



# Estudio de la variación con la altura del flujo atmosférico de protones y neutrones secundarios producidos por rayos cósmicos

Presenta: **Marcos Mata**

Director de tesis: Dr. Oscar Gustavo Morales Olivares

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias

18 de octubre de 2024

# Contenido

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Metodología
- 4 Resultados/Discusión
- 5 Conclusiones
- 6 Referencias

# Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

## ¿Qué son los Rayos Cósmicos?

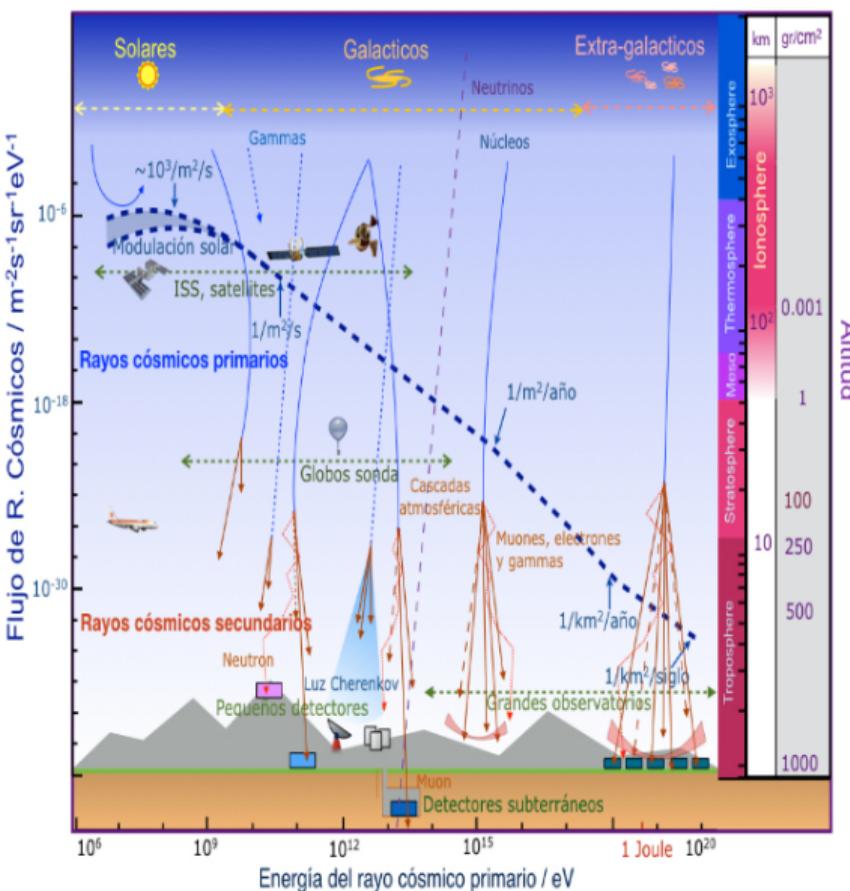
- ▶ Núcleos de átomos desprovistos de sus electrones.
- ▶ Consisten en  $\sim 90\%$  protones,  $\sim 9\%$  núcleos de helio y  $\sim 1\%$  otros núcleos más pesados.
- ▶ Llegan a la Tierra desde todas direcciones.
- ▶ Descubiertos por *Victor Hess* en 1912.



**Figura 1:** Victor Hess recibió el premio Nobel de Física en 1936 por su descubrimiento de los rayos cósmicos.

## Espectro de energía:

- ▶ Ley de potencia:  $\Phi(E) \propto E^{-\alpha}$ , donde **E** es la energía y  $\alpha$  el índice espectral.
- ▶ Abarca varios ordenes de magnitud ( $\sim 10^8$  a  $\sim 10^{21}$ ) eV.
- ▶ Son muy abundantes los rayos cósmicos de **baja energía**.
- ▶ Los rayos cósmicos pueden ser detectados de manera **directa** e **indirecta**.



**Figura 2:** Espectro de los RC, se muestra los instrumentos usados para la detección a diferentes altitudes. Imagen tomada del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) (2023).

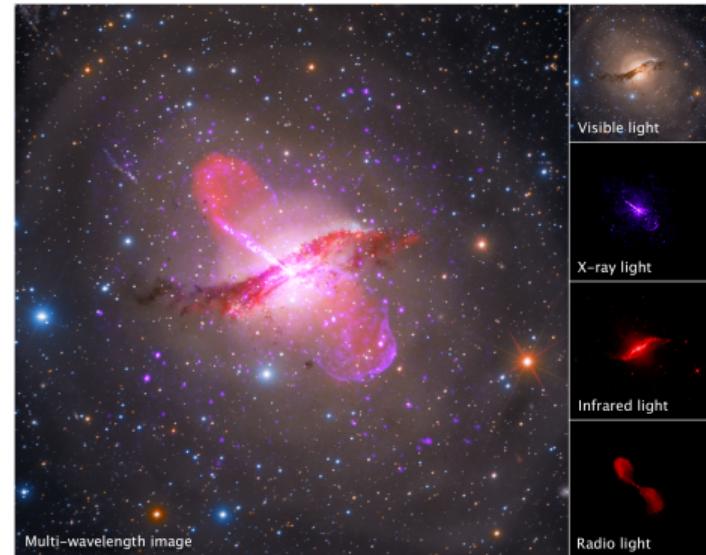
# Origen de los Rayos Cósmicos

Galáctico



**Figura 3:** Remanente de supernova en la **nebulosa del Cangrejo**, se encuentra a 6500 años luz de la Tierra. Créditos: Rayos X: NASA/CXC/SAO; Visible: NASA/STScI; Infrarrojo: NASA-JPL-Caltech.

Extragaláctico



**Figura 4:** Centaurus A es una galaxia activa cercana a la Vía Láctea, ubicada a 3.5 megapársecs. Créditos: X-ray: NASA/CXC/SAO; optical: Rolf Olsen; infrared: NASA/JPL-Caltech; radio: NRAO/AUI/NSF/Univ.Hertfordshire/M.Hardcastle.

## Rigidez umbral

- ▶ Está dada por la ecuación:

$$R = \frac{pc}{Ze},$$

donde **p** es el momento de la partícula, **c** es la velocidad de la luz, **Z** número de carga iónica y **e** la carga elemental.

- ▶ Centro de México:  $R_c \sim 8.3$  GV.

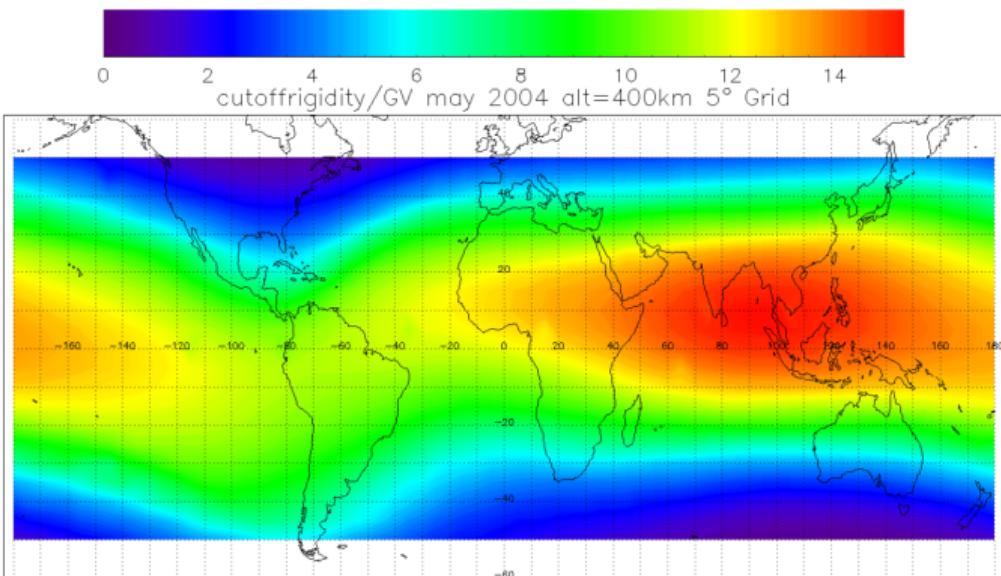


Figura 5: Mapa de la rigidez umbral de la Tierra [Labrenz 2014].

# Cascada de partículas

## ► Componentes:

- ▶ Electromagnética.
- ▶ Muónica.
- ▶ Hadrónica.

## ► Reacciones de decaimiento:

- ▶  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- ▶  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
- ▶  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$

► Vida media  $\pi^0$ :  $\sim 10^{-16}$  s.

► Vida media de los piones ( $\pi^+$  y  $\pi^-$ ):  $\sim 26$  ns.

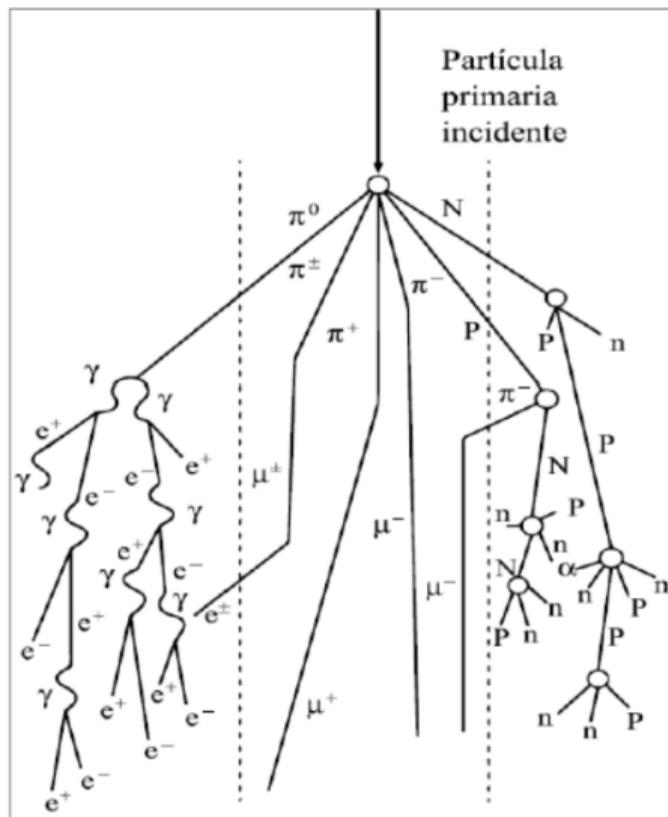


Figura 6: Esquema de las componentes de un chubasco de partículas [Otaola y Valdés-Galicia 1992].

# Observatorios de Rayos Cósmicos en Sierra Negra

- ▶ **HAWC (High Altitude Water Cherenkov)**



- ▶ **Telescopio de Centelleo de Rayos Cósmicos (SciCRT)**



- ▶ **Mini Monitor de Neutrones portátil (MNM)**



- ▶ **Telescopio de Neutrones Solares (TNS)**



# Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

# Objetivos

Determinar cómo cambia el flujo de protones y neutrones secundarios producidos por rayos cósmicos, desde la cima del volcán Sierra Negra hasta el nivel del mar, en el puerto de Veracruz, mediante simulaciones con **CORSIKA**.

- ▶ **Objetivo particular 1:** Comparar el flujo de partículas secundarias con el flujo obtenido con el Mini Monitor de Neutrones portátil.
- ▶ **Objetivo particular 2:** Obtener el espectro de partículas secundarias a nivel de Sierra Negra.

# Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

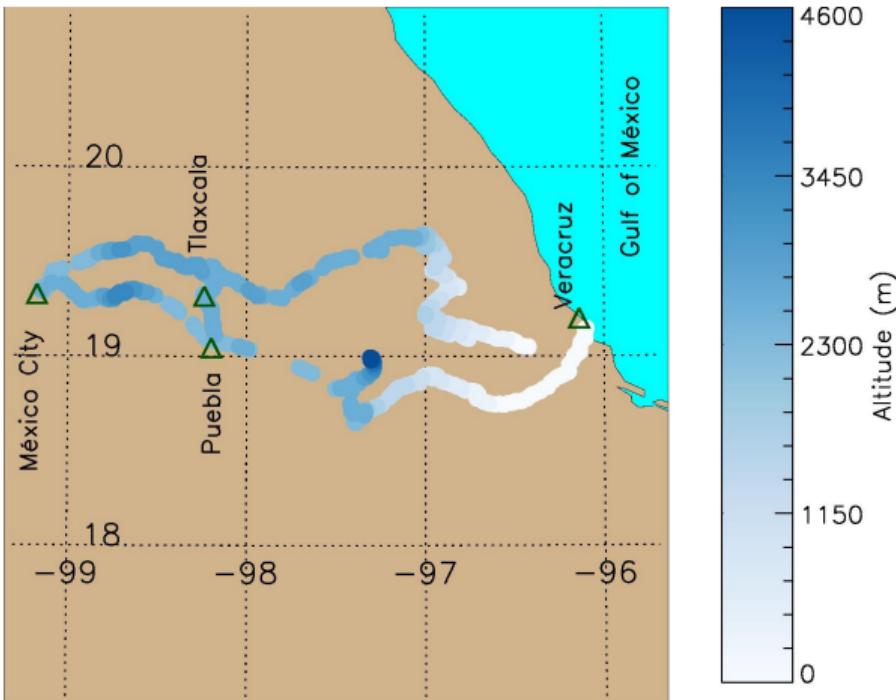
5 Conclusiones

6 Referencias

# Metodología

## Ubicación geográfica de los puntos de observación:

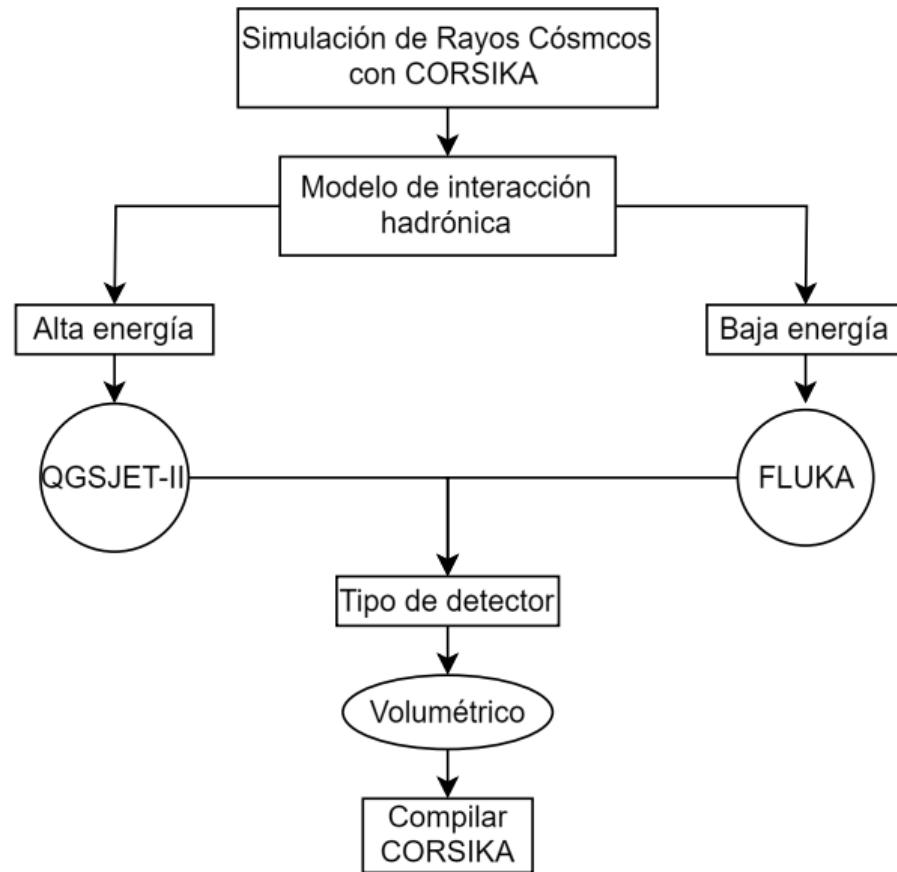
- ▶ Estudio in situ realizado por Lara, Borgazzi y Caballero-Lopez 2016.
- ▶ Mediciones realizadas con el MNM portátil.
- ▶ 41 puntos de observación.
- ▶ Altitud más baja: 7 m.s.n.m.
- ▶ Altitud más alta: 4582.5 m.s.n.m.



**Figura 7:** Mapa con los puntos donde [Lara, Borgazzi y Caballero-Lopez 2016] realizaron mediciones con su detector a diferentes altitudes. El color en los puntos va relacionado a la altitud. Los triángulos corresponden a las ciudades más pobladas.

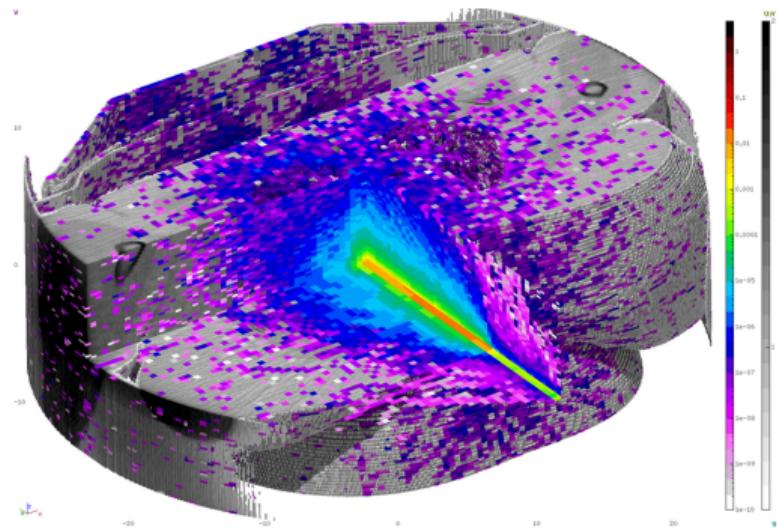
## CORSIKA:

- ▶ Simulación de chubascos de partículas.
- ▶ Escrito en el lenguaje de **FORTRAN**.
- ▶ Modelo de interacción hadrónica para alta energía:
  - ▶ **QGSJET-II**.
- ▶ Modelo de interacción hadrónica para baja energía:
  - ▶ **FLUKA**.



## FLUKA:

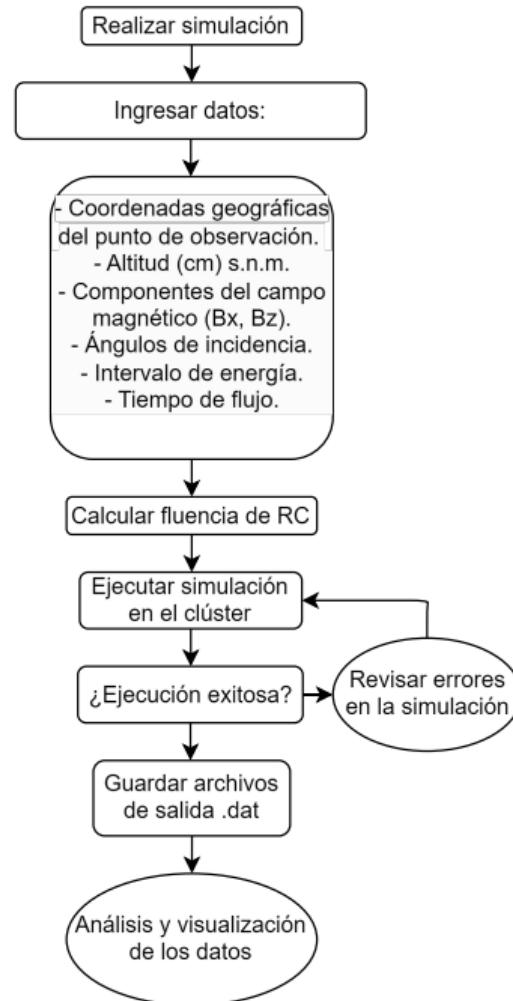
- ▶ Paquete de rutinas que usa el método *Monte Carlo*.
- ▶ Permite hacer un análisis del comportamiento de las partículas en la materia.
- ▶ Se instala de manera independiente y luego se liga a *CORSIKA*.



**Figura 8:** Visualización de un haz de partículas atravesando un material, realizado con FLUKA.

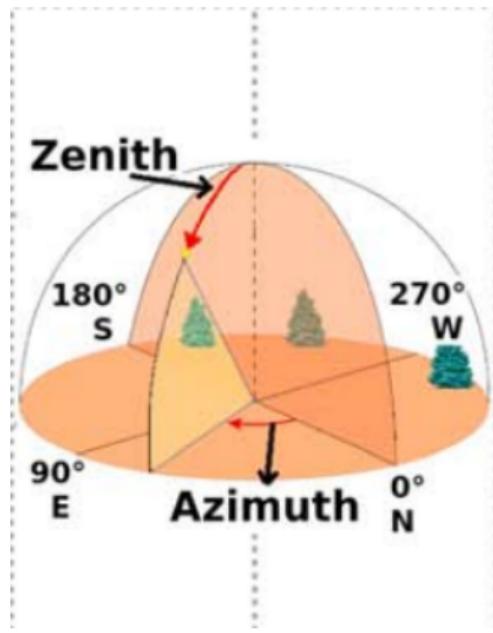
## Procesamiento de datos y simulaciones:

- ▶ Uso del clúster **LARCAD** (Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño).
- ▶ Simulación de millones de cascadas de partículas.
- ▶ Espacio de almacenamiento para guardar los resultados de cada simulación.
- ▶ Automatizar procesos mediante scripts para ejecutar CORSIKA en el clúster.



## Cálculo de la fluencia:

- ▶ Rígidez  $R_c(\text{Lat}, \text{Long}, \text{Alt}, t, \theta, \phi)$ .
- ▶ Donde:  $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ ;  $\phi \in [0^\circ, 360^\circ]$ .
- ▶ Rango de energía para los rayos cósmicos primarios:  
 **$5 \times 10^9$  eV** hasta  **$10^{15}$  eV**.
- ▶ En cada punto de observación se simuló un tiempo,  
 $t = 1$  hr de flujo.
- ▶ Se requirió **simular**  $\sim 450$  millones de cascadas  
para 41 puntos de observación.



**Figura 9:** Definición geométrica de los ángulos **zenital** ( $\theta$ ) y **azimutal** ( $\phi$ ). Donde:  $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ ;  $\phi \in [0^\circ, 360^\circ]$  [Asorey, Núñez y Suárez-Durán 2018].

# Contenido

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Metodología
- 4 Resultados/Discusión
- 5 Conclusiones
- 6 Referencias

## Resultados/Discusión

### Espectro de partículas a 7 m.s.n.m.

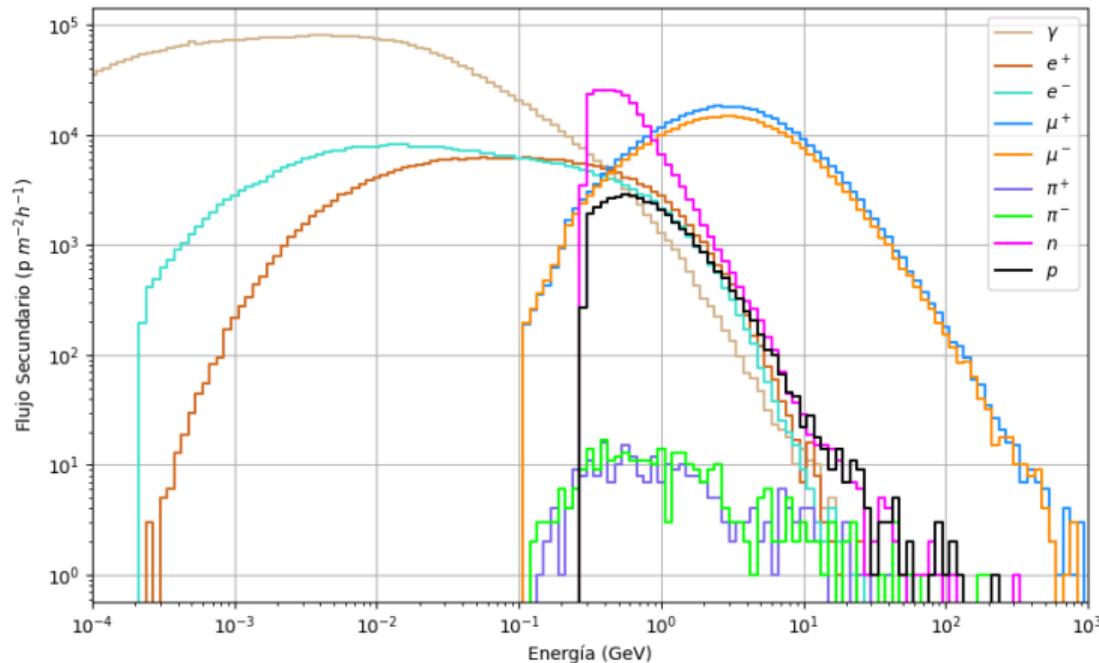


Figura 10: Espectro de partículas secundarias obtenido a una altura de 7 m s.n.m. Los colores corresponden a las diferentes partículas secundarias que lograron llegar al nivel de observación.

# Espectro de partículas a 4582.5 m.s.n.m.

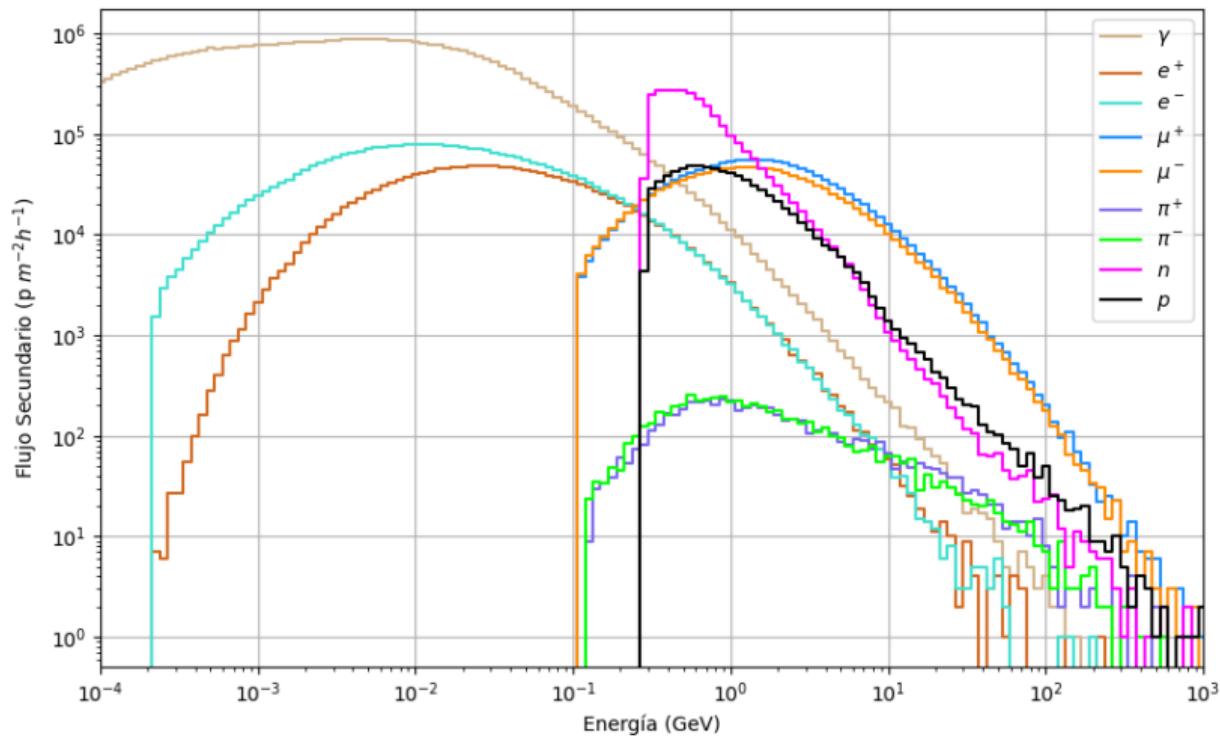
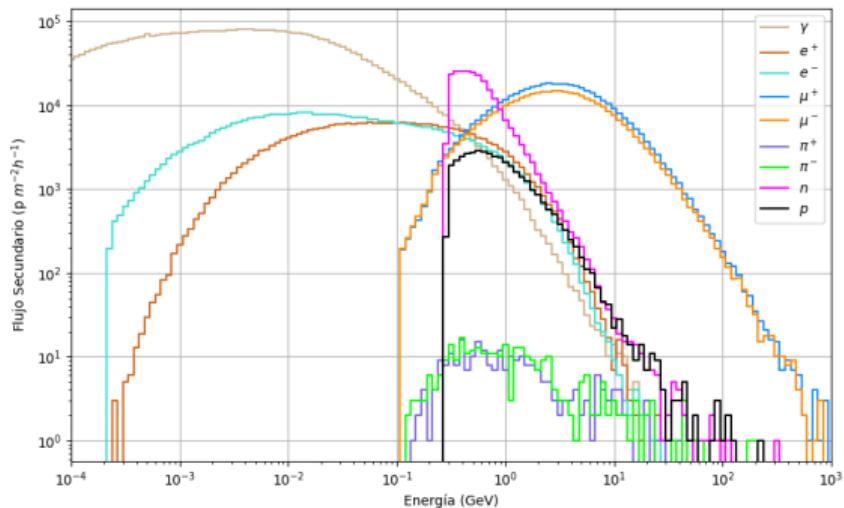
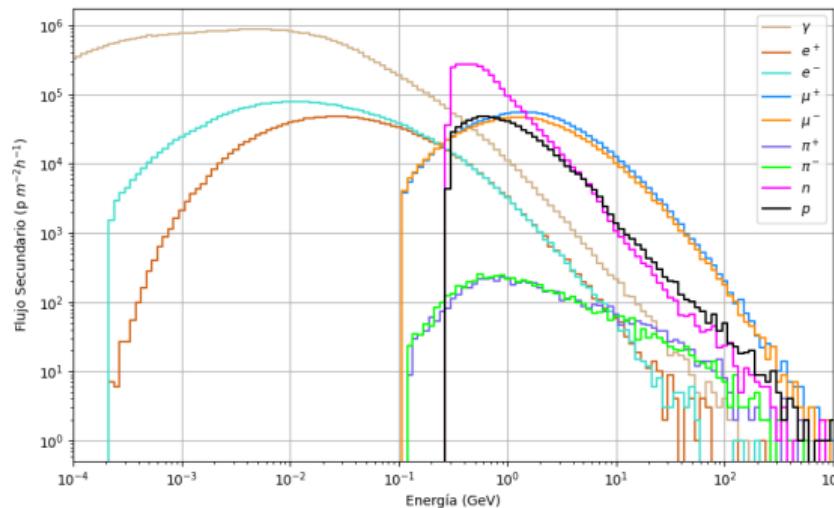


Figura 11: Espectro de partículas secundarias obtenido a una altura de 4582.5 m s.n.m. Los colores corresponden a las diferentes partículas secundarias que lograron llegar al nivel de observación.

## Espectro de partículas a 7 m.s.n.m.



## Espectro de partículas a 4582.5 m.s.n.m.



# Flujo de neutrones con EXPACS

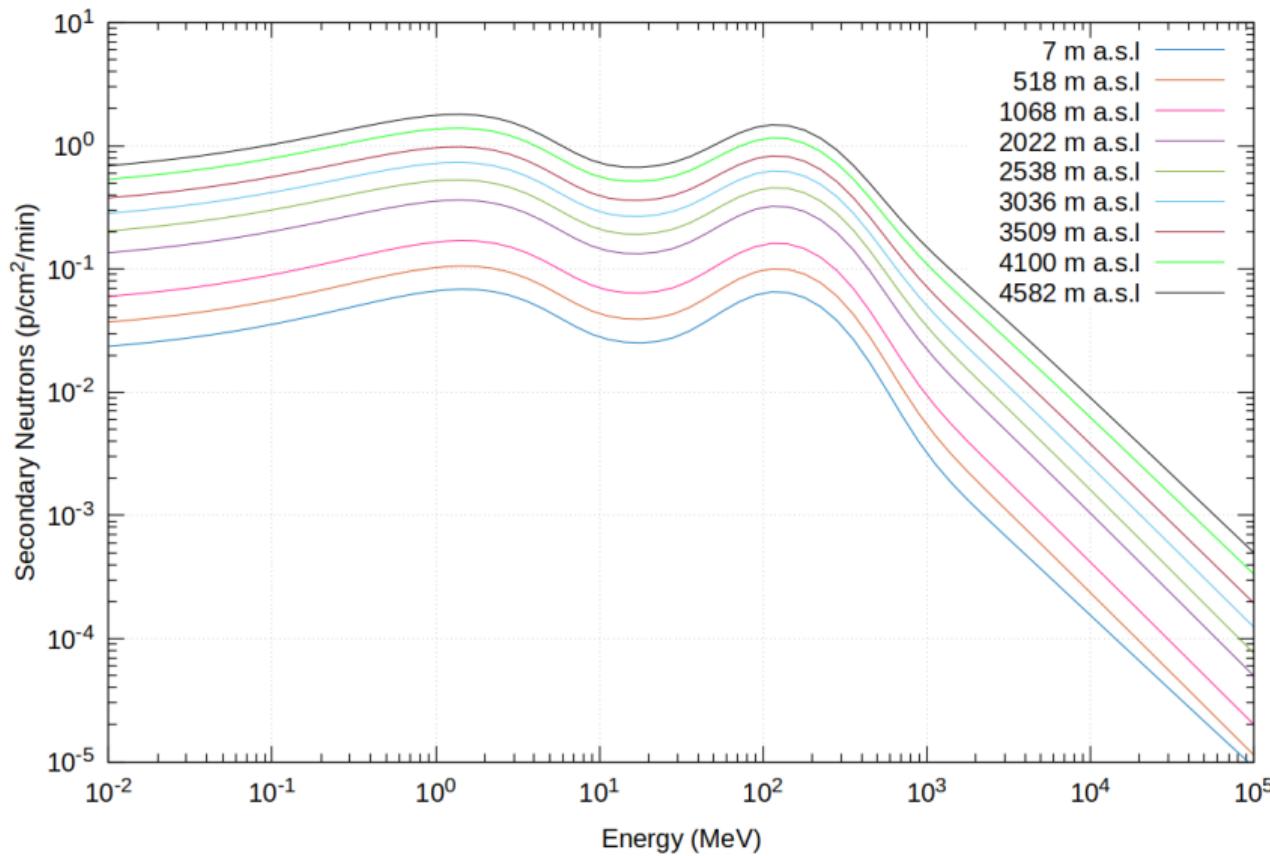


Figura 12: Espectro de neutrones a diferentes alturas utilizando EXPACS [Sedrati y Bouchachi 2022].

## Flujo de protones y neutrones vs Altura

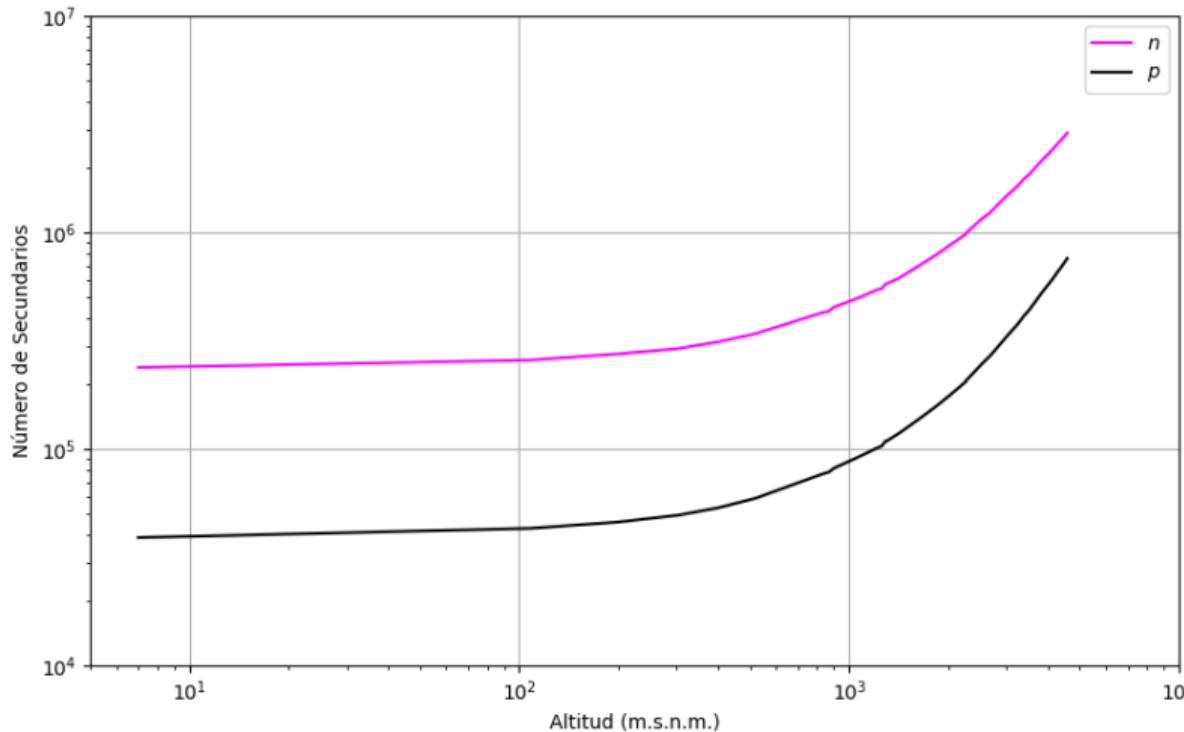
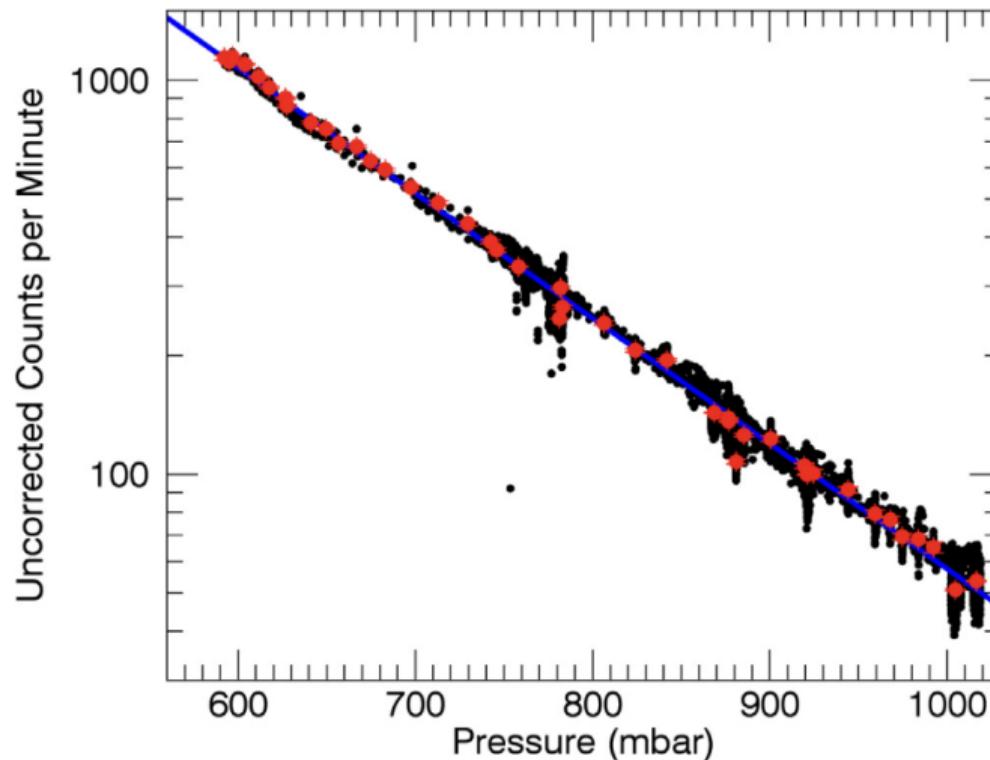


Figura 13: Flujo total de protones (negro) y neutrones (rosa) desde nivel del mar hasta cima del volcán Sierra Negra (4582.5 m s.n.m.) obtenido a través de las simulaciones con CORSIKA.

## Número de cuentas registrado con el MMN



**Figura 14:** Número de cuentas por minuto en función de la presión observada registrada por el MMN. Los puntos negros representan la tasa media de conteo durante todo el estudio (incluidos los períodos de tiempo cuando se movía el MMN de un punto de observación a otro). Los puntos rojos representan la tasa media de conteo en los puntos de observación [Lara, Borgazzi y Caballero-Lopez 2016].

# Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

## Conclusiones

- ▶ Se **obtuvo** el espectro de partículas secundarias a nivel de *Sierra Negra* y a nivel del mar, en el *Puerto de Veracruz*.
- ▶ En *Sierra Negra* se produjeron más partículas, en **un orden de magnitud mayor** que en el *Puerto de Veracruz*.
- ▶ Los resultados mostraron que el flujo de partículas se va **incrementando** a medida que la altitud es mayor, lo que coincide con lo **observado por el MMN**.
- ▶ El **flujo** de protones y neutrones se **incrementa** a medida que la altura es mayor.

- ▶ La principal **fuente de ruido** para los detectores en *Sierra Negra* son los **positrones** y **electrones**, ya que se producen en una cantidad muy parecida a la de los **muones**.
- ▶ Observamos que CORSIKA tiene **limitaciones** para seguir partículas con energías < **300 MeV**.
- ▶ Para estudiar partículas con bajas energías < 300 MeV se puede hacer uso de **EXPACS**.
- ▶ La parte final de la caracterización del MMN consistirá el desarrollo de una simulación en **GEANT4**, la cual tendrá como parámetro de entrada el espectro de protones y neutrones obtenido en este trabajo.

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

*"At times, I will sing you these sad songs.  
On the edge, we will beat the rhythm together on the drum.  
There, beyond the fog, is the very world I saw in my childhood."*



# Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

## Referencias

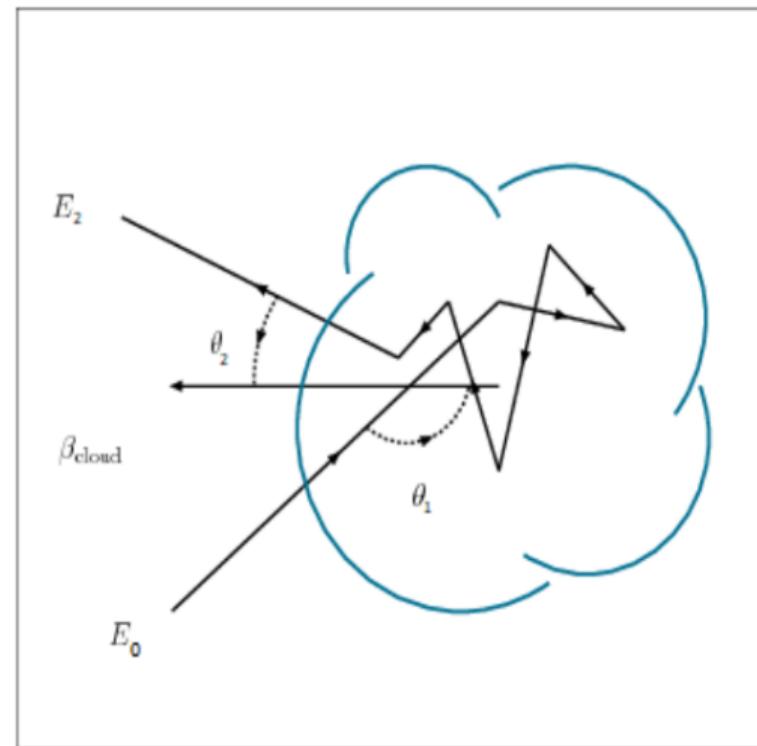
-  Asorey, Hernan, Luis A Núñez y Mauricio Suárez-Durán (2018). "Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain". En: *Space Weather* 16.5, págs. 461-475.
-  Labrenz, Johannes (2014). "Radiation field in low Earth orbit: measurements from MATROSHKA DOSTEL onboard ISS". *Tesis doct.*
-  Lara, A, A Borgazzi y R Caballero-Lopez (2016). "Altitude survey of the galactic cosmic ray flux with a Mini Neutron Monitor". En: *Advances in Space Research* 58.7, págs. 1441-1451.
-  Otaola, Javier A y José F Valdés-Galicia (1992). *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas.* Fondo de Cultura Económica.
-  Sedrati, Rafik y Dallel Bouchachi (2022). "Calculation of the atmospheric cosmic ray flux and dosimetry with EXPACS code". En: *Journal of the Korean Physical Society* 80.9, págs. 940-947.

### Mecanismo de Fermi de segundo orden:

- ▶ Nubes de plasma en movimiento.
- ▶ Puede acelerar partículas mediante la transferencia de energía cinética.
- ▶ La energía se expresa como:

$$E_n = E_0 \left( 1 + \frac{4}{3} \beta^2 \right)^n$$

- ▶  $\beta = v/c$ .



## Mecanismo de Fermi de primer orden:

- ▶ Frentes de choque (e.g. supernovas).
- ▶ La energía se expresa como:

$$E_n = E_0 \left( 1 + \frac{4}{3} \beta \right)^n$$

- ▶ Es el mecanismo más eficiente.
- ▶ Reproduce una ley de potencia con  $\alpha \simeq 2$ .

