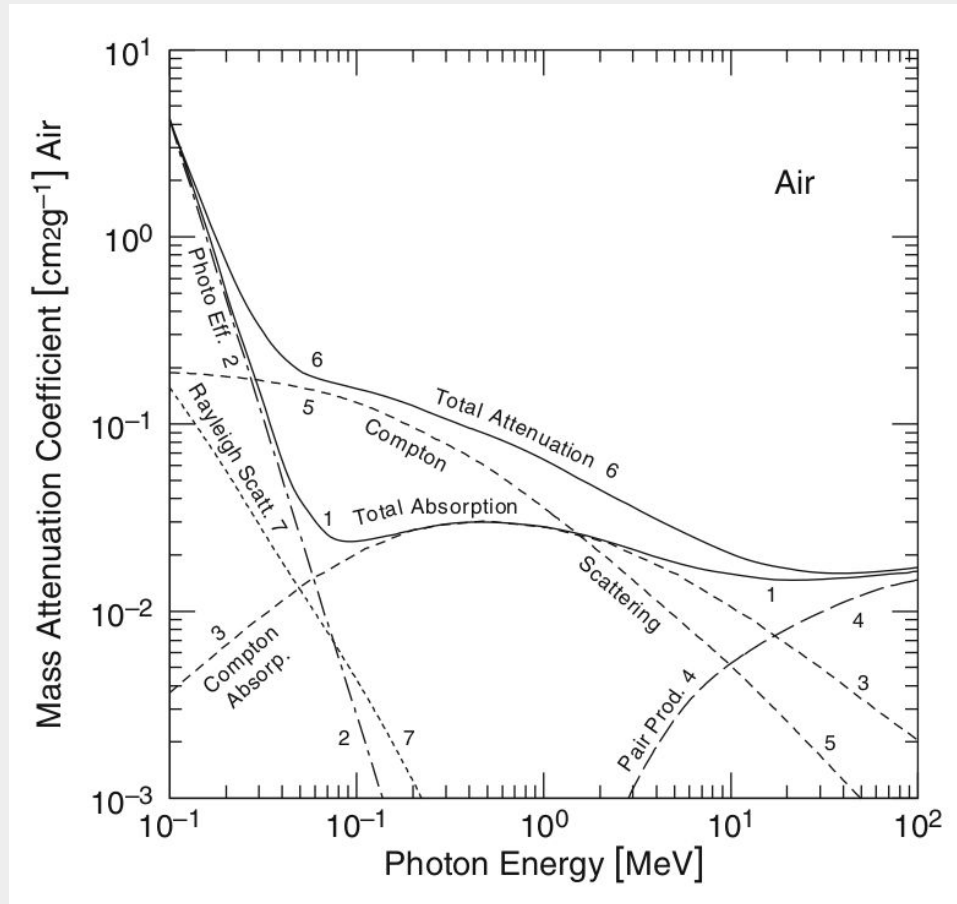
Lluvias de partículas secundarias (EAS)



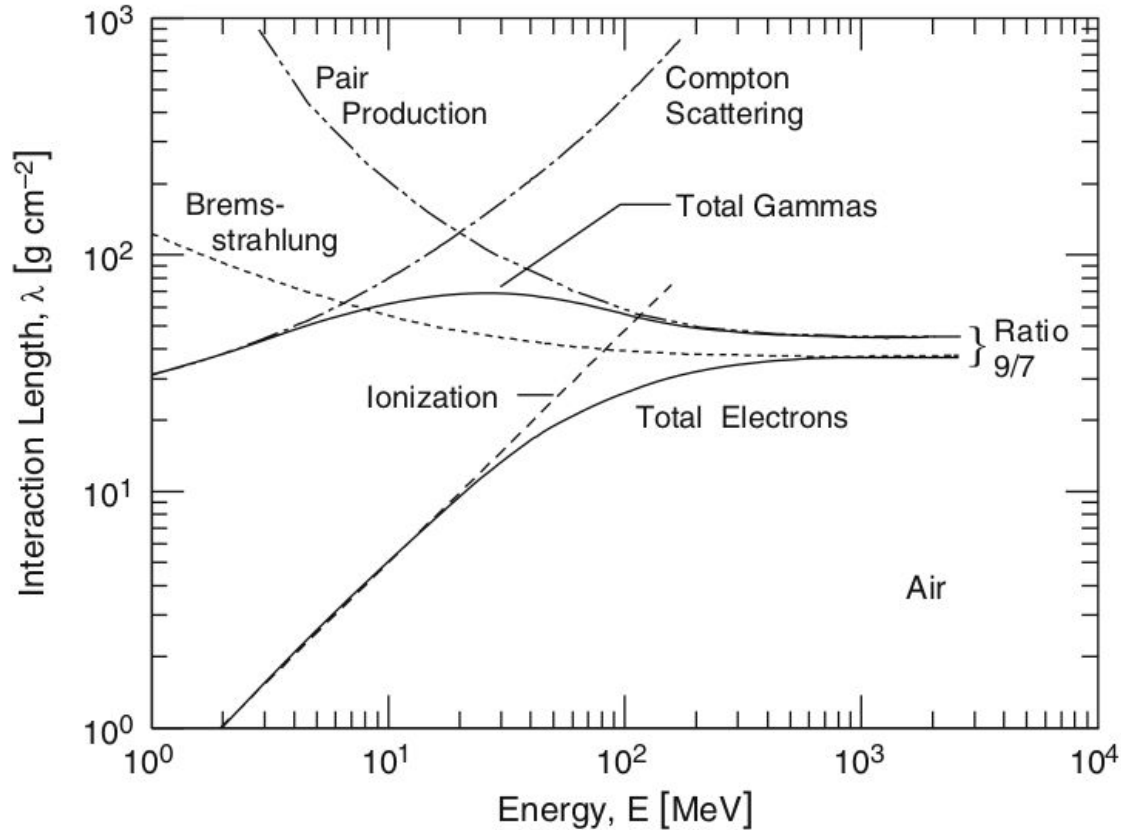
Lluvias de partículas secundarias



Procesos colisionales y radiativos

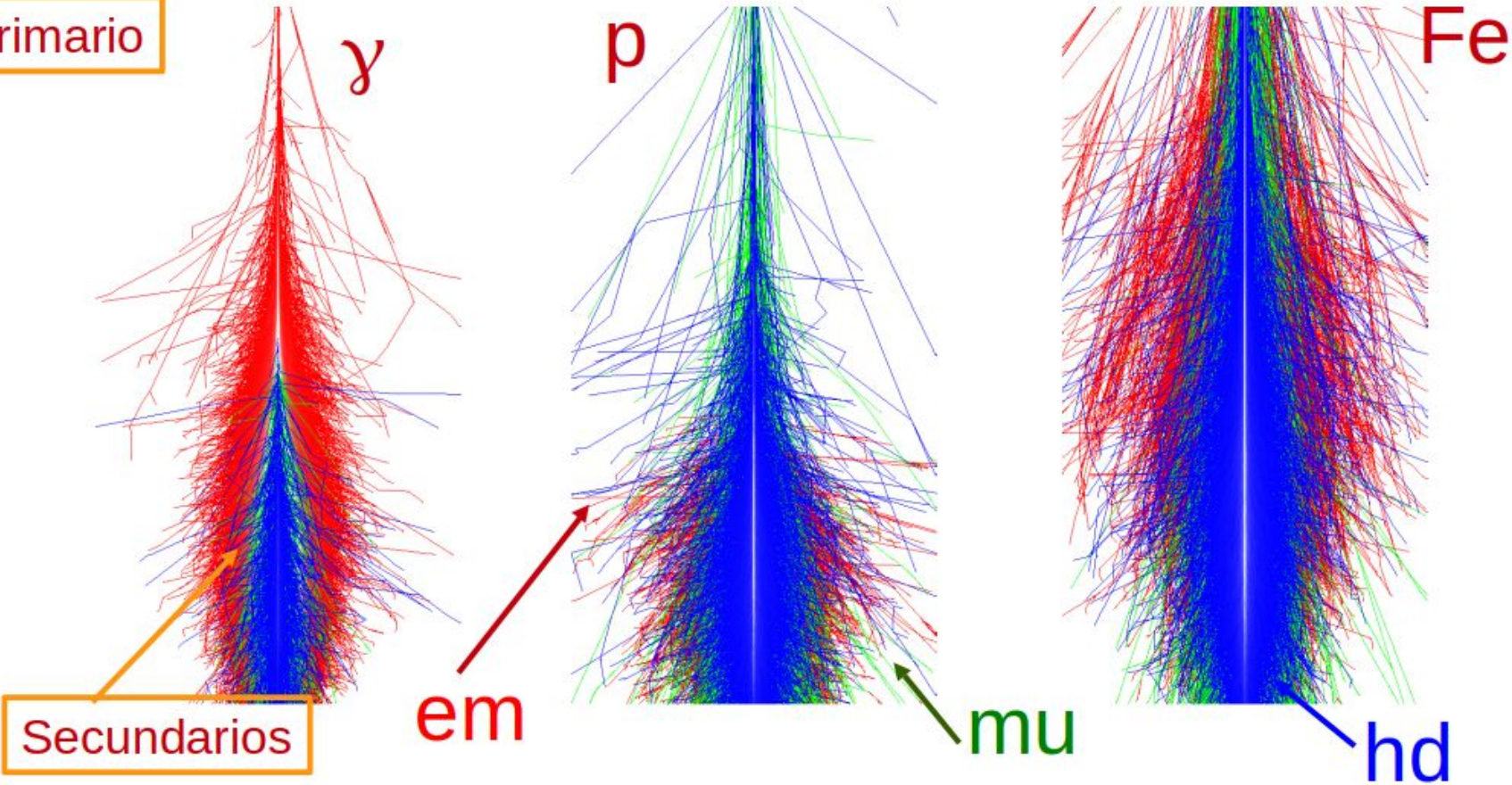


Procesos colisionales y radiativos



La longitud de interacción es la distancia en la cual las partículas cargadas pierden suficiente energía como para poder interactuar.

Primario



Desarrollo dependiente de la composición del primario

Lluvias atmosféricas extendidas

- X_0 Punto de primera interacción
- $N_{\text{máx}}$ Número máximo de partículas en la lluvia: $N_{\text{máx}} \propto E_p$
- $X_{\text{máx}}$ Profundidad del máximo: $X_{\text{máx}} \propto \ln(E_p)$

EM

- Decaimiento de π^0 :
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- Bethe-Heitler:
Frenado: $e^\pm \xrightarrow{ZY} e^\pm \gamma$
Pares: $\gamma \xrightarrow{ZY} e^+ e^-$
- Domina $N_{\text{máx}} \rightarrow X_{\text{máx}}$
- $E_{\text{EM}} = (80\% - 90\%) E_p$

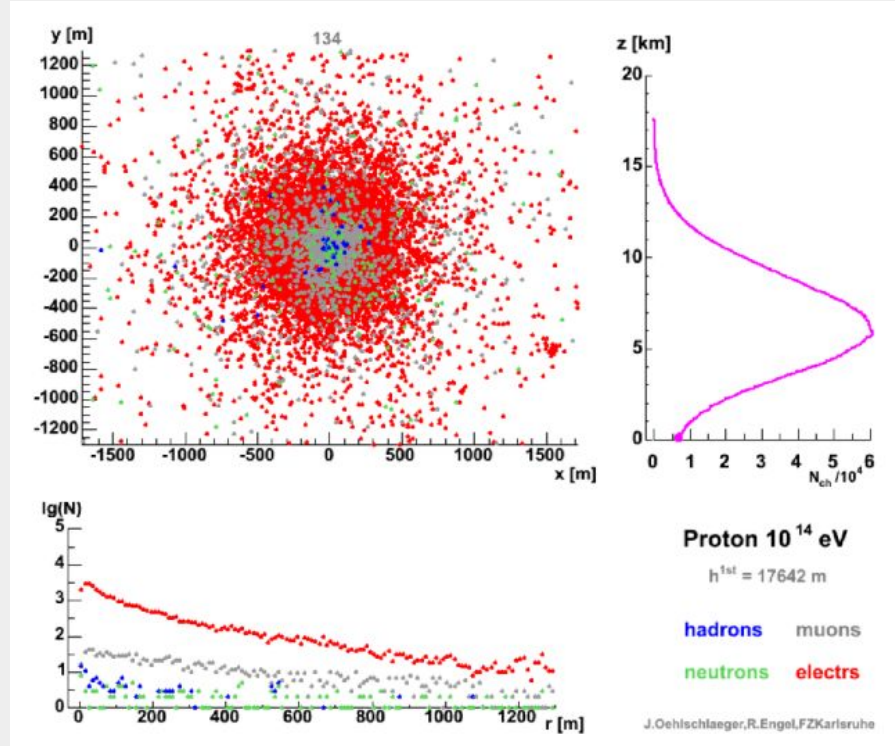
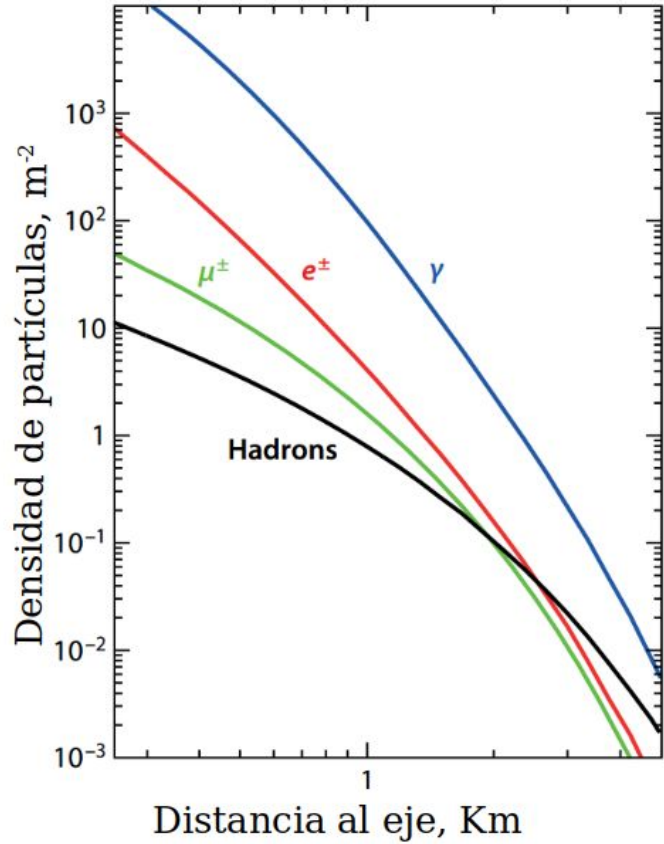
Muónica

- Dec. de K^\pm y π^\pm :
 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
 $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- Procesos radiativos
 $\mu^\pm \xrightarrow{ZY} \mu^\pm e^+ e^-$
 $\mu^\pm \xrightarrow{ZY} \mu^\pm + \text{had}$
- $N_\mu \propto A^{0,1} E_p^{0,9}$

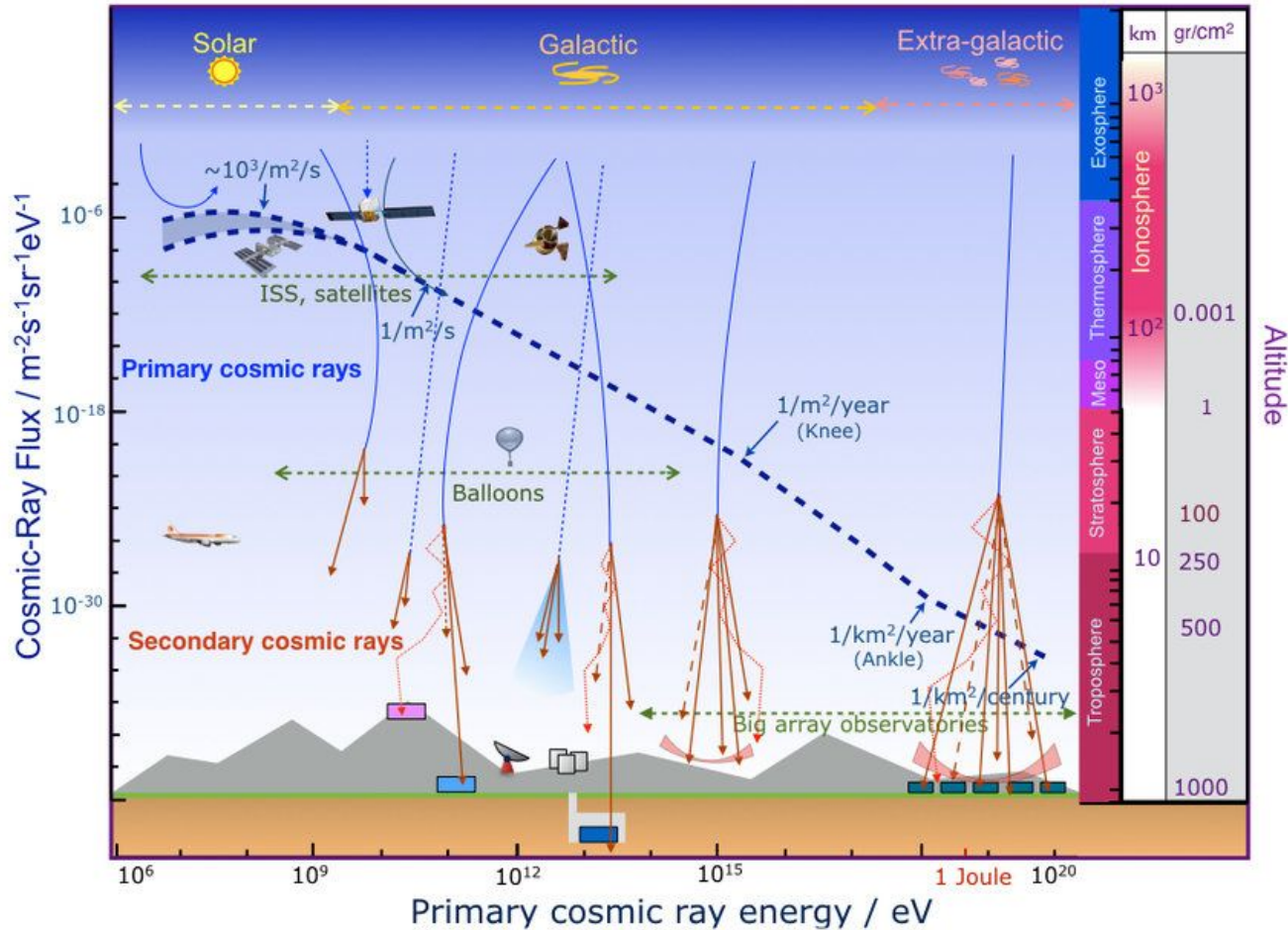
Hadrónica

- Fragmentos nucleares
- p, n, π^\pm, K^\pm
- Mesones encantados
- *Leading particle effect*
- Concentrada en el eje de la lluvia
- $N_h \propto N_e^{0,95}$
- $N_h/N_e \sim 10^{-2} - 10^{-4}$

Perfil lateral de la EAS



¿Cómo se detectan?



Flujo de rayos cósmicos al nivel del suelo



Files used by CORSIKA for simulation setup

Perl language



MAGCOS uses CORSIKA to produce a corrected flux

Root & C++



Bash interface



Initial conditions as energy interval, zenith, azimuth and geomagnetic field.

Fortran & C++



Output: Binary files and pre-analysis files.

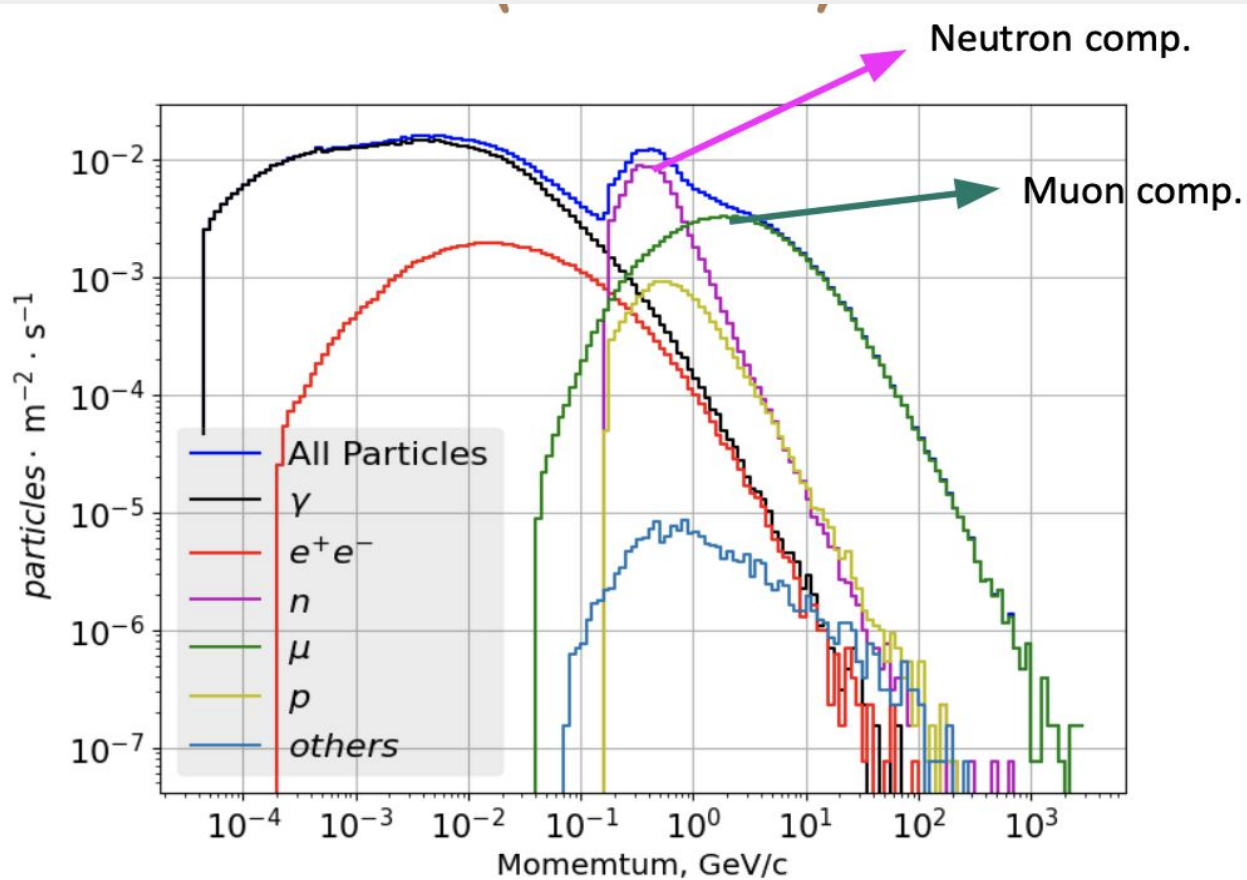


Output: Distribution of photoelectrons & Charge histogram

Github repository



Flujo de rayos cósmicos al nivel del suelo



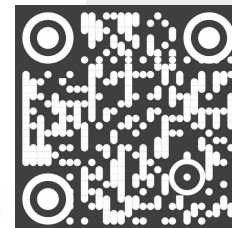
Sarmiento-Cano, & LAGO Collaboration. (2022). **The ARTI framework: cosmic rays atmospheric background simulations.** *The European Physical Journal C*, 82(11), 1019.



Files used by CORSIKA for simulation setup



MAGCOS uses CORSIKA to produce a corrected flux



Perl language

Root & C++



Bash interface

Fortran & C++



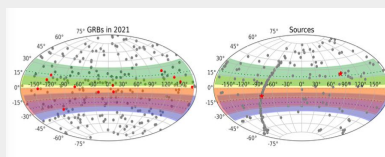
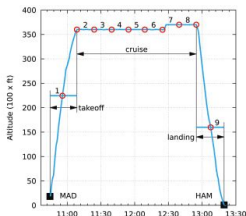
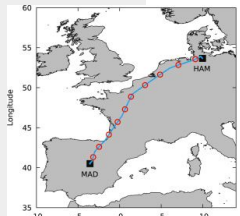
Initial conditions as energy interval, zenith, azimuth and geomagnetic field.



Output: Binary files and pre-analysis files.



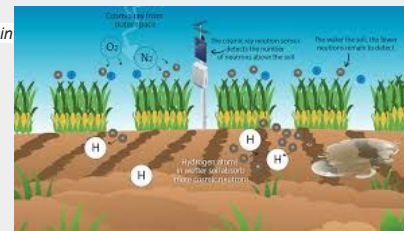
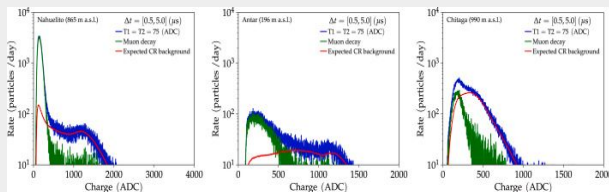
Output: Distribution of photoelectrons & Charge histogram



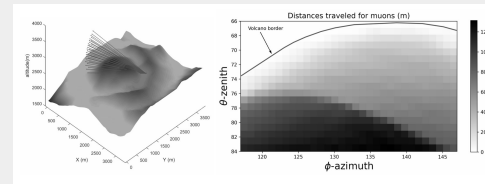
Country	Site	Altitude [m asl]	Latitude [deg]	Longitude [deg]
Sierra Negra	SNG	4,550	18.2 N	97.9 W
Chimborazo	CHI	5,000	1.5 S	78.8 W
Imata	IMA	4,600	15.9 S	71.1 W
Atacama	ATA	5,100	23.0 S	67.8 W
S. A. de los Cobres	SAC	4,500	24.2 S	66.3 W

Sidelnik, I., & LAGO Collaboration. (2023). **The capability of water Cherenkov detectors arrays of the LAGO project to detect Gamma-Ray Burst and high energy astrophysics sources.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 1056, 168576.

Asorey, H., Suárez-Durán, M., & Mayo-García, R. (2023). **ACORDE: A new application for estimating the dose absorbed by passengers and crews in commercial flights.** *Applied Radiation and Isotopes*, 196, 110752.



Sarmiento-Cano, & LAGO Collaboration. (2024). **Cosmogenic neutrons and soil moisture** (in preparation).

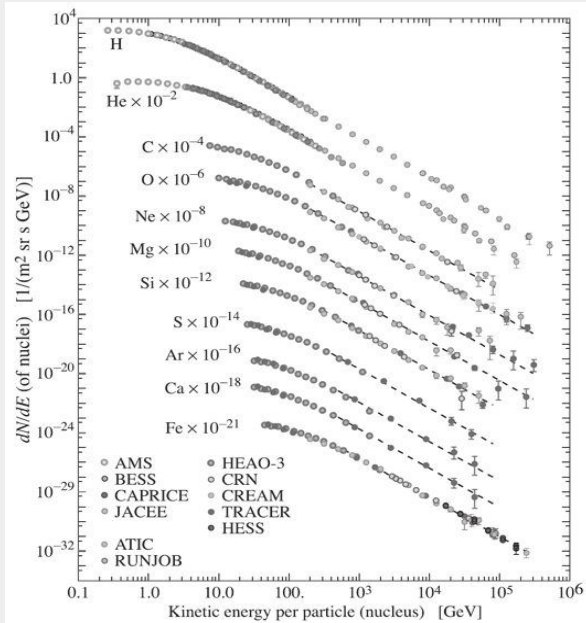
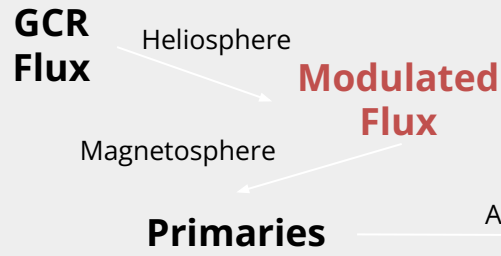


13 volcanoes analysed
Only one complies Cerro Machín

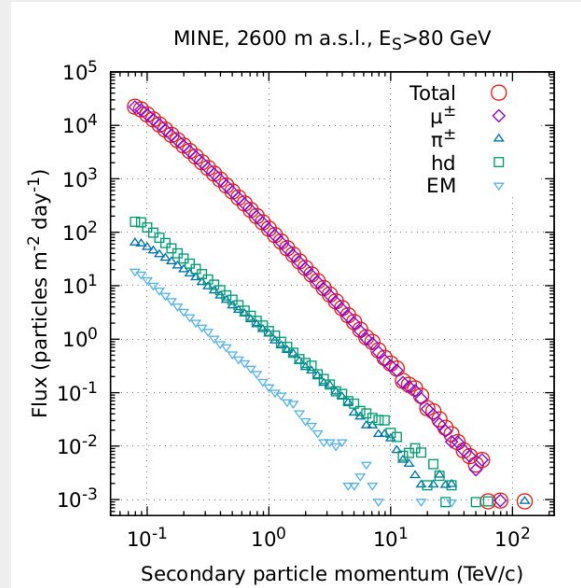
Vesga-Ramirez, A., et al (2020). **Muon Tomography sites for Colombian volcanoes.** *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 63(6).

Otiniano, L., & LAGO Collaboration. (2023). **Measurement of the muon lifetime and the Michel spectrum in the LAGO water Cherenkov detectors as a tool to enhance the signal-to-noise ratio.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 1056, 168567.

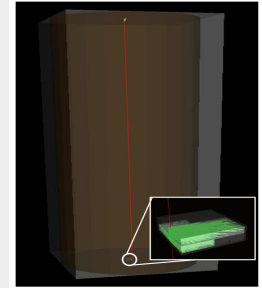
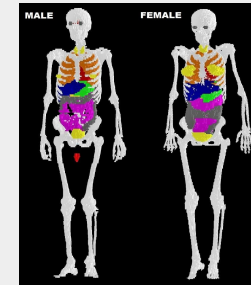
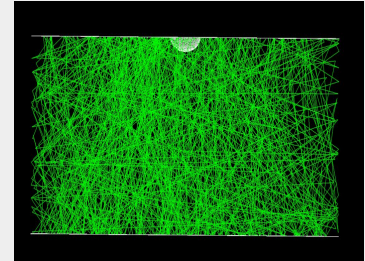
De los RC a las aplicaciones



ARTI + CORSIKA

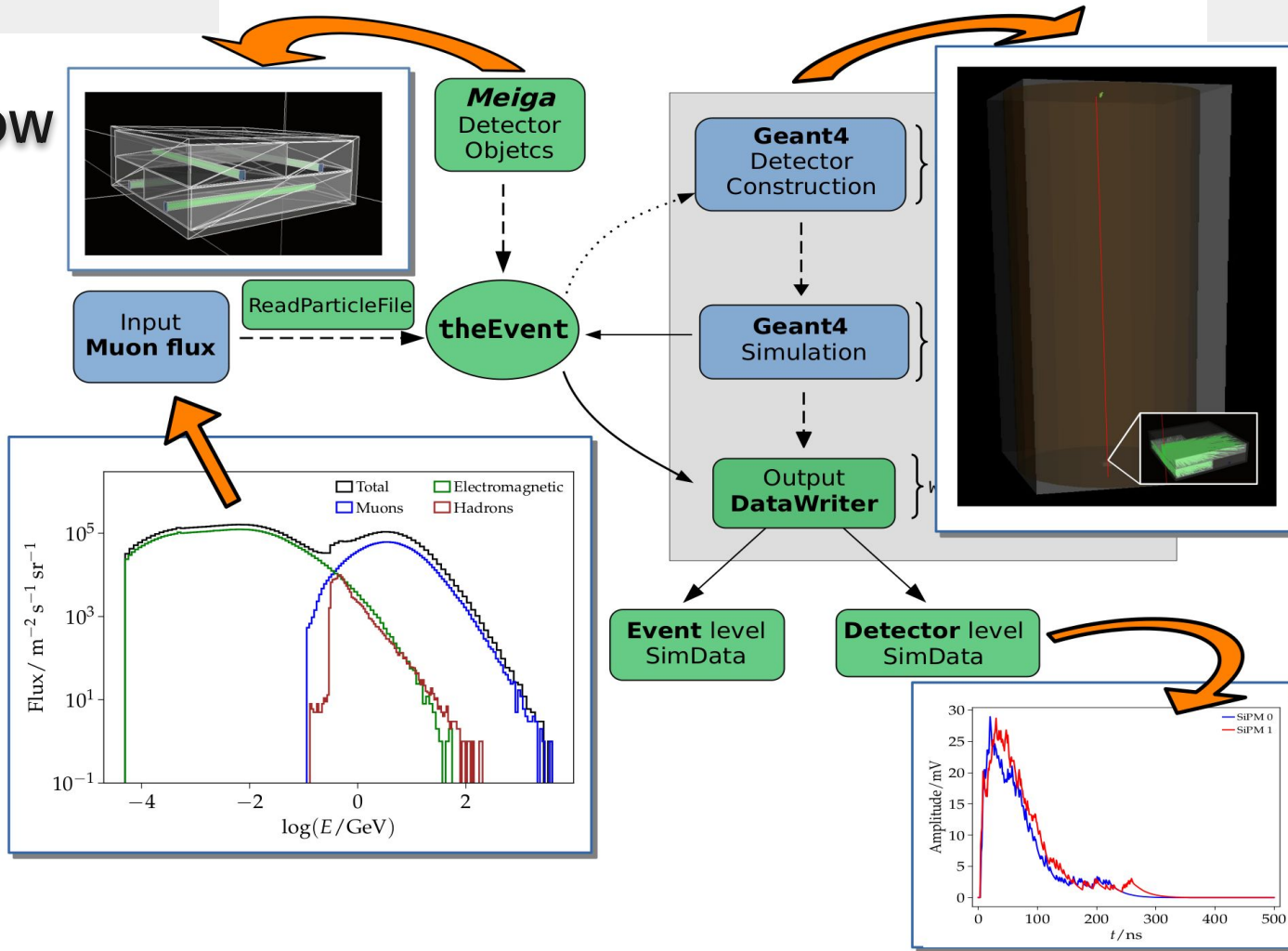


ARTI



ARTI + MEIGA (Geant4)

Workflow

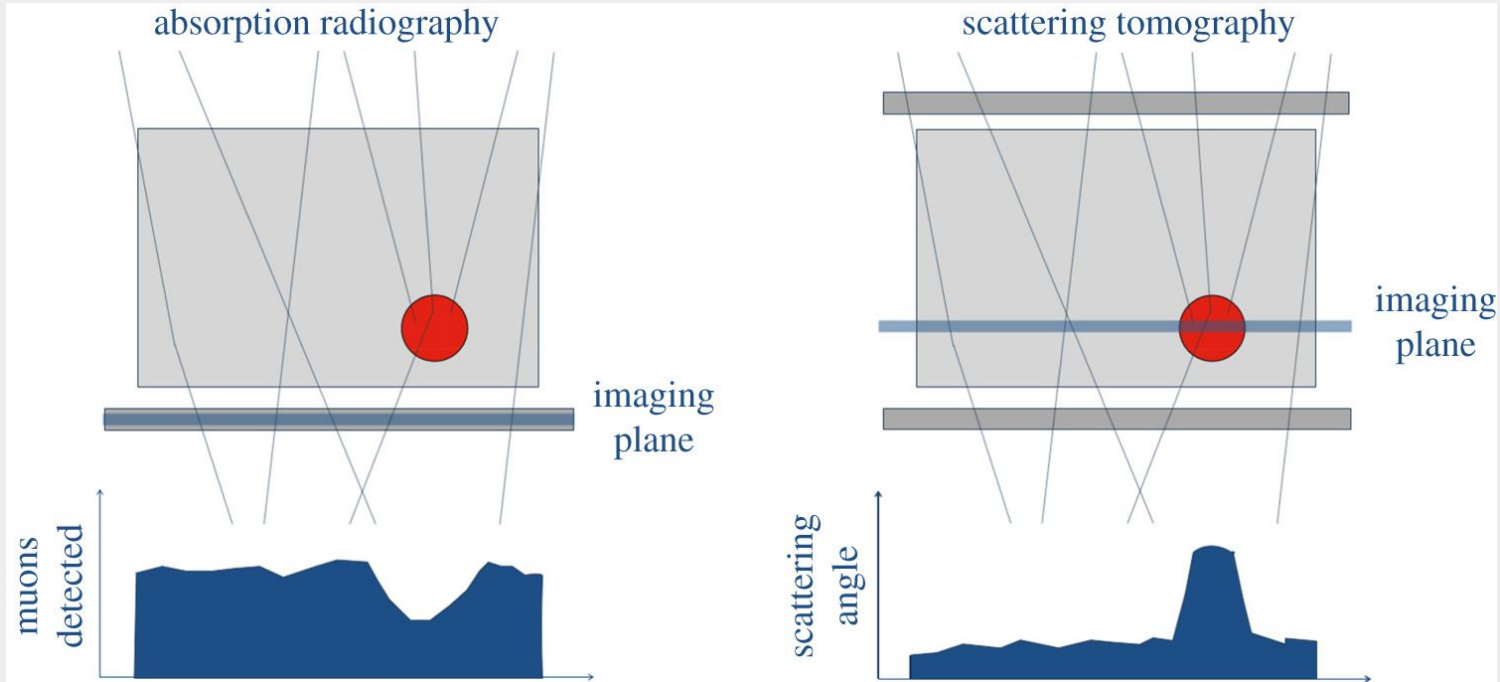


02

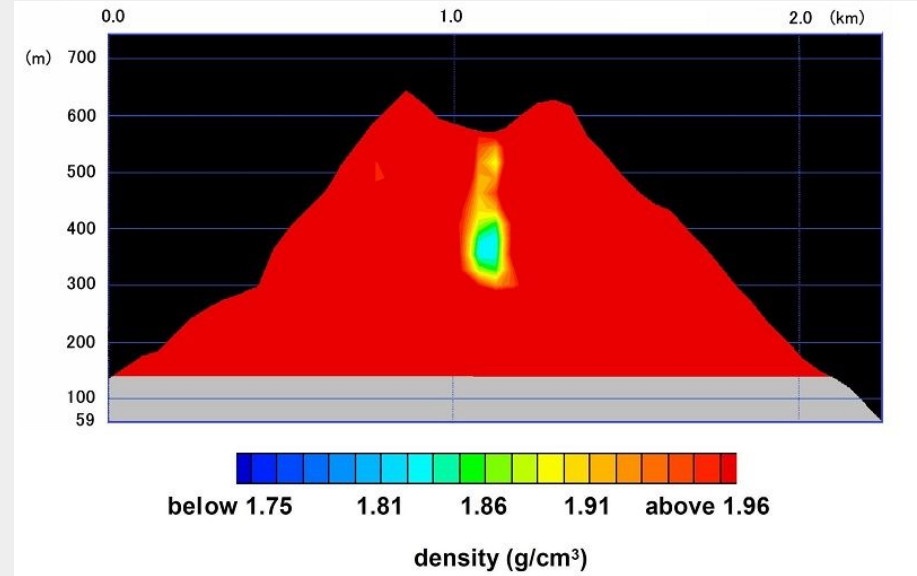
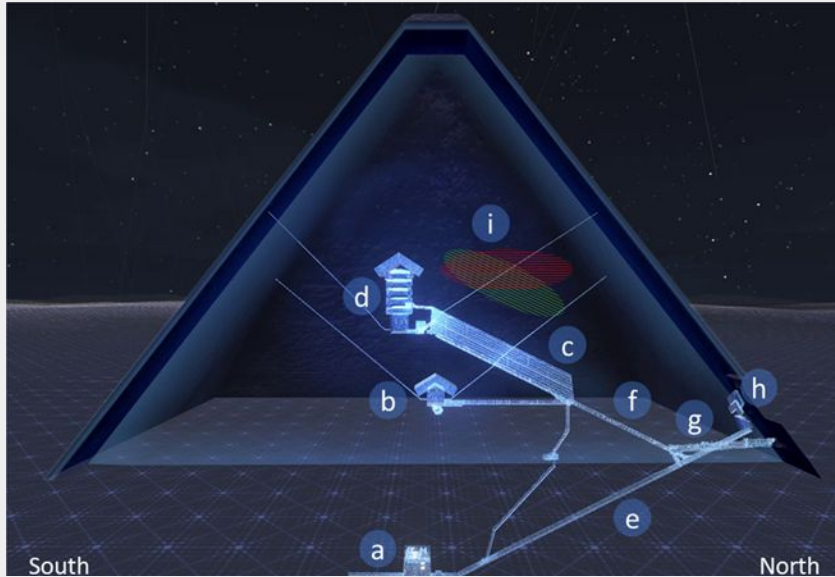
Muografia



Muografía

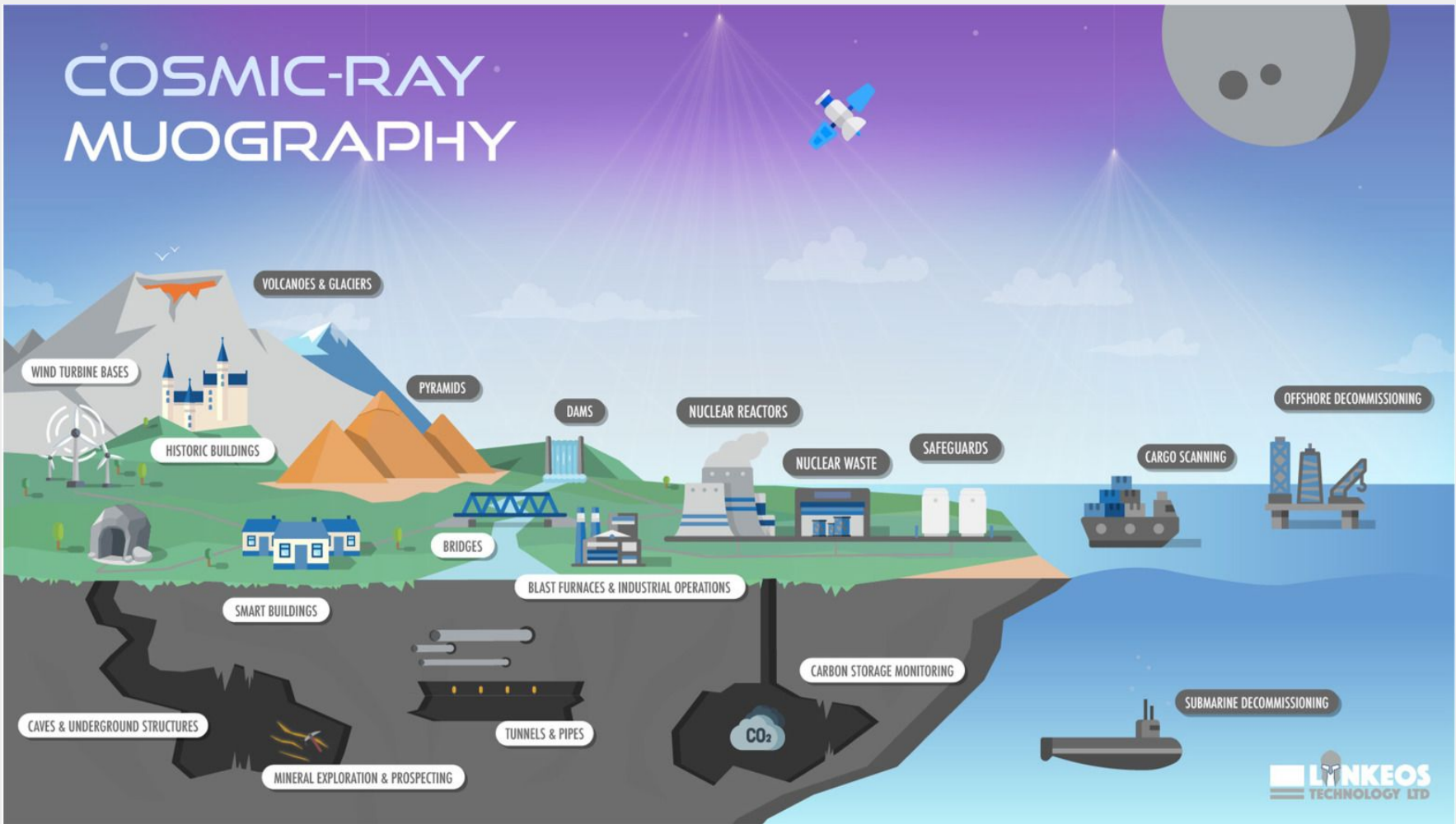


Muografía



Tanaka, H.K.M., Bozza, C., Bross, A. et al. Muography. *Nat Rev Methods Primers* 3, 88 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s43586-023-00270-7>

COSMIC-RAY MUOGRAPHY





Volcán Cerro Machín

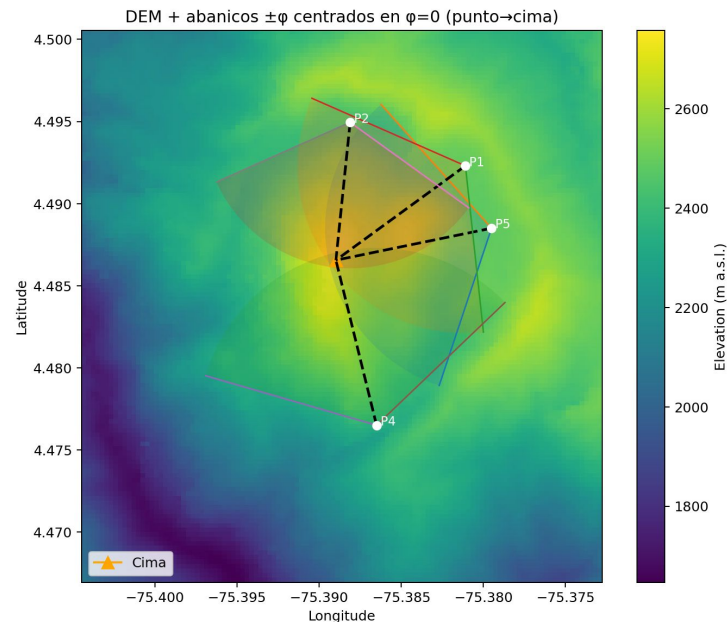
Cajamarca, Tolima - Colombia



Volcán Cerro Machín



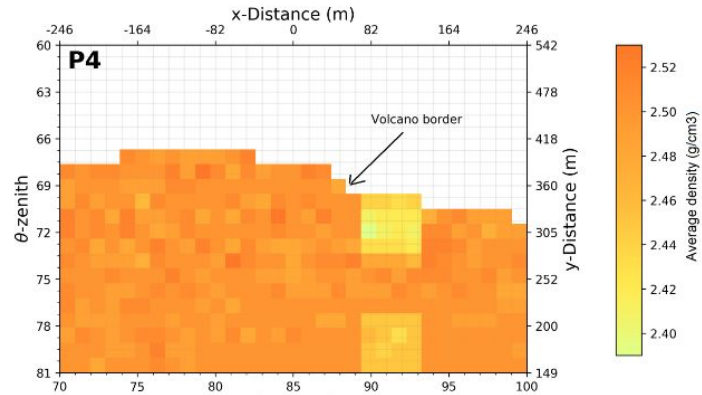
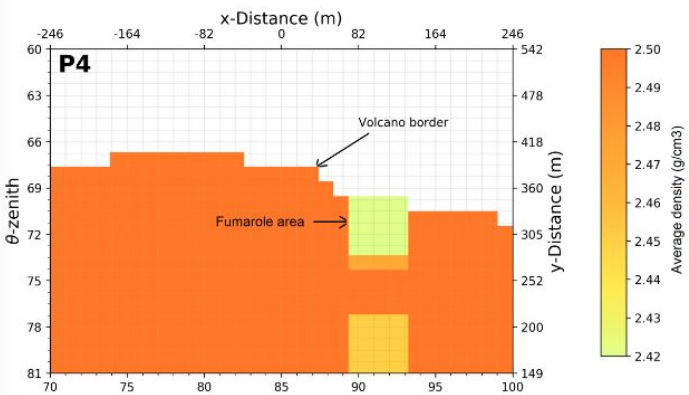
Observation points at Cerro Machín



Simulated flux at observation points

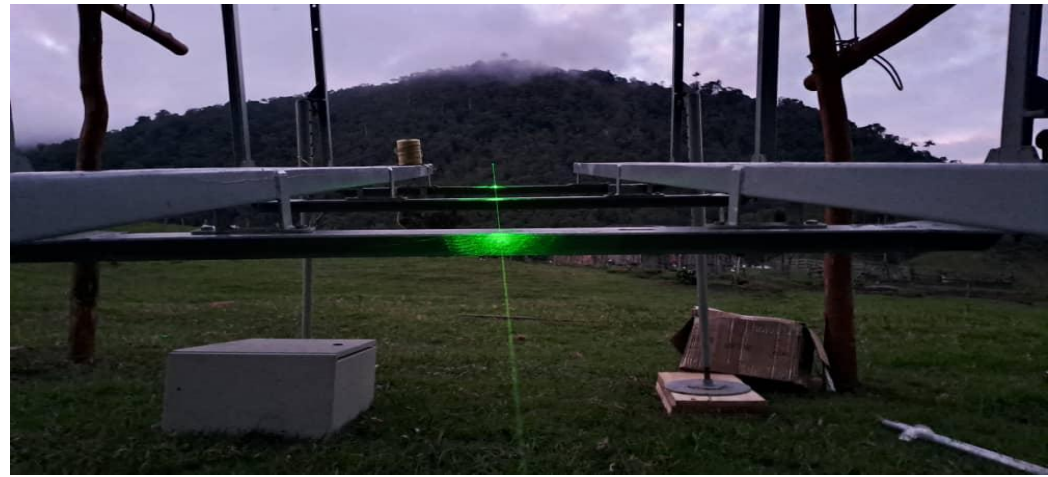
Cerro Machín points	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
Latitude (°N)	4.492	4.491	4.493	4.494
Longitude (°W)	75.381	75.380	75.392	75.388
Distance to center of the edifice (m)	836	946	762	730
Maximum observed depth (m)	208	228	250	190

Table 2: Feasible observation points at Cerro Machín volcano (4°29'23.08"N, 75°23'15.39"W)



Vesga-Ramírez, A., et al (2021). **Simulated annealing for volcano muography.** *Journal of South American Earth Sciences*, **109**, 103248.





Muon Telescope (MuTe) evolution

Asorey, H., et al (2017). *Astroparticle Techniques: Colombia active volcano candidates for Muon Telescope observation sites*. Rev. Mex. Astron. Astrof. Ser. Conf. **49**, 54, arXiv:1704.04967. *Muon telescope (mute): A first study using geant4*. In Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series **49**, 144

Moss, H., et al (2018). *Muon tomography for the cerro machin volcano*. Technical report, Department of Physics & Astronomy, University of Sheffield.

Asorey et al (2018). *miniMuTe: A muon telescope prototype for studying volcanic structures with cosmic ray flux*. *Scientia et technica*, **23**(3), 386-391.

Asorey, H., et al (2018). *Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain*. *Space Weather*, **16**(5), 461-475.

2017 First Simulations Sites & Instrument

2018 HPC MUSIC Site Simulations

2018 First hardware implementation

2018 First simulation chain implementation

Vesga-Ramírez, A., et al (2021). *Simulated annealing for volcano muography*. *Journal of South American Earth Sciences*, **109**, 103248.

Vesga-Ramírez, A. et al (2020). *Muon Tomography sites for Colombian volcanoes*. *ANNALS OF GEOPHYSICS*, **63**(6).

Peña-Rodríguez, J. et al (2020). *Design and construction of MuTe: a hybrid muon telescope to study colombian volcanoes*. *J. Instrumentation*, **15**(09), P09006.

Vásquez-Ramírez, A. et al (2020). *Simulated response of MuTe, a hybrid Muon Telescope*. *J. Instrumentation*, **15**(08), P08004.

2021 optimization algorithm applied to Muography

2020 Full Colombia Muography site simulations

2020 Full Hardware implementation MuTE 1.0

2020 Full instrument simulation

Grisales-Casadiegos, et al. (2022). *Impact of Global Data Assimilation System atmospheric models on astroparticle showers*. *Canadian Journal of Physics*, **100**(3), 152-157.

Sarmiento-Cano, C. et al (2022). *The ARTI framework: cosmic rays atmospheric background simulations*. *The European Physical Journal C*, **82**(11), 1019.

Peña-Rodríguez, J. et al (2023). *Characterization and On-Field Performance of the MuTe Silicon Photomultipliers*. *Instruments*, **7**(1), 7.

Peña-Rodríguez, J. et al (2024). *MUYSC: an end-to-end muography simulation toolbox*. *Geophysical J. International*, **237**(1), 540-556.

2022 modelling atmospheric

2022 ARTI Full (first principle) simulation framework

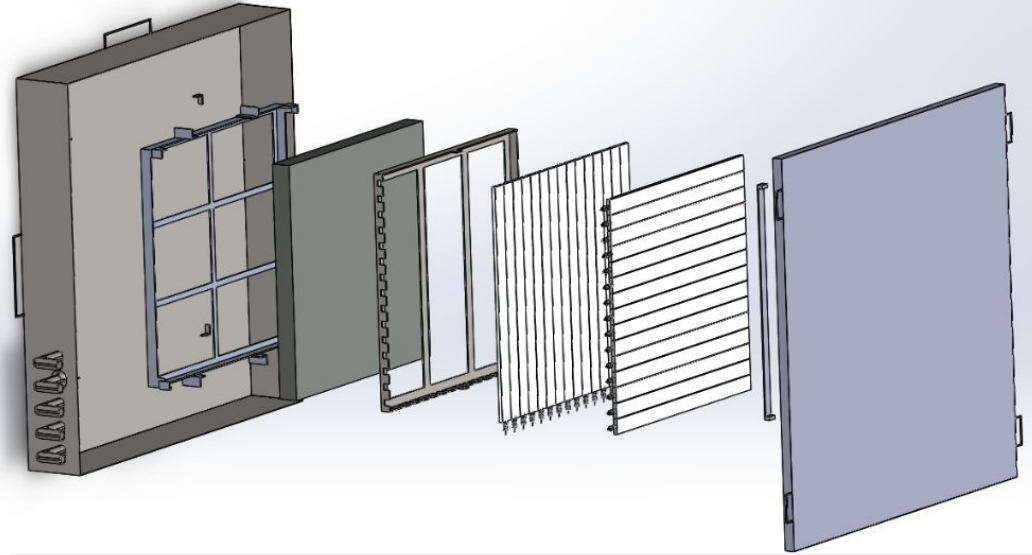
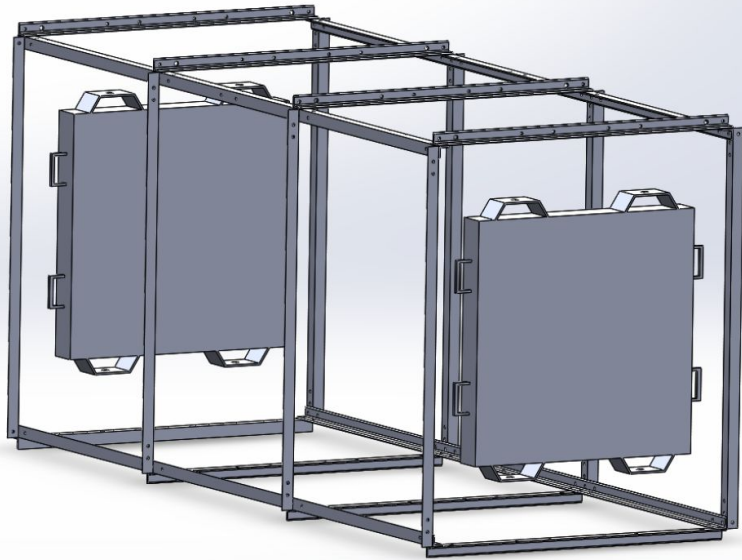
2023 Component on field performance

2024 Full phenomenological simulation framework

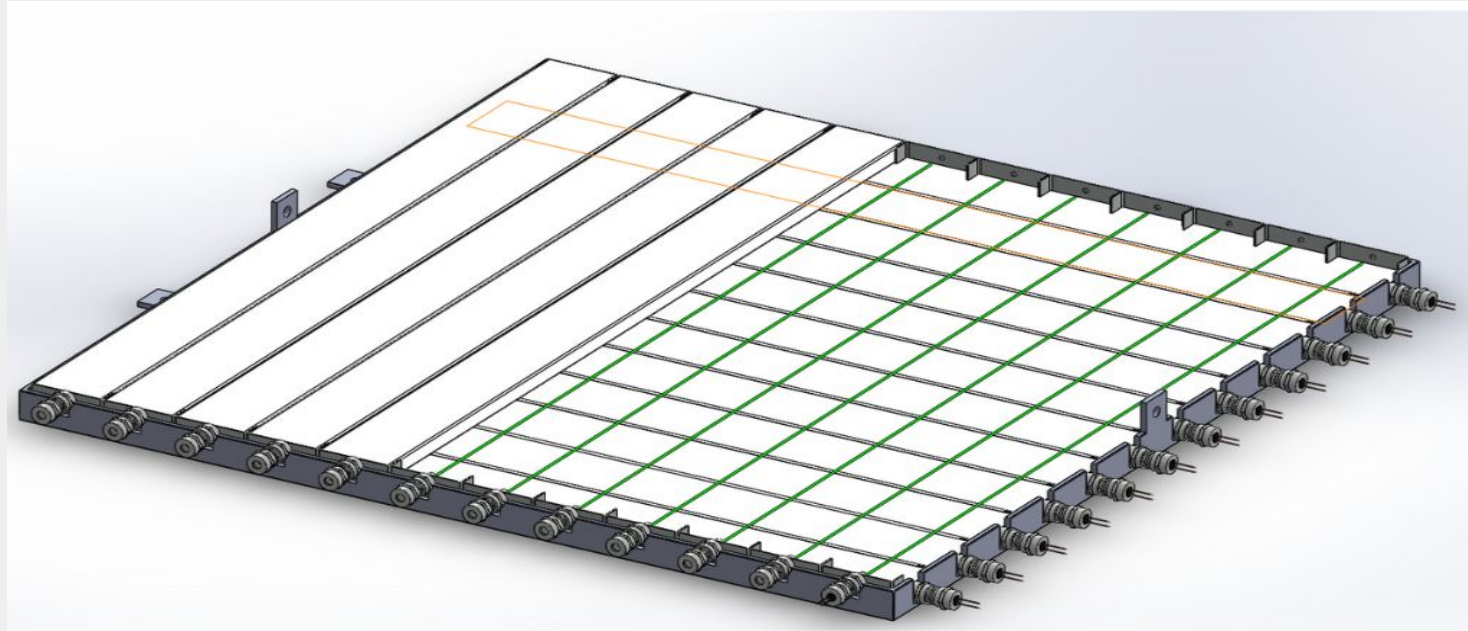
MuTe 2.0



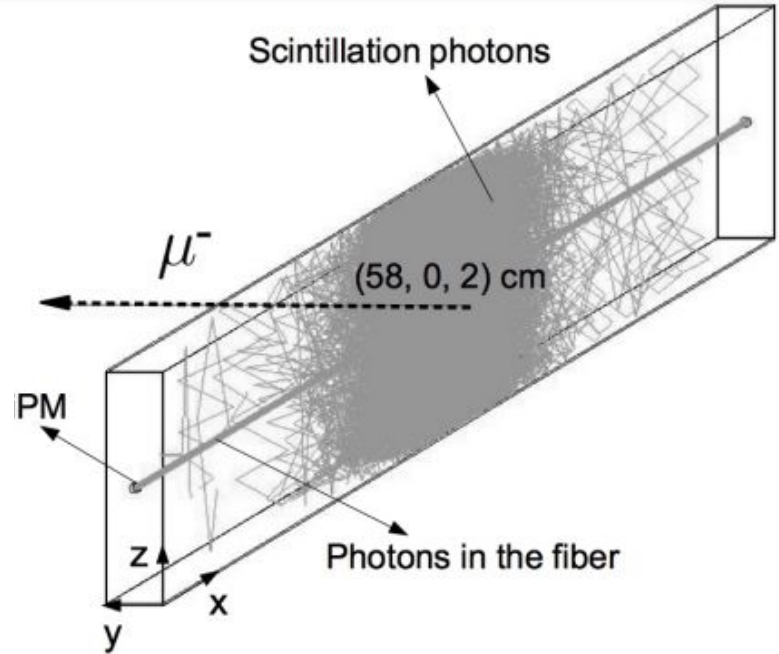
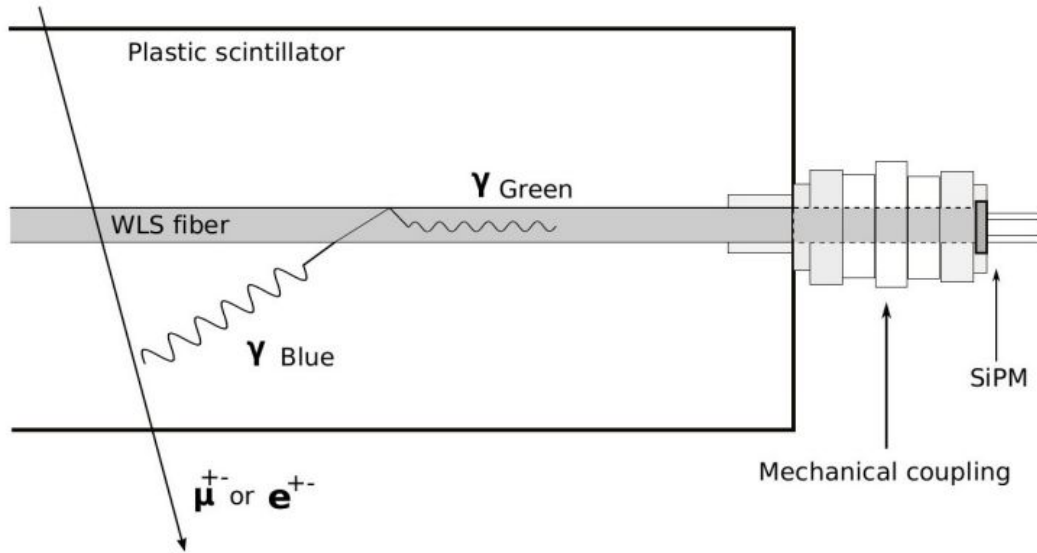
Diseño Mecánico



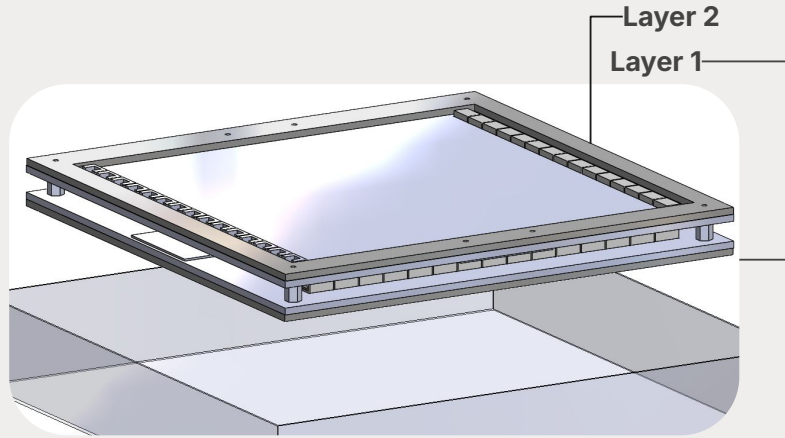
Panel centellador



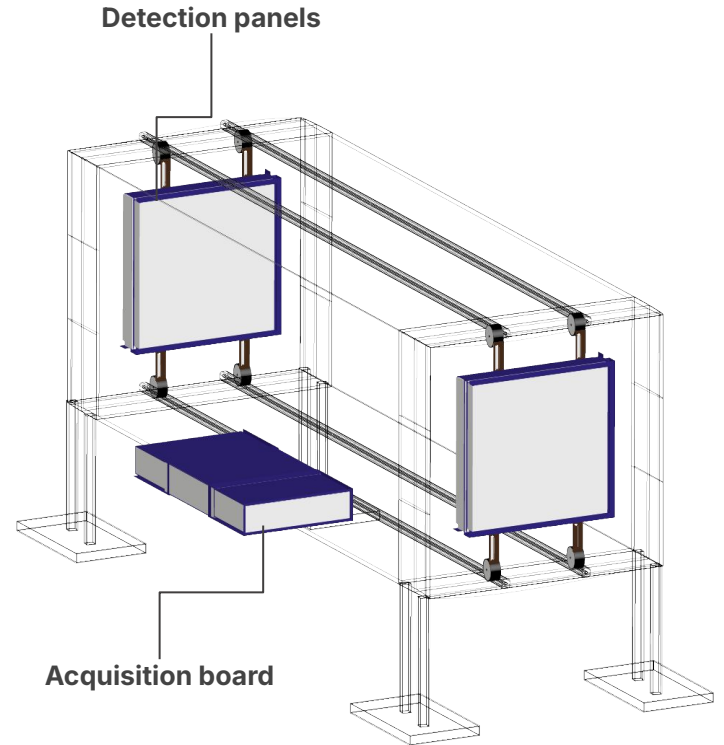
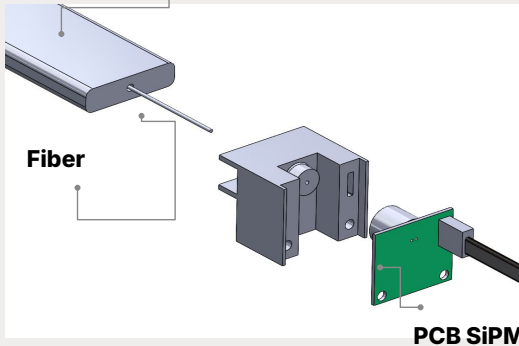
Barras centelladoras



Muon Telescope, MuTe 2.1

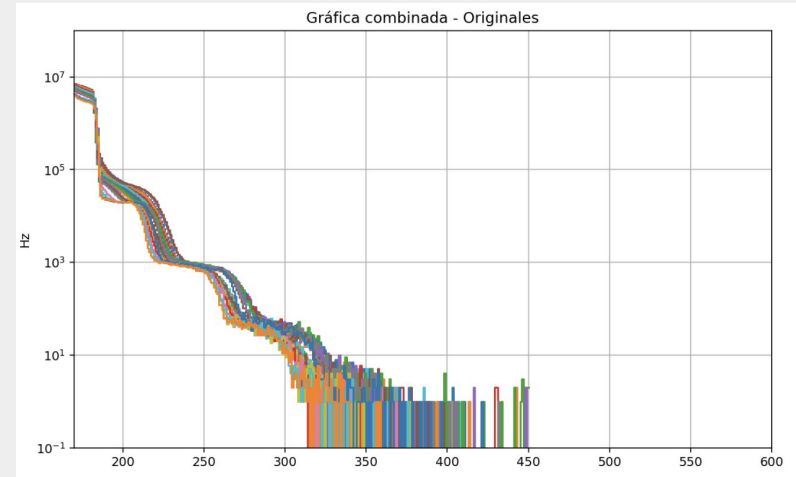
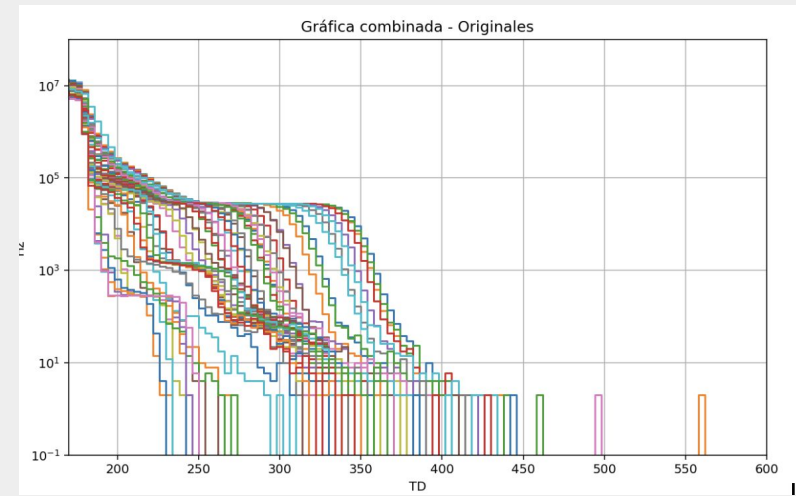


Scintillator bar



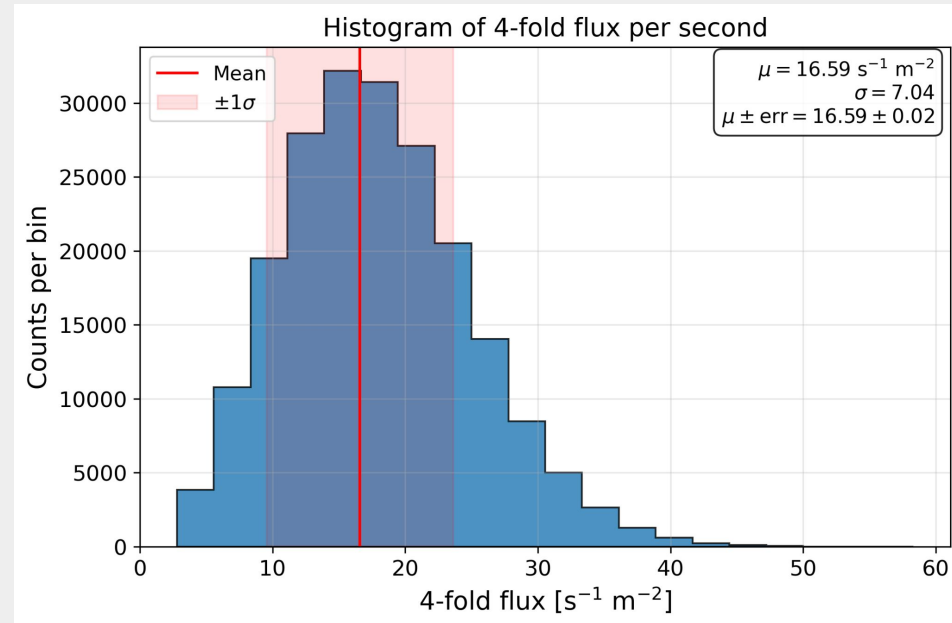
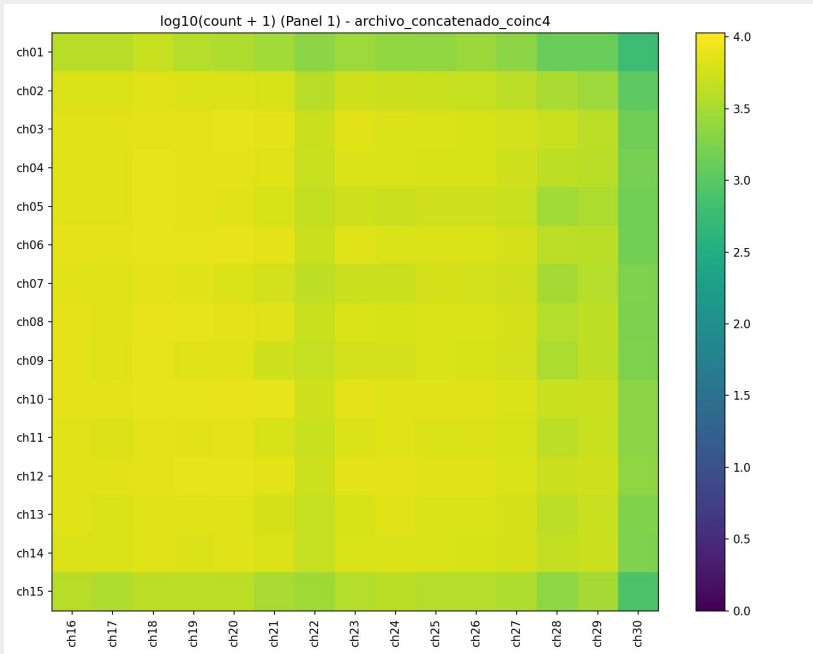
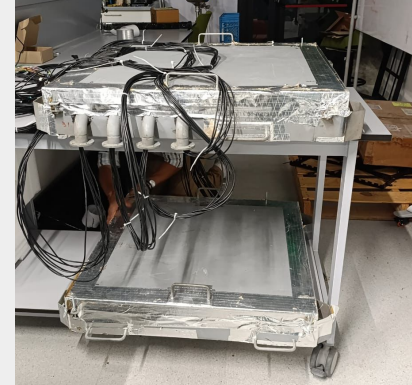
- 15 x 15 scintillator array for a 225-pixel panel
- 84 possible angular trajectories.
- 32 mrad angular resolution

Calibración del detector



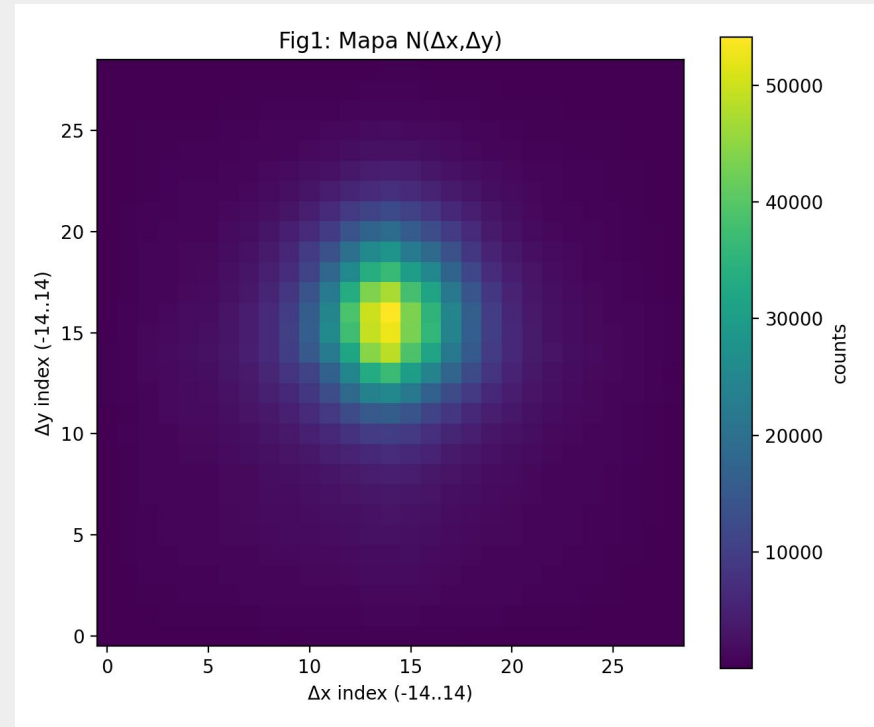
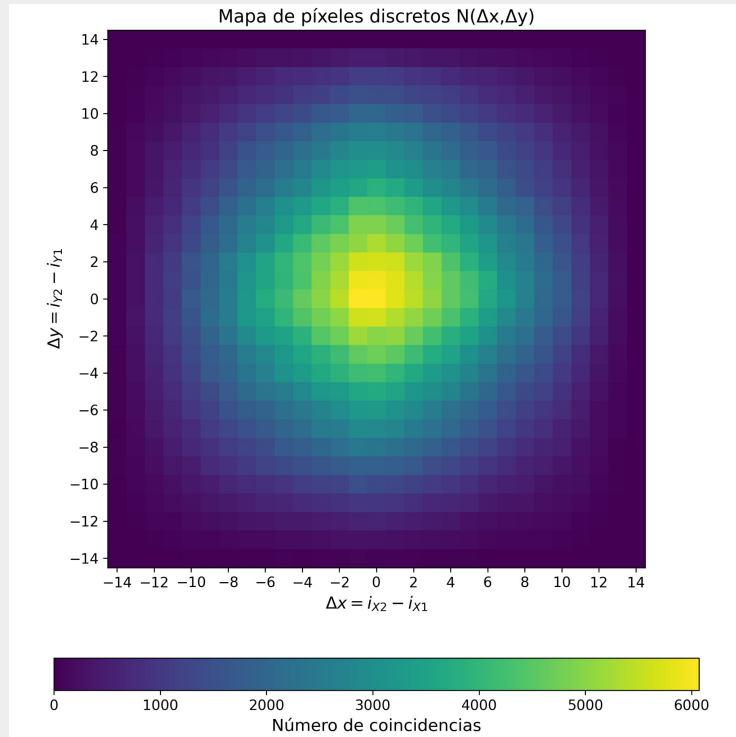
Open-sky measurements

The two panels were oriented parallel to each other and facing upward toward the open sky, maximizing the acceptance of vertically incident cosmic ray muons.



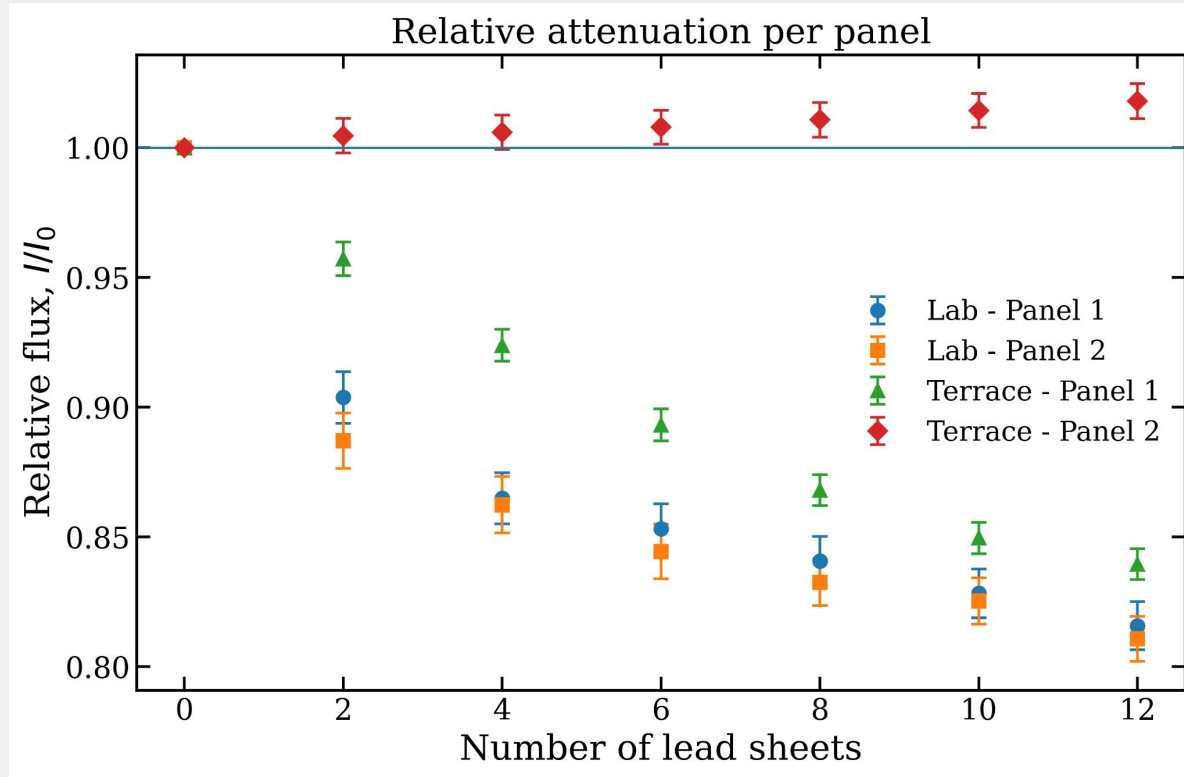
Acceptance: data vs simulation

Comparison between observational data and simulations for the detector acceptance in this configuration. Simulations were performed using CORSIKA and Geant4.



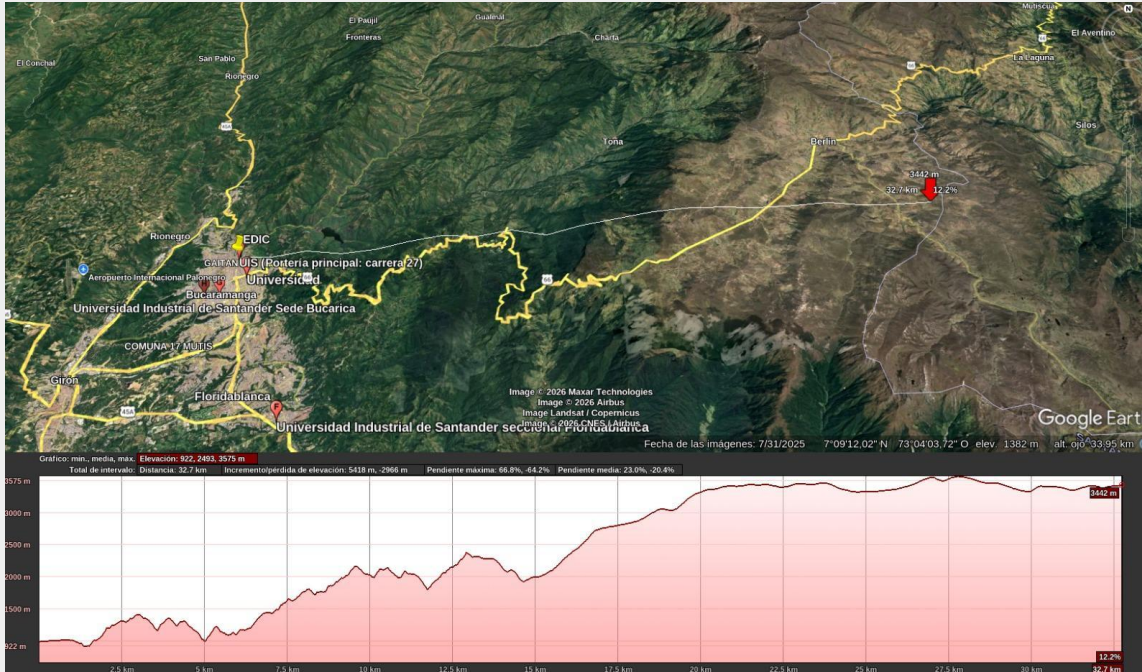
Attenuation using lead shielding

Lead thickness was increased in 0.5,cm steps, with one-hour measurements taken at each step.



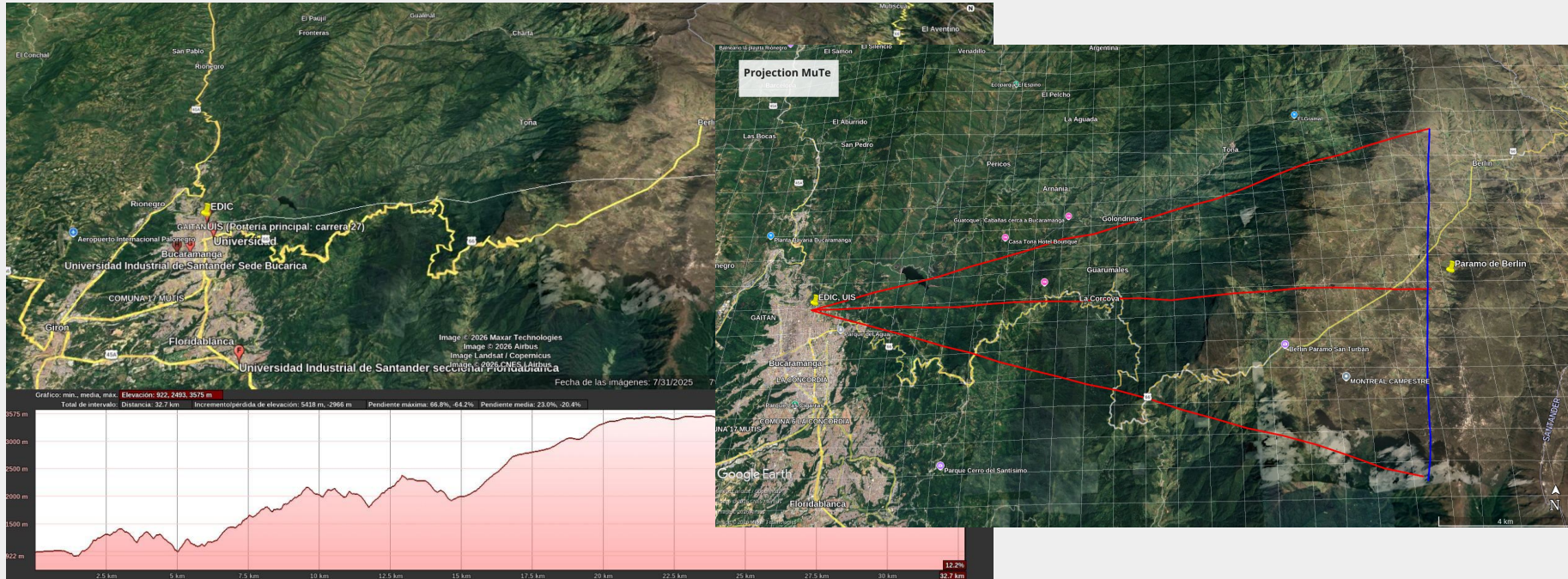
First muogram with MuTe 2.1

A test muography was performed on the mountain range located in front of the university, allowing a first validation of the detector performance under real field conditions.



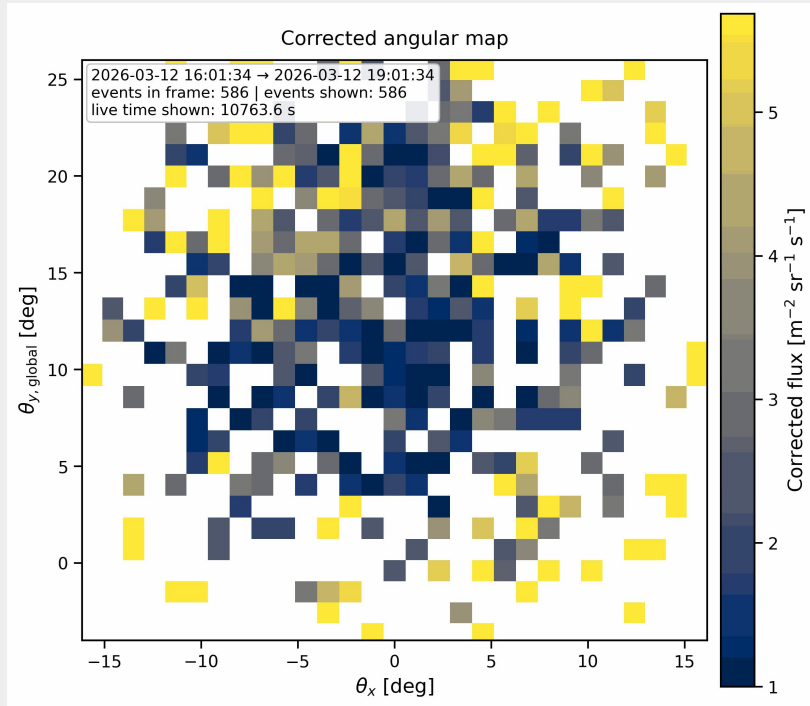
First muogram with MuTe 2.1

A test muography was performed on the mountain range located in front of the university, allowing a first validation of the detector performance under real field conditions.



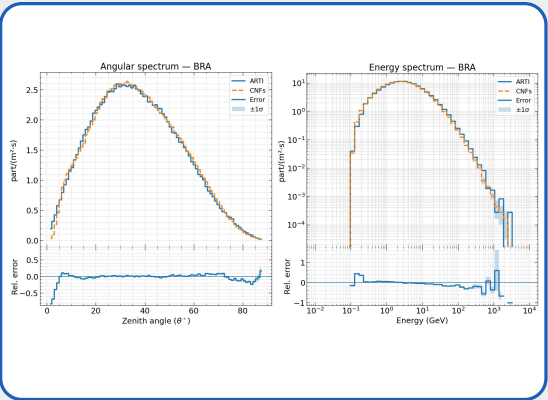
First muogram with MuTe 2.1

Daily pixel occupancy map. The progressive filling of the detector matrix over time reflects the stability of the acquisition system and the uniformity of the detector response across all channels.

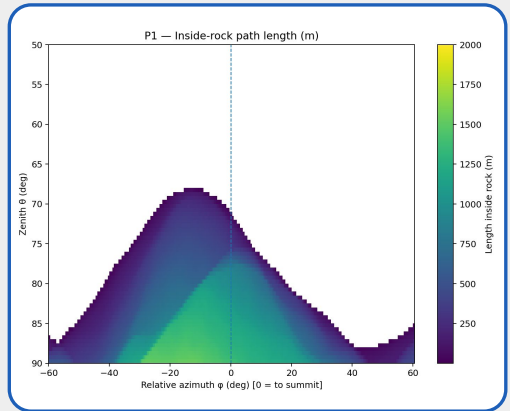


CABRIALES framework: muography simulation

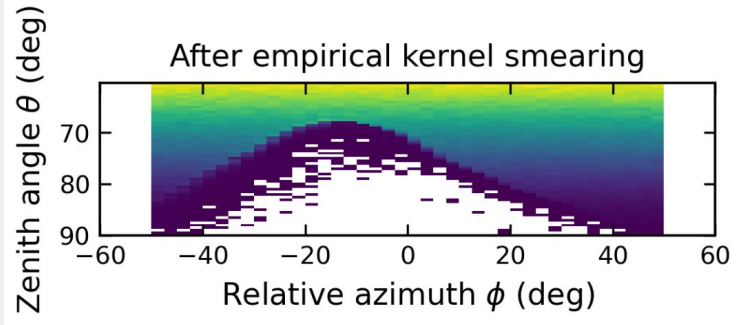
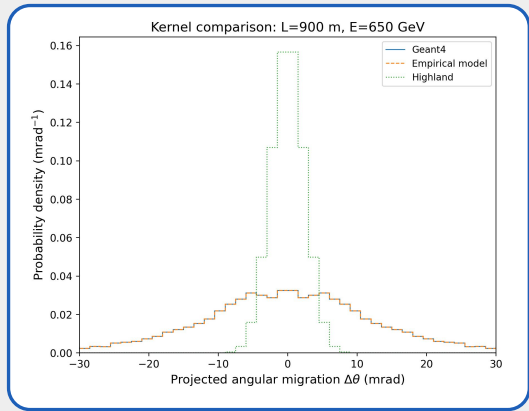
Deep learning muon flux



Backpropagation



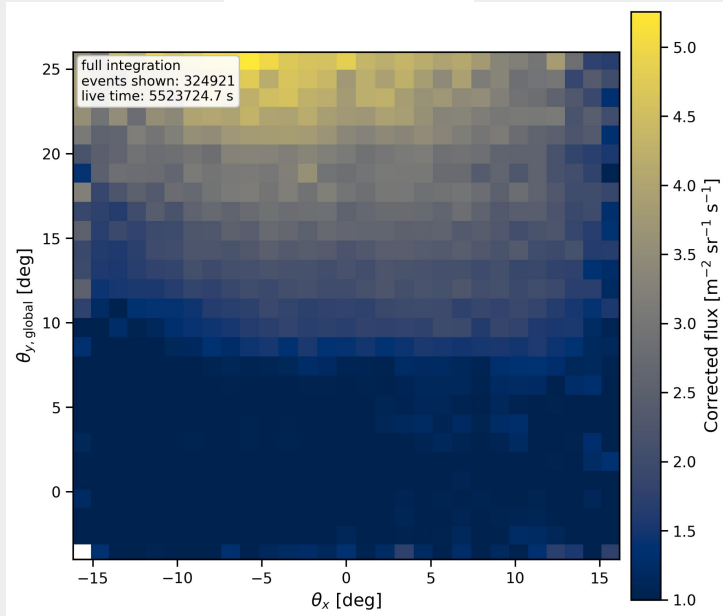
Angular Scattering



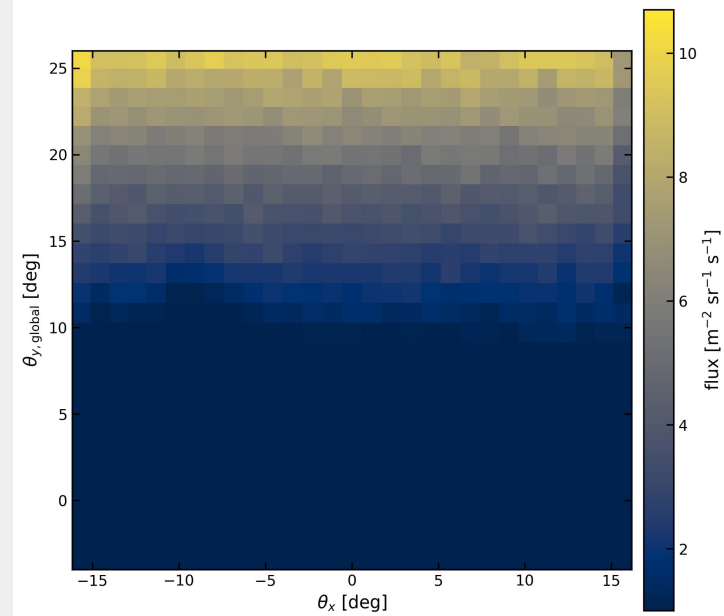
muogram

Simulated and experimental muogram

Comparison between simulated and observational muogram. The agreement between both distributions validates the detector response model and confirms the reliability of the reconstruction chain under real field conditions.



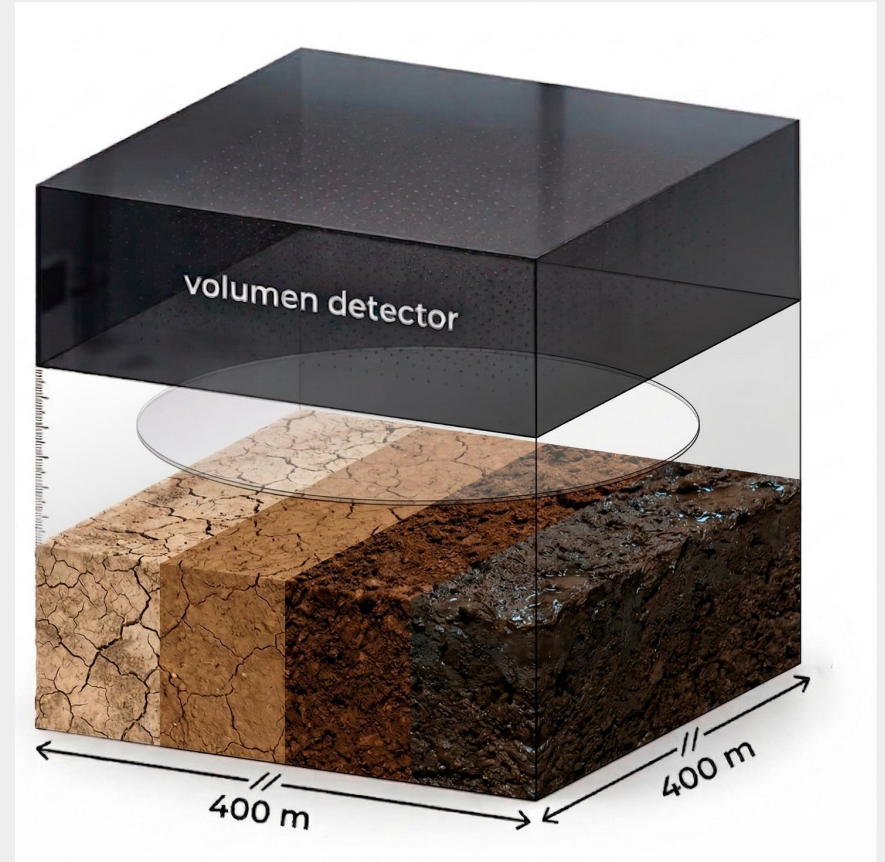
Measurements



Simulation

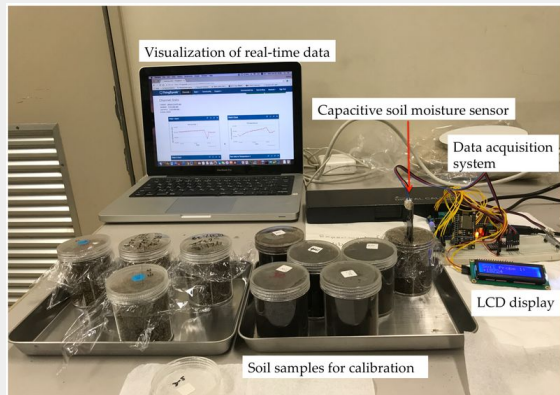
03

Neutrones y humedad del suelo



Motivando el problema

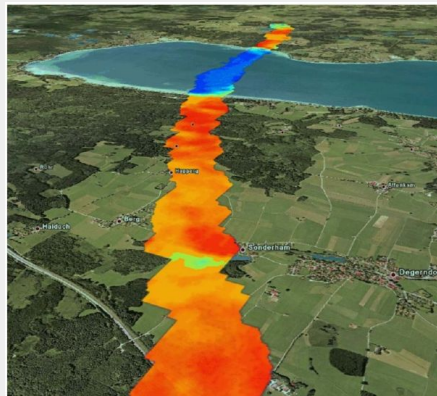
Detectores dieléctricos



Nagahage, 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.

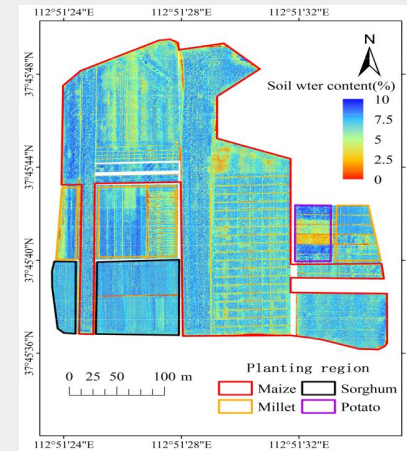
Detección satelital



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.

Drones



Gu, Y. et al. (2024). Agriculture, 14, 404.

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

Medición de la humedad del suelo con neutrones

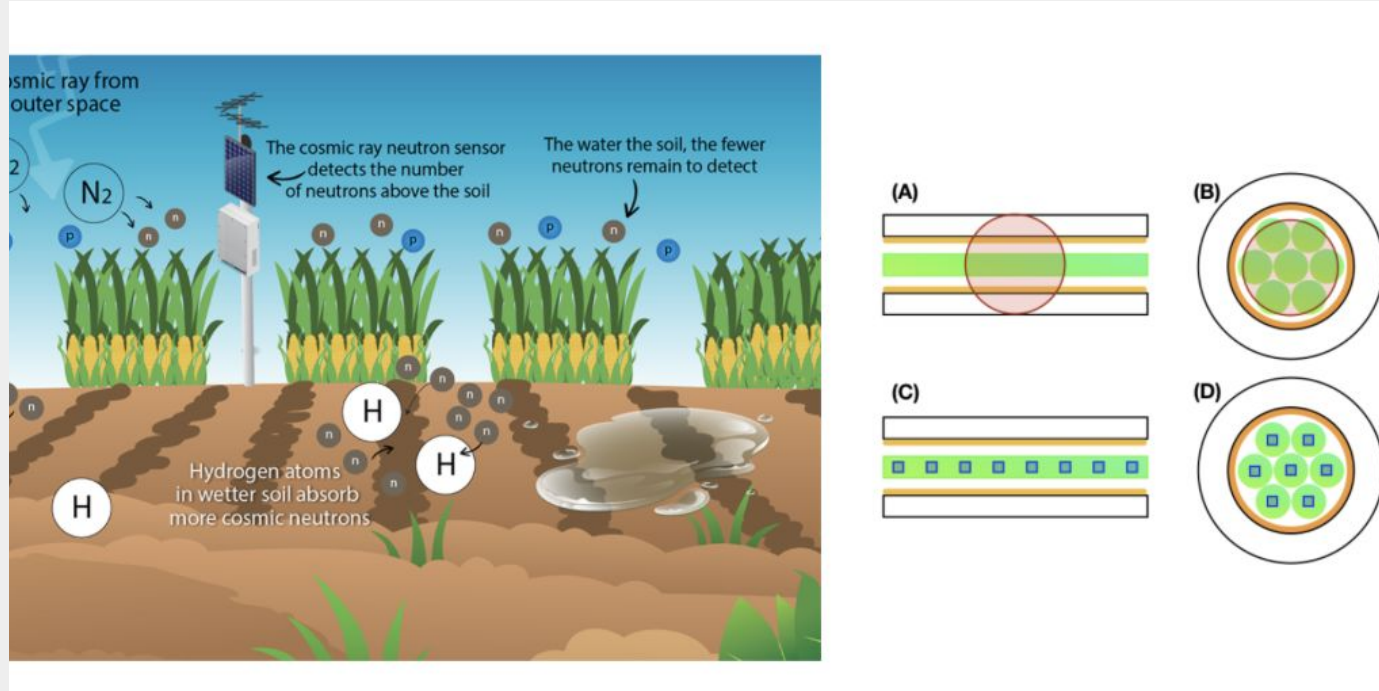
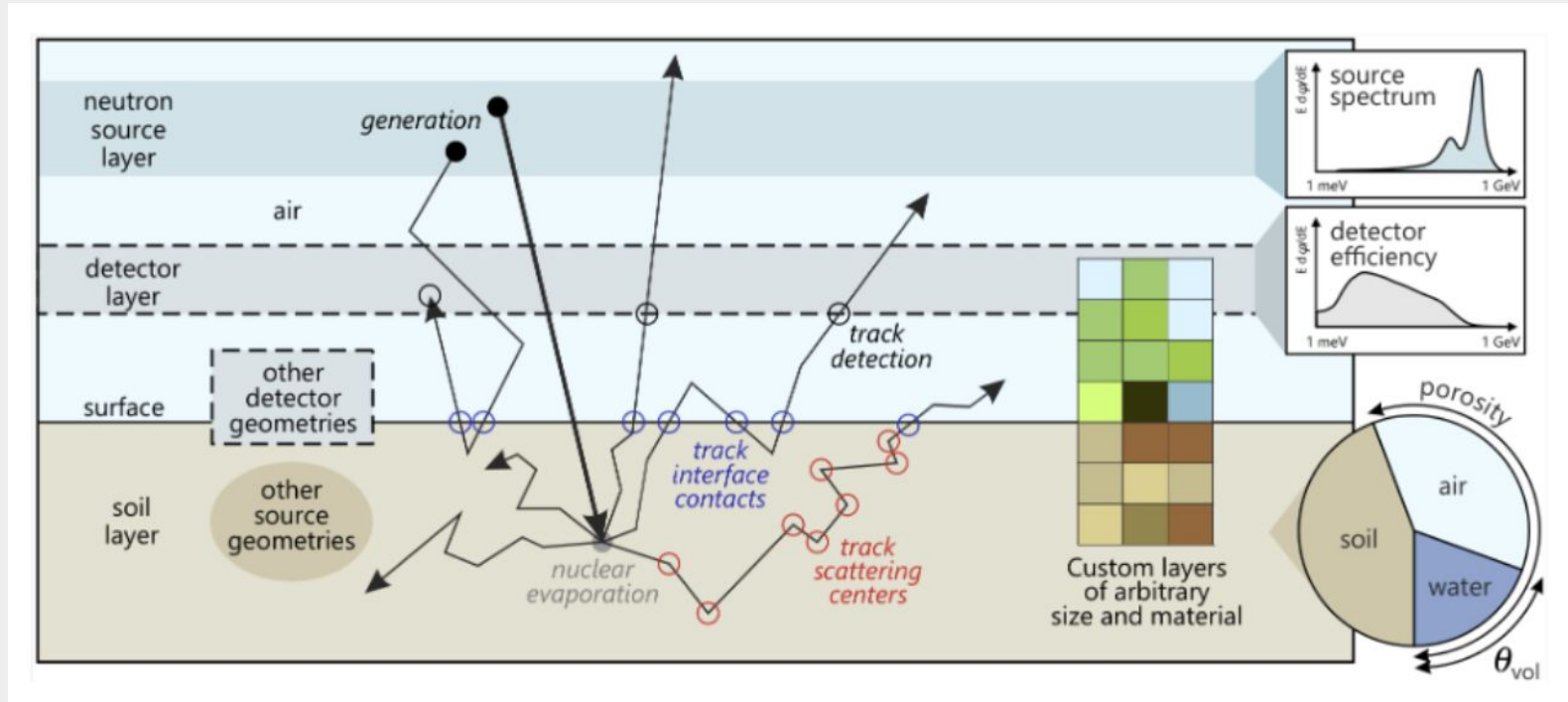


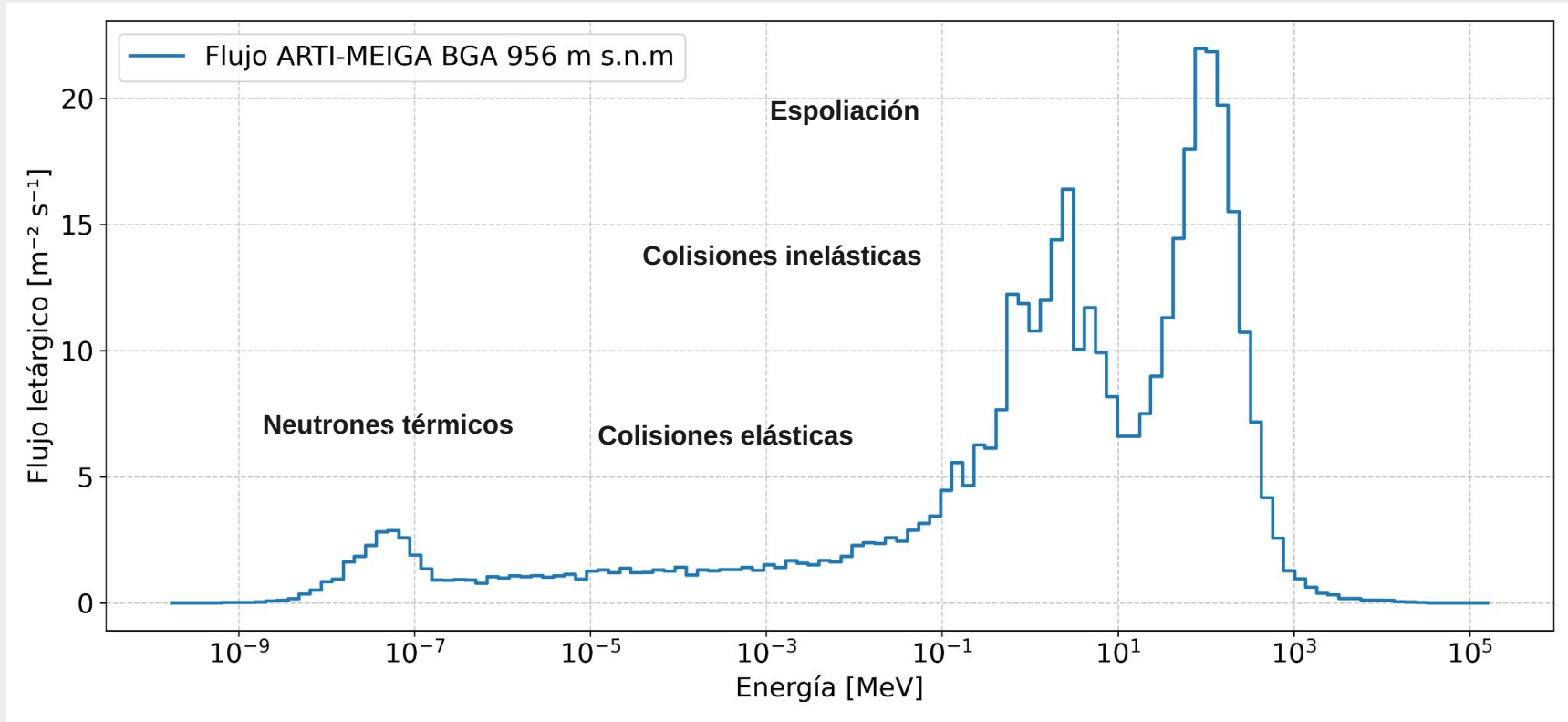
figure taken from IAEA bulletin

Interacción de neutrones con el suelo



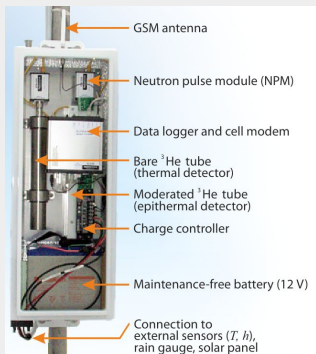
Köhli et al., URANUS, 2022
<https://doi.org/10.5194/gmd-16-449-2023>

Distribución energética de los neutrones



Detectores de neutrones cósmicos

Detectores gaseosos



Schrón et al., 2019. 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.

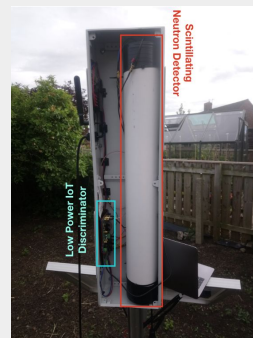
Detectores semiconductores



Figuas et al., 2022. Acta Astronautica, 200, 620–626.

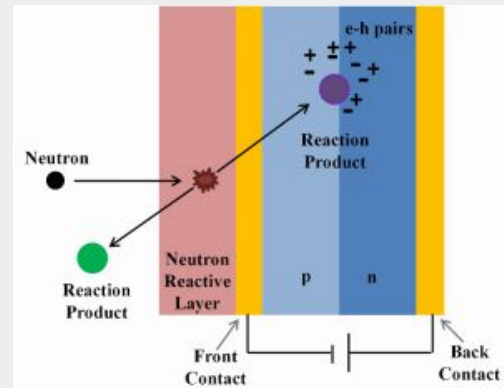
Detectan mediante la creación de pares electrón-hueco en un material semiconductor, cuya carga recogida forma la señal de medición.

Detectores de centelleo

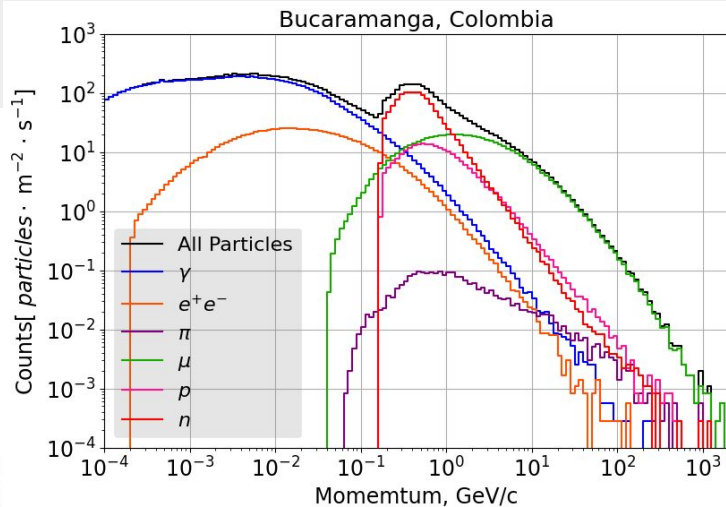
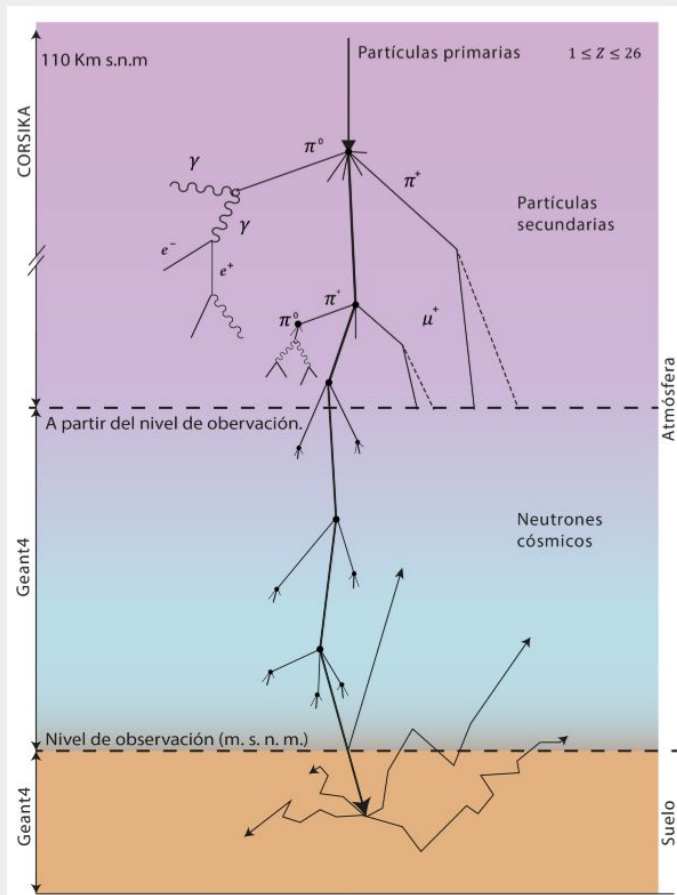


Stowell et al., 2021. In Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021).

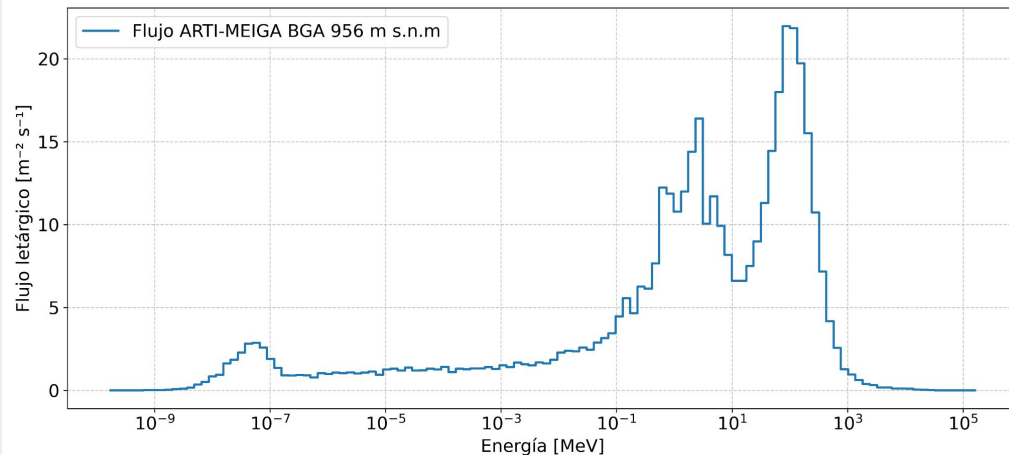
Convierten la energía depositada por la radiación en destellos de luz que son detectados por fotomultiplicadores o fotodiodos.



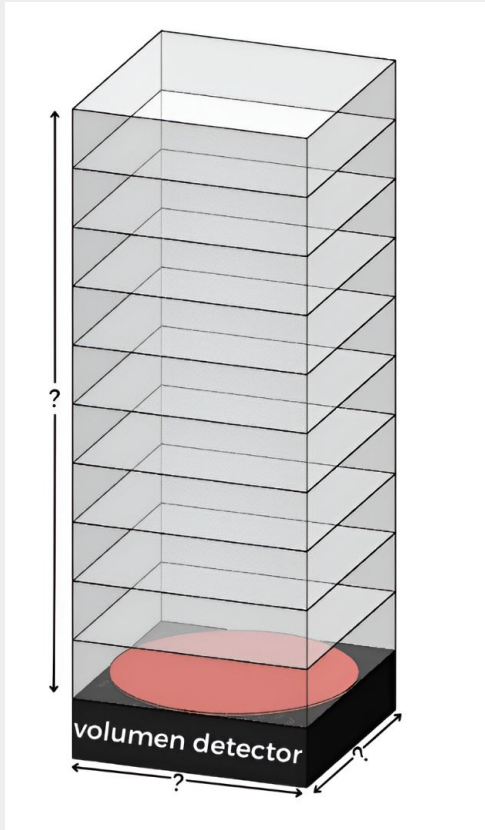
Corsika + Geant4



CORSIKA realiza un corte de energía en 17 MeV para los neutrones.

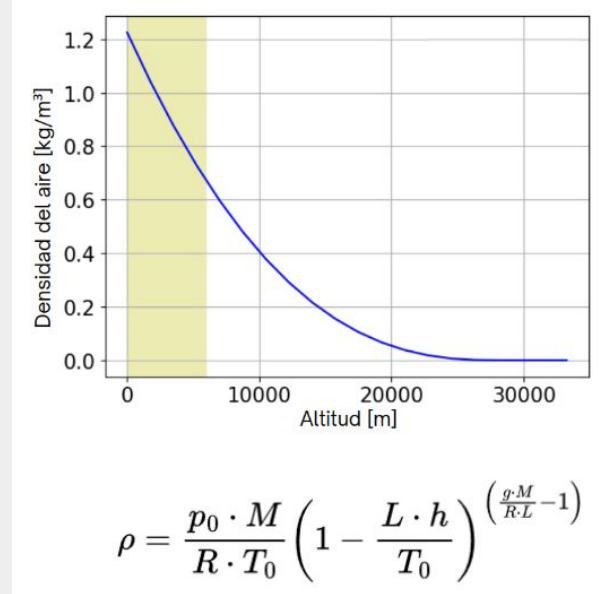


Modelo atmosférico

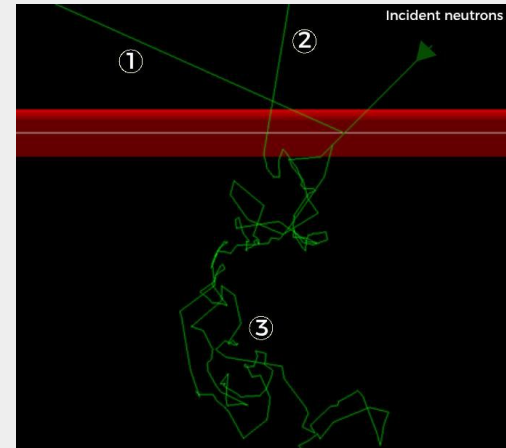
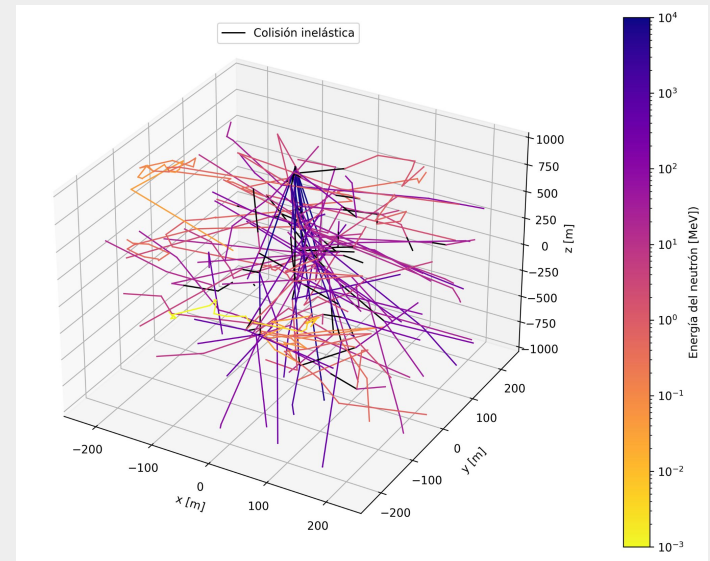
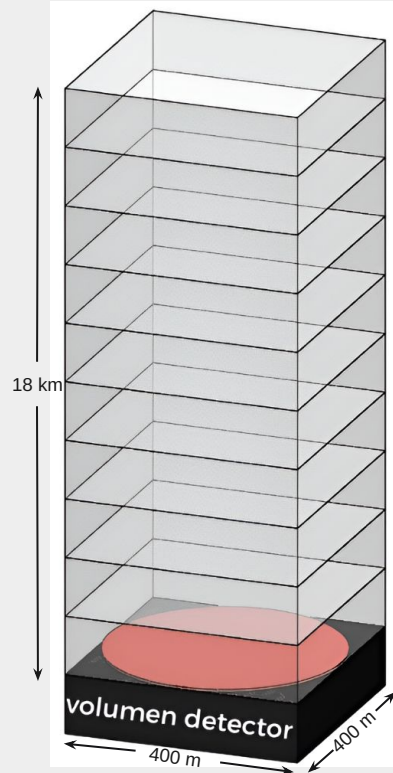
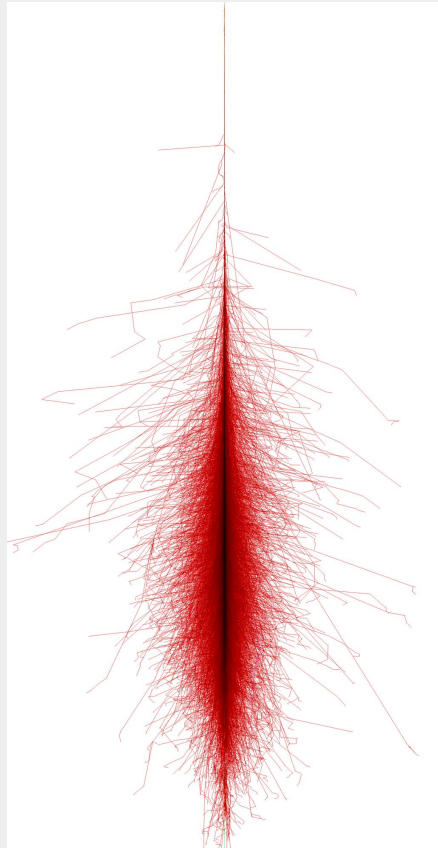


Elemento	Fracción
N	0.7808
O	0.2095
Ar	0.0090

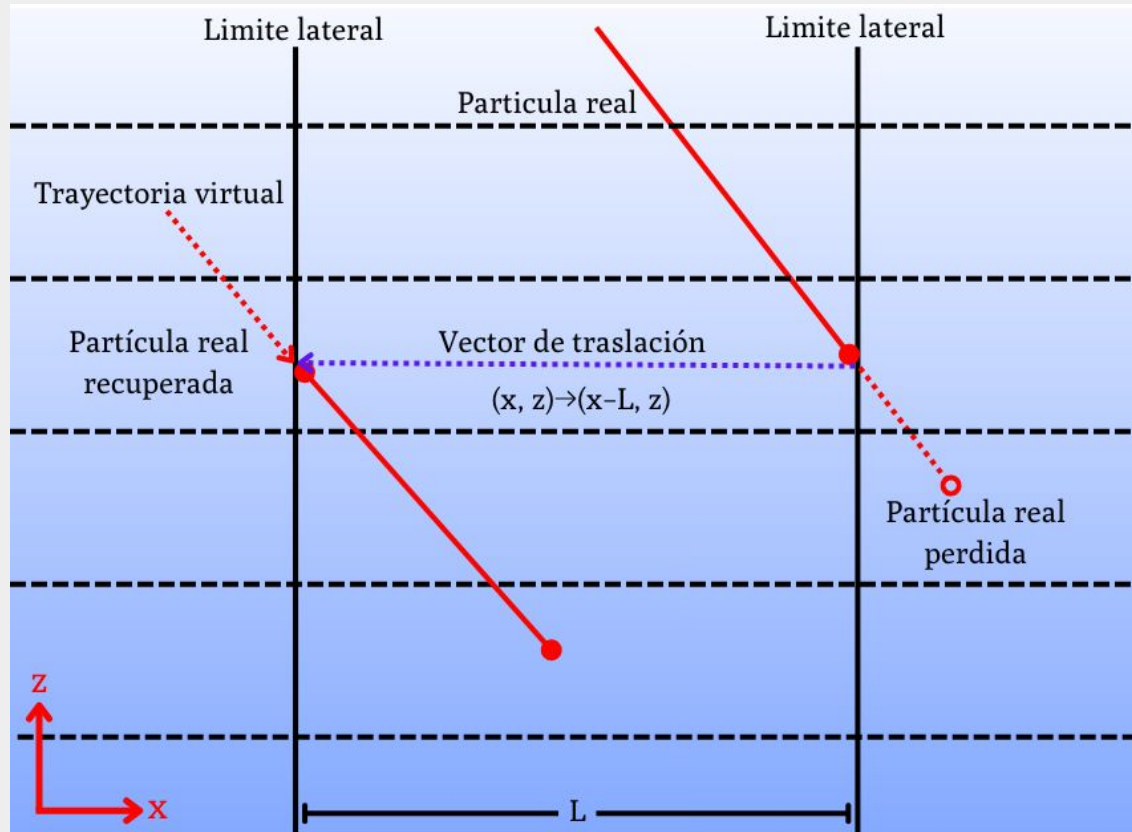
Composición química del aire



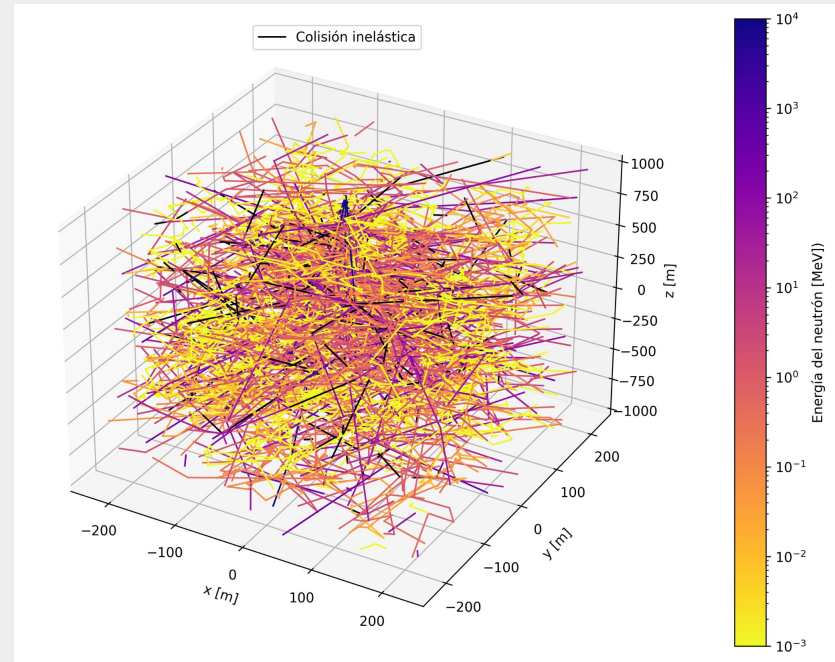
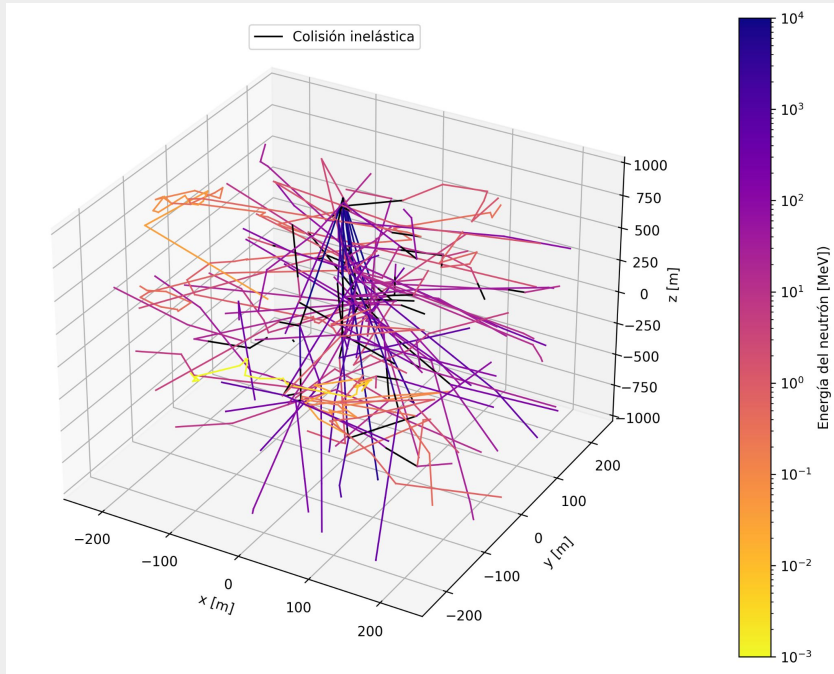
Integración Corsika-Geant4



Condiciones periódicas continuas

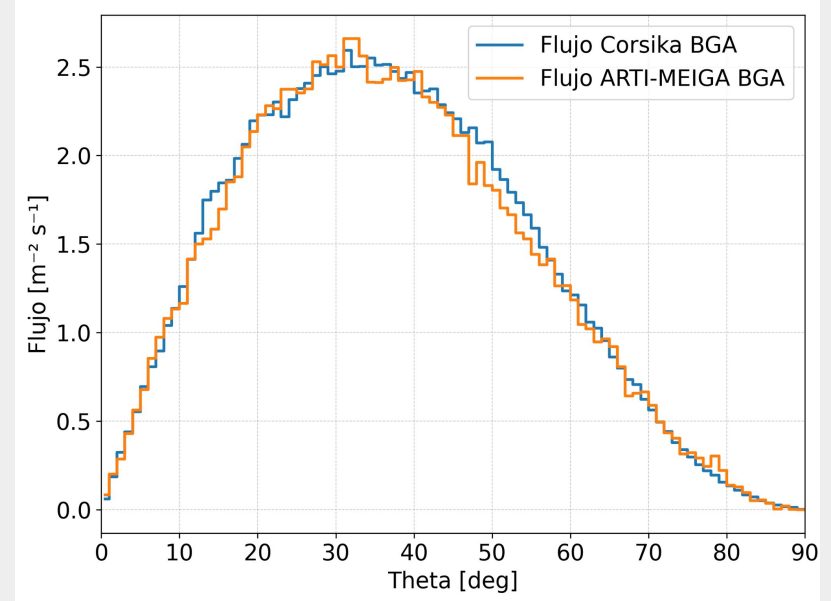
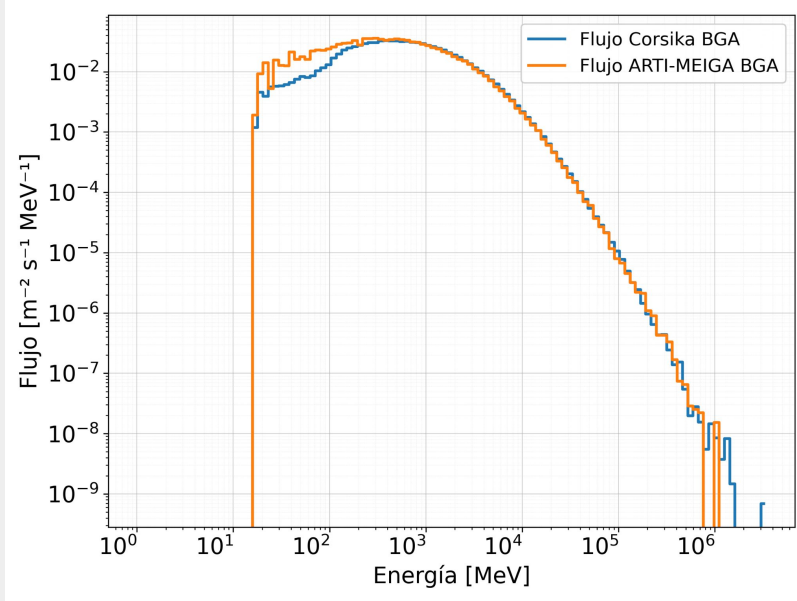


Verificación de condiciones periódicas continuas



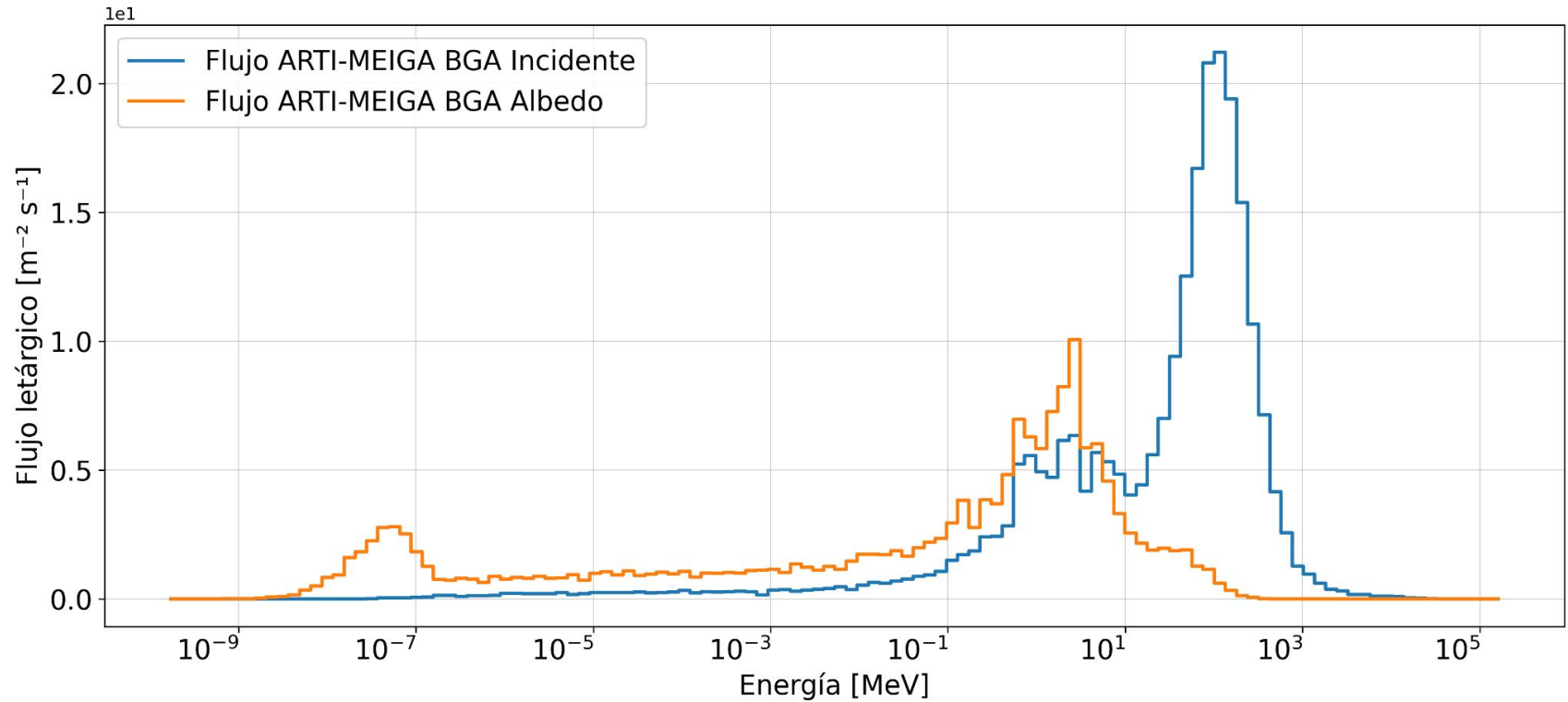
Dejamos de perder 97,35% de las partículas que alcanzaban el volumen detector

Flujo de muones

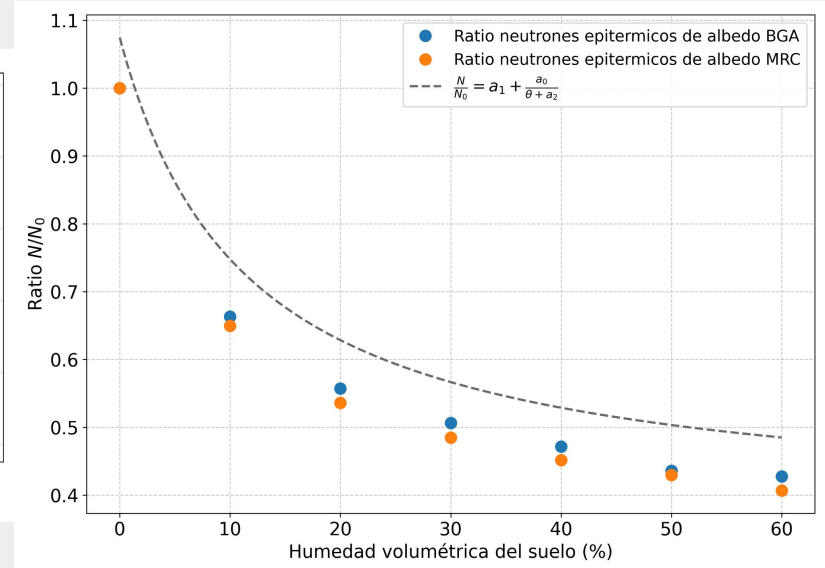
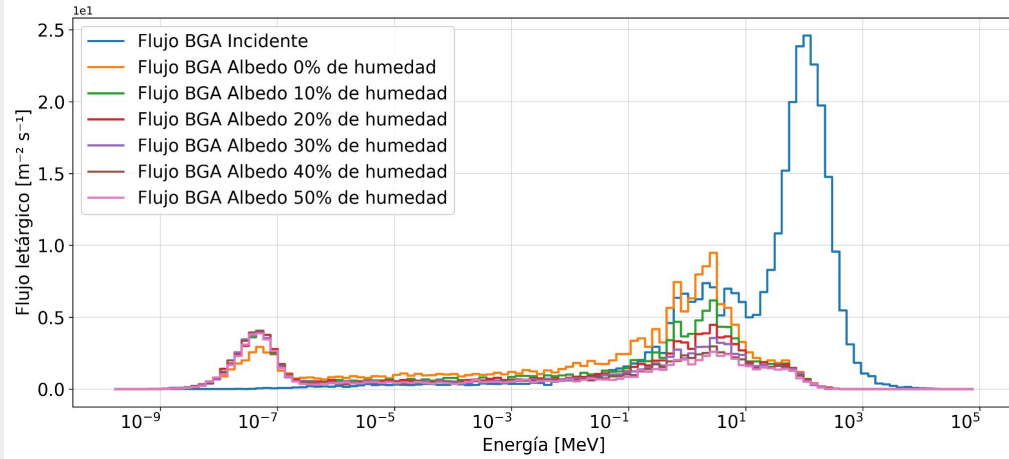


La diferencia relativa en el flujo de muones que presenta las simulaciones ARTI-MEIGA respecto a CORSIKA es del 1.81% y en la distribución angular de un 9.58%.

Flujo total de neutrones

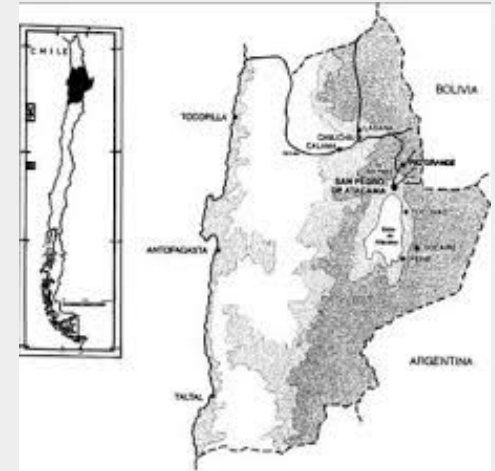
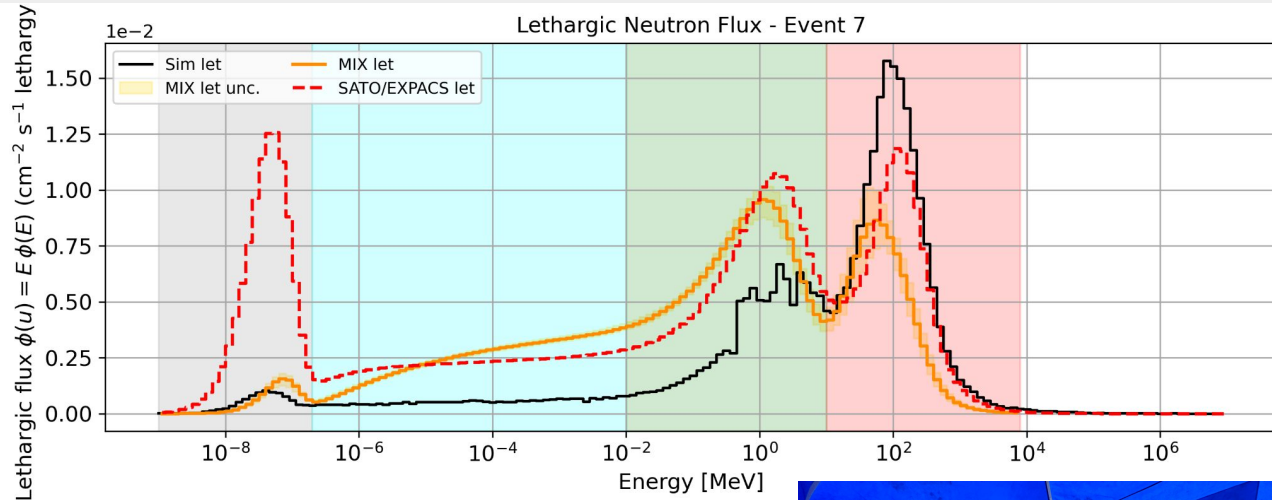


Conteo de neutrones Vs humedad



Los resultados muestran que el flujo de albedo sigue una relación inversa con el contenido volumétrico de agua, consistente con la curva de calibración propuesta por [Desilets et al., 2010]. presentando diferencias porcentuales comprendidas entre 6,94 % y 16,14 %.

Comparación con mediciones



Barranquilla, 28 al 31 de julio.



Escuela Latinoamericana *de Rayos cósmicos y sus aplicaciones*

El Taller-Escuela Latinoamericana de Rayos Cósmicos y sus Aplicaciones busca constituirse como un espacio de discusión en formato híbrido, diseñado para intercambiar competencias e ideas clave en la detección de radiación y sus aplicaciones con impacto social. Tendrá un énfasis especial en ciencia de datos y en herramientas de modelado computacional. Su objetivo central será compartir experiencias en física de la radiación cósmica y en la transferencia de estos conocimientos a aplicaciones, en particular en el ámbito de la agricultura de precisión.





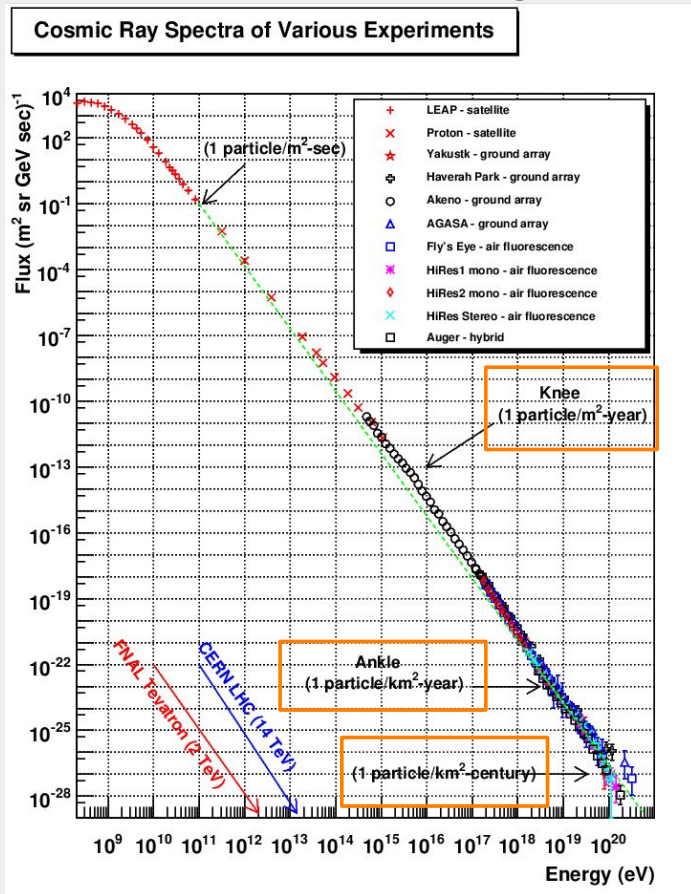
¡Gracias!

Christian Sarmiento-Cano
csarmiento32@unab.edu.co



Backup

Espectro de rayos cósmicos primarios



$$j(E) = \frac{dN}{dt dA d\Omega dE}$$

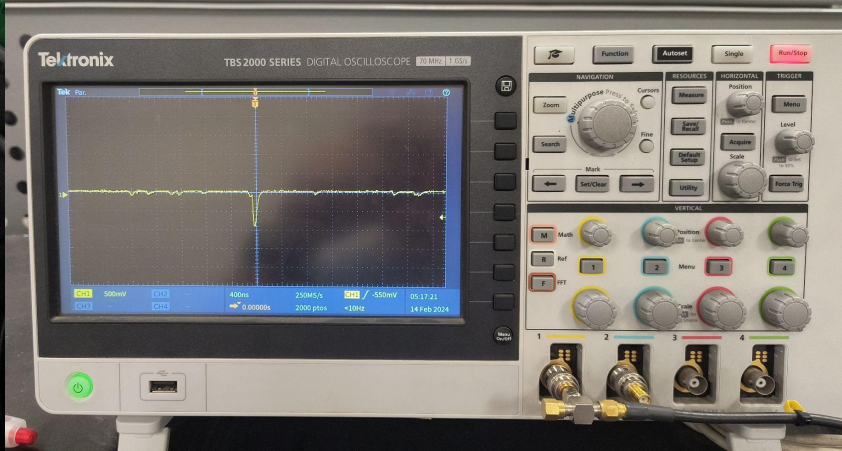
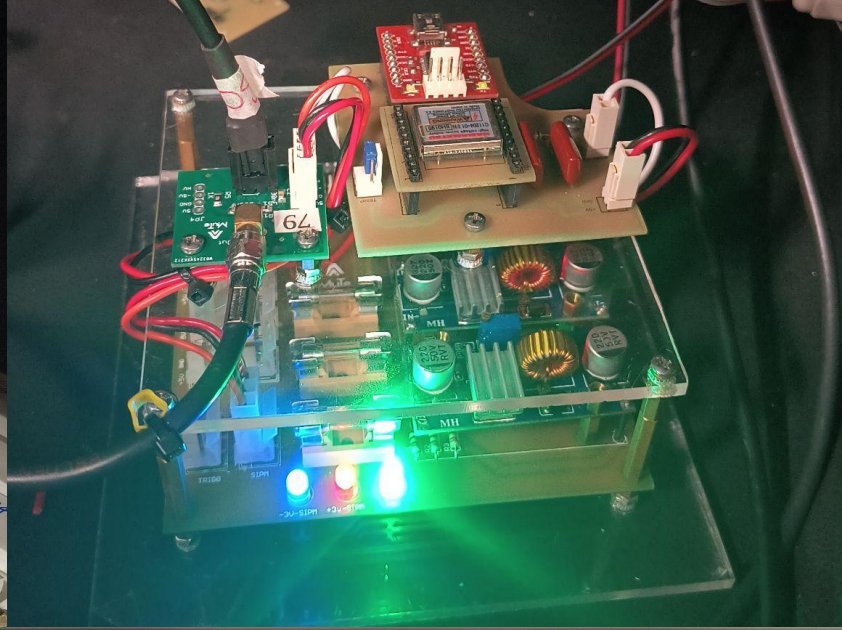
- Unidades

$$[j(E)] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{ s sr eV}}$$

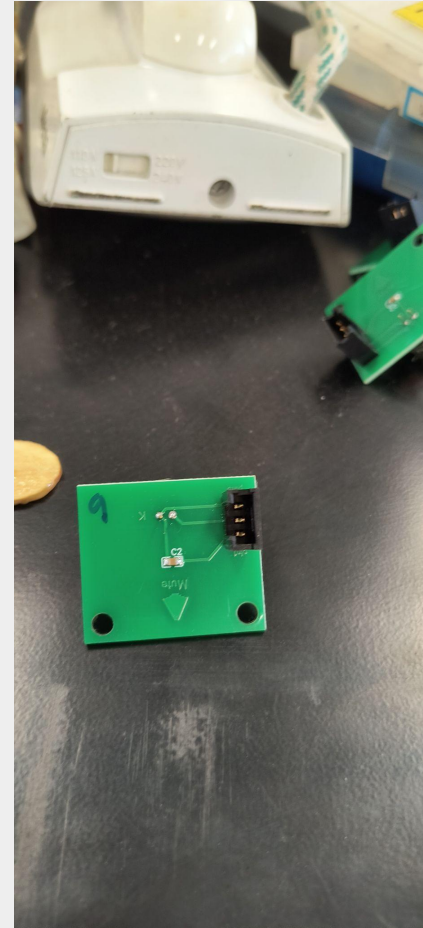
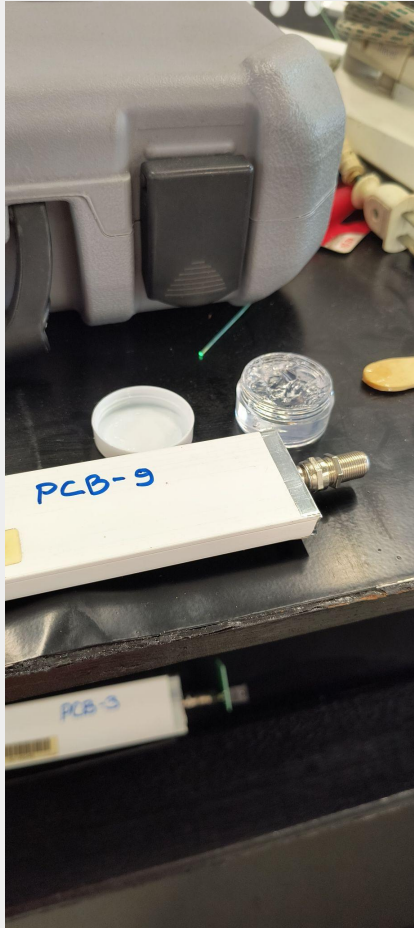
- En general:

$$j(E) = j_0 E^\alpha, \alpha \simeq -3$$

Sistema barra-SiPM-Fi bra

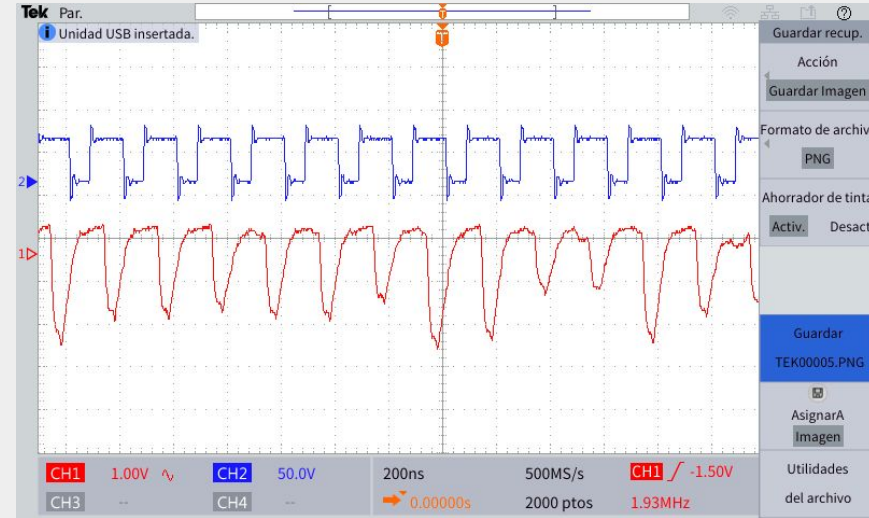
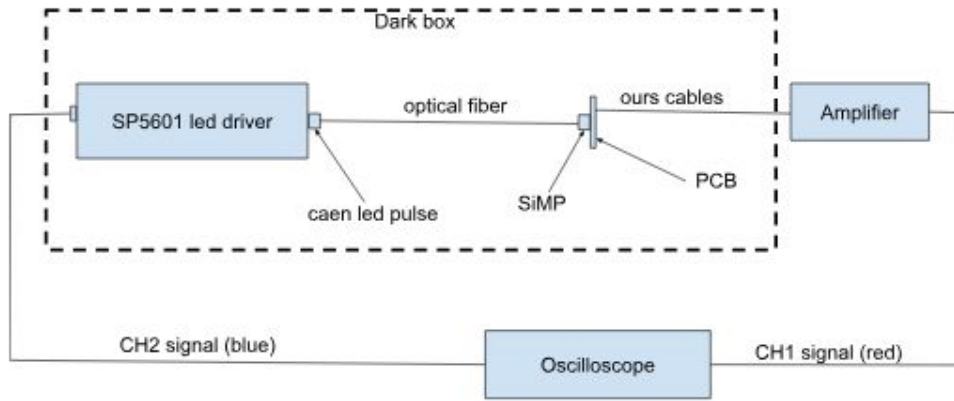


Barra-Cable-PCB



Prueba de los cables

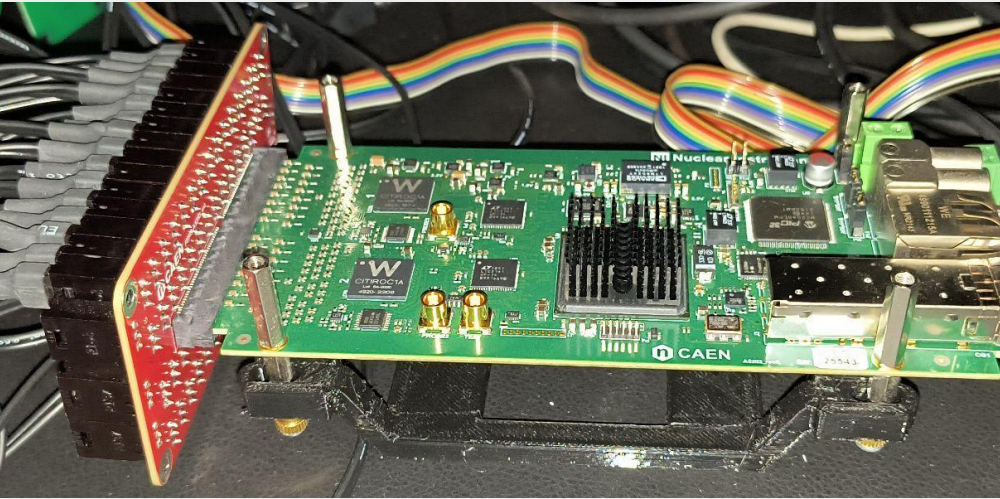
Experimental set-up scheme



MuTe 2.1



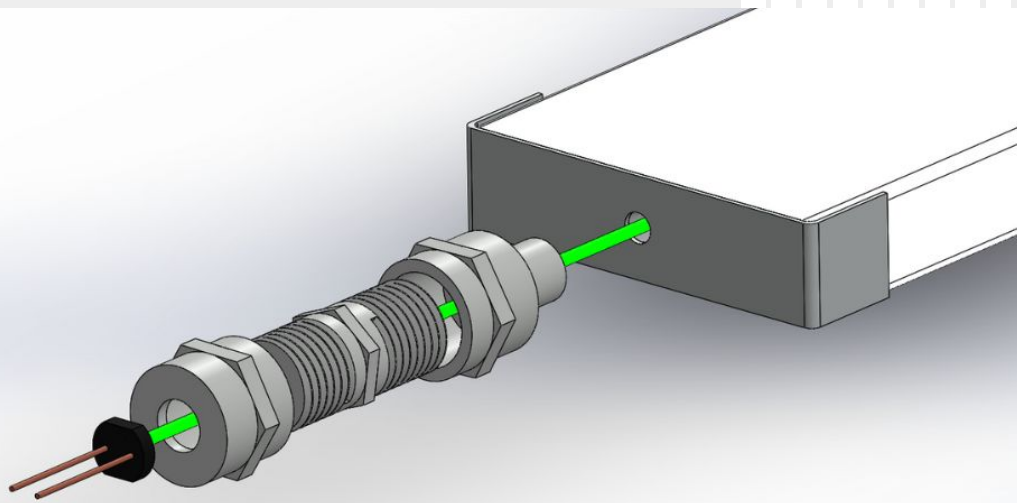
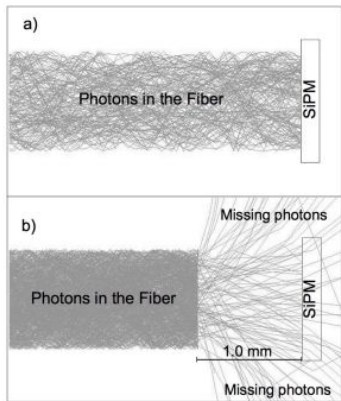
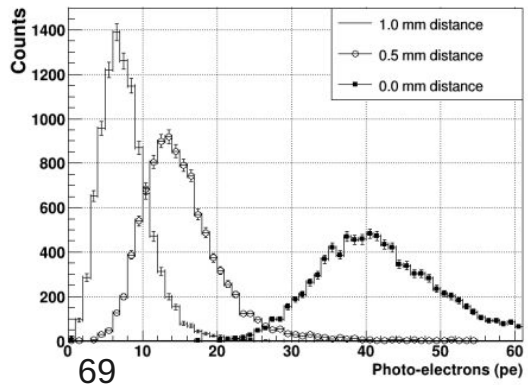
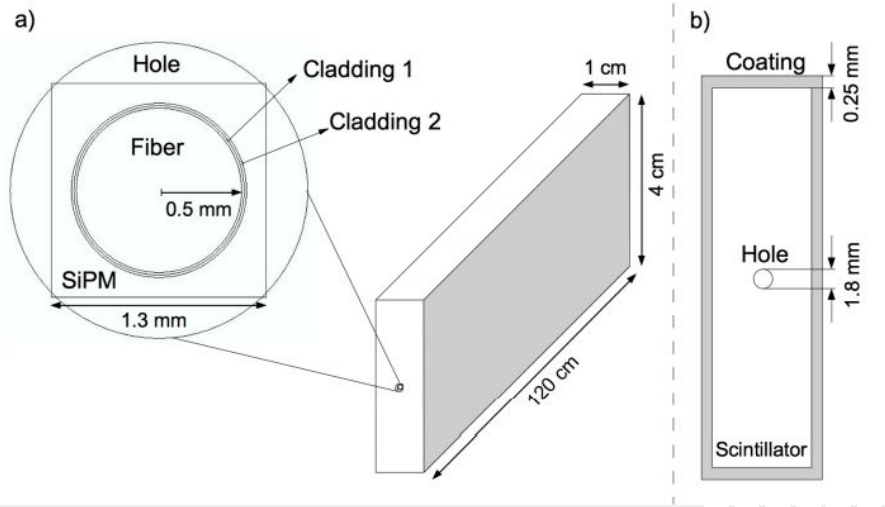
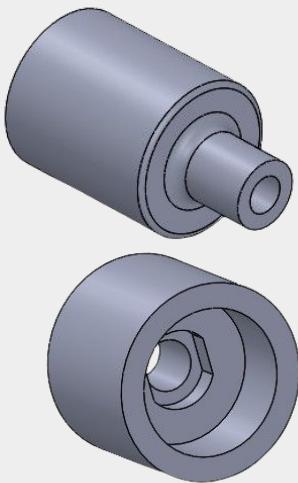
Sistema de adquisición



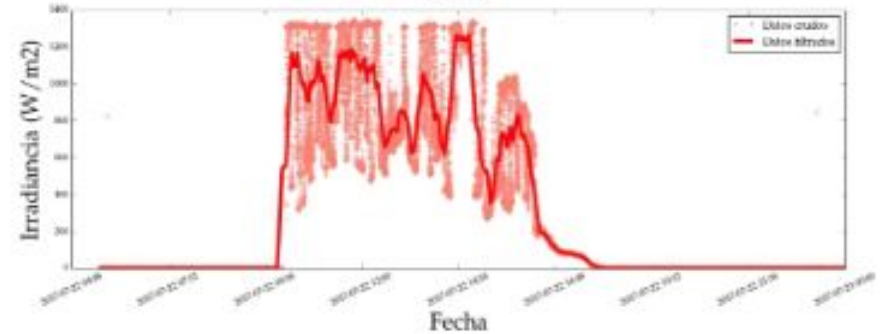
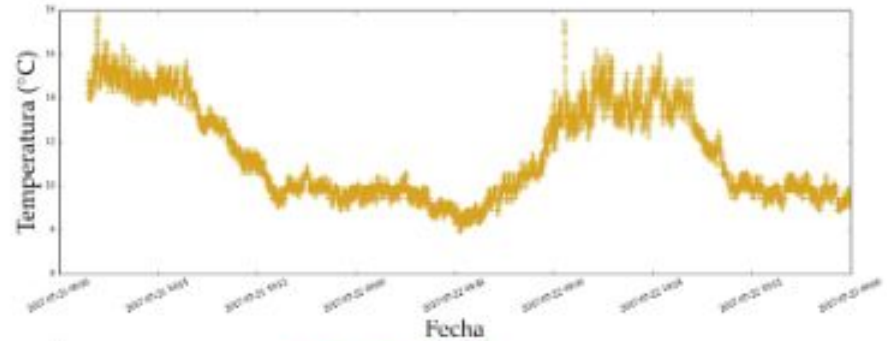
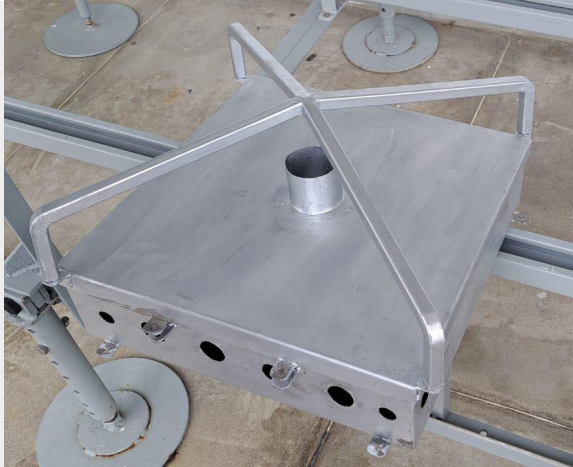
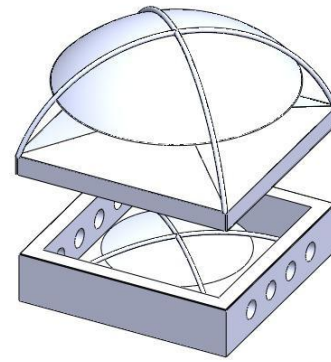
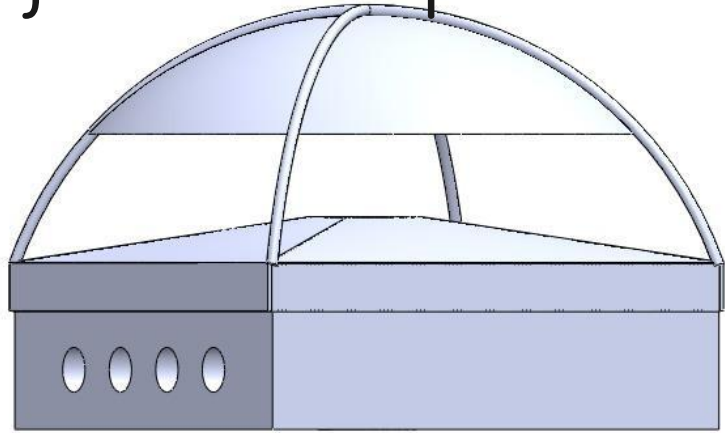
CAEN FERS-5200 DAQ, 64 Ch: convertidores AD, Logical Trigger, sincronización, memoria local e interfaz de lectura.



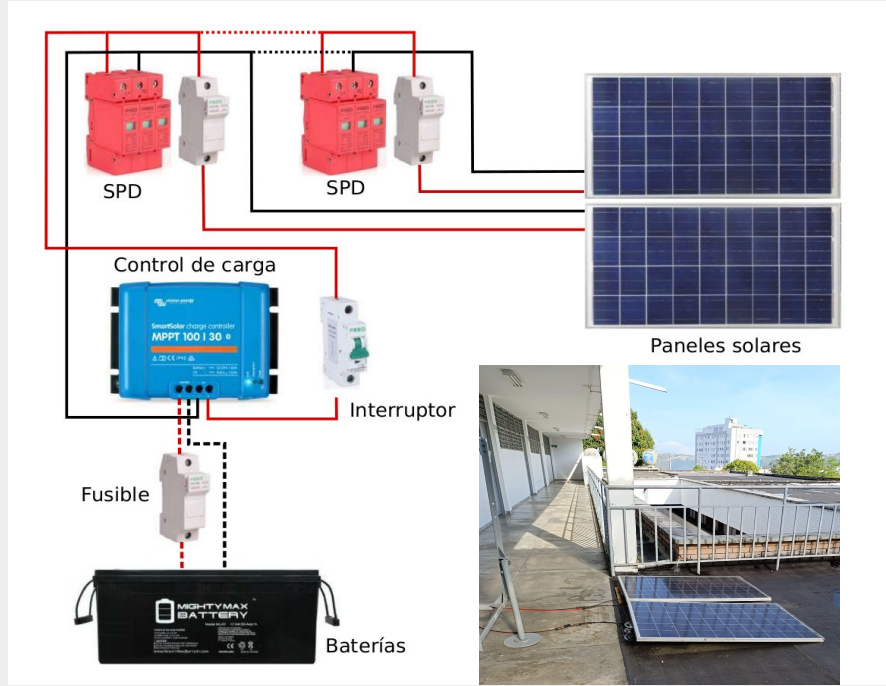
Acople SiPM-Fibra



Caja térmica para la electrónica



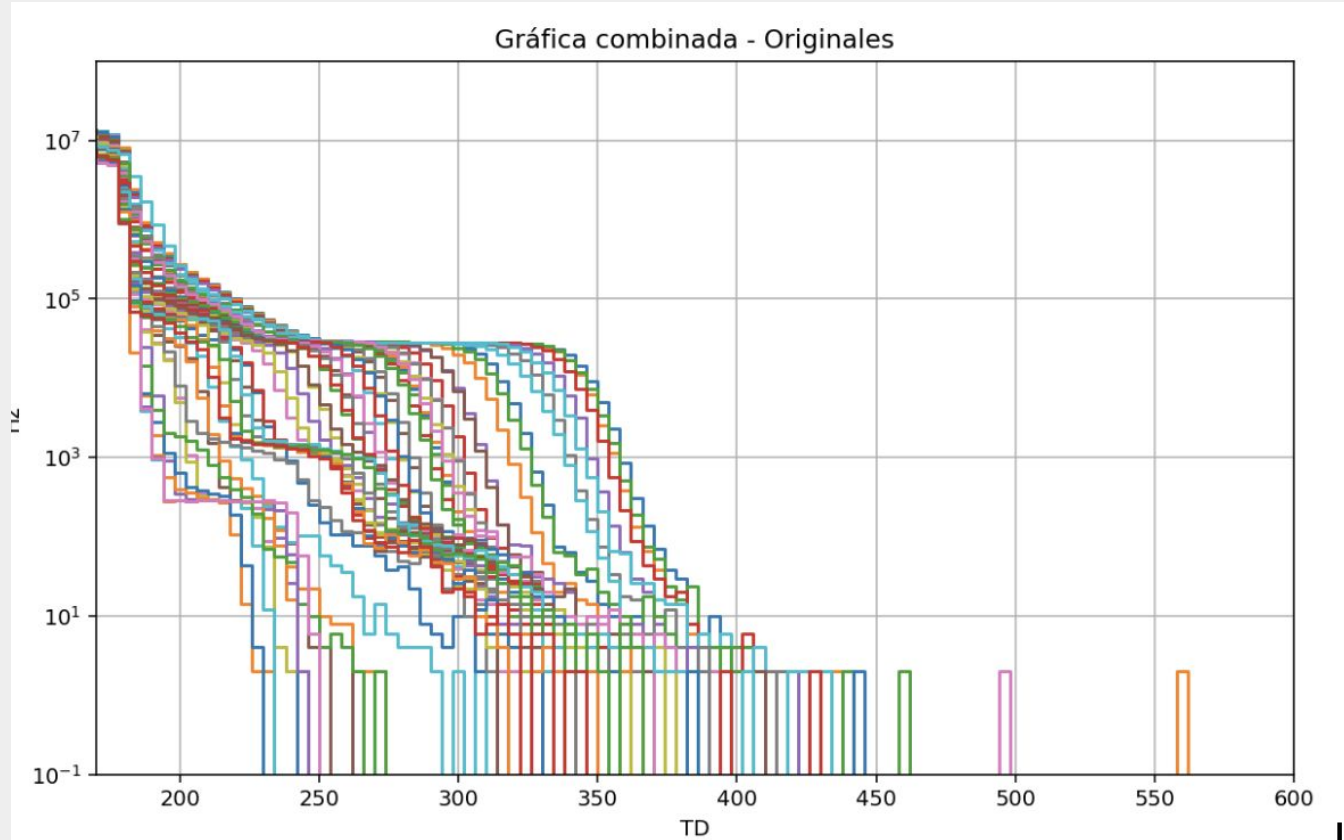
Sistema Fotovoltaico de respaldo



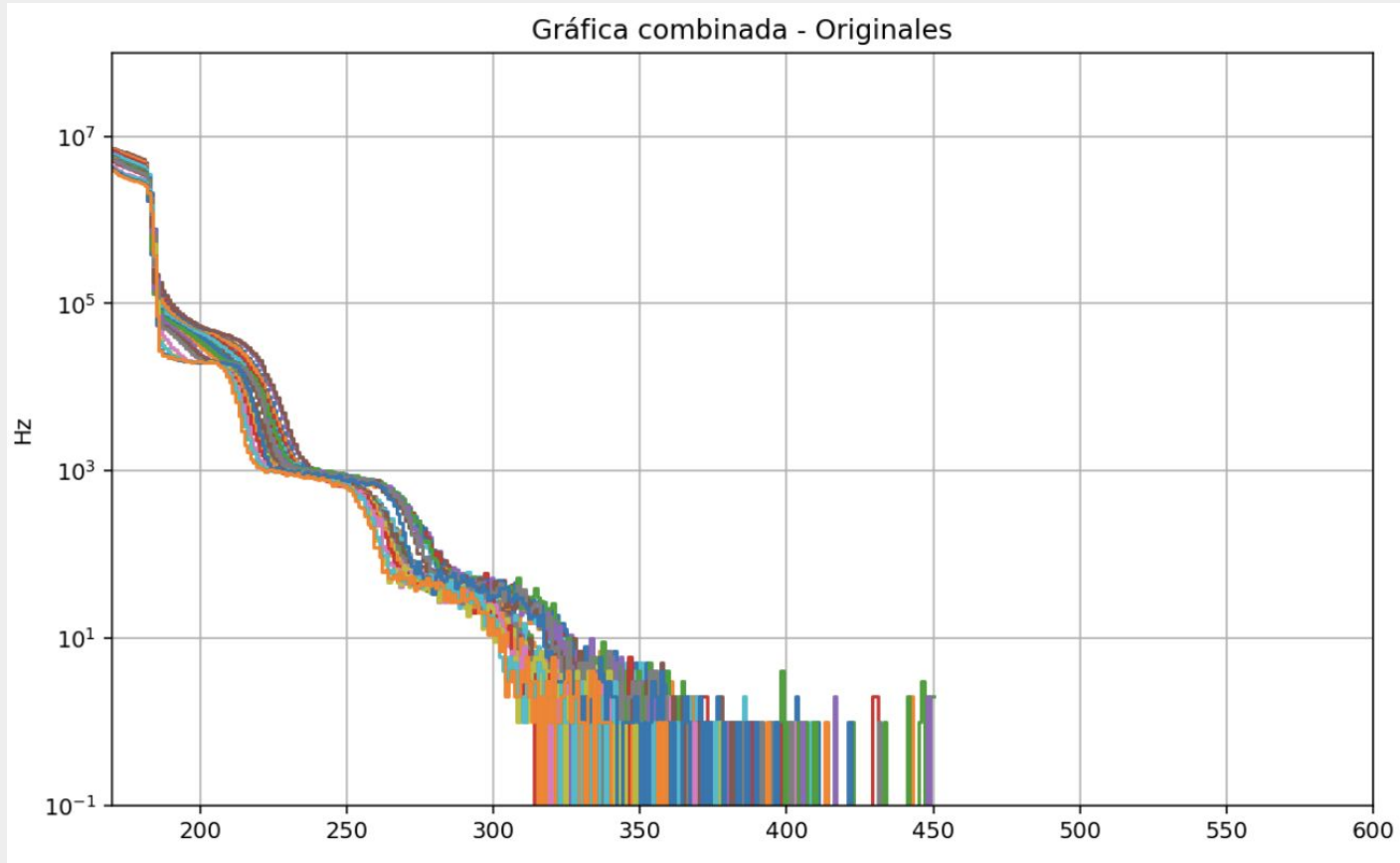
MuTe 2.0



Midiendo la corriente oscura



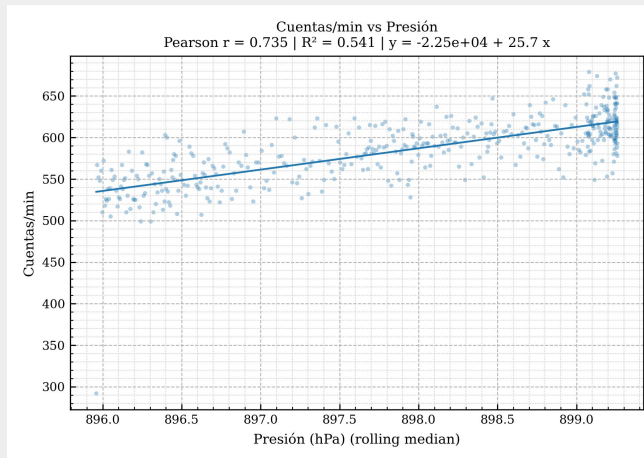
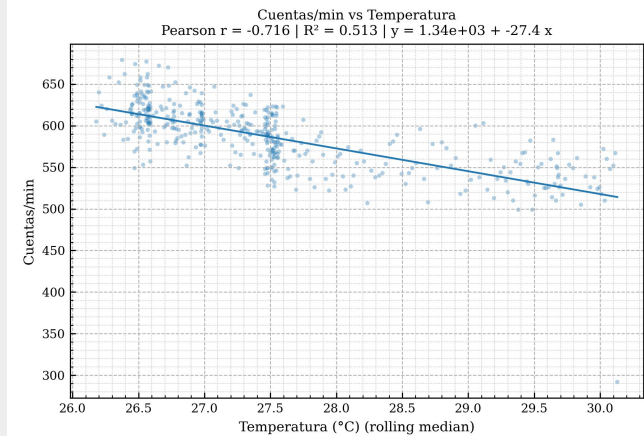
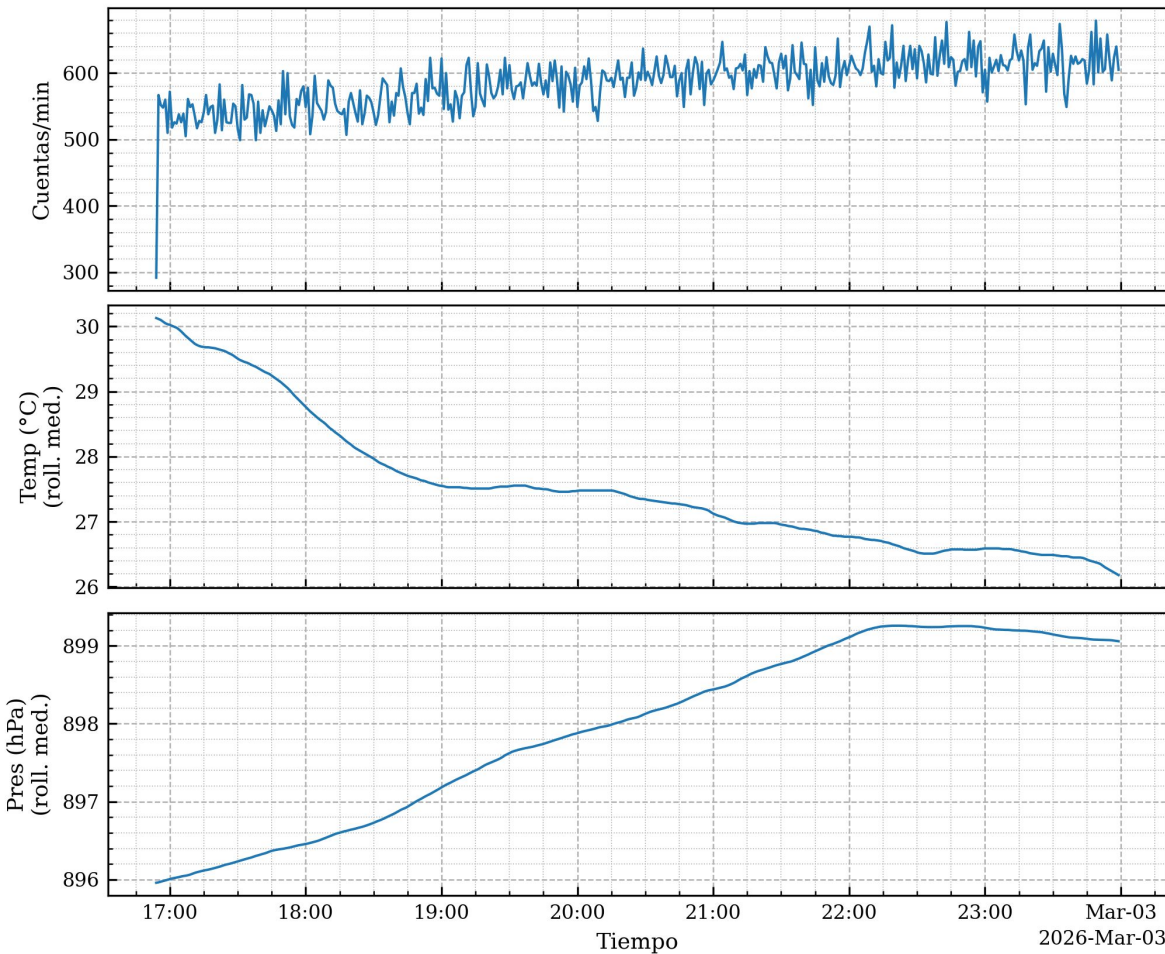
Midiendo la corriente oscura



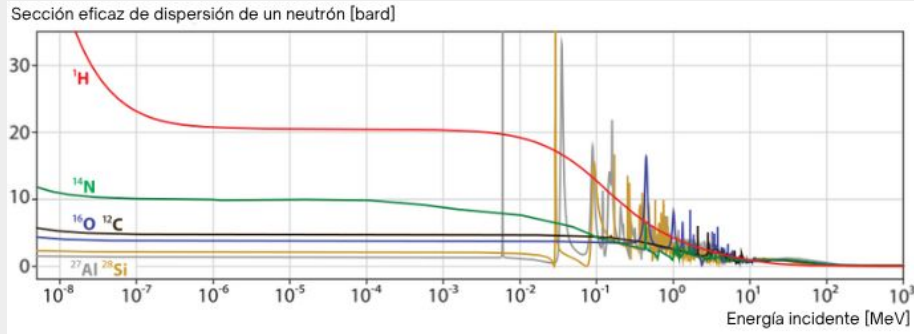
Acknowledgements

Proyecto " Integración de muongrafía con métodos geofísicos estándar para la construcción de un modelo 3D de densidad: aplicación al Volcán Cerro Machín" , financiado con recursos de Minciencias por medio de la convocatoria 890 de 2020 y administrados por el ICETEX mediante contrato No. 2022-0718.

Ventana común: 2026-03-02 16:54:00 → 2026-03-02 23:59:00 | dt=1min | rolling=10min
Pearson r: cuentas vs T = -0.716 | cuentas vs P = 0.735



Dispersión neutrones y ratio de pérdida de energía



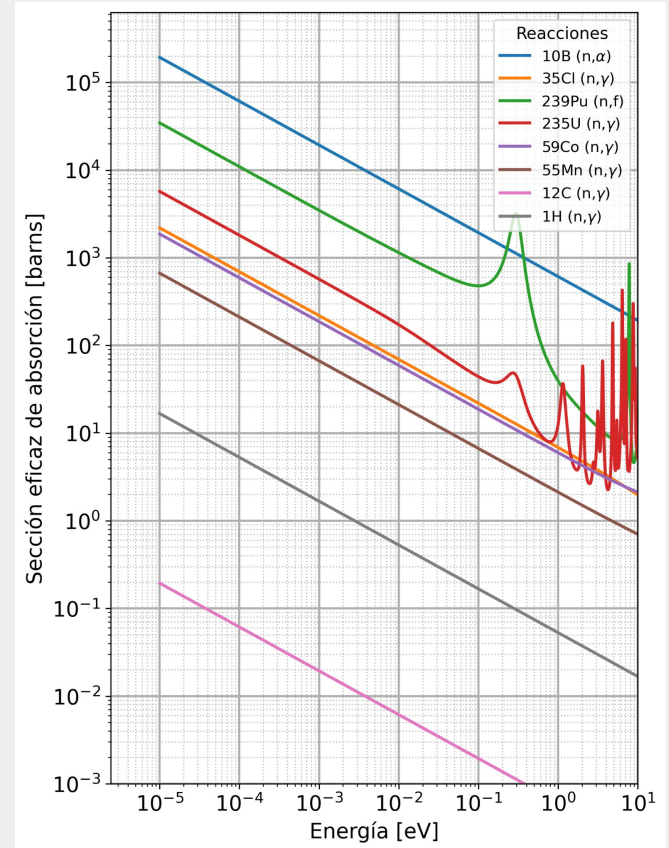
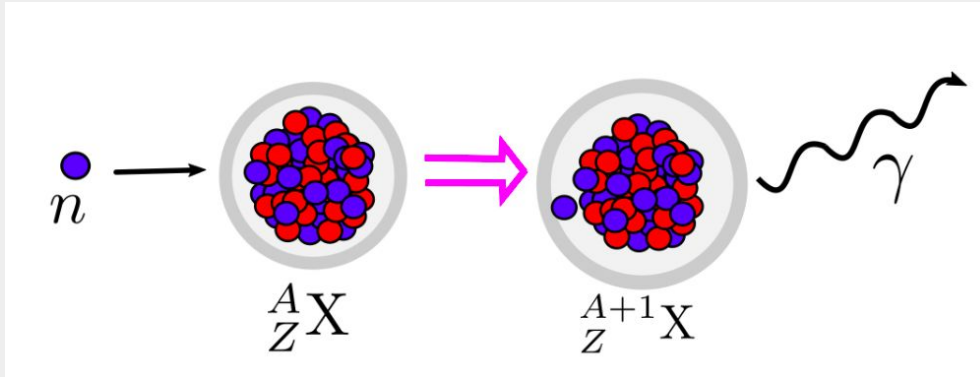
Köhli et al., Water Resources Research, 51(7):5772–5790 2015

Elemento	Masa [u]	Tasa de pérdida de energía ξ	n_{col} para termalizar
H	1	1	18
H ₂ 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 ₂	-	0.11	166
Aire (seco)	-	0.135	135

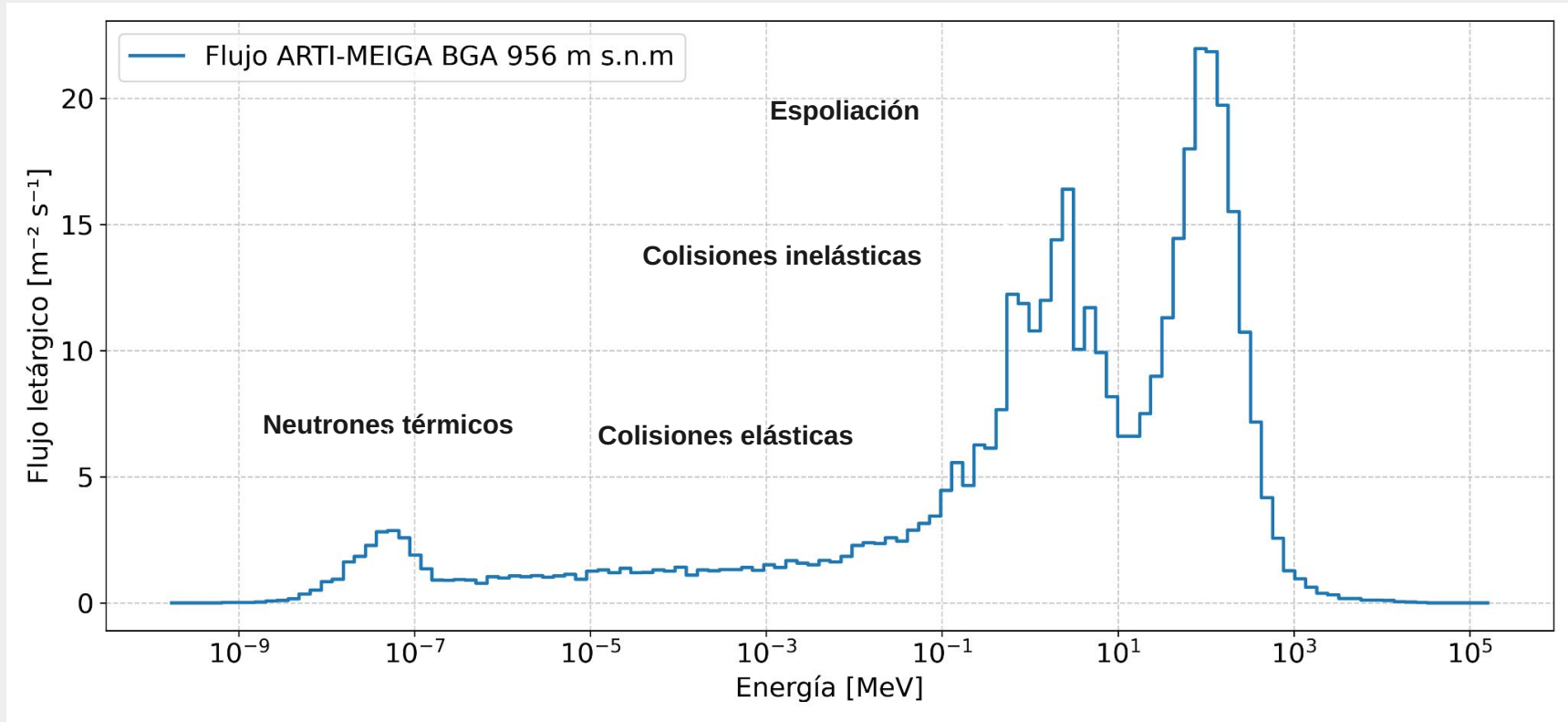
Köhli et al., Frontiers in Water, 2:544–847 2021

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.

Captura de neutrones

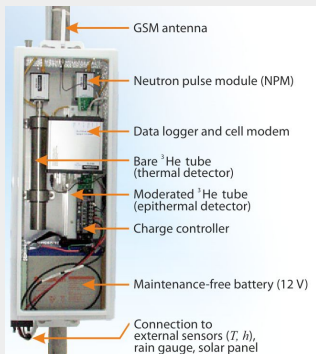


Distribución energética de los neutrones



Detectores de neutrones cósmicos

Detectores gaseosos



Schrón et al., 2019. 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.

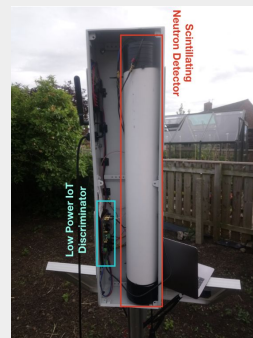
Detectores semiconductores



Figuas et al., 2022. Acta Astronautica, 200, 620–626.

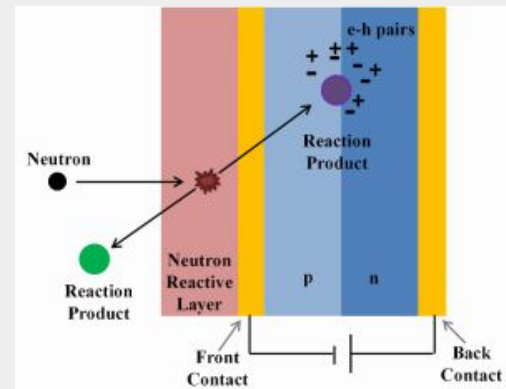
Detectan mediante la creación de pares electrón-hueco en un material semiconductor, cuya carga recogida forma la señal de medición.

Detectores de centelleo



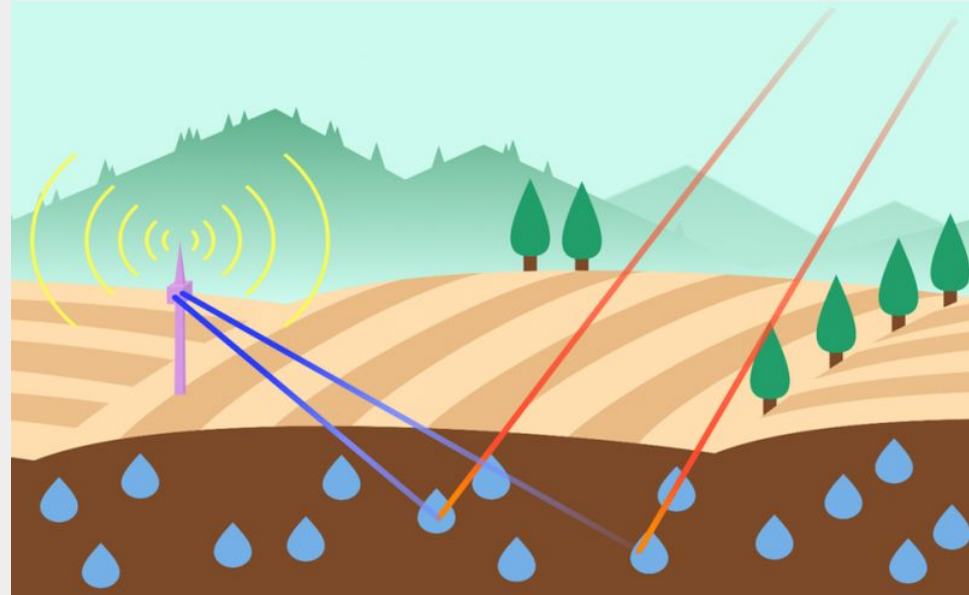
Stowell et al., 2021. In Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021).

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

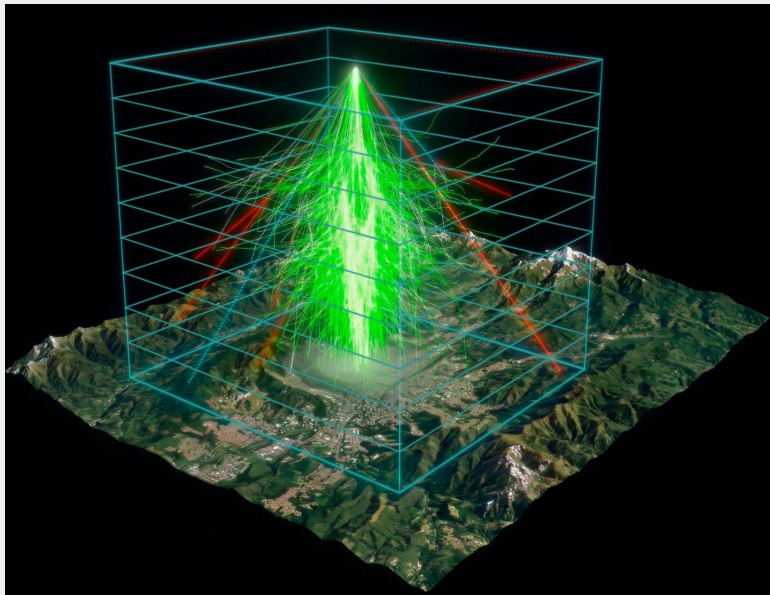


Detectores de neutrones cósmicos

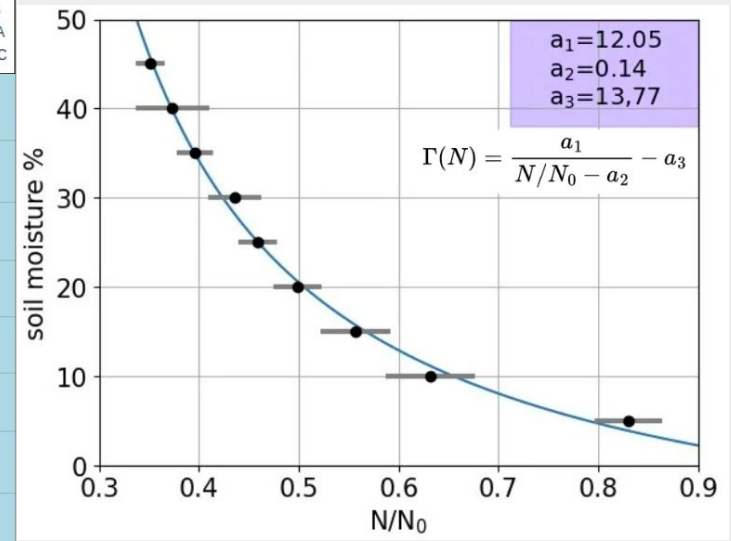
Para la calibración del CRNS, se deben tener en cuenta las condiciones geográficas, como la altitud o el campo geomagnético, del lugar donde se están realizando las mediciones. Sin embargo, la calibración de estos dispositivos sigue siendo un problema abierto.



Metodología



Moderación de los neutrones

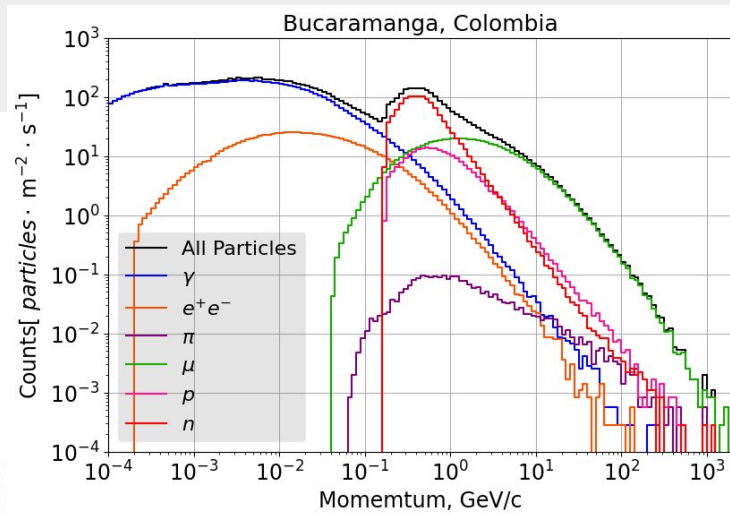
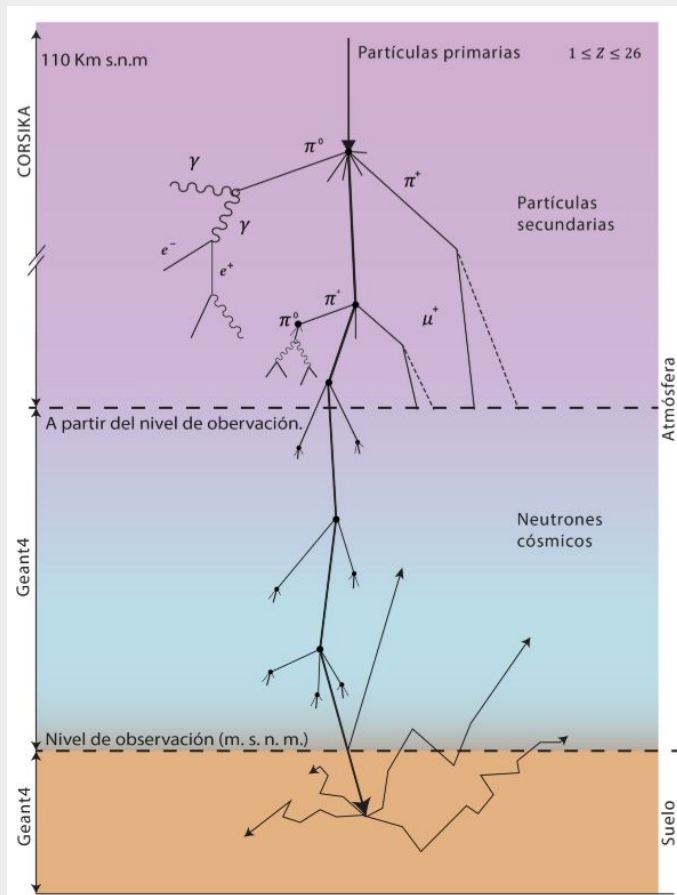


Domínguez-Ballesteros, 2023. Master thesis, ICTP-EAIFR / University of Rwanda.

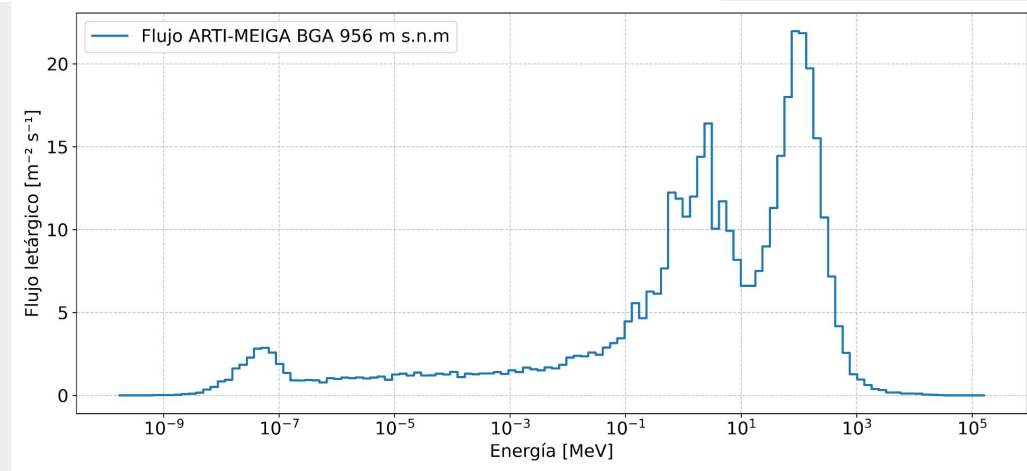
¿Que softwares hay disponibles?

Característica	URANOS	FLUKA	Geant4
Partículas inyectadas	Solo neutrones (espectros predefinidos: cósmico, térmico, monoenergético, fisión, etc.).	Protones, neutrones, iones (hasta uranio), electrones, fotones.	Cualquier partícula (electrones, fotones, iones, hadrones pesados, etc.).
Parámetros iniciales	Posición, energía y dirección.	Tipo de partícula, energía, posición, dirección y geometría del sistema.	Tipo de partícula, energía, posición, dirección, tiempo y polarización.
Flexibilidad en materiales y detectores	Materiales como agua, aire, suelo están predefinidos y opción de composiciones personalizadas. Detectores: capa completa o detector virtual (esfera, cilindro, plano).	Materiales definidos por el usuario a partir de elementos e isótopos. Detectores virtuales en puntos, superficies o volúmenes.	Amplia biblioteca de materiales (NIST) y creación de nuevos. Detectores: volúmenes sensibles personalizables para registrar hits, energía, trazas.
Limitaciones principales	No simula la cascada atmosférica completa; requiere un espectro de entrada predefinido y no calcula el flujo incidente desde el tope de la atmósfera.	Carece de bibliotecas predefinidas para detectores, además su sistema de registro de magnitudes físicas es menos flexible.	Alto costo computacional, derivado de la simulación completa y detallada de todas las interacciones.

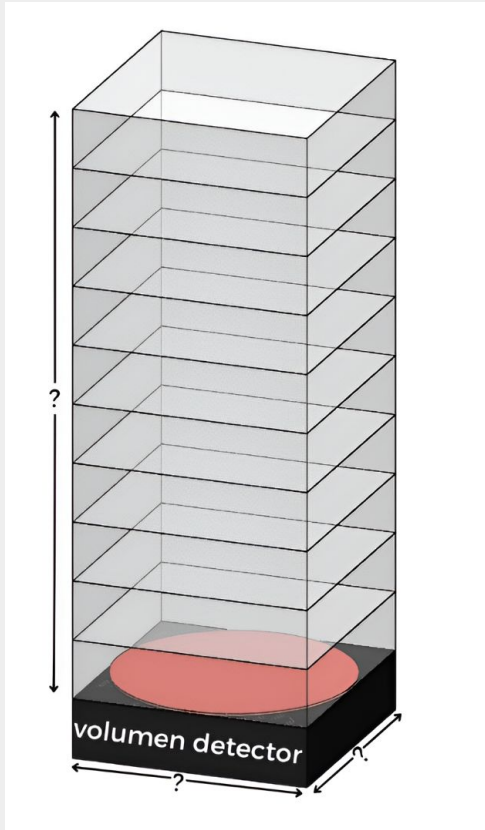
Corsika + Geant4



CORSIKA realiza un corte de energía en 17 MeV para los neutrones.

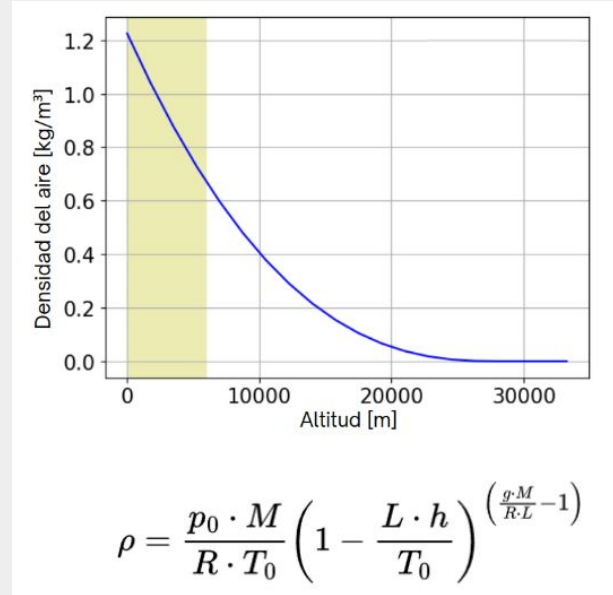


Modelo atmosférico



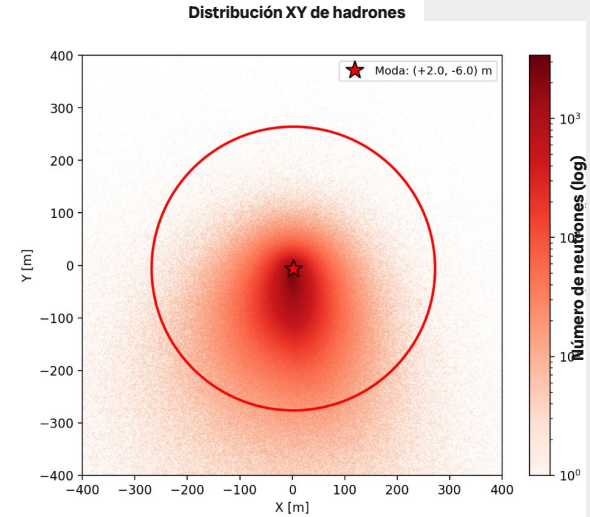
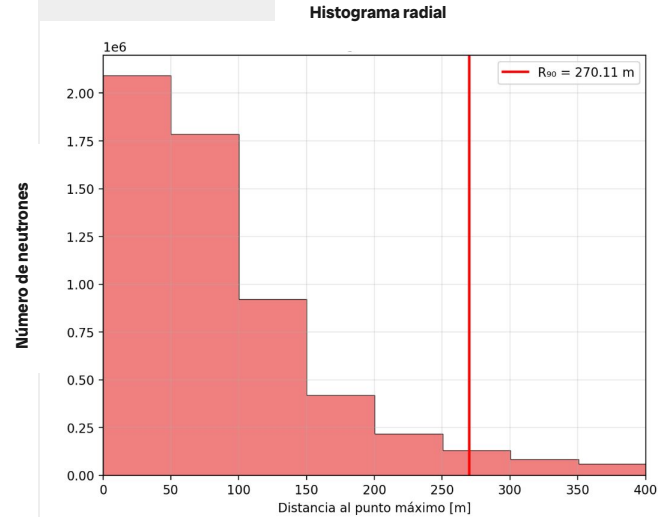
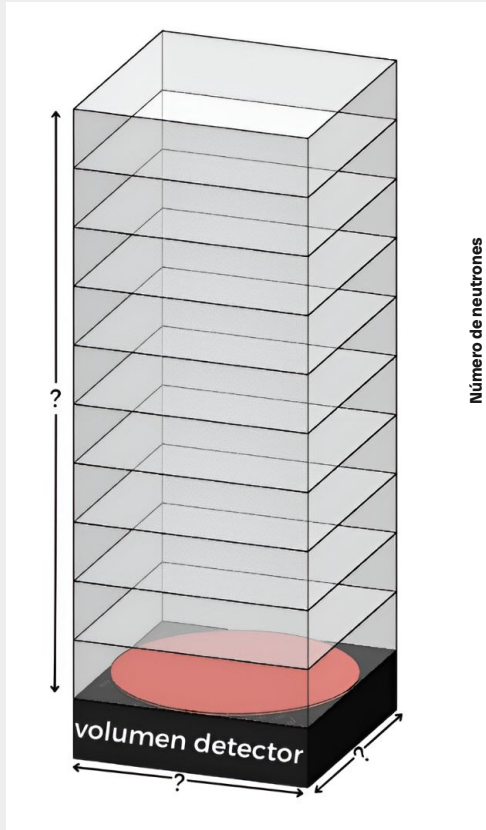
Elemento	Fracción
N	0.7808
O	0.2095
Ar	0.0090

Composición química del aire



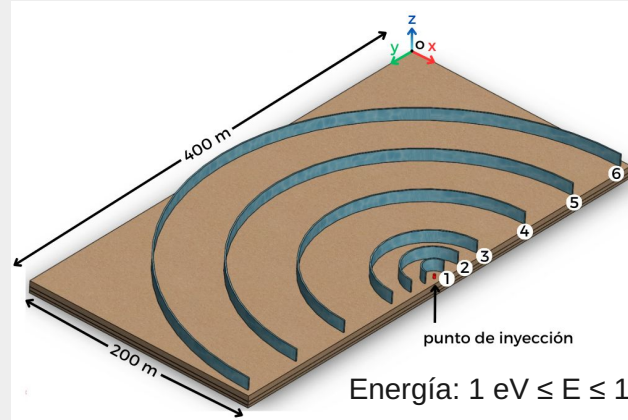
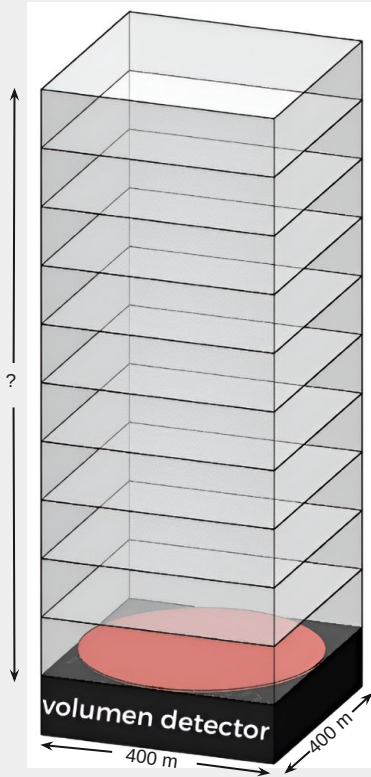
$$\rho = \frac{p_0 \cdot M}{R \cdot T_0} \left(1 - \frac{L \cdot h}{T_0} \right)^{\left(\frac{g \cdot M}{R \cdot L} - 1 \right)}$$

Distancia radial de la componente hadronica



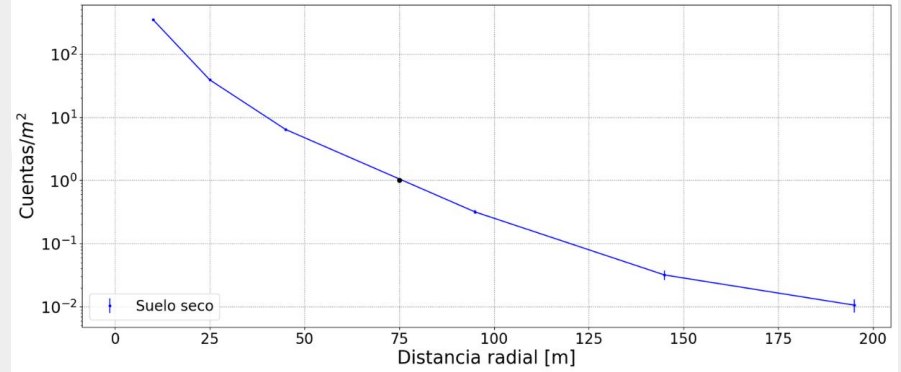
El valor obtenido para la componente hadrónica es $R_{90} = 270.1$ m

Distancia radial de la componente hadronica

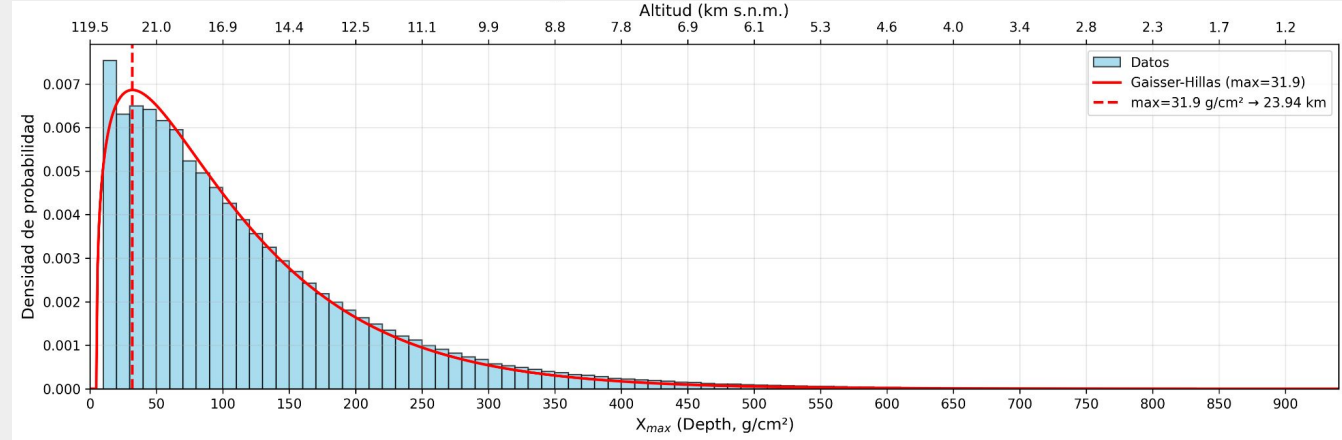
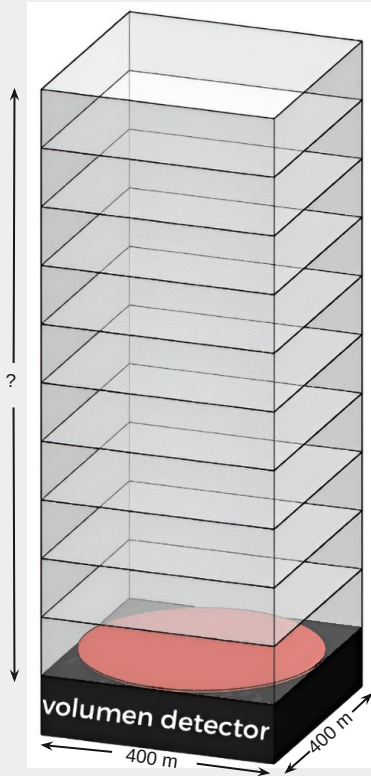


Energía: $1 \text{ eV} \leq E \leq 10 \text{ MeV}$

El flujo de neutrones que retornan a la superficie alcanza distancias de hasta 200m

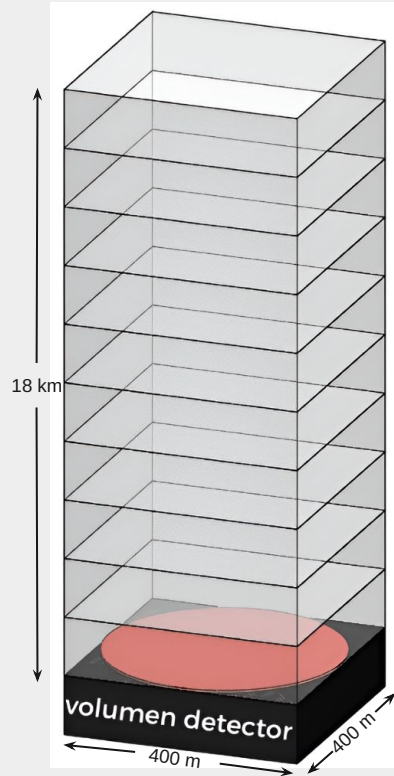


Análisis del X_{max} hadronico

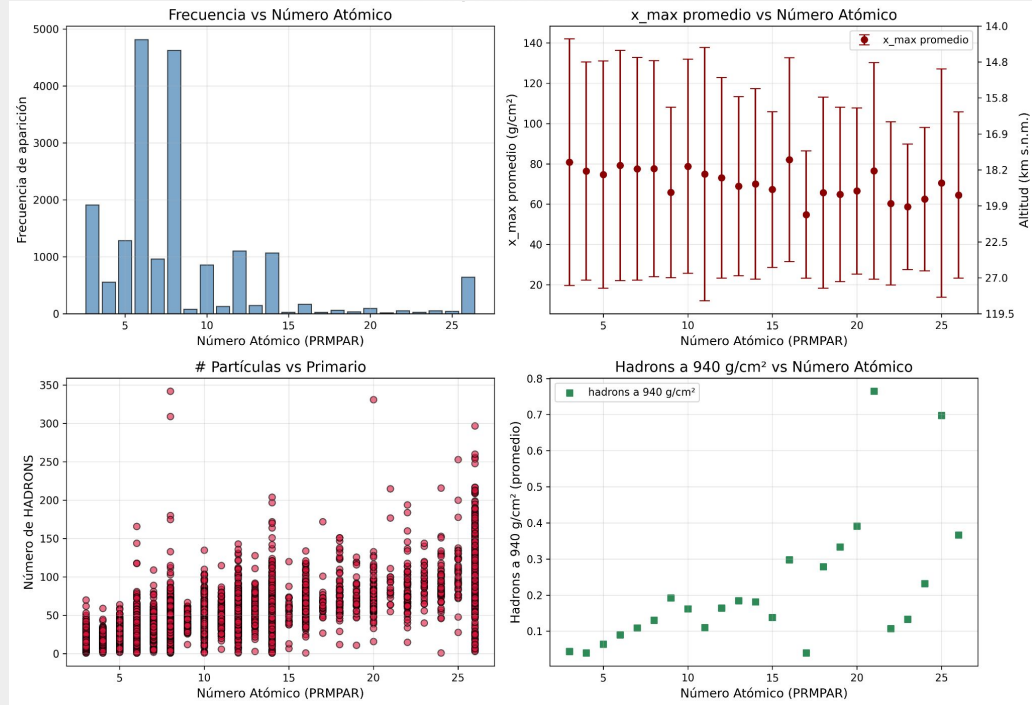


Se observa un máximo correspondiente a una altitud aproximada de 23,94 km, indicando la región donde ocurre con mayor frecuencia el máximo desarrollo de la cascada hadrónica.

Análisis de primarios



Análisis $3 \leq Z \leq 26$

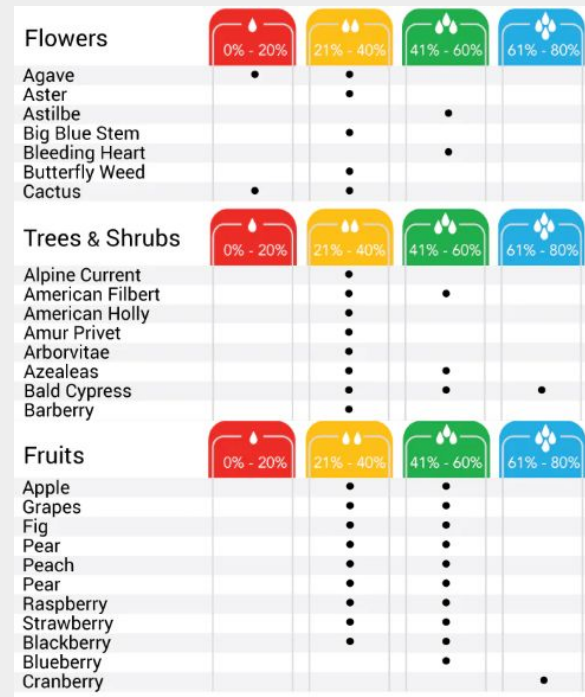


Considerando que la contribución de hidrógeno y helio no es predominante en la producción de hadrones que llegan a la superficie, la altura de inyección de partículas puede reducirse de 24 km a 18 km.

Modelo del suelo



Elemento presente en el suelo	Concentració [%]
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



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

—