



**Universidad Autónoma de Chiapas**

**FACULTAD DE CIENCIAS EN FÍSICA Y MATEMÁTICAS**



Análisis cualitativo para explorar la viabilidad de modelar distribuciones de las componentes de un EAS con procesos de Poisson Mixtos

Tesis que para obtener el grado en Maestría en Ciencias Físicas.

PRESENTA:

Hernán Castellanos Valdés X120004

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Karen Salomé Caballero Mora

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, mayo 2024.



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
14 de Mayo de 2024  
Oficio No. FCFM/0212/24

**Dra. Karen Salomé Caballero Mora**  
Directora de Tesis  
Presente

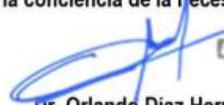
Por este medio me permito informarle que una vez efectuada la revisión de la tesis denominada:

**“Análisis cualitativo para explorar la viabilidad de modelar distribuciones de las componentes de un EAS con procesos de Poisson Mixtos”.**

Ha sido aceptado para sustentar el Examen de Grado de Maestría en Ciencias Físicas del **Lic. Hernán Castellanos Valdés** con matrícula escolar X120004.

Se autoriza su impresión en virtud de cumplir con los requisitos correspondientes.

Atentamente  
“Por la conciencia de la necesidad de servir”



**Dr. Orlando Díaz Hernández**  
Director

C. c. p. Dra. María del Rosario Soler Zapata, Secretaria Académica de la FCFM  
Lic. Juan Manuel Aguilar Gámez, Encargado del Control Escolar Posgrado de la FCFM  
Archivo: ODH/jmag





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA  
COORDINACIÓN DE BIBLIOTECAS UNIVERSITARIAS



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.**

El (la) suscrito (a) Hernán Castellanos Valdés

Autor (a) de la tesis bajo el título de "Análisis cualitativo para explorar la viabilidad de modelar distribuciones de las componentes de un EAS con procesos de Poisson Mixtos"

presentada y aprobada en el año 20 24 como requisito para obtener el título o grado

de Maestría en Ciencias Físicas, autorizo licencia

a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBIUNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 18 días del mes de mayo del año 20 24.

Hernán Castellanos Valdés

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

*Lo que sabemos es una gota de agua;  
Lo que ignoramos es el océano.  
-Sir Isaac Newton-.*

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quisiera agradecer a la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) por permitirme la oportunidad de realizar esta tesis por medio del programa PIGA. También, agradecer a Carlos Ignacio López Bravo y a Claudia Oliva Ichin Gómez por su acompañamiento a lo largo de este tiempo que duro el PIGA, por sus consejos y, sobre todo, su paciencia.

A la Dra. Karen Salomé Caballero Mora, mi asesora de tesis, que a través de todos estos años me ha guiado académicamente (desde el 2014 aproximadamente), y no ha perdido la fe en lo que nosotros, sus estudiantes somos capaces de lograr. A pesar de todos los dolores de cabeza, decepciones u otras emociones negativas que pude haberle causado, se mantuvo siempre pendiente de mí, animándome a por fin terminar esta etapa de mi vida.

Al Dr. Roberto Arceo Reyes, Dr. Oscar Gustavo Morales Olivares, Dr. Marco Antonio Bedolla y al Dr. Hugo de León Hidalgo por tomarse la molestia de leer este trabajo y compartirme sus comentarios y sugerencias, que estas fueron de gran ayuda para poder completar esta tesis, MUCHAS GRACIAS.

Antes de la realización de esta tesis, me encontraba en un punto muy difícil de mi vida, donde afortunadamente (o a gracia Dios, dependiendo de la creencia de la persona que lea esto), comencé a ver la luz al final del túnel. Durante todo ese proceso, que fue muy difícil porque personas vinieron y se fueron de mi vida, tengo que agradecer a mi familia por estar conmigo y para mi en todo ese momento difícil de mi vida. La vida no es fácil, sin embargo, contar con el apoyo incondicional de ciertas personas, te hace poder soportarlo; en especial,

quisiera agradecer a mi madre, Edith Valdés Sánchez, principal pilar y motor que me ha impulsado durante mis años de vida, me ha apoyado en todas mis decisiones, festejando las buenas, y brindándome consuelo en las malas. Ella es una guerrera, que aun cuando lucha con el cáncer, tiene tiempo para ser mi madre, a pesar de los años que transcurran, ella estará para mí con la misma ternura y cariño como cuando era niño.

A mis hermanos, porque muy a su estilo, ellos siempre han procurado por mi bienestar y se han preocupado porque salga adelante. También agradecer a mis dos sobrinos, que aunque estén pequeños y no lo comprendan, no saben el impulso que me dan para seguir adelante y no rendirme.

A CONACyT (ahora conocido como CONAHCyT) por brindarme apoyo económico a través de la beca por PNPc.

Quisiera hacer mención especial, al Dr. Arnulfo Zepeda, que en paz descansa, en vida fue una gran inspiración como persona e investigador, él fue de las personas que me apoyaron durante mi desarrollo en la carrera (junto con la Dra. Karen), y me permitió vivir experiencias que hoy en día aprecio y valoro demasiado.

Y agradecer al pueblo de México, que, sin sus impuestos, muchos de los programas que impulsan la ciencia no serían posibles.

## **DEDICATORIA**

Dedicada a mi familia, principalmente a mi madre.  
Pilar principal que me motivó y ayudó a salir adelante.  
Porque todo lo que hagamos tiene consecuencias, recuerda que  
nosotros caminamos a hombros de gigantes.

# ÍNDICE

1	Resumen.....	11
2	Introducción.....	13
3	Marco Teórico .....	15
3.1	Rayos Cósmicos.....	15
3.2	Antecedentes.....	16
3.3	Espectro de Energía.....	20
3.3.1	Región aplanada.....	21
3.3.2	Región de la rodilla .....	21
3.3.3	Región del tobillo .....	21
3.3.4	Región del empeine .....	22
3.4	Corte GZK .....	23
3.5	Chubascos Atmosféricos Extendidos .....	24
3.5.1	Componente Electromagnética .....	25
3.5.2	Componente Muónica .....	25
3.5.3	Componente Hadrónica .....	26
3.6	Procesos Radiactivos en Chubascos Atmosféricos.....	27
3.6.1	Radiación Bremsstrahlung.....	27
3.6.2	Producción de Pares.....	28
3.6.3	Radiación por Ionización.....	28
3.7	Métodos de detección .....	29
3.8	Composición de los Rayos Cósmicos.....	33
3.8.1	Composición a bajas energías .....	34
3.8.2	Composición a altas energías .....	34
3.9	Modelos Hadrónicos .....	37
3.9.1	Modelos hadrónicos para altas energías.....	38
3.9.2	Modelos hadrónicos para bajas energías.....	40
3.10	CORSIKA.....	42
3.10.1	Consideraciones generales de CORSIKA .....	44
3.11	Modelo de Poisson .....	48
3.12	Distribución de Poisson Mixta .....	51
4	Metodología .....	53

5	Resultados.....	57
6	Conclusión.....	61
	Referencias.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Esquema de un chubasco atmosférico producido por un RC.</i> .....	15
<b>Figura 2</b> <i>Victor Hess en su laboratorio.</i> .....	17
<b>Figura 3</b> <i>Esquema del Observatorio Pierre Auger.</i> .....	19
<b>Figura 4</b> <i>Espectro de energía de los rayos cósmicos.</i> .....	20
<b>Figura 5</b> <i>Radiación Cósmica de Fondo.</i> .....	23
<b>Figura 6</b> <i>Estructura de un chubasco atmosférico con sus tres componentes.</i> .....	25
<b>Figura 7</b> <i>Desarrollo de un EAS y las distintas formas de detección indirecta.</i> .....	30
<b>Figura 8</b> <i>Simulación de un detector Cherenkov en Agua.</i> .....	32
<b>Figura 9</b> <i>Comparación entre elementos en el sistema solar y los rayos cósmicos.</i> .....	35
<b>Figura 10</b> <i>Simulación de un chubasco atmosférico.</i> .....	37
<b>Figura 11</b> <i>Simulaciones en CORSIKA de distintas partículas.</i> .....	43

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Algunas técnicas de detección de rayos cósmicos.....	31
<b>Tabla 2</b> Comparación entre un proceso de Poisson estándar y uno mixto. ....	57
<b>Tabla 3</b> Cotejo entre los procesos de Poisson Mixtos y los chubascos atmosféricos extendidos .	58

## 1 Resumen

Los rayos cósmicos de las más altas energías han sido objeto de estudios muy importantes, ya que entender los procesos involucrados en éstos servirá para comprender mejor el universo que nos rodea. El estudio de los rayos cósmicos ha evolucionado mucho desde que fueron descubiertos por Víctor Hess en el año de 1912, hasta el descubrimiento de que los rayos cósmicos de mayor energía crean una especie de “chubasco” de partículas secundarias por Pierre Auger; éste último descubrimiento nos permite estudiar estos fenómenos altamente energéticos desde la superficie terrestre y a realizar mediciones indirectas. El estudio de los chubascos atmosféricos extendidos (EAS, por sus siglas en inglés) se realiza recopilando la información obtenida por cada una de las partículas que llegan a los detectores, de esta forma sólo tendríamos información de las últimas partículas en ser generadas que alcanzaron a llegar al detector. Es así que, la información proporcionada por el estudio del comportamiento de las partículas a bajas energías se volvió de suma importancia para poder extrapolar estos datos. Actualmente, con la información obtenida con todos los aceleradores de partículas, incluidos el Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN, por sus siglas en inglés), se han podido reconstruir estos chubascos atmosféricos. Así mismo, proporcionan la información para la simulación de los rayos cósmicos en un amplio espectro de energías. Por ejemplo, parte de estos esfuerzos pueden observarse en el programa CORSIKA, software de simulación de chubascos atmosféricos extendidos, que se ha ido actualizando con los descubrimientos surgidos en el área de física de partículas y altas energías. Este software se basó en otros programas especializados en el modelado de ciertas partes del chubasco y CORSIKA se encargó de unirlos y actualizar constantemente la fidelidad de las simulaciones. Lamentablemente, aún hay ciertas particularidades por solucionar en las simulaciones a altas energías. Este trabajo tuvo como objetivo analizar la viabilidad de usar los

procesos de Poisson Mixtos, una herramienta estadística que permite conocer la probabilidad de que ocurran ciertos eventos, dadas ciertas condiciones. A lo largo de esta tesis se encontrará con la información necesaria para comprender qué son los Rayos Cósmicos, los procesos involucrados en el desarrollo de los chubascos atmosféricos extendidos, qué son los métodos de Poisson Mixtos, así como el análisis cualitativo que se hizo comparando las condiciones necesarias que deben cumplir para ser tomados a cuenta para usar dicha herramienta y las características de los chubascos atmosféricos que deben ser considerados en una simulación.

**Palabras clave:** Poisson, Rayos Cósmicos, Altas energías, simulaciones.

## 2 Introducción

El universo es algo que ha cautivado a nuestra especie desde tiempos muy antiguos; desde las observaciones que se realizaron por las primeras civilizaciones, hasta el desarrollo de elaboradas teorías para explicar cómo funciona el cosmos. Los grandes avances tecnológicos han servido para poder observar galaxias y los fenómenos estelares/galácticos más violentos que podamos imaginar. Eventos tan violentos y extremadamente energéticos que aun estando a distancias cosmológicas, es posible observar de cierta manera sus consecuencias.

Los rayos cósmicos, partículas cargadas provenientes de los lugares más recónditos de nuestro universo que constantemente bombardean la atmósfera terrestre, tienen energías que oscilan entre los  $10^9$  y los  $10^{20}$  eV (electronvoltios). Descubiertos por Víctor Hess en 1912, siendo bautizados por Robert Andrews Millikan en 1926 y que en 1938 Pierre Auger descubrió que los de más alta energía se comportaban de una manera distinta y que llamó chubasco atmosférico extendido. El estudio de estos fenómenos ha servido para comprender nuestro universo, en especial los rayos cósmicos de la más alta energía, conocidos como Rayos Cósmicos Ultra Energéticos (UHECR por sus siglas en inglés) con energías a partir de  $10^{18}$  eV, proporcionan información de la interacción de partículas a esas energías.

Comprender el origen y la composición de los UHECR nos puede brindar información de lo que sucede en el universo. Por ejemplo, de los fenómenos más energéticos que los pudieran producir, ya que se cree fuertemente que los UHECR tienen un origen extra galáctico. La forma de estudiar estos UHECR es de forma indirecta, observando el chubasco atmosférico extendido que se origina con la interacción de la partícula primaria con la atmósfera. Este chubasco tiene tres componentes: la hadrónica, la muónica y la electromagnética; siendo la componente muónica una

variable sensible a la composición. No obstante, para energías mayores a  $10^{17}$  eV, se presenta una discrepancia en el número de muones en los eventos entre una simulación y los datos reales.

En este caso se busca analizar si los procesos de Poisson Mixtos son candidatos para ser usados en la simulación de los rayos cósmicos a esa energía y disminuir la discrepancia entre los datos reales y simulados. Con el apoyo de tablas, diagramas y expresiones matemáticas, se observan y se realizan comparaciones para ver si los procesos que se llevan a cabo de los chubascos atmosféricos extendidos y la teoría de los procesos de Poisson Mixtos son compatibles y se verifica la viabilidad de parametrizar las distribuciones de las componentes de los chubascos con dichos procesos.

### 3 Marco Teórico

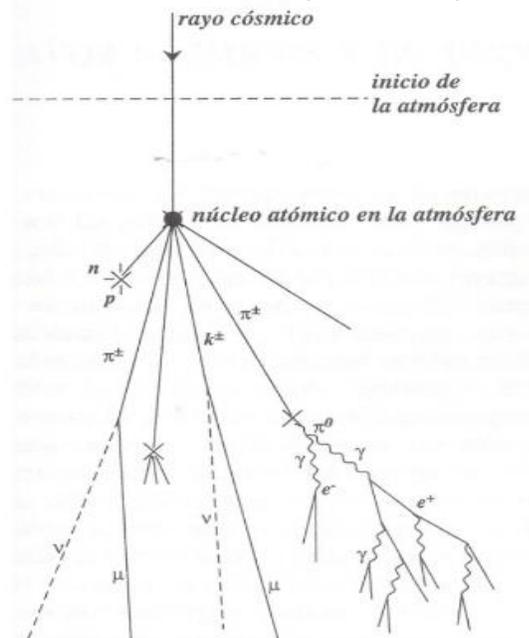
En esta sección, podrás encontrar la información necesaria para comprender los procesos físicos que están involucrados en el estudio que nos interesa, los antecedentes que existieron sobre esos temas; así como la investigación que se realizó sobre la herramienta de los procesos de Poisson Mixtos, el cómo funciona el programa de simulaciones de chubascos atmosféricos extendidos (CORSIKA).

#### 3.1 Rayos Cósmicos

Los Rayos Cósmicos (RC) son partículas que llegan a la Tierra cuyas energías se encuentran entre  $10^9$  y  $10^{20}$  eV (*electrovolts*) provenientes del espacio interestelar que alcanzan la superficie terrestre con una frecuencia aproximada de 100 por  $\frac{m^2}{s}$  para energías de  $10^9$  eV y a razón

**Figura 1**

*Esquema de un chubasco atmosférico producido por un RC.*



*Nota.* Fuente: Imagen tomada de <https://ramanujan25449.blogspot.com/2012/04/ravos-cosmicos.html>

de uno por  $\frac{km^2}{siglo}$  para energías de  $10^{20}$  eV. Se tiene evidencia que la mayoría de partículas con baja energía (menores a  $10^{12}$  eV) se originan dentro de nuestra galaxia. Conforme aumenta la energía de estas, es decir los Rayos Cósmicos Ultra Energéticos (UHECR, por sus siglas en inglés), se reportó que éstos tienen muy probablemente origen extragaláctico (The Pierre Auger Collaboration, A. Aab [PAC], 2017). Cuando un RC interactúa con los átomos de la atmósfera terrestre produce un chubasco atmosférico, produciendo en su mayoría partículas como electrones, fotones y muones (ver Figura 1). Gracias a estas interacciones se pueden medir estos eventos de manera indirecta desde la superficie terrestre.

Se estima que actualmente, 90% de los núcleos de los rayos cósmicos son protones, 9% son partículas  $\alpha$  (núcleos de He) y sólo 1% de otros elementos más pesados. (*National Aeronautics and Space Administration*, 2017).

### 3.2 Antecedentes

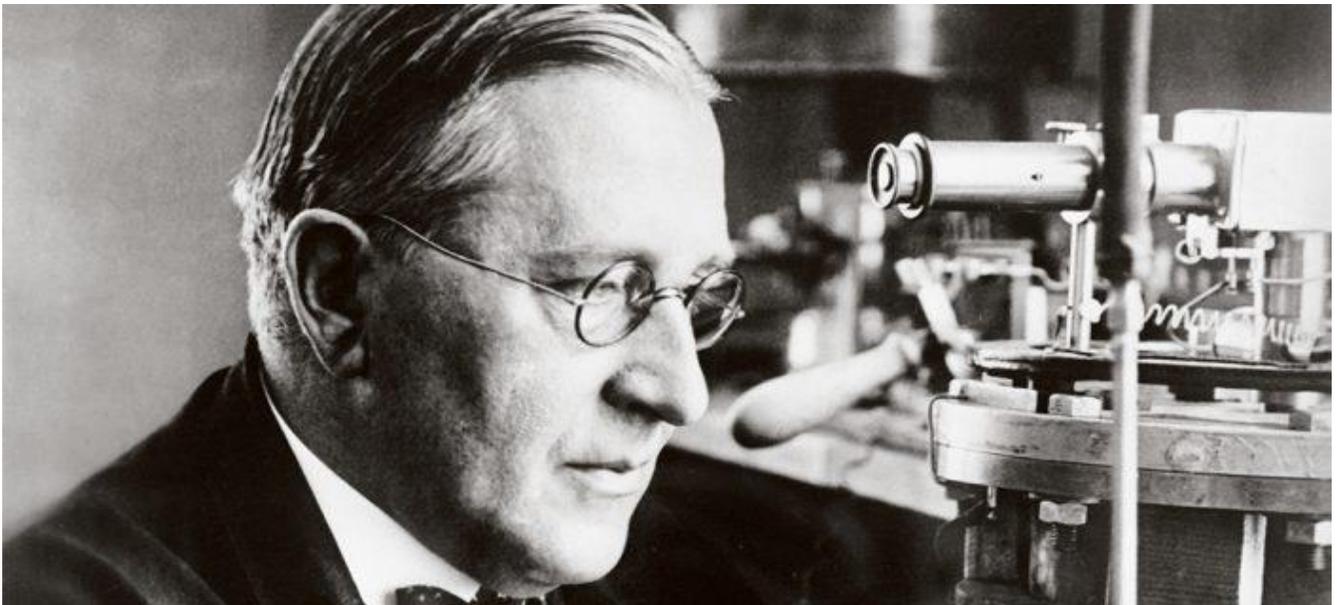
Para el descubrimiento de los RC podemos remontarnos a los años 1900. Charles Wilson observó que los electroscopios perdían energía sin una razón aparente (Clay, y Dawson, 1997). Para 1910, usando un electrómetro, T. Wulf midió la diferencia de radiación entre la parte superior e inferior de la Torre Eiffel. Éste se percató que la radiación medida al nivel de la tierra iba aumentando conforme este subía, contrario a lo que él esperaba, ya que se creía que la radiación que estaba siendo medida en la superficie provenía de la superficie terrestre. Víctor Hess (ver Figura 2), en 1912, realizó distintas mediciones a diferentes alturas mediante vuelos en globos aeroestáticos; llegando hasta los 5000 m, Hess se percató que conforme más se elevaba, la radiación era incluso mayor, descartando la radiación proveniente de la tierra, ya que ésta afecta

hasta aproximadamente 2000 m de altura. Con la información recabada, él infirió que el origen de esta radiación no podía ser otro más que del espacio exterior. A Víctor Hess se le considera el descubridor de los RC (Hess, 1912).

Entre los años 1923 y 1926; R. A. Millikan, físico estadounidense, y sus colaboradores, realizaron mediciones a distintas alturas, realizando algunas incluso debajo de un lago, todo esto para corroborar el origen de esta radiación que, en efecto, es extraterrestre. Millikan bautizó a esta radiación como *Rayo Cósmico*. En 1929 se registra un evento de un RC en una cámara de niebla por V. Skobeltsyn. En 1932 se descubre el positrón por Millikan y Anderson, y en 1937, se descubre el muón por Seth Neddermayer y Carl Anderson. Con estos descubrimientos se da origen a la física de partículas.

## Figura 2

*Victor Hess en su laboratorio.*



*Nota.* Victor Hess en su laboratorio en la Universidad de Fordham en los años 40. Fuente: Imagen tomada de <https://news.fordham.edu/fordham-magazine/cosmic-connections-on-the-life-and-legacy-of-nobel-laureate-victor-hess/>

En 1938, Pierre Auger realizó mediciones de rayos cósmicos en los Alpes, y observó que los detectores separados presentaban concordancias al momento de detectar partículas: las medían al mismo tiempo aunque la distancia de separación entre los detectores fuera muy grande. Auger pudo concluir que existían “chubascos” de partículas secundarias producidas por la interacción de partículas primarias, y éstas deberían tener energías de  $10^{15}$  eV para ser capaces de producir estos chubascos atmosféricos extendidos (Auger, et al., 1939). Unos años más tarde, por medio de fotografías de emulsión a grandes alturas, se logró determinar que las partículas primarias consistían principalmente en protones, partículas  $\alpha$  (núcleos de He) y otros elementos más pesados. Entre los años de 1954 a 1957 se realizaron investigaciones donde se logró detectar RC que producían chubascos cuyo número de partículas eran de  $7 \times 10^8$  partículas, con energías entre  $3 \times 10^{15}$  a  $10^{18}$  eV (Clark, et al., 1961). Para el año de 1960, en *Volcano Ranch*, Nuevo México, EE. UU., se construyó un arreglo de 19 centelladores, separados entre sí 884 m, cubriendo un área de  $3.3 \text{ km}^2$ . Aquí, en 1962, John Linsley midió los primeros rayos cósmicos con energía de alrededor de  $10^{20}$  eV. A partir de este momento, detectores con áreas mayores fueron construidos. A continuación mencionamos algunos:

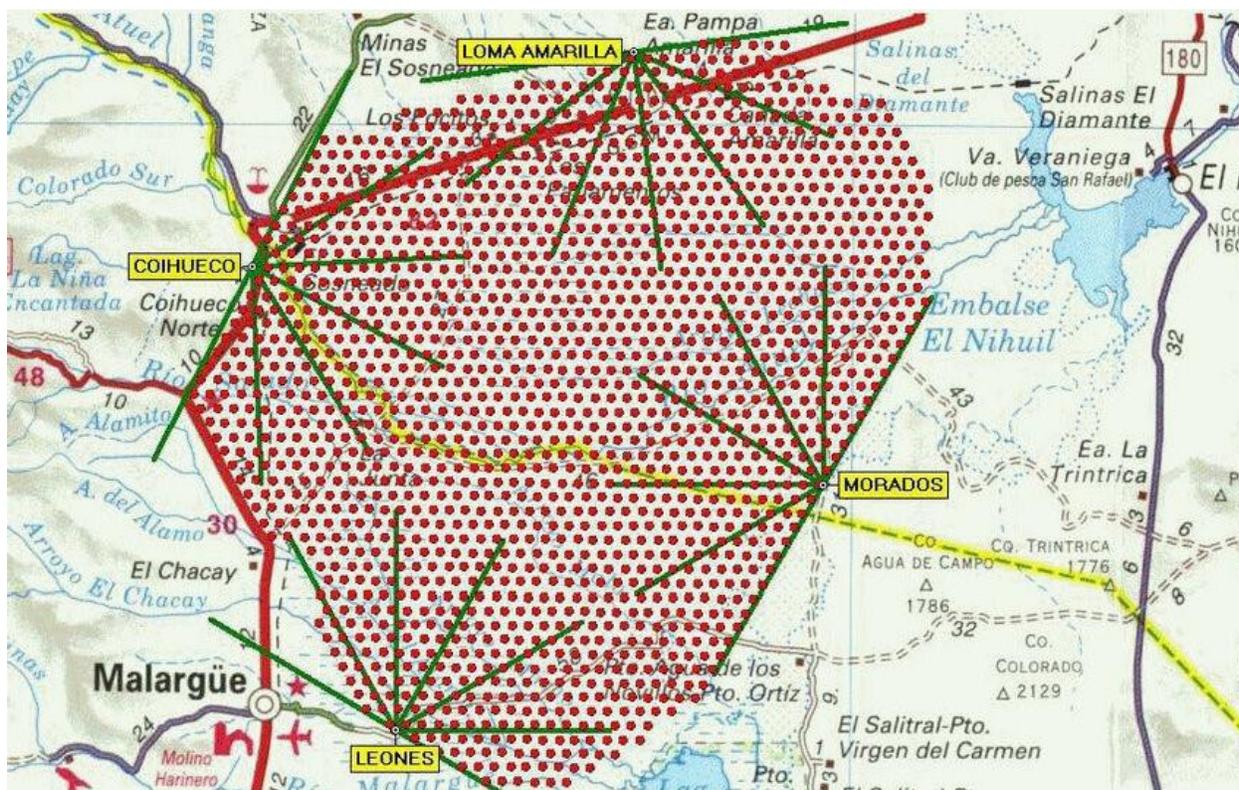
- Yakutsk, Rusia. Utilizó detectores tipo centellador, cherenkov en aire y contadores de muones; cubriendo un área de  $18 \text{ km}^2$ .
- AGASA, Japón. Detectores tipo centellador y contadores de muones; cubriendo un área de  $100 \text{ km}^2$ .

En 1976, se implementaron detectores de fluorescencia rudimentarios en *Volcano Ranch*, dando paso a más adelante al experimento *Fly's Eye*, que fue construido en los EE. UU., donde se usaron detectores de fluorescencia. *Fly's Eye* observó uno de los eventos más energéticos, con una energía de  $3 \times 10^{20}$  eV en 1991; y en 1994, los experimentos AGASA y Yakutsk realizaron

mediciones de eventos cuyas energías fueron de  $2 \times 10^{20}$  eV (Clay, 1997; Rocha, 1996; Otaola y Galicia, 1995).

En 1995, un grupo de investigadores planeó la construcción de un nuevo observatorio que combinaba las técnicas de detección de superficie y de fluorescencia, sugiriendo construir una red bastante extensa. Conocido como el Proyecto Pierre Auger (ver Figura 3); este observatorio fue diseñado para observar los RC de las más altas energías (el detector de superficie del observatorio cubre un área de  $3,000 \text{ km}^2$ ), inaugurado el 14 de noviembre de 2008 en Malargüe, Argentina.

**Figura 3** Esquema del Observatorio Pierre Auger.



Nota. Esquema del Observatorio Pierre Auger, donde podemos observar el arreglo que corresponde al detector de superficie y a los telescopios de fluorescencia. Fuente: Caballero-Mora, Nellen y Valdés-Galicia (2008)

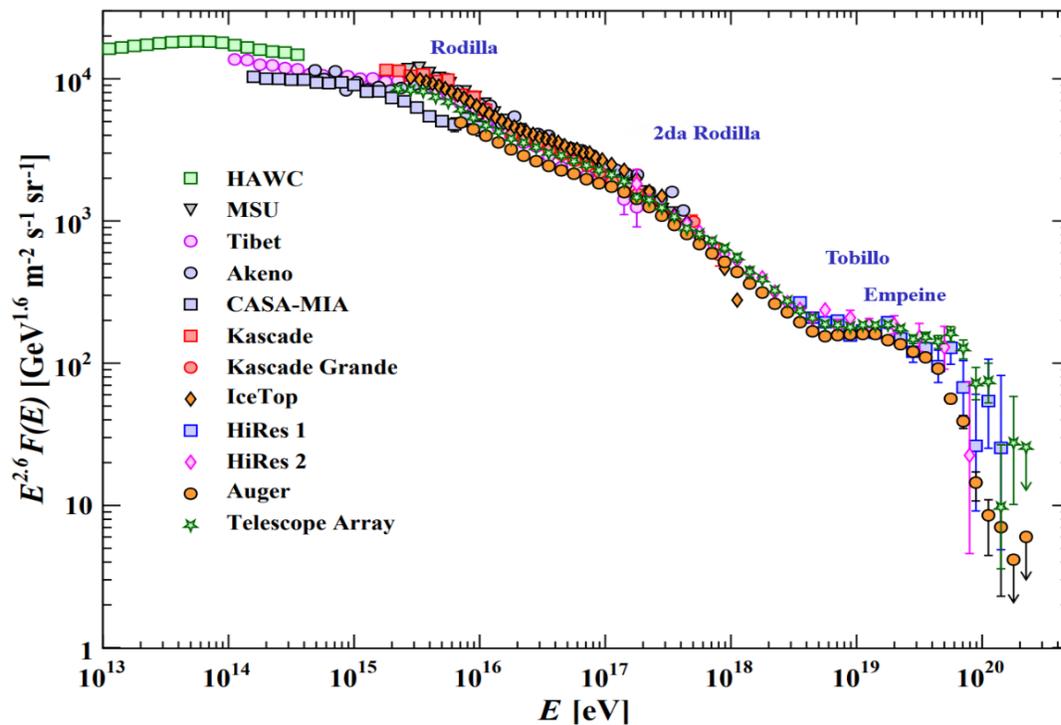
### 3.3 Espectro de Energía

El espectro de energía de los RC se obtiene al graficar el flujo de llegada respecto a la energía. Éste se extiende a RC con energías de unos cuantos GeV, hasta el rango de  $10^{20}$  eV, que estos últimos tienen energías mayores a las que se puedan obtener actualmente en cualquier acelerador de partículas en la Tierra. La Figura 4 nos muestra el flujo de los RC en función de la energía del RC primario por nucleón. La intensidad de flujo de los RC sigue una ley de potencias:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

**Figura 4**

*Espectro de energía de los rayos cósmicos.*



Nota. Fuente: Imagen modificada de Particle Data Group [PGD] (2022)

<https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-cosmic-rays.pdf> .

con el índice espectral ( $\gamma$ ) generalmente entre 2.7 y 3.3 (Pimienta y De Angeliss, 2018). El espectro de energía cuenta con tres zonas muy importantes.

### **3.3.1 Región aplanada**

Zona que se encuentra entre  $10^9$  y  $10^{15}$  eV. En esta región el índice espectral es de  $\approx 2.7$ . El flujo en esta zona es muy abundante, los RC se pueden detectar de forma directa con experimentos en globos, satélites, etc., (Workman et al., 2022).

### **3.3.2 Región de la rodilla**

Esta zona es observada a partir de energías de aproximadamente de  $10^{15}$  a  $10^{17}$  eV. En esta zona el índice espectral varía de 2.7 a 3. Se encontró que el cambio de ley de potencias es debido a una disminución progresiva de elementos individuales con masa menor a la del carbón. Se cree que estos RC deben provenir del exterior de nuestra galaxia, originados por fenómenos muy energéticos como remanentes de supernovas (Longair, 1981). Hay una región llamada «segunda rodilla», que se encuentra a una energía de aproximadamente  $10^{17}$  eV, teniendo un índice espectral entre 3.1 y 3.2 (Pimienta y De Angeliss, 2018).

### **3.3.3 Región del tobillo**

La región del tobillo corresponde a energías de aproximadamente  $10^{18}$  eV o superiores; aquí es donde el índice espectral vuelve a ser de 2.7. A partir de estas energías pasan a ser UHECR. Para detectarlos se necesita cubrir un área muy extensa ya que su flujo equivale a una partícula por  $\text{km}^2$  por siglo (Karpert y Tinyakov, 2014).

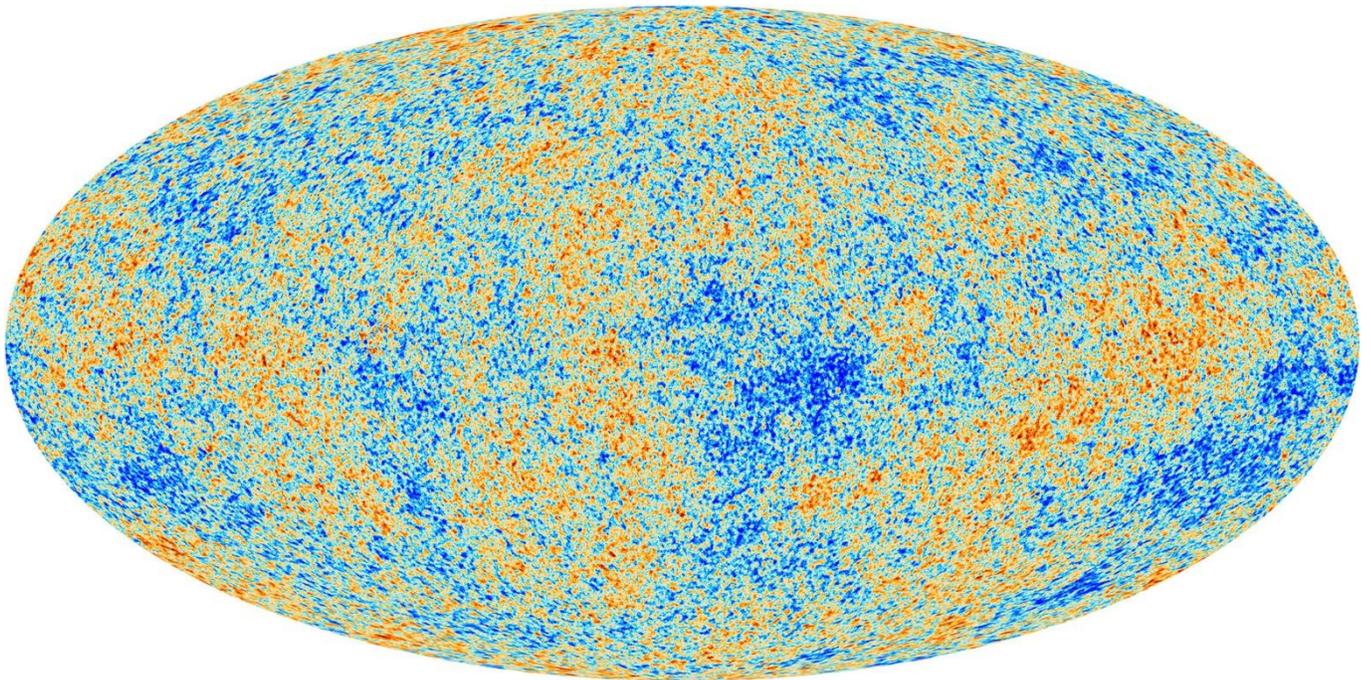
### 3.3.4 *Región del empeine*

Esta zona fue recientemente reportada por el observatorio Pierre Auger (Deligny, 2023), y a su vez por el Telescope Array (Ivanov, D., 2021). Se observó un ligero aumento en el flujo de los RC a partir de energías entre  $10^{19}$  a  $10^{19.2}$  eV. Región donde predominan protones y núcleos de Helio (The Pierre Auger Collaboration, Aab, A., [PAC], 2020). Esta región llama la atención, porque no sigue la tendencia de la región del tobillo, ya que existe una pequeña rampa que crece en esa zona, que podemos observar en la Figura 4 (Workman et al., 2022).

### 3.4 Corte GZK

El corte GZK fue predicho por Kenneth Greissen, Vadim Kuz'min y Georgiy Zatsepin (Zatsepin y Kuz'min, 1966). Se basaron en las interacciones que tienen los RC con los fotones de la radiación cósmica de fondo (CMB, por sus siglas en inglés), como se observa en la figura 5. El corte GZK nos dice que, a partir de cierto nivel de energía, los RC interactúan con esta radiación

**Figura 5** Radiación Cósmica de Fondo.



*Nota.* Mapa de la radiación cósmica de fondo. Créditos a *ESA and Planck Collaboration*  
[https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Spain/Mision\\_Planck\\_Presentacion\\_de\\_la\\_imagen\\_mas\\_detallada\\_de\\_la\\_historia\\_de\\_la\\_radiacion\\_cosmica\\_de\\_fondo\\_los\\_vestigios\\_del\\_Big\\_Bang](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Mision_Planck_Presentacion_de_la_imagen_mas_detallada_de_la_historia_de_la_radiacion_cosmica_de_fondo_los_vestigios_del_Big_Bang)

de fondo provocando una pérdida de energía producida por la producción de fotopiones por la interacción de protones con la CMB. Debido a esto, alrededor de  $10^{19}$  eV se espera un corte en el flujo de RC, observaciones del observatorio Pierre Auger favorecen esta teoría (Workman, et al., 2022).

### 3.5 Chubascos Atmosféricos Extendidos

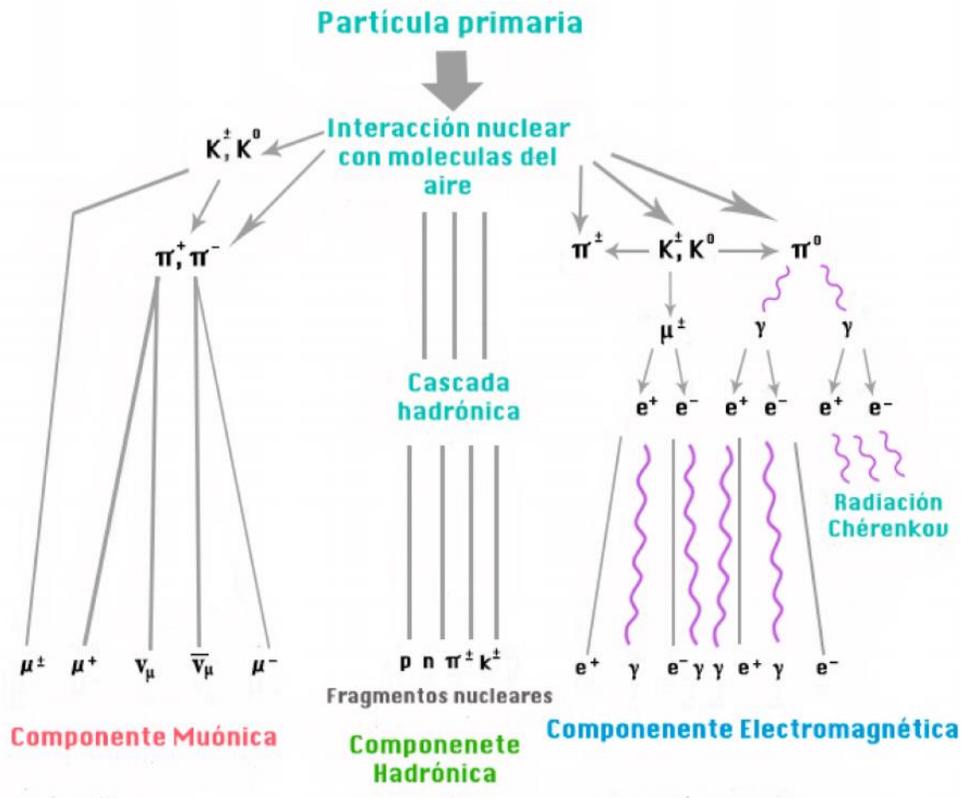
Los chubascos atmosféricos extendidos (EAS, por sus siglas en inglés), son producidos por la interacción que tienen los RC con las partículas que se encuentran en la atmósfera terrestre (Pimienta y De Angeliss, 2018). Cuando sucede esta colisión, la partícula que llega de fuera (que llamaremos partícula primaria) pierde parte de su energía inicial, ocasionando la creación de partículas secundarias. Estas a su vez, interaccionan nuevamente con otras partículas de la atmósfera produciendo así, nuevos chubascos; continuando así hasta llegar a un desgaste significativo de la energía de cada partícula (ver Fig. 6). Un EAS está conformado por tres componentes: Electromagnética, Muónica y Hadrónica.

### 3.5.1 Componente Electromagnética

Compuesta por fotones ( $\gamma$ ), electrones ( $e^-$ ) y positrones ( $e^+$ ) originados por el decaimiento de piones neutros ( $\pi^0$ ) y partículas  $\eta$ . Es una componente que se desarrolla rápidamente por medio de la radiación de frenado (*Bremsstrahlung*), donde el electrón sufre una desaceleración y es desviado de su trayectoria original, en consecuencia, su momento y energía se ve disminuido emitiendo un fotón en la dirección original de su momento.

**Figura 6**

*Estructura de un chubasco atmosférico con sus tres componentes.*



*Nota.* Componentes en las que se descompone un chubasco atmosférico. *Nota.* Fuente: <http://www.iteda.cnea.gov.ar/?q=node/28/>

### 3.5.2 Componente Muónica

Esta componente es la que contiene a los muones ( $\mu$ ), generada por el decaimiento de kaones ( $K^\pm$ ) y piones ( $\pi^\pm$ ) de bajas energías. La mayoría de los muones son producidos muy alto,

en la atmosfera (usualmente a unos 15 km). Representa aproximadamente el 10% de las partículas totales del chubasco. Debido a que las interacciones inelásticas hadrónicas de los muones son muy extrañas, solo pueden decaer (por debajo de los 10 GeV) de la forma:  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ , o éstos pierden su energía vía *bremsstrahlung*, producción de pares electrón-positrón y por ionización. Por debajo de la energía crítica ( $E_C \simeq 3.6 \text{ TeV}$ ), la energía perdida por ionización del medio toma relevancia. Los muones que no decayeron pierden justo una porción muy pequeña de su energía en la atmósfera ( $\sim 1.8 \text{ GeV}$ ), es por esto, que el flujo de éstos es atenuado muy poco comparado con los electrones y positrones, que a una altitud por debajo de los 15 km son rápidamente absorbidos en la atmósfera (Tcaciuc, 2006, p. 40). Los muones representan una herramienta muy importante en el estudio de los EAS. Debido a su baja interacción, son muy penetrantes y pueden ser detectados muy profundo en la atmósfera o incluso bajo tierra; debido a esto, esta es conocida como la componente “dura” del EAS (Tcaciuc, 2006, p. 41).

### 3.5.3 *Componente Hadrónica*

Contiene los nucleones y otros hadrones de alta energía, suele mantenerse cerca del eje del chubasco y la mayor parte de la energía es transferida a otras componentes. Es la componente más pequeña respecto al porcentaje de partículas, con apenas aproximadamente 1%; sin embargo, las componentes electromagnética y muónica del EAS son productos de esta componente al desintegrarse las partículas resultantes de las interacciones hadrónicas.

### 3.6 Procesos Radiactivos en Chubascos Atmosféricos

Existen diversos fenómenos físicos que ocurren durante el desarrollo de un chubasco atmosférico extendido, dichos fenómenos están estrechamente relacionados con las tres componentes de la composición de estos. Algunos de estos procesos son:

- Radiación *Bremsstrahlung*.
- Producción de Pares.
- Ionización.
- Dispersión Compton.

Comprender la física que hay detrás de cada uno de estos procesos se vuelve relevante para poder comprender la forma en que evolucionan los chubascos atmosféricos, comprender la física detrás de ellos que complemente el estudio de la composición.

#### 3.6.1 Radiación *Bremsstrahlung*

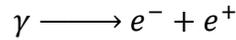
También conocida como radiación de frenado (*Bremsstrahlung* significa de hecho eso, en alemán). Ocurre cuando las partículas cargadas interactúan con los núcleos atómicos de la atmósfera y su trayectoria se ve desviada. Al ser desviada, la partícula cargada “frena” un poco, lo que haría que su momento cambie y esa diferencia de energía la emita en forma de un fotón (Stanev, 2009). La pérdida de la energía obedece la siguiente ecuación:

$$\frac{dE}{dX} = -\frac{N}{A} \int_0^{E-mc^2} \sigma_{br}(E, k) dk$$

Donde  $E$  representa la energía de la partícula cargada,  $k$  es la energía del fotón que es emitido,  $N$  y  $A$  representan el número de partículas y su número de masa respectivamente y  $\sigma_{br}$  representa la sección transversal de los electrones (Stanev, 2009).

### 3.6.2 Producción de Pares

La producción de pares es un proceso parecido a la radiación *Bremsstrahlung*, se da cuando un fotón, al pasar cerca del campo de un núcleo atómico se descompone en un par electrón-positrón ( $e^-e^+$ ), ya que la masa en reposo del electrón es de 0.511 MeV, la energía mínima para que un fotón pueda provocar una producción de pares es de 1.02 MeV (Stanev, 2009). Esta interacción la podemos ver expresada en la siguiente ecuación:



Este es uno de los procesos más importantes en el desarrollo de un chubasco atmosférico, ya que es uno de los procesos que más ocurren y su contribución al conteo final de partículas es muy relevante (Stanev, 2009).

### 3.6.3 Radiación por Ionización

Se da cuando una partícula cargada muy energética atraviesa algún medio; como en este caso de los chubascos atmosféricos, la atmósfera es un medio gaseoso. Dicha partícula, al interactuar con los átomos del medio pierde energía y a su vez arranca electrones de los átomos, por lo tanto ioniza a los átomos con los que interacciona. La ecuación de la energía perdida es la siguiente:

$$\frac{dE}{dX} = -\frac{N_A Z}{A} \frac{2\pi(z e^2)^2}{M v^2} \left[ \ln \frac{2M v^2 \gamma^2 W}{I^2} - 2\beta^2 \right]$$

Donde  $I$  representa el potencial medio de ionización,  $W$  es la máxima energía de pérdida,  $z$  es el número atómico,  $A$  es el número de masa atómica,  $N_A$  el número de Avogrado,  $ze$  es la carga de la partícula,  $v$  su velocidad y  $M$  su masa.

### **3.7 Métodos de detección**

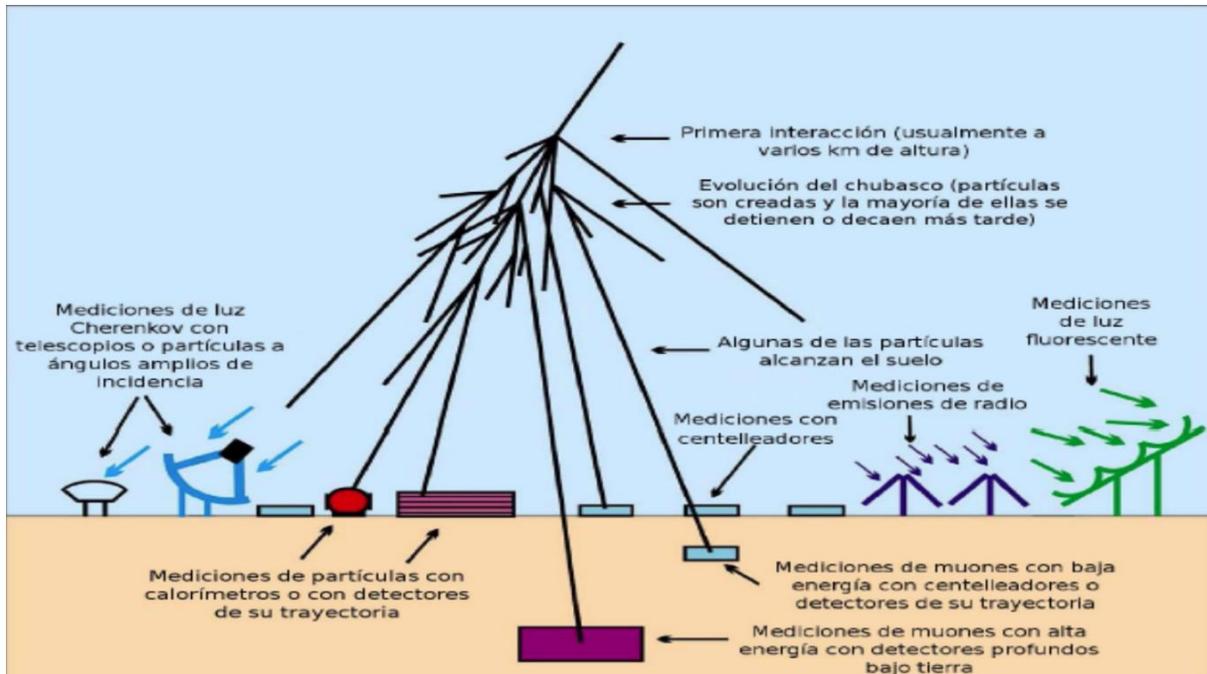
Desde su descubrimiento, los rayos cósmicos han ido sumando técnicas nuevas en la forma en la que estos son detectados. Podemos decir que hay dos formas de detectarlos, de forma directa o de forma indirecta. Cada forma tiene ciertas particularidades que nos permiten realizar las mediciones a las necesidades que tenga el experimento (ver Tabla 1).

Para bajas energías, se usan espectrómetros, calorímetros, y detectores de transición de radiación los cuales son colocados en satélites o globos meteorológicos. También, se tiene el experimento LHC, un acelerador de partículas con el cual ya podemos estudiar las interacciones que tendrían las partículas con la atmósfera, con energías de hasta 6.8 TeV.

Para energías más altas, se usa la medición indirecta; la cuál consiste que, a nivel del suelo,

### Figura 7

*Desarrollo de un EAS y las distintas formas de detección indirecta.*



*Nota.* Imagen sustraída de Estupiñán (2015).

medimos las partículas secundarias generadas por el EAS (ver figura 7), con esta información se puede reconstruir el evento para saber el espectro de energía y la composición de la partícula primaria que originó el EAS.

**Tabla 1***Algunas técnicas de detección de rayos cósmicos.*

Tipo	Técnica	Rango de Energía
Directa	Espectrómetro	1 – 100 GeV
Directa	Calorímetro	30 GeV – 500 TeV
Directa	Cámaras de emulsión	100 – 500 TeV
Indirecta	Calorímetro de hadrones	500 GeV – 1 PeV
Indirecta	Espectrómetro de muones	100 GeV – 10 TeV
Indirecta	Detectores de centelleo	100 TeV – 10 PeV
Indirecta	Cámaras de emulsión	5 – 300 TeV
Indirecta	Telescopios de Fluorescencia	$10^{17.2}$ eV
Indirecta	Tanques de agua Cherenkov	100 PeV – 1 EeV
Indirecta	Cherenkov atmosféricos	100 PeV – 100 EeV

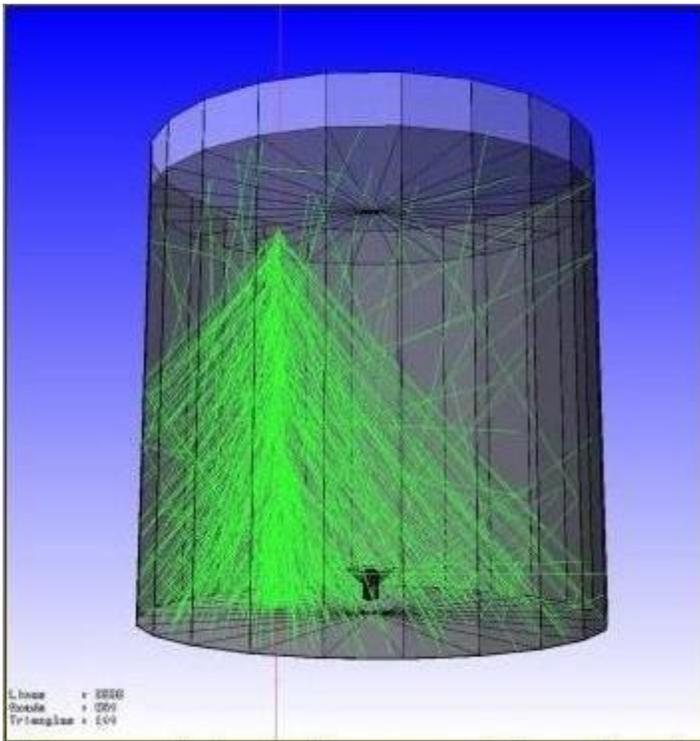
*Nota.* En esta tabla encontramos algunas técnicas usadas en algunos observatorios de rayos cósmicos, con sus respectivos rangos de energía. Tabla sustraída de Tavera (2010).

La principal desventaja de esta forma de detección es que no podemos saber la composición de la partícula primaria de forma directa, si no que se utilizan modelos de interacción hadrónica que permiten reconstruir el evento, estos modelos se calibran usando datos de los aceleradores de partículas (Sokolsky, 2020). Algunas de las formas de los instrumentos para detección indirecta son los siguientes:

- Detectores Cherenkov en agua: Este tipo de detectores utilizan el fenómeno de radiación cherenkov. La radiación cherenkov es un destello de luz que se emite cuando la partícula viaja más rápido que la velocidad de la luz en ese medio. El Observatorio Pierre Auger, en Argentina, y el High Altitude Water Cherenkov (HAWC), en México, utilizan esta técnica de detección, ver Figura 8 (Pierre Auger Observatory, 2024; High Altitude Water Cherenkov, 2024).

### Figura 8

*Simulación de un detector Cherenkov en Agua.*



*Nota.* Un tanque de 5 metros de diámetro que es atravesado por el chubasco producido por un fotón, en esta simulación se redujo el número de fotones en un factor de 50 para su correcta visualización. Fuente: <https://www.inaoep.mx/hawc/>

- Detectores de centelleo: Esta técnica emplea placas de ciertos materiales que, al entrar en contacto con la radiación ionizante de las partículas, emiten un destello de

luz. Un ejemplo de uso de este tipo de detectores es el Proyecto Escaramujo, en donde la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la UNACH tiene participación activa. (<https://es.escaramujo.net> ).

### 3.8 Composición de los Rayos Cósmicos

El estudio de la composición de los rayos cósmicos es una de las áreas más importantes de esta rama de la física; los rayos cósmicos, la ser partículas cargadas, podrían ser de cualquier elemento estable encontrado en la tabla periódica, aunque no necesariamente. Podemos hacer una pequeña clasificación de los rayos cósmicos dependiendo de su origen:

- Rayos cósmicos solares: Son los rayos cósmicos de menor energía detectados, como su nombre lo indica, tienen su origen dentro de nuestro sistema solar. Son eventos transitorios.
- Rayos cósmicos galácticos: Estos ya tienen energías que abarcan el espectro entre 100 MeV hasta aproximadamente  $10^{15}$  eV. Estos tienen su origen dentro de nuestra misma galaxia.
- Rayos cósmicos extra galácticos: En la actualidad, existe la teoría de que los rayos cósmicos de las más altas energías son de esta categoría. Estos se originan debido a procesos muy energéticos fuera de nuestra galaxia.

Con esto, damos paso a hablar de la composición de los rayos cósmicos a bajas y a muy altas energías.

### ***3.8.1 Composición a bajas energías***

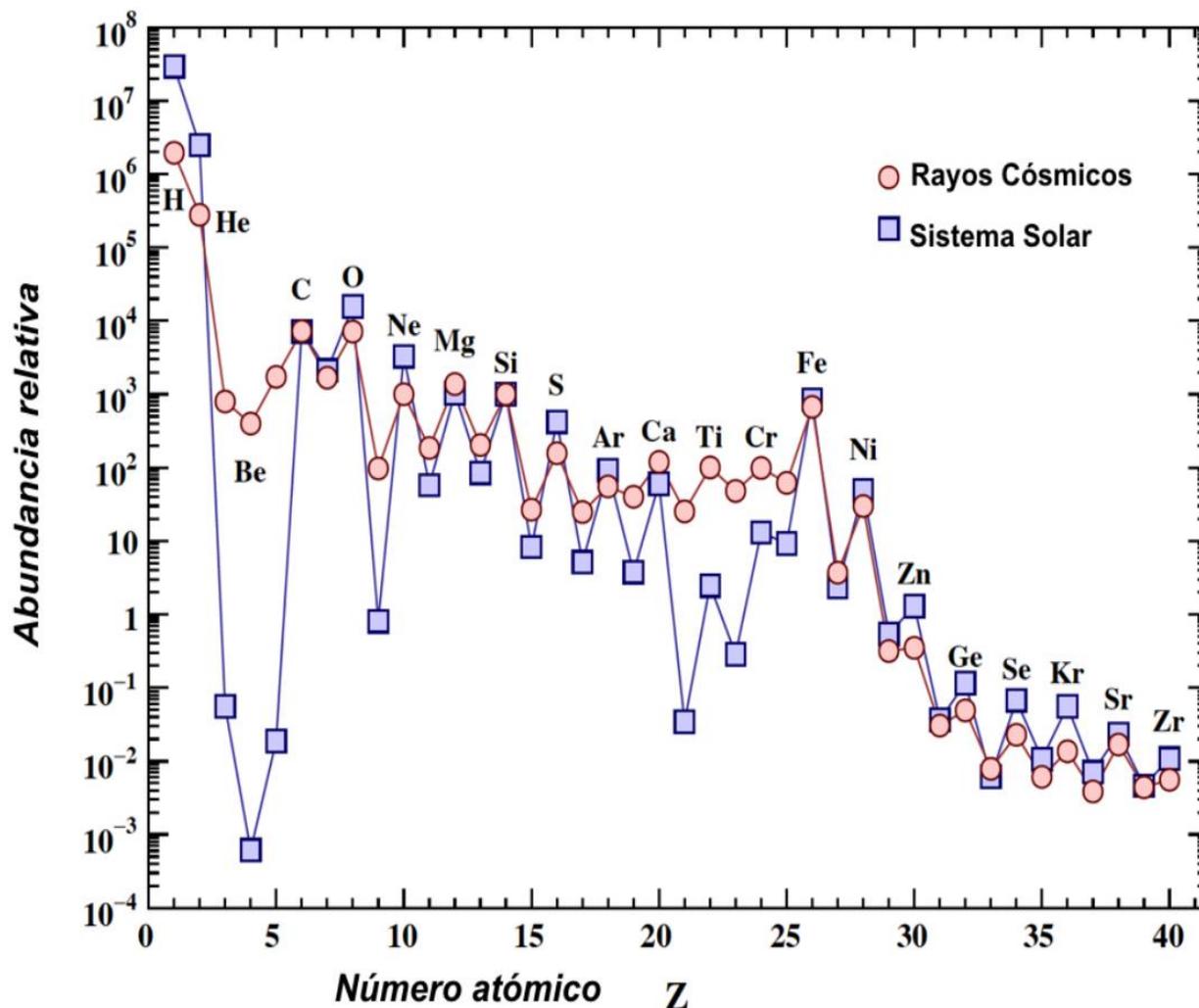
En la figura 9 podemos observar una comparación entre la abundancia relativa de los rayos cósmicos con energías menores a  $10^{12}$  eV (rayos cósmicos de bajas energías) y los elementos que abundan en nuestro sistema solar. Esta gráfica se obtuvo con los datos obtenidos por los experimentos AMS-02, ACE/CRIS y TIGER/SuperTIGER (López, 2020). De esa información, hay dos cosas de las cuales podemos inferir: los núcleos con  $Z > 1$  son mucho más abundantes si los comparamos con los protones (núcleos de hidrógeno). Se piensa que este fenómeno se debe a que los procesos dentro del sol sintetizan Helio a partir de Hidrógeno, siendo este uno de los elementos más difíciles de ionizar (López, 2020; Castellanos-Valdés, 2018; Masip, 2015). Con esto, encontrar mecanismos dentro del sistema solar capaces de acelerar el hidrógeno se vuelve muy complicado. Lo segundo que podemos inferir es que, al observar núcleos más pesados como el Berilio, Litio, Boro, Titanio, Escandio, Vanadio, Cromo y Manganeso son más abundantes en la radiación cósmica que en los materiales que podemos encontrar en nuestro sistema solar, esto es debido a que estos elementos son resultado de las interacciones que tienen los elementos más pesados, donde decaen a elementos más ligeros (Masip, 2015).

### ***3.8.2 Composición a altas energías***

Algunas de las preguntas más prominentes en el campo de la física de los rayos cósmicos pertenecen al origen y los mecanismos de aceleración de los rayos cósmicos más energéticos. Estudiando el flujo de los rayos cósmicos, y sus variaciones con la energía, así como la composición de la partícula primaria es imperativo para comprender plenamente estas cuestiones

**Figura 9**

*Comparación entre elementos en el sistema solar y los rayos cósmicos.*



*Nota.* Gráfica que muestra la abundancia de elementos de nuestro sistema solar y la abundancia de elementos en la radiación cósmica. Imagen sustraída de López (2020)

que aún desconocemos (Flaggs, Coleman y Schröder, 2023). El estudio de la composición de los RC una tarea que se lleva realizando desde su descubrimiento, una tarea esencial para comprender su naturaleza, origen y propagación. Para los RC de bajas energías ( $10^{14}$  eV), su composición química es conocida, ya que las mediciones directas son posibles, gracias a satélites que se encuentran orbitando a la Tierra. Para RC por encima de esas energías, es decir los UHECR, hacer

una medición directa se vuelve una misión imposible debido al enorme tiempo que tomaría el detectar un UHECR en superficies muy pequeñas (Tavera, 2010). Sin embargo, es posible realizar mediciones de forma indirecta con experimentos que tengan mayor tamaño, pero al mismo tiempo requieren una mayor inversión de capital.

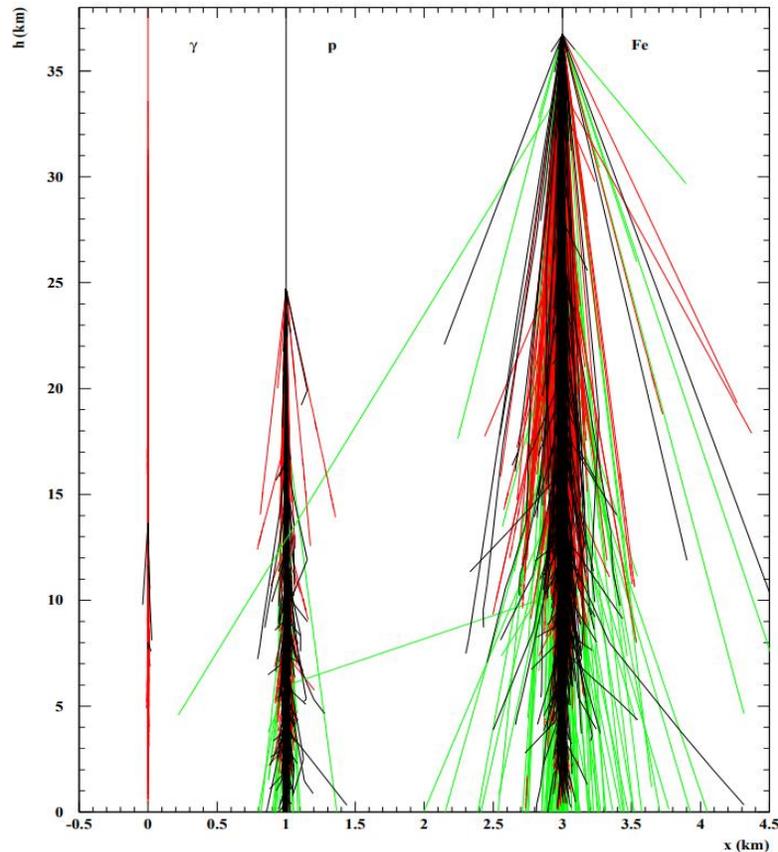
Como los UHECR se miden de forma indirecta, es un desafío medir las contribuciones relativas de diferentes núcleos y así determinar la composición de la partícula primaria como una función de la energía. Una variable sensible a la composición es  $X_{\max}$  (profundidad del máximo del chubasco), que nos dice a qué altura respecto al suelo se produce el mayor número de partículas del chubasco. Los chubascos producidos por los protones, a diferencia de los producidos por núcleos más pesados, penetran más profundamente en la atmósfera; esto significa que, para núcleos pesados, la interacción con la atmósfera se produce a una mayor altura (ver Figura 10). Esto indica que el valor de  $X_{\max}$  para dichos núcleos se dará a una mayor altura, a diferencia de los protones. También el sondeo de la componente muónica ( $N_{\mu}$ ) es una variable observable sensible a la composición del chubasco para energías dadas. Específicamente, estas dos últimas variables están relacionadas a la composición del RC como  $\langle X_{\max} \rangle \propto -\ln(A)$  y  $\langle N_{\mu} \rangle \propto A^{\approx 0.15}$  donde A es el número de masa del núcleo primario (Matthews, 2005).

### 3.9 Modelos Hadrónicos

Los modelos consideran las interacciones hadrónicas y procesos Monte Carlo (MC) para el análisis de los RC. Para poder estudiar los RC, se ha tenido que tomar en cuenta los datos obtenidos por los aceleradores de partículas, como el LHC, que operan acelerando las partículas y haciendo que colisionen con energías de hasta  $13 \times 10^{12}$  eV (<https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>). Donde los datos de éstos han

**Figura 10**

*Simulación de un chubasco atmosférico.*



*Nota.* Simulación de los chubascos producidos por un fotón, un protón y un núcleo de hierro, con energía de 100 TeV. El color rojo representa a los fotones, negro a los hadrones y verde a los muones. Imagen sustraída de Tcaciuc (2006).

ayudado a reducir la incertidumbre de los modelos. Para los UHECR se extrapolan los datos obtenidos por los aceleradores a las enormes energías que tienen los rayos cósmicos. La forma en la que estos modelos trabajan es que se busca que puedan transferir parte de la energía de un proyectil de alta velocidad a partículas con una menor velocidad, también se busca que, conservando los números cuánticos, sea capaz de producir nuevas partículas. Esto último se puede traducir como que conserve la energía total del sistema y que sean consistentes con el modelo estándar de partículas.

### **3.9.1 Modelos hadrónicos para altas energías**

Algunos de los modelos hadrónicos para altas energías son (Pierog, 2017):

- **VENUS:** Very Energetic Nuclear Scattering, es un código principalmente diseñado para tratar las dispersiones por nucleón - nucleón, nucleón - núcleo, y núcleo - núcleo a energías ultra relativistas. Esencialmente está basado en la teoría de Gribov-Regge (Heck et al., 1998).
- **QGSJet (01/II-03, II-04):** Quark Gluon String model with Jets, desarrollado por S. Ostapchenko. Este modelo es una extensión del modelo Quark Gluon String (QGS, por sus siglas en inglés), el cuál describe interacciones hadrónicas basándose en el intercambio de pomerones supercríticos.
- **DPMJET:** Dual Parton Model with Jets), el código para éste considera el Modelo de Partones Dobles (DPM, por sus siglas en inglés) junto con pequeñas cadenas, así como múltiples jets. El DPM actualmente es uno de los modelos fundamentales, conteniendo las bases de muchas de las implementaciones de los algoritmos que se emplean en los métodos Monte Carlo para las simulaciones de los chubascos

atmosféricos. La versión III de DPMJET es capaz de modelar eventos con energías entre 1 GeV hasta las energías en las que se encuentran los UHECR.

- **EPOS** (1.99/LHC), Utilizado para simular interacciones de UHECR con la atmósfera, desarrollado por Tanguy Pierog y Klaus Werner. Este modelo toma como base los datos obtenidos por los aceleradores, en especial EPOS LHC, en los obtenidos por el LHC. Este código es usado principalmente para modelar la producción de iones pesados y los chubascos atmosféricos de los rayos cósmicos. Para poder reproducir todos los datos de los iones pesados, se introducen los efectos nucleares que se relacionan con el momento transversal de Cronin, la saturación de los partones y el apantallamiento. También se toman en cuenta los efectos que llevan a un comportamiento colectivo en colisiones de los iones pesados (Pierog, 2017; Heck et al., 1998).
- **SYBILL** (2.1/2.3c): se centra en la simulación de interacciones hadrónicas a energías con rangos de GeV y EeV, desarrollado por E-J Ahn, R. Engel, R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari, F. Riehn y T. Stanev. Es una extensión de DPM cuando se corren núcleos ligeros usando el modelo de semi-superposición. Si se hace una comparación con las partículas producidas al modelar usando QGSJET-II, se producen más partículas usando SYBILL, pero la comparación con los datos de colisiones nucleares es limitada, ya que SYBILL no puede ser usado para simular colisiones de iones pesados en los aceleradores (como por ejemplo RHIC o LHC). Aunando a esto, este modelo solamente provee una descripción adecuada de las partículas secundarias de altas energías en una dirección particular del haz, esto para la versión 2.1. Para la versión 2.3 se tiene una producción mejorada para la

producción de pares, de forma particular para la producción de mini-jets, y también se considera un modelo fenomenológico para la producción de partículas “encantadoras” (aquellas compuestas por al menos un quark *charm*), lo cuál es importante para la producción de muones de altas energías (Pierog, 2017; Heck et al., 1998).

### 3.9.2 Modelos hadrónicos para bajas energías

- **FLUKA:** Como se menciona en Fassò et al. (2003), es un código Monte Carlo multipropósito, éste está disponible para tratar con interacciones hadrón – hadrón, hadrón – núcleo, neutrinos, electromagnéticas y muónicas, con energías de hasta 10,000 TeV así como todas las interacciones relevantes involucradas en las partículas cargadas (considerando también donde está implicado el campo magnético). FLUKA no forma parte originalmente del software de CORSIKA, para poder usarlo con este, se requiere una instalación independiente. Las interacciones núcleo – núcleo, desde un enfoque de interacción nuclear ion – ion, aún no pueden ser tratadas con este código. FLUKA está basado, en la manera de lo posible, en modelos microscópicos. Debido a esta aproximación “microscópica” a los modelos de interacción hadrónica, cada paso tomado en cuenta en este modelo es consistente y tienen una base física muy sólida (Fassò et al., 2003).
- **UrQMD:** *Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics*, es un modelo de transporte microscópico que describe la fenomenología de interacciones hadrónicas a energías bajas e intermedias (López, 2020). Este modelo se basa en la combinación de la propagación covariante de los hadrones y las dispersiones binarias estocásticas (López, 2023; Bleicher, 2018).

- **GHEISHA:** La paquetería GHEISHA es recomendada para tratar interacciones hadrónicas a bajas energías. Las rutinas GHEISHA están diseñadas para energías de laboratorio de hasta unos cuantos cientos de GeV. Se usa exclusivamente en laboratorios que alcancen energías por debajo de los 80 GeV para tratar las interacciones de los proyectiles hadrónicos con los núcleos que se encuentren en la atmósfera. Las secciones transversales para interacciones elásticas e inelásticas son interpolaciones y extrapolaciones de valores ya tabulados derivados de datos experimentales y almacenados con la paquetería GHEISHA. La captura neutrónica es tomada en cuenta como un proceso de terceros, para neutrones que tengan una energía en el laboratorio igual o menor a los 0.033 GeV. Como la atmósfera terrestre no tiene elementos fisionables, se eliminaron las rutinas que tratan la fisión nuclear. Además, las rutinas de GHEISHA tratan neutrones de bajas energías de forma muy consistente. Esto puede ser comparado con el modelo ISOBAR (este modelo es brevemente descrito más adelante); aunque, a pesar de los grandes tiempos de cálculos, se recomienda más el uso de GHEISHA (Heck et al., 1998).
- **ISOBAR:** Las rutinas del modelo ISOBAR de Grieder trabajan con energías de centro de masa entre 0.3 GeV y 10 GeV. En este modelo las colisiones hadrón – núcleo están aproximadas por reacciones hadrón – nucleón. Los nucleones del objetivo que no interactúan son despreciados (Heck et al., 1998).

Los modelos hadrónicos para bajas energías, así como para altas energías, tienen como propósito ser lo más adecuados para poder emular a la naturaleza de los rayos cósmicos. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, toman muchas consideraciones dependiendo del código, así como sus objetivos e intenciones. También deben tener en cuenta que muchos procesos

pueden resultar en tiempos de cómputo más elevados, por lo que deben de buscar la eficiencia del funcionamiento de estos.

Desafortunadamente, estos modelos se encuentran con una peculiaridad al simular eventos con energías aproximadas de  $10^{17}$  eV. La componente muónica, al ser simulada a estas energías se encuentra que existe un exceso de muones comparado con los datos reales obtenidos de eventos en esos rangos de energía. Se han hecho estudios y propuestas para obtener información del porqué esta discrepancia (Arteaga-Velázquez, 2023). Retomando el hecho de que conocer el número de muones producidos por un EAS es una herramienta importante para poder saber la composición de la masa del RC; es importante realizar más estudios para contrastar con los estudios previos. Ahí es donde entra la propuesta de este estudio, que, usando el método de procesos de Poisson Mixtos, ver si es viable simular estos RC para atenuar esa discrepancia que presentan los modelos actuales.

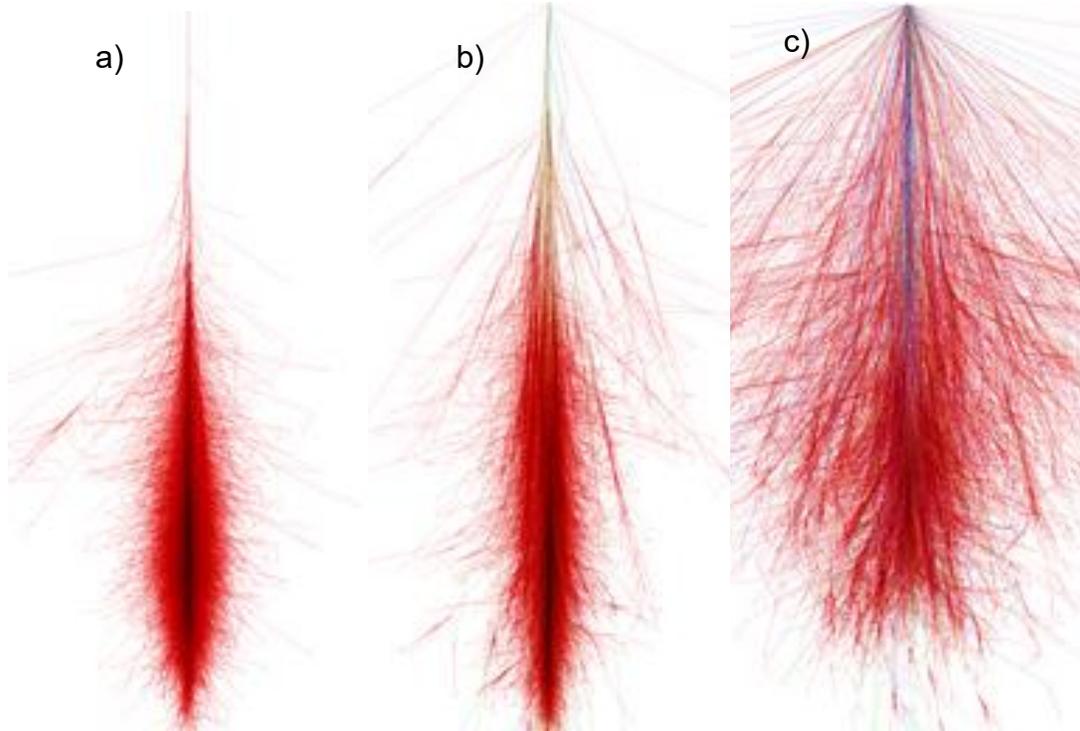
### **3.10 CORSIKA**

Se han hecho esfuerzos por mejorar los modelos mencionados en la sección anterior. Una de estas mejoras, CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for Kascade), es un código que unifica algunos de los modelos anteriores para modelar chubascos energéticos extendidos. Este es un programa de Monte Carlo muy detallado para el estudio de la evolución de los EAS producidos por fotones, protones, núcleos o cualquier otra partícula (ver figura 11). Originalmente fue desarrollado para el experimento Karlsruhe Shower Core and Array Detector (KASCADE) en Karlsruhe, Alemania. El programa ha sido mejorado a lo largo de los años y se ha convertido en una herramienta de trabajo para múltiples grupos y experimentos. El desarrollo de CORSIKA no solamente se basa en la idea de predecir de forma correcta los valores promedios de las observables

involucrados en un EAS, también busca reproducir las fluctuaciones de forma correcta que corresponden al valor de estas variables. El programa continúa desarrollándose, y se buscará

### Figura 11

*Simulaciones en CORSIKA de distintas partículas.*



*Nota.* Simulaciones de un evento de 1 TeV de a) fotón b) protón c) Núcleo de hierro. Imágenes sustraídas de <https://www.iap.kit.edu/corsika/index>.

incluir todos los procesos físicos que puedan influir notablemente en el desarrollo del EAS, cuando estos estén disponibles (Heck et al., 1998).

El código empleado en CORSIKA está desarrollado tomando como base tres de los programas mejor establecidos. El primero, el código escrito por Greider en los años 70's. La estructura general de este programa fue adoptada en CORSIKA, y sus rutinas ISOBAR, que es un modelo de interacción hadrónica simple, puede ser usado como una alternativa para simular interacciones hadrónicas a bajas energías (Heck et al., 1998). El segundo, basado en el código

escrito por Capdevielle, llamado HDPM, el código fue inspirado por el modelo dual de partones. Este código describe las interacciones hadrónicas de protones a altas energías con gran coincidencia con los datos medidos en las colisiones de partículas en los aceleradores. El tercer programa se encarga de la simulación de la parte electromagnética de los EAS, el código en el que se basó llamado EGS4, usado de forma exitosa en la simulación de experimentos de la física de partículas. Estos tres programas forman parte de las primeras versiones de CORSIKA en 1989 (Heck et al., 1998).

Más adelante, para estudiar las interacciones que se estaban requiriendo, se añadieron cuatro modelos de interacción hadrónica: VENUS, QGSJET, DPMJET y SIBYLL, que describen las interacciones hadrónicas inelásticas. Estos cuatro modelos brindaron una alternativa a los generados por HDPM. También las rutinas de GHEISHA representan un reemplazo más sofisticado del modelo ISOBAR para bajas energías.

### ***3.10.1 Consideraciones generales de CORSIKA***

Como Heck et al. (1998) nos menciona, CORSIKA toma ciertas consideraciones generales a la hora de simular los rayos cósmicos, así como ciertos criterios que decide ignorar ya que no representan una contribución notoria en el desarrollo del chubasco, estas son algunas de las consideraciones que toma en cuenta:

- **Control y corrida:** En el principio de los cálculos de la simulación, el usuario es capaz de escoger una variedad de parámetros para considerar, aquí es donde la partícula primaria tiene que ser definida, su energía puede ser preseleccionada o que sea seleccionada de manera aleatoria de un cierto espectro de energía, esto provee de una simulación un poco más realista. También el ángulo de incidencia de

la partícula primaria puede ser seleccionado, siendo  $0^\circ$  un evento totalmente vertical. Sumando a eso, puedes seleccionar entre 10 niveles de observación para los parámetros atmosféricos, así como ciertos criterios para la simulación y control de las interacciones hadrónicas, así como la forma en que se modelará la componente electromagnética.

- **Partículas:** CORSIKA reconoce 50 partículas elementales, como por ejemplo  $\gamma, e^\pm, \mu^\pm, \pi^0, \pi^\pm, K^\pm, K_S^0, \eta$ , los bariones  $p, n, \Lambda, \Sigma^0, \Sigma^\pm, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$  con sus correspondientes antibariones. Opcionalmente, los neutrinos y antineutrinos correspondientes pueden ser generados explícitamente. Todas estas partículas pueden ser seleccionadas para interacciones en la atmósfera, están disponibles para interactuar, aniquilar o decaer y producir partículas secundarias. Están totalmente definidas por un identificador de partícula, su factor de Lorentz, su ángulo cenital y azimutal de la trayectoria, el tiempo en el cual ocurre la primera interacción con la atmósfera, las coordenadas espaciales x,y,z.
- **Sistema Coordinado:** En CORSIKA se consideran las coordenadas del plano cartesiano, siendo el eje  $x$  positivo en dirección al polo norte magnético de la Tierra, el eje  $y$  positivo siendo el oeste y el eje  $z$  positivo hacia arriba. El origen estará localizado al nivel del mar. Esta definición es necesaria porque dentro de los cálculos de CORSIKA se considera el campo magnético de la Tierra. El ángulo cenital de la partícula se toma en cuenta entre el vector de momento de la partícula y el eje  $z$  negativo, así como el ángulo azimutal se toma entre el eje  $x$  positivo y las componentes x-y del vector momento de la partícula.

- **Atmósfera:** La atmósfera que se considera en las simulaciones contiene  $N_2$ ,  $O_2$  y Ar con una proporción de 78.1%, 21.0% y 0.9% respectivamente. La variación de la densidad de la atmósfera está dividida en cinco capas.
- **Generador Numérico Aleatorio:** El método Monte Carlo está esencialmente basado en números aleatorios, y por eso, un generador de números aleatorios que se cumple con los requerimientos de cálculos cada vez más largos y complejos es indispensable. CORSIKA opera con el generador de números aleatorios RANMAR, en la versión que es implementada en el CERN.
- **Desviación en el campo magnético de la Tierra:** El campo magnético de la Tierra se toma a consideración, y deben usarse los datos de los lugares de la tierra en el que se esté interesado medir, esos datos los puedes encontrar en internet, más específicamente, [en Geomag \(https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm\)](https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm). Una partícula que esté atravesando la atmósfera puede verse desviada por el campo magnético de la Tierra, afectando su trayectoria y otras interacciones que tengan en el camino, por eso es muy importante modelarlo.
- **Tiempo de vuelo:** En el momento que interacciona por primera vez la partícula primaria con la atmosfera se le considera que el tiempo de desarrollo del EAS ha iniciado.
- **Thin Sampling:** En la simulación de los EAS por programas Monte Carlo, los tiempos de cálculos escalan de una forma muy abrupta con la energía de la partícula primaria, esto debido al exceso de chubascos producidos por partículas con  $E_0 > 10^{16} eV$ . Una forma de descartar este problema, explicado de forma muy general,

es el “*thin sampling*” o una reducción de varianza. Todas las partículas secundarias por debajo de una ajustada fracción de la energía primaria son expuestas a este procedimiento. Si la suma de la energía de todas las partículas secundarias sometidas cae debajo de la “energía de adelgazamiento”, solo una será tomada en cuenta, seleccionándola de una forma aleatoria de acuerdo con su energía. Todas las demás partículas son descartadas. Este mecanismo es implementado en la parte hadrónica, así como en las rutinas EGS4.

- **Muones:** Como las interacciones hadrónicas inelásticas de los muones son muy raras, son omitidas en CORSIKA. Por lo tanto, los muones solo pueden decaer o someterse en las interacciones de *bremstrahlung* y producción de pares. Usan una parametrización previamente calculada e implementada en el código de la simulación de detector GEANT3, un código para simulaciones implementado en el CERN, antecesor a GEANT4.

Estas son algunas de las consideraciones generales que toma el programa CORSIKA, además de esto, para las interacciones hadrónicas considera los modelos VENUS, QGSJET, DPMJET, SIBYLL y HDPM para interacciones de altas energías. Para bajas energías se considera ISOBAR o GHEISHA (Heck et al., 1998) y FLUKA si se instaló previamente.

CORSIKA también permite simular la radiación cherenkov producida por los EAS, con un programa escrito por los colaboradores de HEGRA (Heck et al., 1998).

El programa CORSIKA presenta modelos de chubascos atmosféricos extendidos iniciados por fotones, protones y núcleos primarios de las más altas energías. Emplea un número de modelos teóricos de las interacciones hadrónicas el cuál es ajustado para reproducir los datos

experimentales donde sea posible. CORSIKA es una herramienta muy útil y flexible para estudiar las interacciones de los rayos cósmicos muy energéticos, para sustentar la interpretación de las mediciones de los chubascos atmosféricos extendidos y optimizar el diseño de futuros experimentos de rayos cósmicos (Heck et al., 1998).

Desafortunadamente para los chubascos atmosféricos extendidos, los resultados de los aceleradores de partículas tienen que ser extrapolados a energías y regiones donde las interacciones se supone que deben de ser diferentes. Por ejemplo, gluones en lugar de quarks se convierten en reacciones que acompañan el desarrollo del chubasco, quarks “pesados” y mini-jets son producidos.

### **3.11 Modelo de Poisson**

El modelo de Poisson, que lleva el nombre del matemático francés Siméon Denis Poisson, es una herramienta de la estadística ampliamente utilizada para analizar eventos discretos donde los sucesos no se pueden predecir o que tienen una ocurrencia aleatoria (Martínez, M. y Marí, M., s.f.). El modelo de Poisson parte de la distribución de Poisson, que considera los siguientes supuestos (Apezteguía y Ferrario, 2019):

- La variable aleatoria es el número de veces que ocurre un evento durante un intervalo definido, ya sea de tiempo o de espacio.

- La probabilidad de ocurrencia es la misma en el tiempo, dicho de otra forma, para cualesquiera dos intervalos de igual medida la probabilidad de ocurrencia se mantiene invariante.
- La probabilidad de que ocurra o no ocurra en un determinado intervalo, es independiente de lo que ocurra o no ocurra en cualquier otro intervalo.

Partiendo de lo anterior, decimos que una variable aleatoria discreta “N” tiene una distribución de Poisson con parámetro  $\alpha$  (con  $\alpha > 0$ ), si la función de probabilidad para N es la siguiente:

$$P(N = k) = \frac{e^{-\alpha} \cdot \alpha^k}{k!} \quad (Eq. 1)$$

Donde  $P(N = k)$  representa la probabilidad de k ocurrencias en un intervalo,  $\alpha$  es la media o valor esperado de N.

La distribución de probabilidad de la variable aleatoria de Poisson representa el número de resultados que ocurren en un intervalo de tiempo dado o región en específicos. La distribución de Poisson nos puede ayudar a saber el número de autos que pasan a través de un cierto punto en una ruta, el número de errores de ortografía que uno comete al escribir, etc.

Con lo anterior, podemos decir que nos tenemos que concentrar en tres cosas:

- El número de eventos.
- El tiempo en el que ocurren estos eventos.
- Las consecuencias de estos eventos.

Una forma de ver esto es la siguiente, tomemos la situación planteada por el autor Grandell (1997), si nos ponemos en el papel de una compañía de seguros, nos vamos al evento más drástico que podamos inferir, que es morir. En la ecuación que definimos arriba para la distribución de Poisson,  $N$  sería una variable aleatoria que describe el número de accidentes de tráfico no fatales en las que un individuo está involucrado durante un año, durante ese tiempo, el individuo está expuesto a muchas situaciones de riesgo, en el cuál muy pocas se convierten en accidentes.

Con esto, el valor de  $\alpha$  depende de factores como:

- La distancia recorrida.
- El ambiente del tráfico.
- Las habilidades que el individuo tenga como conductor.

En cualquier caso, fijaremos a  $\alpha$  como un parámetro que caracteriza que tan propenso está el individuo a los accidentes. Supongamos ahora que consideramos el mismo individuo durante varios años, naturalmente, el valor de  $\alpha$  cambiará año con año, por cambios en el comportamiento del individuo. Pero para fines de este ejemplo, como nos menciona el autor, despreciaremos esas condiciones y diremos que el número de accidentes en los diferentes años son independientes y siguen una distribución de Poisson con la misma  $\alpha$ .

Ahora vamos a considerar el número de accidentes de tráfico de varios individuos durante un año, todos bajo las mismas condiciones de tráfico y manejando aproximadamente las mismas distancias. A pesar de tener las mismas condiciones, el número de accidentes podría variar más de lo que debería, si todos son considerados de observaciones independientes de una distribución de Poisson. Una explicación natural es que para cada diferente individuo tienen diferentes tendencias a accidentarse, es decir, a cada individuo corresponde un valor de  $\alpha$  particular. Como es de esperarse,

calcular el valor de  $\alpha$  para cada individuo resulta en un trabajo muy difícil al menos que el patrón individual de accidentes sea conocido.

Asumiendo que los accidentes de tráfico son eventos muy raros (esperemos que así sea para todos), esto significa que un solo individuo tendría que ser observado durante mucho tiempo para poder aproximar el valor de su  $\alpha$  particular.

Independiente de la dificultad, asumiremos que para cada individuo corresponde **un proceso de Poisson** particular, describiendo futuros posibles accidentes. Con esto podemos comprender que un proceso de Poisson es aquella situación que podemos modelar haciendo uso de una distribución de Poisson estándar.

Con esto definido, pasaremos hablar ahora de los que serían los procesos de Poisson Mixtos.

### 3.12 Distribución de Poisson Mixta

Siguiendo el ejemplo del autor que se presentó en el apartado pasado. A pesar de que la  $\alpha$  particular es desconocida, nosotros podríamos tener una buena idea general sobre su variación de individuo a individuo, al menos para un grupo de sujetos de un grupo razonablemente homogéneo. Por lo tanto, es esperado considerar que las  $\alpha$  personales sean resultado de una variable aleatoria, a la que llamaremos  $\Lambda$  con una distribución  $U$  ya conocida. La distribución  $U$  es llamada “estructura de distribución”. Entonces podemos reinterpretar la ecuación (1) como la distribución condicional de  $N$ , dado el hecho de que  $\Lambda = \alpha$ . Ahora, la distribución incondicional de  $N$  en este caso está dado por:

$$P\{N = k\} = \int_0^{\infty} \frac{\Lambda^k}{k!} e^{-\Lambda} dU(\Lambda)$$

Esta distribución es llamada como una **Distribución de Poisson Mixta** (Grandell, 1997).

Con lo descrito anteriormente, podemos decir que los procesos de Poisson Mixtos son situaciones dónde están compuestas por varios procesos de poisson estándar. Los procesos de Poisson Mixtos tienen una gama de aplicaciones más amplia que los procesos estándar, ya que permiten modelar ciertas situaciones que serían más realistas.

Al igual que los procesos de Poisson estándar, los procesos de Poisson Mixtos deben tener algunas condiciones o consideraciones:

- Para poder hacer uno de los Procesos de Poisson Mixtos, se pueden considerar modelar situaciones donde la ocurrencia de eventos no sea fija.
- La independencia de los eventos sigue siendo un criterio necesario.
- En lapsos muy cortos, donde  $\Lambda = \alpha$ , se observa que es un comportamiento de proceso de poisson estándar.

Con esto podemos concluir que los procesos de Poisson Mixtos nos permiten realizar modelados o simulaciones de situaciones más realistas que las que nos permitirían los procesos estándar. Al permitir una variabilidad en la tasa de ocurrencia de los eventos, nos permite trabajar con distintas situaciones donde la tasa de ocurrencia no es fija.

## 4 Metodología

Hasta ahorita hemos presentado la información necesaria para comprender los temas con los que estamos trabajando en esta tesis. Ahora en este apartado se describe la forma en la que el trabajo fue realizado, así como el objetivo principal de este trabajo.

Uno de los objetivos principales de esta tesis es analizar la viabilidad de utilizar los procesos de Poisson Mixtos para describir las componentes que conforman un chubasco atmosférico extendido. Para ello hemos hecho un análisis cualitativo, que consistió en lo siguiente.

- Se realizó una investigación documental. Primeramente, se consultaron diversos autores que hayan trabajado en el área de: Rayos Cósmicos, Física de partículas, Física de altas energías. Se buscaron libros, tesis y artículos publicados en revistas de ciencia. Esto con la finalidad de que se reuniera la información necesaria que sirvió para comprender la física detrás de los Rayos Cósmicos Ultra-Energéticos.
- Además, se consultaron libros sobre estadística que sirvieron de base para comprender: La distribución de Poisson, los procesos de Poisson y, finalmente, los procesos de Poisson Mixtos.
- Como se mencionó en el objetivo general, estábamos buscando la forma de aplicar esta herramienta de estadística en el modelado de los chubascos atmosféricos extendidos producidos por los rayos cósmicos. Para poder hacer esto, también necesitábamos saber cómo es que estos programas funcionan, en particular, se leyó la forma en la que el programa CORSIKA trabaja.

- Una vez que se obtuvo toda la información, procedimos a escribir el Marco Teórico, que, a su vez, al estar escribiendo este apartado, sirvió de punto de discusión y reflexión para lograr el objetivo.
- Se elaboró una tabla comparativa entre los procesos de Poisson estándar y los procesos de Poisson Mixtos, que sirvió para identificar las principales diferencias entre uno y otro.
- Se definió en qué momento del desarrollo del chubasco atmosférico estamos interesados en que se modele, en este caso, estamos interesados en que se modele el desarrollo del chubasco del rayo cósmico ultra energético, no la incidencia de estos en la atmósfera terrestre.
- Se elaboró una tabla comparativa donde se cotejan las condiciones necesarias para que algo pueda ser modelado como un proceso de Poisson Mixto y las características físicas del desarrollo del chubasco atmosférico.
- Se procedió a plantear una conclusión utilizando el resultado de esa tabla.

Los textos principales que se analizaron para comprender los procesos de poisson mixtos y el cómo las simulaciones de los chubascos atmosféricos extendidos se llevan a cabo fueron los siguientes:

- I. Grandell, J. (1997). *Mixed Poisson Processes*. Springer US. DOI 10.1007/978-1-4899-3117-7
- II. Schoorlemmer, H., Hinton, J. y López-Coto, R. (2019). *Characteristics of extensive air showers around the energy threshold for ground-particle-based*

*gamma-ray observatories.* Eur. Phys. J. C 79, 427.  
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6942-x>.

Además de los textos anteriores, otros textos de igual importancia para comprender los programas de simulación de rayos cósmicos fueron:

- I. D. Heck, Knapp, J., Capdevielle, J.N., Schatz, G., Thouw, T., T. Pierog, algunos de sus textos se pueden consultar en: <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>
- II. Sciutto, S. J. Su obra se puede consultar en: <http://aires.fisica.unlp.edu.ar/>.

Entre otros textos fundamentales sobre física de astropartículas que podrán consultar en el apartado de referencias de esta tesis.

Como este trabajo fue una investigación documental, se pudo realizar desde cualquier lugar físico, ya que el trabajo se basará en la consulta de textos especializados, que esto significó leer información, interpretarla, realizar un resumen para después poder plasmarla en el trabajo, en específico, en el marco teórico. Todo esto se realizó independiente del lugar donde me encontraba.

El trabajo siguió el siguiente cronograma:

- Primer mes: Consultar el primer y segundo texto, mientras se preparaba todo el apartado de marco teórico y metodología.
- Segundo mes: Se buscaron más fuentes de información sobre los rayos cósmicos, se hizo una búsqueda exhaustiva entre los documentos que referenciaban otras tesis, e incluso se buscaron otras tesis, ya fueran de licenciatura o de doctorado.

- Tercer mes: Se continuaron consultando diferentes lugares para conseguir más información, se revisaron repositorios de otras universidades, documentos en el arXiv y se comenzó a leer sobre los procesos de Poisson Mixtos.
- Cuarto mes: Se llevó a cabo la discusión con la asesora de tesis sobre los resultados a los que se llegaron, y se realizó la conclusión sobre los mismos.

Es importante mencionar, que mientras me encontraba en el proceso de esas actividades, también atendía el curso del programa PIGA, en el cuál estuve elaborando el trabajo de la tesis escrito por etapas.

Los obstáculos que se tuvieron al realizar este trabajo fue primeramente el tiempo de realización, ya que el tiempo no fue el suficiente para poder realizar una investigación más profunda. Los asuntos personales (trabajo y salud) que se estuvieron presentando fueron un obstáculo muy fuerte en la realización del trabajo, tanto la parte documental y cualitativa, como al elaborar la tesis escrita.

El alcance de esta investigación se quedó en analizar la viabilidad de la aplicación de los procesos de Poisson mixtos. Como se podrá leer en el apartado de conclusiones, se realizaron propuestas de trabajo con los resultados obtenidos.

## 5 Resultados

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo con la investigación documental realizada, para que algo pueda ser modelado como proceso de Poisson mixto, debe cumplir ciertos criterios. En este apartado se expondrán los resultados acerca de si los chubascos atmosféricos extendidos producidos por un UHECR cumplen o no dichos criterios y se hará un análisis cualitativo, más adelante se reportan las conclusiones en el apartado correspondiente.

Como podemos ver en la tabla 2, se presenta una comparativa de las condiciones de los procesos de Poisson estándar y los mixtos.

**Tabla 2**  
*Comparación entre un proceso de Poisson estándar y uno mixto.*

<b>Procesos de Poisson Estándar</b>	<b>Procesos de Poisson Mixtos</b>
Los procesos de Poisson estándar deben de tener una tasa contante de ocurrencia de eventos, eso significa que esperamos que siempre ocurra el mismo número de eventos en un lapso determinado.	Los procesos de Poisson Mixtos permiten cierta variabilidad en la tasa de ocurrencia de los eventos, ya sea debido a que no tengan la misma frecuencia o provocada por alguna otra variable.
En ambos procesos, es un requisito indispensable la independendia de ocurrencia de eventos. Decimos que existe la independendia de eventos al hecho de que, al ocurrir (o no ocurrir) un evento, no afecte la probabilidad o que condicione la ocurrencia (o no ocurrencia) de los siguientes eventos.	
Los eventos ocurridos en un proceso de Poisson estándar deben de seguir una distribución de Poisson, donde la probabilidad de observar un número de eventos en un determinado periodo de tiempo se puede calcular con la ecuación de la distribución de Poisson.	Para intervalos muy cortos, donde la tasa $\Lambda$ se puede considerar constante, el proceso de Poisson Mixto se comporta como un proceso de Poisson estándar. Es decir, localmente, en un lapso muy corto, el Proceso de Poisson Mixto lo podemos tomar como un Proceso de Poisson Estándar.

Recordando también que lo que estamos buscando es un modelo alternativo a la forma en la que se separan las componentes de los EAS en las simulaciones de UHECR, es decir, cuando la partícula primaria ya interactuó con la atmosfera y no como tal el comportamiento de los UHECR. Es importante mencionar eso ya que, los procesos de Poisson mixtos asumen una periodicidad de recurrencia de eventos, que para fines de este trabajo, serán la frecuencia con las que detectaremos las partículas secundarias generadas y no la frecuencia con la que llegan los UHECR a la atmósfera terrestre; para eso como podemos observar en la tabla 3, se hizo un cotejo entre la física de un chubasco atmosférico extendido y las condiciones necesarias para que puedan aplicar los procesos de Poisson Mixtos, más adelante se explicará de forma más amplia cada apartado de forma independiente.

**Tabla 3**

*Cotejo entre los procesos de Poisson Mixtos y los chubascos atmosféricos extendidos*

Condiciones de los Procesos de Poisson Mixtos	¿Se cumple considerando el comportamiento físico en los chubascos atmosféricos extendidos?
Variabilidad en la tasa de ocurrencia	Sí
En lapsos muy cortos de tiempo, se comporta como un proceso de Poisson estándar	Sí
Mantiene una independencia entre los eventos	No

- **Variabilidad en la tasa de ocurrencia**

Como mencionamos en el marco teórico, los procesos de Poisson Mixtos (MPP, por sus siglas en inglés), a diferencia de los procesos de Poisson estándar, permiten cierta variabilidad en

la frecuencia de ocurrencia de los eventos. Este apartado cumple con el comportamiento de los EAS en los UHECR, ya que, aunque se usan lapsos muy pequeños en los que llegan las partículas, y posteriormente llegan a los detectores, hay cierta variación temporal a la hora que se detectan las distintas partículas que conforman al EAS de un evento.

- **Proceso de Poisson Estándar localmente**

Otra de las características que debe de cumplir, es que, si tomamos intervalos más pequeños de tiempo, para este caso, serían intervalos muy ínfimos, ya que los tiempos de llegadas de las partículas ocurren en fracciones muy pequeñas de segundo, podemos modelar las cosas como si fueran métodos de Poisson estándar. Consideremos entonces, periodos de tiempo lo suficientemente pequeños para que ese lapso, haya cierta homogeneidad esperada dependiendo del tipo de partículas, por ejemplo, los muones son las primeras partículas en llegar al detector (Workman et al., 2022). Para el caso de la componente muónica, este paso lo cumple sin problemas, si ahora vemos las otras dos componentes, hay algunas condiciones que debemos de considerar, y son que tomaremos en cuenta la ocurrencia del evento (la detección o generación de la partícula) a priori, sin considerar qué tipo de partícula sea, así, sí cumpliría esta condición.

- **Independencia de eventos**

Los EAS tienen tres componentes principales al generarse: la hadrónica, electromagnética y muónica. Para que pueda considerarse como MPP, debe de existir la independencia de eventos, esto significa que la ocurrencia de un evento no depende del anterior, visto de esta forma, el comportamiento de un EAS, de forma general, no estaría cumpliendo este apartado debido a que algunos procesos en la componente hadrónica generan partículas que contribuyen a la componente

electromagnética y muónica, teniendo una dependencia del número final de eventos de los demás procesos involucrados.

## 6 Conclusión

El propósito de este trabajo fue explorar la viabilidad, de manera cualitativa, de usar MPP, en la descripción de las partículas provenientes de un EAS, para usarla como herramienta para separar sus componentes y mejorar la estimación de la masa (composición química) del UHECR primario. Conocer la composición del UHECR podría otorgar información sobre su origen y mecanismos de propagación y producción, uno de los desafíos más investigados en el área de astropartículas. Después de haber realizado una investigación documental, y con base en interpretaciones cualitativas discutidas en la sección de resultados, se concluye lo siguiente:

1. Los MPP deben cumplir dos condiciones:
  - a) Variabilidad de la tasa de ocurrencia de eventos.
  - b) Independencia entre eventos.
2. El desarrollo de los EAS producidos por los UHECR, cumplen con la condición de variabilidad en la tasa de ocurrencia. No obstante, no se cumple la condición de que los eventos sean independientes.
3. Por lo tanto, usar los MPP para describir las componentes de los EAS producidos por los UHECR, solo se podrían aplicar como una primera aproximación muy reservada, en las regiones de los chubascos en los que la independencia entre la producción de partículas (eventos) sea lo más alta posible y donde la variabilidad de la tasa de eventos sea clara.
4. Una primera propuesta es usar la región inicial de producción de partículas secundarias, es decir, donde ocurren las primeras interacciones con la atmósfera.
5. En estudios posteriores se pueden explorar simulaciones para investigar cómo varía la región inicial, dependiendo del tipo de elemento (masa) que tenga el UHECR, y

de las condiciones de la atmósfera que se use. La información obtenida se puede considerar para complementar la aplicación de los MPP en la descripción de los EAS medidos de los detectores de astropartículas.

## Referencias:

Arteaga-Velázquez, J.C. (2023). *A report by the WHISP working group on the combined analysis of muon data at cosmic-ray energies above 1 PeV, PoS (ICRC2023)*, vol. 466.

Apezteguia, M.C. y Ferrairo, J. (2019). *Probabilidades y Estadística: análisis de datos*. Universidad Nacional de La Plata. EDULP. ISBN 978-950-34-1735-5

Auger, P., Ehrenfest, P., Maze, R., Daudin, J. y Fréon, R.A. (1939). *Extensive Cosmic-Ray Showers. Rev. Mod. Phys.*, 11.

Bleicher, M. (2018). Introduction to the UrQMD model. *Frankfurt Institute for Advanced Studies, Institut für Theoretische Physik Goethe Universität*.

Caballero-Mora, K.S., Nellen, L. y Valdés-Galicia, J.F. (2008) Azimuthal signal variation in the engineering array of the Pierre Auger Observatory. *Revista Mexicana de Física*.

Castellanos-Valdés, H. (2018). Estudio del comportamiento del risetime como función de la distancia al centro del chubasco en el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de Chiapas.

Clark, G. W., Earl, J., Kraushaar, W. L., Linsley, J., Rossi, B. B., Scherb, F., y Scott, D. W. (1961). *Cosmic-Ray Air Showers at Sea Level. Physical Review*, 122(2), p. 637–654. doi:10.1103/physrev.122.637

Clay, R. y Dawson, B. (1997). *Cosmic Bullets. High Energy Particles in Astrophysics*. Helix Boox. Perseus.

[Esquema de un chubasco atmosférico]. (2012).

<https://ramanujan25449.blogspot.com/2012/04/rayos-cosmicos.html> .

Deligny, O. (2023). The science of ultra-high energy cosmic rays after more than 15 years of operation of the Pierre Auger Observatory, *J. Phys.:* Conf. Ser. 2429 012009. DOI:10.1088/1742-6596/2429/1/012009

Estupiñán, A. (2015). Método de Thinning y Dethinning para lluvias de primarios con alta energía. [Tesis de licenciatura]. Universidad Industrial de Santander.

Fassò, A., Ferrari, A., Roesler, S., Sala, P.R., Ballarini, F., Ottolenghi, A., Battistoni, G., Cerutti, F., Gadioli, E., Garzelli, M.V., Empl, A. y Ranft, J. (2003). *The physics models of FLUKA: status and recent developments*. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0306267v1>.

Flaggs, B., Coleman, A. y Schröder, F.G. (2023). *Studying the mass sensitivity of air-shower observables using simulated cosmic rays*. arXiv: 2306.13246

Fordham News. (19 de octubre de 2011). *Cosmic Connections: On the Life and Legacy of Nobel Laureate Victor Hess*. <https://news.fordham.edu/fordham-magazine/cosmic-connections-on-the-life-and-legacy-of-nobel-laureate-victor-hess/>

Grandell, J. (1997). *Mixed Poisson Processes*. Springer. ISBN 978-0-412-78700-3. DOI: 10.1007/978-1-4899-3117-7

Heck, D., Knapp, J., Capdevielle, J.N., Schatz, G. y Thouw, T. (1998). *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*. <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>

Hess, V. (1912). *Z. Phys.*, 12, p. 1084.

High Altitude Water Cherenkov (2024). <https://www.hawc-observatory.org>

Ivanov, D., Bergman, D., Furlich, G., Gonzalez, R., Thomson, G.B. y Tsunesada, Y. (2021). *Recent measurement of the Telescope Array energy spectrum and observation of the shoulder feature in the Northern Hemisphere. Proceedings of Science (ICRC2021)*. 341.

Kampert, K. H., y Tinyakov, P. (2014). *Cosmic rays from the ankle to the cutoff. Comptes Rendus Physique*, 15(4), pp. 318-328.

López, V.M. (2020). Estado del arte de la descripción de los chubascos atmosféricos producidos por rayos cósmicos de altas energías [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de Chiapas.

Longair, M.S. (1981). *High Energy Astrophysics. Cambridge University Press*.

Martínez, M., Marí, M. (s.f.). La distribución de Poisson. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7937/Distribucion%20Poisson.pdf>

Masip, M. (2015). *Los rayos cósmicos: las energías más extremas del universo*. RBA

Matthews, J. (2005). *A Heitler model of extensive air showers. Astroparticle Physics*, vol 22, p. 387-397. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2004.09.003

National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (28 de junio de 2017). *Imagine the Universe*. [https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/cosmic\\_rays1\\_orig.html](https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/cosmic_rays1_orig.html)

Otaola, J. y Galicia, J.V. (1995). Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas, vol. 108. Fondo de la Cultura Económica.

Pierog, T. (2017). *Air Shower Simulation with a New (first) Generation of post-LHC Hadronic Interaction Models in CORSIKA*, ICRC2017.

Pierre Auger Observatory. (2024) <https://www.auger.org/observatory/auger-hybrid-detector>

Pimienta, M., De Angelis, A. (2018). *Introduction to Particle and Astroparticle Physics*. Springer

Rocha, A.M. (1996). El discreto encanto de las partículas elementales, vol. 68, Fondo de la Cultura Económica.

Sokolsky, P. y Thomson, G. (2020). *Introduction to Ultrahigh energy Cosmic Ray Physics*. ISBN 9780367151171

Stanev T. (2009). *High Energy Cosmic Rays*. Springer.

Tavera, A. (2010). Estudio de la componente muónica en chubascos de partículas, producidos por rayos cósmicos en la atmósfera, usando el experimento KASCADE-Grande [Tesis de licenciatura]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Tcaciuc, R. (2006). *Lateral Distribution of Cosmic Ray Muons Underground: Results from the CosmoALEPH Experiment* [Tesis doctoral]. Universität Siegen [Universidad de Siegen].

The Pierre Auger Collaboration, Aab, A. (2017). *Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above  $8 \times 10^{18}$  eV*, *Science*, 357, pp. 1266 – 1270. DOI: 10.1126/science.aan4338

The Pierre Auger Collaboration, Aab, A. (2020). *Features of the Energy Spectrum of Cosmic Rays above  $2.5 \times 10^{18}$  eV using the Pierre Auger Observatory*. *Phys. Rev. Lett.*, 125. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.121106

Workman, R. L. et al. [Particle Data Group]. (2022). *Review of Particle Physics*. *Prog. Theor. Exp. Phys.* p. 083C01. DOI: 10.1093/ptep/ptac097. <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-cosmic-rays.pdf>

Zatsepin, G.T., Kuz'min, V.A. (1966). *Upper limit of the spectrum of cosmic rays*, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, Volumen 4, p. 78.