



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA BIOFÍSICA

**“CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO DE PARTÍCULAS SECUNDARIAS
PROVOCADAS POR PROTONES Y RAYOS GAMMA EN LA ATMÓSFERA,
PARA DETERMINAR EL TIPO DE DETECTORES DE ASTROPARTÍCULAS
ADECUADOS A LA REGIÓN DE RIOBAMBA-ECUADOR”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto De Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTOR: ISER IVÁN PEÑA CORREA

DIRECTOR: PhD. RAFAEL OMAR RODRIGUEZ

Riobamba – Ecuador

2020

©2020, Iser Iván Peña Correa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Iser Iván Peña Correa, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 27 de Febrero del 2020



Iser Iván Peña Correa

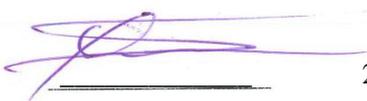
CI: 0603429044

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA BIOFÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El proyecto de investigación, **“CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO DE PARTÍCULAS SECUNDARIAS PROVOCADAS POR PROTONES Y RAYOS GAMMA EN LA ATMÓSFERA, PARA DETERMINAR EL TIPO DE DETECTORES DE ASTROPARTÍCULAS ADECUADOS A LA REGIÓN DE RIOBAMBA-ECUADOR”** de responsabilidad del señor Iser Iván Peña Correa, ha sido revisado minuciosamente por los Miembros del Tribunal de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales en tal virtud el Tribunal Autorizada su presentación.

| | Firma | Fecha |
|---|--|------------|
| Biof. Vilma Nohemí Yanchapanta Bastidas, Mgs. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL |  | 2020/02/27 |
| PhD. Rafael Omar Rodríguez DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN |  | 2020/02/27 |
| Dr. Richard Willians Pachacama Choca MIEMBRO DEL TRIBUNAL |  | 2020/02/27 |

DEDICATORIA

A mi madre, mi tía y abuelita que principalmente fueron las bases del hombre que soy hoy en día, junto con toda mi familia. A mi padre que donde quiere que este seguro está feliz por mí. Y, por último, pero no menos importante, a mi gran chica poderosa Paola, que me ha guiado a completar mis ideas y pensamientos para poder explotar mi potencial al máximo completando mis objetivos diarios.

Iser

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecerle a mis amigos, profesores y personas que han sumado a la madurez de mi vida, no pienso nombrarlos a todos pues no quisiera omitir a nadie, cada uno me ha enseñado valores y conocimientos que me ha guiado durante toda mi vida para tomar las mejores decisiones a través de experiencias, bajas y altas de la vida.

Además, quiero agradecerle al Dr. Omar Rodríguez por haber sido un gran amigo conmigo y haberme guiado para la finalización de esta tesis de la mejor forma posible.

Iser

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Esta tesis no hubiese sido posible sin el apoyo de un gran amigo y profesor el PhD. Nicolás Vázquez, profesor de la EPN que ha ocupado su tiempo conmigo, día a día ayudándome y guiándome sobre el estudio de las astropartículas. Además, quiero agradecerle por haberme prestado el servidor en el que realiza proyectos junto a la RedERACli y CEDIA que me ayudo a finalizar las simulaciones de mi tesis.

Iser

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|-------------------------|-----|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xi |
| ABREVIATURAS..... | xiv |
| RESUMEN..... | xv |
| ABSTRACT..... | xvi |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |

CAPÍTULO I

| | |
|--|---|
| 1. MARCO REFERENCIAL..... | 3 |
| 1.1. <i>Antecedentes</i> | 3 |
| 1.2. <i>Planteamiento del problema</i> | 4 |
| 1.3. <i>Justificación</i> | 5 |
| 1.4. <i>Objetivos</i> | 6 |

CAPÍTULO II

| | |
|---|----|
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 2.1 <i>Astropartículas</i> | 8 |
| 2.2 <i>Origen de aceleración de astropartículas</i> | 9 |
| 2.3 <i>Detección de Astropartículas</i> | 11 |
| 2.4 <i>Lluvias atmosféricas extendidas (EAS)</i> | 12 |
| 2.5 <i>Espectro de Energía</i> | 13 |
| 2.6 <i>Tipos de EAS</i> | 15 |
| 2.7 <i>Detectores</i> | 19 |
| 2.9 <i>Anomalía del Atlántico sur (SAA)</i> | 20 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|----|
| 3. MARCO METODOLÓGICO..... | 22 |
| 3.1 <i>Diseño de la Investigación</i> | 22 |
| 3.2 <i>Software utilizado en el desarrollo de la investigación</i> | 22 |
| 3.3 <i>Rigidez magnética y de corte</i> | 25 |
| 3.4 <i>Modelo atmosférico</i> | 25 |
| 3.5 <i>Modelos de Interacción Hadrónica</i> | 26 |
| 3.6 <i>Simulación en Corsika</i> | 27 |
| 3.7 <i>Archivos de entrada</i> | 33 |
| 3.8 <i>Archivos de salida</i> | 35 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.9 | <i>Profundidad atmosférica</i> | 38 |
| 3.10 | <i>Análisis einterpretación de resultados</i> | 40 |
| 3.11 | <i>Simulación de una sola cascada por Gamma y Protón</i> | 40 |
| 3.12 | <i>Simulación de una hora de flujo de EAS con el paquete ARTI</i> | 44 |
| 3.13 | <i>Histograma de una hora de flujo para Riobamba-Ecuador</i> | 49 |
| | CONCLUSIONES | 55 |
| | RECOMENDACIONES | 57 |
| | BIBLIOGRAFÍA | |
| | ANEXOS | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-2: La composición química de los núcleos atómicos (línea continua) de astropartículas comparados con la abundancia química del sol (línea punteada). | 12 |
| Figura 2-2: Descripción de una cascada atmosférica extendida a partir de un protón e interacciones con núcleos atmosféricos. | 13 |
| Figura 3-2: Espectro de energía de astropartículas observado por varios experimentos de investigación. | 14 |
| Figura 4-2: Diagrama donde se indica la descomposición y producción de partículas secundarias. | 16 |
| Figura 5-2: Desarrollo de la cascada de rayo gamma y electromagnético..... | 18 |
| Figura 6-2: Detector híbrido “Fly’sEye” combinado con detectores Cherenkov y fluorescente y el desarrollo de las EAS. | 20 |
| Figura7-2: Mapa geográfico del exceso en la radiación tomada por la nave espacial DMSP F18 en 2015 según la contaminación eliminada (conteos)..... | 21 |
| Figura 1-3: Sistema de coordenadas dentro del programa de simulación Corsika | 23 |
| Figura 2-3: Imagen de referencia CORSIKA | 24 |
| Figura 3-3: Gráfico de la tabla de partículas en Corsika..... | 36 |
| Figura 4-3: Gráfico de la tabla de partículas en Corsika | 37 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | | |
|----------------------|---|----|
| Gráfico 1-4: | Relación entre la cantidad de electrones y positrones producidos por un gamma y protón con energía de 1 TeV, y colocada en escala “log” para apreciarse mejor. | 41 |
| Gráfico 2-4: | Distribución de fotones gamma producidos por un primario gamma y protón con energía de 1 TeV, y colocada en escala “log” para apreciarse mejor..... | 42 |
| Gráfico 3-4: | Desarrollo longitudinal de la EAS en Riobamba, para un protón de energía de 1 TeV..... | 42 |
| Gráfico 4-4: | Desarrollo longitudinal de la EAS en Riobamba, para un gamma de energía de 1 TeV..... | 43 |
| Gráfico 5-4: | Composición química de las partículas primarias simuladas..... | 48 |
| Gráfico 6-4: | Histograma de flujo de partículas para una hora de flujo a 2764 m.s.n.m con energía desde 13 GeV a 1×10^3 TeV..... | 49 |
| Gráfico 5-4: | Distribución longitudinal del Hierro para una hora de flujo a 2764 m.s.n.m con energía de 13 GeV a 1×10^3 TeV..... | 50 |
| Gráfico 8-4: | Distribución lateral en 2D de fotones gamma a 2764 m.s.n.m. para una hora de flujo..... | 51 |
| Gráfico 9-4: | Distribución lateral en 3D de fotones gamma a 2764 m.s.n.m. con respecto al tiempo (eje z) para una hora de flujo..... | 52 |
| Gráfico 10-4: | Distribución lateral en 2D de muones (-) a 2764 m.s.n.m. para una hora de flujo..... | 52 |
| Gráfico 11-4: | Distribución lateral en 3D de muones (-) a 2764 m.s.n.m. con respecto al tiempo (eje z) para una hora de flujo..... | 53 |
| Gráfico 12-4: | Distribución lateral en 2D de muones (+) a 2764 m.s.n.m. para una hora de flujo..... | 54 |
| Gráfico 13-4: | Distribución lateral en 3D de muones (+) a 2764 m.s.n.m. con respecto al tiempo (eje z) para una hora de flujo..... | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1-2: Decaimientos de partículas y sus porcentajes de ocurrencia. | 15 |
| Tabla 2-2: Procesos resultantes por fotones y electrones. | 18 |
| Tabla 1-3: Valores Geomagnéticos Riobamba-Ecuador..... | 24 |
| Tabla 2-3: Parámetros atmosféricos de Corsika de Diciembre 2019 | 38 |
| Tabla 3-3: Número de partículas simuladas por CORSIKA de acuerdo con la sujeción de los rayos cósmicos que interactúan al llegar a nuestra atmósfera. | 48 |

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGO EN PYTHON PARA HISTOGRAMAS DE FLUJO

ANEXO B: CÓDIGO EN PYTHON PARA DISTRIBUCIÓN LONGITUDINAL

ANEXO C: CÓDIGO EN PYTHON PARA GRÁFICOS EN 2D

ANEXO D: CÓDIGO EN PYTHON PARA GRÁFICOS EN 3D

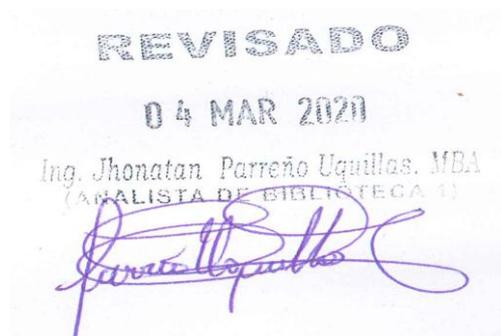
ABREVIATURAS

| | |
|-------------------------------|---|
| EAS: | (Extensive Air Shower por sus siglas en inglés) cascada atmosférica extendida. |
| CORSIKA: | (CO smic R ay SI mulations for K Ascade) software de simulación de extensas duchas de aire inducidas por energías altas de las astropartículas. |
| RIGIDITY: | rigidez magnética |
| Cut-Off Energy: | rigidez de corte |
| GRBs: | (Gamma Rays Bursts) Ráfaga de Rayos Gamma |
| eV: | electronvoltio |
| ΔE: | incremento de energía |
| γ: | Gamma |
| E: | Energía |
| p: | protón |
| n: | neutrón |
| e^-: | electrón |
| e^+: | positrón |
| u : | muón |
| K: | kaon |
| π : | pion |
| ν: | neutrino |
| ρ: | densidad atmosférica |
| h: | altitud |
| α: | partículas alfa |
| c: | velocidad de la luz |
| θ: | ángulo cenital |
| ϕ: | ángulo azimutal |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo la caracterización del flujo de partículas secundarias provocadas por protones y rayos gamma en la atmósfera de la ciudad de Riobamba para determinar el tipo de detectores de astropartículas adecuados para esta región. Las astropartículas provenientes del espacio exterior con energías que superan los TeV, interactúan con el campo magnético y núcleos de la atmósfera terrestre, formando la llamada lluvia atmosférica extendida (EAS). Mediante el software computacional CORSIKA se obtuvo un gran número de partículas primarias, donde las de mayor densidad de partículas secundarias fueron los fotones, electrones, positrones y muones. En una hora de flujo se tiene que las especies más abundantes son los núcleos de Hidrógeno y Helio con energías desde 13 GeV a 1000 TeV a una altitud de 2764 m.s.n.m y respectiva rigidez magnética de 12.47 GeV. Además, en las distribuciones longitudinales de las cascadas unitarias provenientes de un protón y gamma primario con 1 TeV de energía con un ángulo cenital de 90 grados donde se observó que el protón primario alcanza un mayor número de secundarios observables para la ciudad de Riobamba. La distribución lateral nos mostró que para que los muones sean observables se requiere al menos 3 detectores de tipo Cherenkov cubriendo un área de 1 km cuadrado. Por último, se recomienda trabajar con una variedad más amplia de ángulos cenitales, energía del primario, tiempo de simulación, y altitudes superiores a 4000 m.s.n.m que fácilmente son encontradas en Ecuador, como tenemos al Volcán Chimborazo (6,268 m) o en el Volcán Cotopaxi (5,897 m.) para una obtención de información de mayor precisión y adecuada de la zona.

PALABAS CLAVE:<BIOFÍSICA>, <FÍSICA>, <ASTROPARTÍCULAS>, <CORSIKA (SOFTWARE)>, <DETECTORES DE ASTROPARTICULAS>, <LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS>



ABSTRACT

This research work aimed to characterize the flow of secondary particles caused by protons and gamma rays in the atmosphere of the city of Riobamba to determine the type of astroparticle detectors suitable for this region. Astroparticles from outer space with energies that surpass TeV, interact with the magnetic field and nuclei of the Earth's atmosphere, forming the so-called extended atmospheric rain (EAS). A large number of primary particles were obtained through CORSIKA computer software where photons, electrons, positrons and muons were the highest density of secondary particles. In an hour of flow, it is necessary that the most abundant species are the nuclei of Hydrogen and Helium with energies from 13 GeV to 1000 TeV at an altitude of 2764 m.s.n.m and respective magnetic stiffness of 12.47 GeV. In addition, in the longitudinal distributions of the unit cascades coming from a proton and primary gamma with 1 TeV of energy with a zenith angle of 90 degrees where it was observed that the primary proton reaches a greater number of observable secondary for the city of Riobamba. The lateral distribution showed that for the muons to be observable, at least 3 Cherenkov type detectors covering an area of 1 square km are required. Finally, it is recommended to work with a wider variety of zenith angles, primary energy, simulation time, and altitudes higher than 4000 m.s.n.m that are easily found in Ecuador, as in the Chimborazo Volcano (6,268 m) or in the Cotopaxi Volcano (5,897 m) for more accurate and appropriate information about the area.

KEY WORDS: <BIOPHYSICS>, <PHYSICS>, <ASTROPARTICLES>, <CORSIKA (SOFTWARE)>, <EXTENDED ATMOSPHERIC RAIN>



INTRODUCCIÓN

En 1912, Víctor Hess descubrió las astropartículas (AP), estas son partículas provenientes del espacio como; núcleos atómicos, fermiones, fotones, neutrinos con energías que pueden superar los 10^{20} eV. Al llegar al borde exterior de la atmósfera de la Tierra interactúan con los núcleos atmosféricos y generan "partículas secundarias" también conocidas como EAS (chubascos atmosféricos extendidos por sus siglas en inglés, Extensive Atmospheric Showers) (Tonwar, 2003).

La región Andina de América Latina ha despertado en los últimos años un gran interés para la construcción de observatorios de altas energías como CTA y HAWC (Abeyssekara et al., 2013; Bigongiari, 2016). El fácil acceso a altitudes superiores a las 2500 m.s.n.m. representa un atractivo para el desarrollo de astronomía gamma y la detección de astropartículas.

Existe una amplia gama de detectores espaciales y observatorios terrestres, como en Latinoamérica tenemos a LAGO (LargeAperture Gamma Ray BurstsObservatory, en inglés) donde se ha detectado astropartículas de alta energía empleando arreglos de detectores Cherenkov de agua instalados en alta montaña (más de 4000 m.s.n.m.)(Sidelnik& Asorey, 2017).

El análisis de datos experimentales sobre EAS y la planificación de los experimentos correspondientes requiere un detallado estudio teórico de la cascada, que se desarrolla cuando una partícula primaria de alta energía interactúa con la atmósfera. Esto solo puede lograrse mediante cálculos detallados basados en técnicas de Monte Carlo teniendo en cuenta las interacciones electromagnéticas y hadrónicas en un régimen de alta energía.

Es por eso, por lo que se han escrito varios programas de computadora para simular el desarrollo de EAS en la atmósfera como es el paquete computacional CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAScade, por sus siglas en inglés) (Heck, Knapp, Capdevielle, Schatz, & Thouw, 1998), con el que esta investigación trabaja para obtener información necesaria sobre las características de las EAS en la ciudad de Riobamba-Ecuador. El aporte científico de este trabajo radica en una contribución en la estimación del flujo de partículas secundarias a los grupos de investigación locales dentro de esta área.

En este proyecto se estructura de la siguiente manera. En capítulo I, se plantea la problemática del estudio que implica la ausencia de datos de astropartículas en Riobamba, Ecuador a 2764 m.s.n.m.,

así como su marco referencial, justificación de su trabajo, objetivos a cumplir, y antecedentes sobre el estudio de estas en otras áreas del mundo.

En el capítulo II se define la teoría aceptada por la comunidad científica, que es relevante para la comprensión del tratamiento del problema planteado. Se revisan los temas: generalidades sobre las astropartículas, su fuente de origen y mecanismos de aceleración, métodos de detección, partículas secundarias y sus tipos de EAS, y tipo de detectores para su observación.

En el capítulo III refiere a la metodología con la que se trabajó para las simulaciones y diseño de investigación utilizado, donde además encontramos el software de uso libre utilizado para la simulación de secundarios a partir de primarios, las unidades y coordenadas con las que trabaja, los tipos de modelos para partículas que contiene, el tipo de sistema atmosférico que utiliza, así como la descripción de la desviación de partículas por el campo magnético de la tierra.

En el último capítulo (IV) se exhiben los resultados obtenidos, las gráficas de las distribuciones longitudinales, los histogramas del flujo de partículas, el área de partículas necesarias para su observación, y por consecuente las conclusiones, resultados y recomendaciones para la utilización de futuros proyectos.

Las simulaciones debido a su tamaño fueron realizadas en servidores compartidos libremente por la Escuela Politécnica Nacional de Quito por el PhD. Nicolás Vásquez, que a su vez trabaja con RedERACli (Red Ecuatoriana de investigación en Astropartículas, Rayos Cósmicos y Clima Espacial.) y CEDIA (Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia).

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

En la Universidad de San Carlos de Guatemala se realizó una “Simulación de cascadas aéreas extensas en Corsika para la colaboración Lago en Guatemala” por (Aguilar, 2017) donde se obtuvo simulaciones de EAS iniciadas por protones de alta energía, donde la densidad de partículas de las cascadas aéreas que llegaban al detector aumentaba si la energía del primario también lo hacía. La densidad disminuyó cuando se alejaba del núcleo de la lluvia en la distribución lateral. Además, se comprobó que el software CORSIKA para una hora de flujo de cascadas ayudaba a seleccionar aleatoriamente partículas primarias consiguiendo por ende secundarias al nivel del detector. En sus resultados se consiguió abundancia de fotones, una gran cantidad de muones, y electrones, positrones, piones, neutrones y protones.

Un segundo trabajo corresponde a (Bahmanabadi & Moghaddam, 2018) donde se realizó una simulación de la estructura temporal de las EAS con CORSIKA, iniciadas por varias partículas primarias a nivel de observatorio Alborz-I. Se simularon los lapsos de tiempo de EAS con varios ángulos cenitales en la atmósfera producidos por diferentes partículas primarias, incluyendo rayos gamma, protón, carbono y hierro a nivel de observatorio Alborz-I en el rango de energía de $3 * 10^{13}$ eV – $3 * 10^{15}$ eV por Medio del código CORSIKA Monte Carlo. La distribución del retardo de tiempo de un frente de EAS con respecto a la primera partícula que toca el suelo, en cada uno de los compartimientos de distancia del núcleo, se pudo describir de una manera adecuada mediante una función log-normal $f(\tau) = \frac{a}{\tau} e^{-\frac{\log(\tau-b)^2}{c}}$ descrita por (Battistoni, Ferrari, Carboni, & Patera, 1998), especialmente para partículas primarias cargadas pesadas. Además, también se encontró que la curvatura del disco de las EAS es más pequeña a distancias cercanas del núcleo que a distancias lejanas. La curvatura del disco de la ducha disminuye a medida que aumenta la masa.

En otra investigación tenemos a (Das, Hazarika, & D. Goswami, 2018) quienes efectuaron un estudio de simulación sobre algunos parámetros de fotones de Cherenkov EAS provenientes de diferentes primarias incidentes en varios ángulos cenitales sobre un nivel de observación de gran altitud. Se estudió los patrones de distribución de la densidad lateral, el tiempo de llegada y la posición angular de los fotones de Cherenkov generados iniciadas por primarias de rayos γ , protones y

hierro que inciden en diferentes energías. Este estudio fue importante porque contribuye a distinguir las duchas iniciadas por rayos γ de las duchas hadrónicas en la astronomía de rayos γ basada en tierra, donde se está utilizando la técnica de arreglo telescópico de Cherenkov (CTA, por sus siglas en inglés).

El código de simulación CORSIKA se utilizó para la generación de EAS originadas por primarios en un rango amplio de energías. Se concluyó que en general, la fluctuación de la EAS para la densidad y el tiempo de llegada de los fotones Cherenkov disminuyen a medida que aumenta la energía de la partícula primaria, y es más alta para el protón primario y menor para el rayo gamma en todos los ángulos cenitales. Al estimar las incertidumbres sistemáticas en los datos de un experimento de rayos γ , esta información proporciona un aporte importante científico para ser considerado.

Un ejemplo en nuestro país se registra en la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador donde se realizó un trabajo por (Delgado, 2017) sobre “Caracterización de los detectores Cherenkov de agua de LAGO-México mediante simulación, para la determinación del área efectiva de partículas secundarias generadas por un gamma primario de energías entre 200 GeV y 1.1 TeV” junto con la colaboración de LAGO-México, donde se simuló lluvias atmosféricas extendidas (EAS) generadas por un gamma y un protón de 10 TeV que inciden verticalmente en la atmósfera y se encontró la proporción de partículas secundarias: gammas, muones, antimuones, electrones y positrones que llegan al nivel de los detectores. Estos generaron una diferencia de 20 muones a 1 entre la lluvia iniciada por un protón y un fotón gamma, respectivamente. Además, se presentó la simulación de un detector Cherenkov de agua como trazador de partículas, el cual permitió diferenciar entre una cascada generada por un protón o un gamma.

1.2. Planteamiento del problema

Varios países Latinoamericanos son incentivados hacia el desarrollo de la física de astropartículas por las ventajas geográficas de su zona, como tenemos a el Observatorio Pierre Auger, en Malargüe, Argentina , donde se cuenta con 1600 detectores de superficie, distribuidos en un área de 3000 km^2 (Aab et al., 2015) , o en Bolivia que junto a Japón trabajan en un proyecto llamado “ALPACA” (Takita, 2017), donde se planea cubrir $83,000 \text{ m}^2$ a 4,740 metros de altitud cerca del monte Chacaltaya en La Paz. Al mismo tiempo en Chile se están elaborando arreglos de telescopio Cherenkov (CTA) en el cerro Paranal para el año 2025 (Arrabito et al., 2019) , este, se

convertirá en el observatorio de rayos gamma más grande del mundo, donde se planea obtener información diez veces más potente que los telescopios actuales.

Desde Sudamérica hasta una zona de África se encuentra una región llamada “Anomalía del Atlántico Sur”, donde el campo magnético de la tierra está debilitado. Ecuador, por su parte, se encuentra en la lista de países de interés científico, además de que posee zonas donde la altitud es conveniente como el Volcán Chimborazo a (6,268 m) que es considerado el punto más cercano al sol.

La ciudad de Riobamba encontrada en la provincia de Chimborazo, ha colaborado en trabajos relacionados con LAGO como; “Panchito Water Cherenkov Detector” (Quishpe et al., 2015) donde se analizaron muestras de agua purificadas mediante sistemas químico-físicos y se estudiaron algunas características como el índice de refracción, la absorbancia, la conductividad, así como el costo de producción para detectores. Este tipo de trabajos aún no han realizado simulaciones correspondientes con el software CORSIKA (Heck et al., 1998), enfocados hacia las astropartículas y por ende no se tiene un estudio adecuado sobre el flujo de las mismas en su zona.

1.3. Justificación

El flujo partículas secundarias producto de las astropartículas es dependiente de las variables atmosféricas y geofísicas como: presión, temperatura, la densidad, altura y campo geomagnético local. La densidad de la atmósfera refleja cambios en las concentraciones de sus especies químicas y esto produce una variación en la interacción de las astropartículas con los núcleos atmosféricos reflejada en la tasa de partículas secundarias al nivel del detector. Al haber menos núcleos atómicos para interactuar disminuye el flujo de secundarios y viceversa. De igual manera la interacción de las astropartículas depende de la intensidad de campo magnético local y rigidez de corte (Shea & Smart, 2004). Su estudio tiene un lugar especial en física, no solo por derecho propio, sino también al papel pionero que ha jugado la investigación de rayos cósmicos y que todavía continua haciéndolo en el estudio de las partículas elementales y sus interacciones (Perkins, 2009).

Anteriormente, se ha reportado en proyecto como LAGO (Allard et al., 2008), que a mayor altura sobre el nivel del mar, menor es el área de detección requerida, por eso a diferencia con bajas alturas donde el uso de detectores es de carácter mayoritario, se busca en esta tesis determinar la viabilidad y del uso de detectores de superficie tipo Cherenkov de agua, así como el número de estos y aportar información científica de alta calidad sobre el flujo y la naturaleza de las partículas cósmicas.

Riobamba al encontrarse a 2764 m.s.n.m (Vega & Jara, 2009) se sitúa en un lugar ventajoso por su altitud para ubicar detectores de astropartículas, similar al detector de agua Cherenkov (WDC) tipo LAGO (Quishpe et al., 2015).

El cáncer así como varias enfermedades por daño al ADN pueden ser causadas por radiaciones ionizantes como lo son las astropartículas (Cucinotta & Durante, 2006). Se puede además encontrar contribuciones como; la creación de nuevos tipos y métodos de detección de astropartículas, astrofísica, física de partículas o incluso innumerables áreas como la meteorología, hidrología, climatología y relacionadas a estas, debido a que el conocimiento de las interacciones de alta energía todavía no está completo.

Por eso se han creado paquetes computacionales que faciliten el estudio de estas partículas. Por ejemplo, tenemos al código CORSIKA (Heck et al., 1998) que es de libre distribución, se desarrolló originalmente sobre la base de sistemas de programas bien establecidos en 1998 y a partir de entonces se ha mejorado este software exponencialmente. Mediante el software CORSIKA podemos caracterizar los parámetros necesarios y contribuir información esencial a todas las áreas de interés. Aunque este tipo de estudios también se han llevado a cabo ampliamente en el pasado, no existen aún muchos estudios aplicables particularmente a niveles de observación de gran altitud (Das et al., 2018), de esta forma se justifica la necesidad de estas simulaciones en la ciudad de Riobamba.

1.4. Objetivos

1.4.1 General

Determinar el flujo de partículas secundarias generadas por protones, rayos gamma y otras especies químicas provenientes del espacio en la localidad de Riobamba-Ecuador, mediante el método Montecarlo utilizado en CORSIKA.

1.4.2 Específicos

- Determinar los perfiles longitudinales asociados a las diferentes astropartículas primarias que llegan a Riobamba; identificando el modelo de decaimiento hadrónico en el software CORSIKA.
- Diferenciar la componente de muones generados por los rayos gamma de aquellos generados por los protones, así como la variación de dicha cascada respecto al centro para una hora de flujo de partículas.

- Determinar la fluencia de partículas secundarias para la altura de Riobamba y definir la cascada iniciada por un protón y/o gamma de 1 TeV para un ángulo zenit de 90° .
- Simular la fluencia de partículas secundarias generadas en las EAS considerando una hora de flujo de astropartículas en la atmósfera de Riobamba, en un rango de energía de 13 GeV a 1000 TeV para establecer el tipo de detector de astropartículas adecuado.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Astropartículas

Las astropartículas son partículas relativistas que llegan a la Tierra desde todas las direcciones, lo que proporciona una evidencia sorprendente de la existencia de aceleradores efectivos en el Universo (Morlino, 2017). Generalmente son partículas cargadas eléctricamente, como protones, núcleos pesados, electrones y positrones, pero más ampliamente se incluye entre ellos también partículas eléctricamente neutras como neutrones y neutrinos del espacio exterior (Mészáros Péter, 2010). Sin embargo, así como la tierra posee un campo magnético, en el cosmos también existen estos campos que interactúan con las astropartículas cargadas. Como consecuencia el origen de las partículas cargadas eléctricamente no está determinado, pese a esto se tienen teorías del nacimiento de estas mismas.

Se dice que los de más bajas energías provienen del Sol y de otras estrellas cercanas (Dogiel, 2012). Otras más energéticas pueden provenir de efectos violentos en el centro de la galaxia, cataclismos astrofísicos fuera de la Vía Láctea, de explosiones de estrellas, supernovas o agujeros negros. Los rayos cósmicos generados en alguna fuente astrofísica antes de interactuar con núcleos atmosféricos son denominados "primarias" para su estudio posterior.

2.1.1 Fuentes de Energía

De acuerdo a la energía las astropartículas pueden ser de origen : solar (15-30 GeV), galáctico ($10^{15} - 10^{16}$ eV), extragaláctico (hasta 10^{21} eV); interplanetario, y magnetosféricas tienen una energía del orden superior a MeV (Dorman, 2015).

- **Sol:** Principal fuente de radiación que la tierra ha estado expuesta y que produce ondas electromagnéticas en casi todos los rangos y que son altamente energéticas debido a las explosiones y ráfagas solares que posee. El flujo de partículas de esta fuente llega constantemente a la tierra, donde está, es protegida por su campo magnético.
- **Supernovas:** Colapso gravitacional de estrellas cuando finaliza su tiempo de vida (cesan las reacciones nucleares) debido a un desbalance entre la gravedad y la presión de radiación, el material que sale disparado por esta explosión llamado "remanente" genera

radiaciones altamente energéticas y enriquece todo el medio estelar para la formación de nuevas estrellas. Aunque a veces se ocultan en el polvo estelar, la gran luminosidad que producen ha servido para el descubrimiento de estas.

- **Cuásares: Fuentes** de radio y ópticas más brillantes del cielo, pero con grandes desplazamientos al rojo. Se les asocia con agujeros negros entre $10^6 - 10^9$ masas solares en los centros galácticos y tiene luminosidades $10^{13} >$ que el sol (1026 W).
- **Núcleos activos de galaxias (AGNs):** Asociados con los cuásares, se dice que los agujeros negros de estas galaxias consumen materia (estrellas, gas, polvo) formando un disco de acreción resultado de la disminución y conservación del momento angular, y los mismos forman jets de energía. Cuando el material se agota, la AGN se “apaga” y solo queda un agujero negro supermasivo, por eso la luminosidad varía con el tiempo (Perkins, 2009).

2.2 Origen de aceleración de astropartículas

Mecanismo de Fermi

Enrico Fermi en 1950 analizó los problemas al estudiar los rayos cósmicos, uno de ellos fue el origen de su aceleración, sus mecanismos. Uno de los primeros que analizó fueron los llamados “espejos magnéticos” los cuales fueron así nombrados por los campos magnéticos relacionadas a los movimientos variados que producirían nubes interestelares ionizadas. Este estudio sin embargo no justifica las energías registradas por los rayos Cósmicos.

Pese a varios mecanismos propuestos por Fermi, existe un mecanismo de aceleración de gran interés, en esta vez examinan aceleradores a través de nubes de plasma cargadas magnéticamente. Lo que ocurre en este proceso es un incremento de energía original después de “ n ” interacciones dentro de la nube. Así sea E_i la energía inicial con la que la partícula ingresa a la nube, y E_n la energía incrementada por sus interacciones. Vamos a llamarle a (ϵ) el incremento de energía, $\Delta E = \epsilon E$.

$$E_n = E_i(1 + \epsilon)^n \quad (1)$$

Entonces si queremos obtener el n° de integraciones solamente despejamos n .

$$\frac{E_n}{E_i} = (1 + \varepsilon)^n \quad (1.1)$$

$$n = \ln\left(\frac{E_n}{E_o}\right) / \ln(1 + \varepsilon) \quad (1.2)$$

En cada aceleración la partícula tiene una probabilidad de escape (p_{esc}) por etapa de la nube cargada. Si esta probabilidad es constante, su probabilidad esta vez de permanecer en n etapas será $(1 - p_{esc})^n$ y si usamos sumatoria para obtener el total de energía podemos utilizar:

$$\sum_{m=n}^{\infty} (1 - x)^m = \sum_0^{\infty} (1 - x)^m - \sum_0^{n-1} (1 - x)^m$$

Por lo tanto, la fracción de partículas aceleradas con energías $> E$ usando la Eq. (2) será proporcional a:

$$(N \geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1 - p_{esc})^m = \frac{(1 - p_{esc})^n}{p_{esc}} \quad (2)$$

Podemos ordenarlo e introducir n de la (2.1) y recordar la ley logarítmica $a^{lnb} = b^{lna}$ y darnos que cuenta entonces que además estas partículas con energías mayores son también proporcionales a:

$$(N \geq E) \propto \frac{1}{p_{esc}} \left(\frac{E}{E_i}\right)^{-\alpha} \quad (2.1)$$

Donde α después de despejar es igual a:

$$\alpha = \ln\left(\frac{1 - p_{esc}}{p_{esc}}\right) / \ln(1 + \varepsilon)^n \quad (3)$$

Ahora podemos llamarle a $E/E_i = E_{pr}$ y a C_1 tomarle con una constante de proporción y tendremos:

$$\ln(N > E) = C_1 + \ln E_{pr}^{-\alpha} \quad (4)$$

Despejamos la constante:

$$C_1 = \ln \left(\frac{N > E}{E_{pr}^{-\alpha}} \right) \quad (4.1)$$

Por lo tanto, podemos decir que el número de partículas $> E$ es proporcional a $E_{pr}^{-\alpha}$

$$N(> E) \propto E_{pr}^{-\alpha} \quad (4.2)$$

Al realizar la derivada de este con respecto a E obtendremos:

$$\left(\frac{dN}{dE} \right) \cong E^{-\alpha} \quad (5)$$

Y como observamos en (5) es igual a la ley de potencias de los rayos cósmicos descritos anteriormente para el espectro de Energía.

2.3 Detección de Astropartículas

Las astropartículas (AP) han sido detectadas en la Tierra, así como en el espacio alrededor de la Tierra, con globos, experimentos satelitales o detectores de EAS. De las astropartículas primarias, que se originan fuera de la atmósfera terrestre, aproximadamente 86% son protones simples (es decir, núcleos de hidrógeno), (11%) partículas α (como los núcleos de helio), y (2%) para electrones y existe una distribución de 1% para núcleos pesados como el uranio (Perkins, 2009). Su composición química se puede apreciar en la Figura 1-2 donde se muestra una comparación con elementos de abundancias solares.

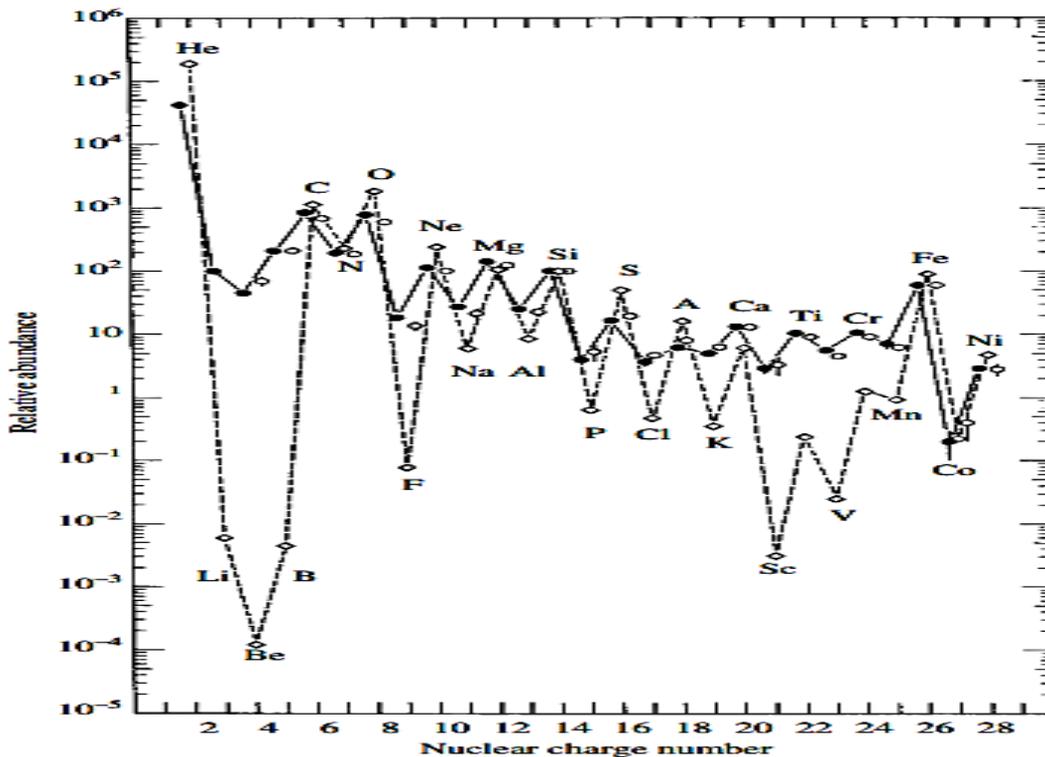


Figura 1-2: La composición química de los núcleos atómicos (línea continua) de astropartículas comparados con la abundancia química del sol (línea punteada).

Fuente:(Perkins, 2009)

La característica más impresionante es que el espectro de astropartículas se extiende durante al menos 13 décadas en energía y las partículas más energéticas detectadas tienen energías de unos pocos julios, aproximadamente 10 millones de veces más que la energía máxima alcanzable en el LHC. A pesar de este gran intervalo de energía, extraer información del espectro de astropartículas es difícil porque casi no tiene rasgos (Morlino, 2017).

2.4 Lluvias atmosféricas extendidas (EAS)

Las lluvias atmosféricas extendidas (EAS, por sus siglas en inglés) o simplemente lluvias atmosféricas (AS, por sus siglas en inglés) (Tonwar, 2003) son partículas primarias que interactúan con las de la atmósfera terrestre en su llegada y producen una serie de colisiones que por resultado generan nuevas partículas, éstas son llamadas secundarias y llegan con velocidades relativistas. Las interacciones en la atmósfera podemos encontrarlas a alturas entre 10-40 km de distancia sobre el nivel del mar después que el primario se divide en su choque con partículas como O_2 o N_2 .

Aunque las EAS contienen componentes tales como: muónico, electromagnético, hadrónico, son estos últimos la mayor parte de la EAS. Normalmente se inician por protones, y son hadrones de

astropartículas primarias extremadamente energéticas ($E > 10^{13}$ eV, también llamados 10 TeV) que ingresan a la atmósfera isotrópicamente desde el espacio interestelar, como se observa en la Fig. 2-2.

Como los procesos de colisión están dominados por el decaimiento hadrónico, esta cascada formada se propaga longitudinalmente, a lo largo de la dirección del vector de impulso inicial del primario incidente (Grieder, 2010).

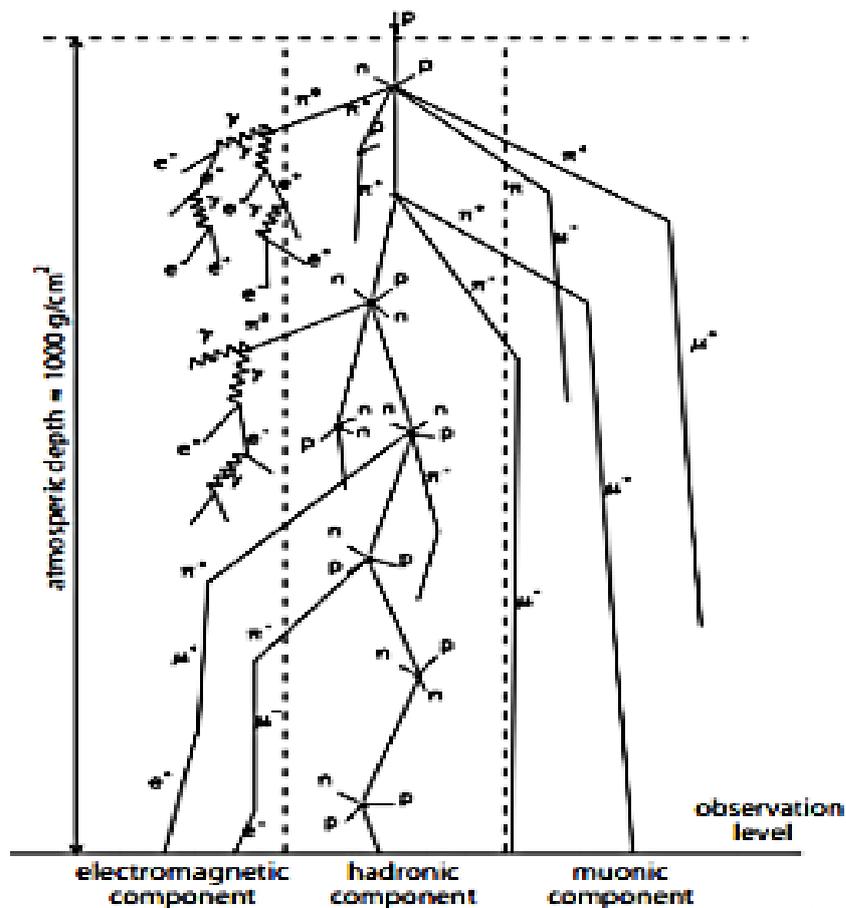


Figura 2-2: Descripción de una cascada atmosférica extendida a partir de un protón e interacciones con núcleos atmosféricos.

Fuente:(De Souza et al., 2007)

2.5 Espectro de Energía

El flujo de astropartículas es caracterizado al llegar a la tierra por seguir una ley de potencias de la forma:

$$\left(\frac{dN}{dE}\right) \cong E^{-\alpha} \quad (6)$$

Donde N representa el flujo de los rayos cósmicos y E la energía de las partículas. El exponente α se le conoce como índice espectral y no es un parámetro constante, presentando tres cambios; el primero recibe el nombre de “rodillas”, el segundo “tobillo” y el tercero “supresión”. En la Figura (3-2) podemos observar que energías del orden de hasta 10^{15} eV es de carácter lineal, y el α tiene un valor de -2.7 , en la siguiente región entre $(10^{15}-10^{16})$ eV, α tendrá un valor de -3.0 , luego este índice espectral regresa al valor de -2.7 con energías de hasta 10^{18} eV. Si las energías son de 10^{19} eV o superior el $\alpha = -4.2$, aquí tendrá una imagen de flujo de aspecto vertical (Perkins, 2009)

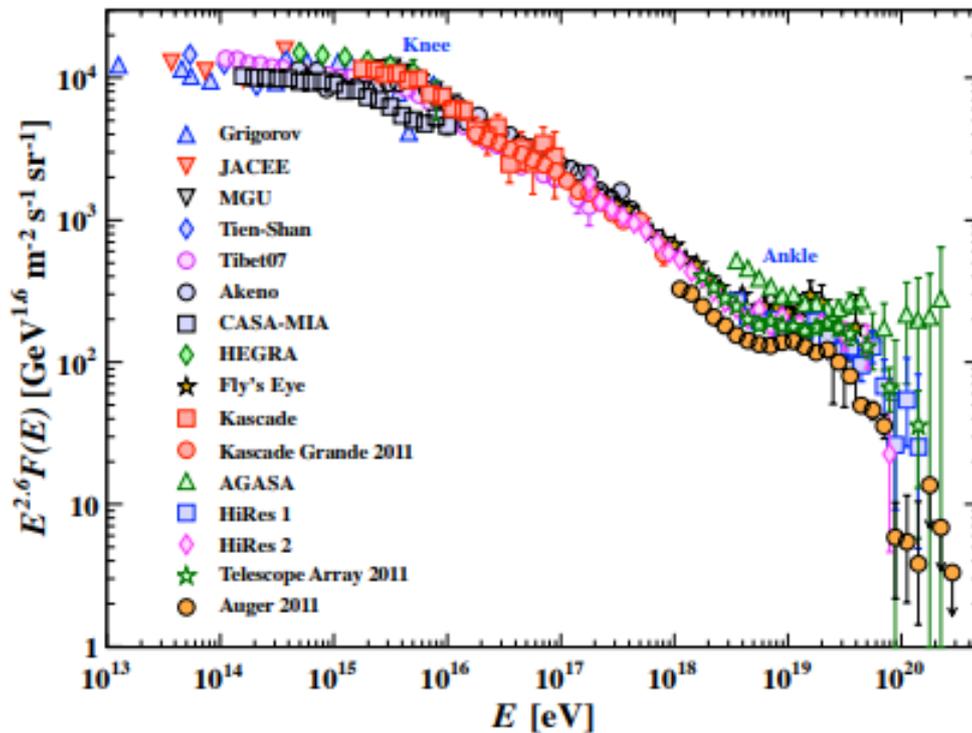


Figura 3-2: Espectro de energía de astropartículas observado por varios experimentos de investigación.

Fuente: (Beringer et al., 2012)

Además, se puede puntualizar que cuando el flujo de partículas es menor, su energía llega hasta $> 10^{20}$ eV. Además, se observa el espectro de astropartículas de diferentes estudios realizados por investigadores de diferentes partes del mundo, entre estos tenemos a: detectores de tipo Cherenkov, de fluorescencia, telescopios, satélites.

En la Figura 3-2 se puede determinar que por lo tanto la detección específica de las partículas y su energía depende del tipo de detector utilizado, así por ejemplo un detector de tipo Cherenkov puede ayudar a observar partículas de un orden de energía alto.

2.6 Tipos de EAS

2.6.1 Hadrónico

Los protones (o núcleos) que interactúan con los átomos de la atmósfera tienen normalmente gran masa y por eso alcanzan con mayor eficiencia altas energías. Este tipo de cascada suele ser llamado por algunos textos como componente duro (en el inglés, hard component) junto con los muones. Los hadrones son llamados también como componente activo nuclear o componente fuerte y se dice que contienen el 1% del total de partículas que se observan a nivel del mar en una simulación promedio, además son los encargados de repartir la energía de las EAS (Grieder, 2010).

Este tipo de componente tiene un desarrollo longitudinal y lateral en la vector dirección inicial de la partícula primaria. Comúnmente las partículas iniciales que contiene la cascada son piones (π^+ , π^- , π^0) y kaones (K^+ , K^- , K^0), cómo se puede observar en la Fig.4-2, después estas decaen dando lugar a otras partículas secundarias.

Tabla 1-2: Decaimientos de partículas y sus porcentajes de ocurrencia.

| Decaimientos | Porcentaje % | Decaimientos | Porcentaje % |
|------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|
| $\pi^\pm \rightarrow u^\pm \nu_u$ | 99.99 | $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ | 21.13 |
| $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ | 0.01 | $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ | 5.6 |
| $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ | 1.2 | $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ | 4.9 |
| $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ | 98.8 | $K^+ \rightarrow u^+ \nu_u$ | 63.43 |

Fuente:(Pierog, 2019)

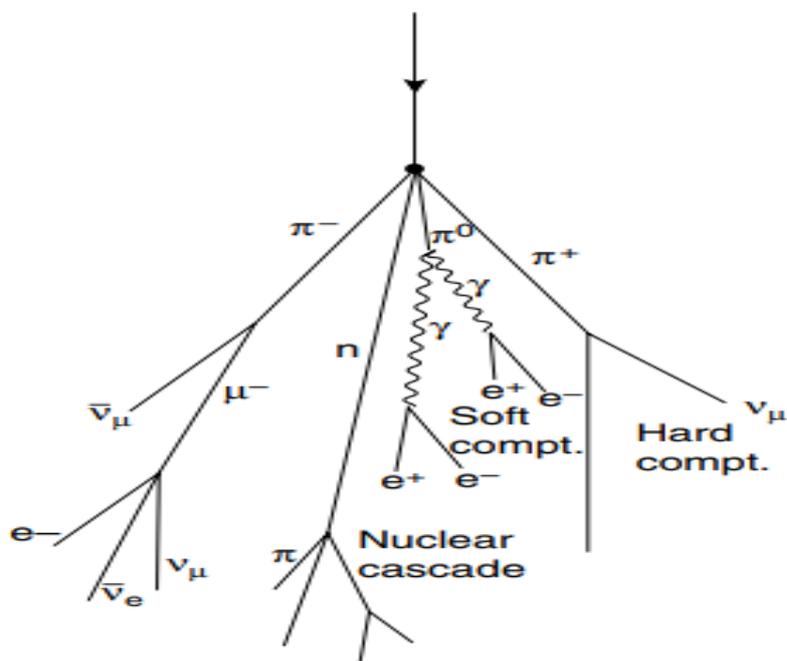


Figura 4-2: Diagrama donde se indica la descomposición y producción de partículas secundarias.

Fuente: (Perkins, 2009)

2.6.2 Electromagnético

Cerca del 89% de la cascada detectada se dice que tiene electrones y positrones de baja energía y son llamados componentes blandos en algunos textos. Después de que las partículas hadrónicas llegan al umbral de su energía convierten su energía en cascadas electromagnéticas y muónicas, estas alcanzan un máximo en una cierta altura atmosférica dependiendo de la energía de la partícula primaria. Las partículas cargadas se pueden detectar con mayor facilidad mediante detectores de superficie como los detectores Cherenkov o Detectores de fluorescencia (FD) explicados en las siguientes páginas.

Las principales colisiones de hadrones pueden ser entre protón-núcleo o protón-protón y si el primario es un hadrón energético puede producir 2γ como se puede observar en la Tabla 1-2 por los π^0 en su descomposición.

2.6.3 Muónico

Del decaimiento de piones cargados (π^\pm) podemos obtener muones μ^\pm y neutrinos muónicos ν_μ . Si la cascada de muones tienen energía ≤ 1 GeV decaerán en vuelo (Perkins, 2009), pero sí la cascada es enormemente energética, pueden llegar a profundidad subterránea, es por eso por lo

que a la cascada muónica se la llama también componente fuerte y contiene el 10% del número de partículas de la cascada que es detectada a nivel del mar.

2.6.4 EAS iniciadas por rayos gamma y electrones

Si las partículas son cargadas estas interactuarán con el campo magnético de la tierra, a diferencia de los rayos gamma de alta energía ($> 10^{12} \text{TeV}$) que no lo hacen, siendo importante por eso tomarlo en cuenta siempre en las mediciones. Las cascadas tienen procesos importantes que lideran a sus consecuentes estos son:

- Bremsstrahlung, también llamada de “frenado” es una partícula cargada e^+ que es “desviada” por interacción con el átomo y como consecuencia emite radiación electromagnética (e^+, γ)
- Creación de pares (producción de pares e^+e^- siempre que $E_\gamma > 2mc^2$ o si alcanza el umbral energético a 1.052 Mev

Estos crean repetidos procesos en las sub-cascadas que se crean a largo de esta cambiando energías y tamaños diferentes como se observa en la Fig.5-2. Cuando la energía es menor aún tenemos efectos consecuentes que aún continúan contribuyendo al aumento de la EAS con electrones de baja energía, algunos procesos que ocurren son como tenemos en la Tabla 2-2.

Development of gamma-ray air showers

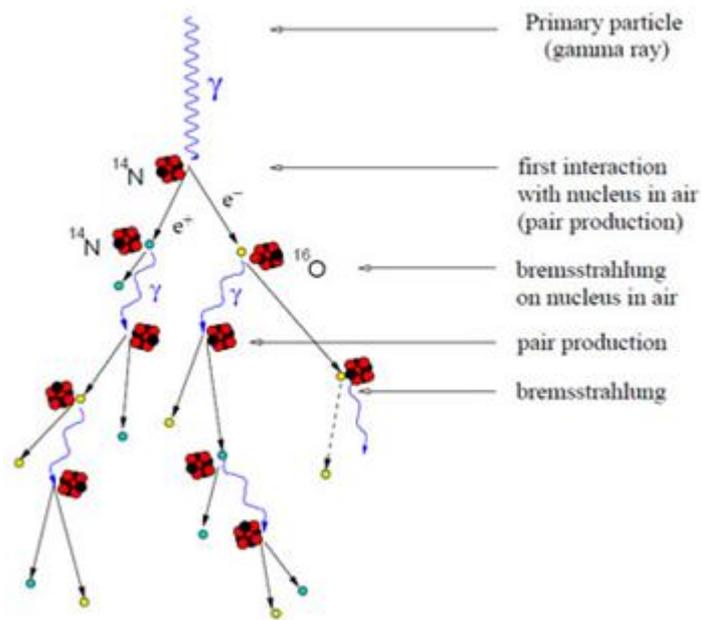


Figura 5-2: Desarrollo de la cascada de rayo gamma y electromagnético.

Fuente:(Aharonian et al., 2006)

Tabla 2-2: Procesos resultantes por fotones y electrones.

| Procesos iniciados por fotones | |
|---------------------------------|--|
| – Dispersión de Rayleigh | – Producción de pares (Coulomb) |
| – Efecto fotoeléctrico | – Interacciones fotonucleares |
| – Efecto Compton | – Interacciones fotones-fotones |

| Procesos iniciados por electrones | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| – Dispersión de Coulomb | – Radiación Cherenkov |
| – Ionización, Excitación | – Emisión de Radio |
| – Bremsstrahlung (Coulomb) | – Aniquilación Positrón |
| – Radiación Sincrotrón | – Dispersión Inversa Compton |

Fuente : (Grieder, 2010)

2.7 Detectores

2.7.1 Detector Cherenkov de Agua

También llamado Water Cherenkov Detector (WCD) por sus siglas en inglés, es un dispositivo utilizado para la detección de astropartículas que tiene como objetivo aprovechar la generación de luz Cherenkov en un material dieléctrico (agua purificada) por el paso de una partícula con una velocidad mayor a la velocidad de la luz en ese material (Glenn G. Knoll, 2010), de esta forma se puede caracterizar de manera indirecta las partículas secundarias que son resultado de una lluvia atmosférica extensa (EAS).

Estas partículas al atravesar el tanque con el agua, son detectadas por el fotomultiplicador, la señal producida por efecto Cherenkov (Bertou & Allard, 2005) es amplificada, y gracias a la electrónica podemos cuantificar y obtener la información adecuada del proceso físico ocurrido. Este tipo de detectores son de menor costo, son de superficie y más accesibles al usuario.

2.7.2 Detector de Fluorescencia

Las cascadas de partículas que interactúan en la atmósfera además de ionizar también excitan a los átomos, y una parte de esta aparece como un suceso ya conocido “la fluorescencia” en un porcentaje de 25/5000 de la energía de las EAS. La mayoría de las componentes de interacción provienen de partículas de nitrógeno, generando luz principalmente en la región (300-450 nm) y emitiéndola isotrópicamente, de esta forma se pueden detectar sin una dirección específica.

Con este tipo de información se puede obtener el ángulo azimutal θ y el ángulo cenital denotado por φ , la densidad de fotones y su tiempo de llegada entre otros.

Como un ejemplo de este tipo de detectores tenemos a “Fly’sEye” que como su nombre indica es un detector con forma de ojos de mosca utilizada en proyectos como “The Pierre Auger Experiment” (Dova, 2003) donde se combinó con otros detectores de superficie como en la Fig. 6-2, convirtiéndolo en un híbrido que conlleva una mejor calibración cruzada, una amplia visión y que puede detectar una mayor cantidad de astropartículas.

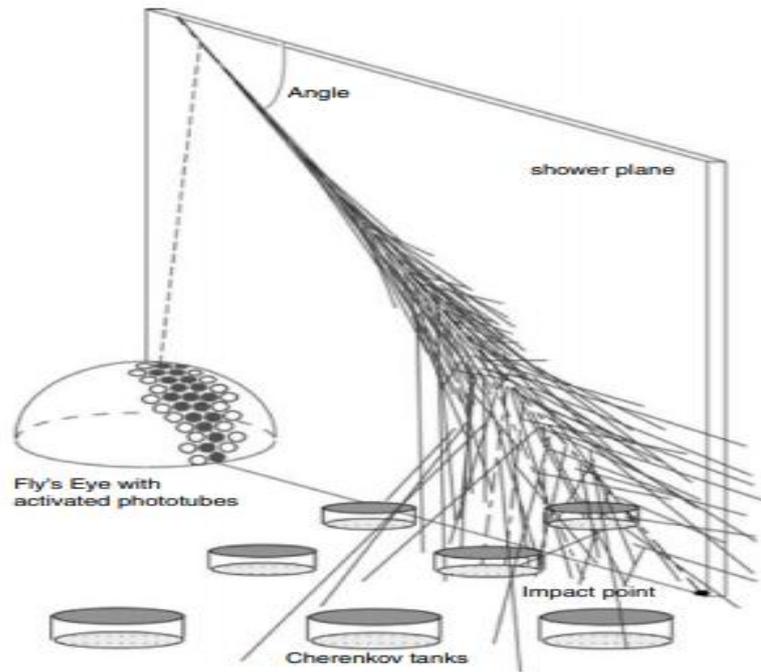


Figura 6-2: Detector híbrido “Fly’sEye” combinado con detectores Cherenkov y fluorescente y el desarrollo de las EAS.

Fuente:(Abraham et al., 2010)

2.9 Anomalía del Atlántico sur (SAA)

Se sabe que la tierra es protegida de tormentas geomagnéticas gracias al campo magnético de la Tierra, los mismos estudios sobre este han encontrado zonas donde este campo está deprimido, a este se le conoce como Anomalía del Atlántico Sur o por sus siglas en inglés SAA (South Atlantic Anomaly). Se dice que esta situación ocurre debido al origen dipolar del campo magnético con un desvío de aproximadamente 436 km desde el centro de la Tierra hacia el Sureste Asiático (Asikainen & Mursula, 2005).

Se puede observar con forma de agujero desde el espacio, esta región de baja intensidad se describe desde América del Sur hasta el este de África, aunque esta región se ha expandido hacia el oeste con el tiempo (Cnossen & Matzka, 2016) y se dice que el SAA se mueve 0.06° Norte y 0.28° Oeste por año (Anderson, Rich, & Borisov, 2018). En la zona del SAA los cinturones de Van Allen están próximos a la superficie terrestre, entonces las partículas cargadas alcanzan altitudes bajas aumentando su radiación.

Como la radiación espacial de alta energía perturba los dispositivos electrónicos, afecta a los humanos y además existe una escasa información del flujo de partículas en su área, el estudio de

esta área ha sido de interés científico. Se sabe asimismo que las naves espaciales apagan o desactivan sus sistemas al cruzar esta región debido a la radiación extrema.

El conocimiento de esta anomalía e información de las características de la SAA conllevan una corrección adecuada para cualquier área de interacción con esta, como el blindaje adicional en la estación espacial internacional y tiempos de desactivación y apagado exactos de sus sistemas para evitar daños severos. Aún existe escasez de información de la SAA en sus fronteras, así que, como resultado, mientras más datos se obtengan sobre partículas energéticas mayor van a ser las consecuencias científicas positivas.

Hoy en día se ha podido rastrear el movimiento de la SAA con satélites y detectores adecuados en diferentes partes del mundo sincronizadamente y junto con los datos tomados en periodos anteriores. En la Fig. 7-2 podemos observar un mapa de la anomalía tomada de nave espacial DMSP F18 creada conjuntamente gracias a la toma de datos de años pasados.

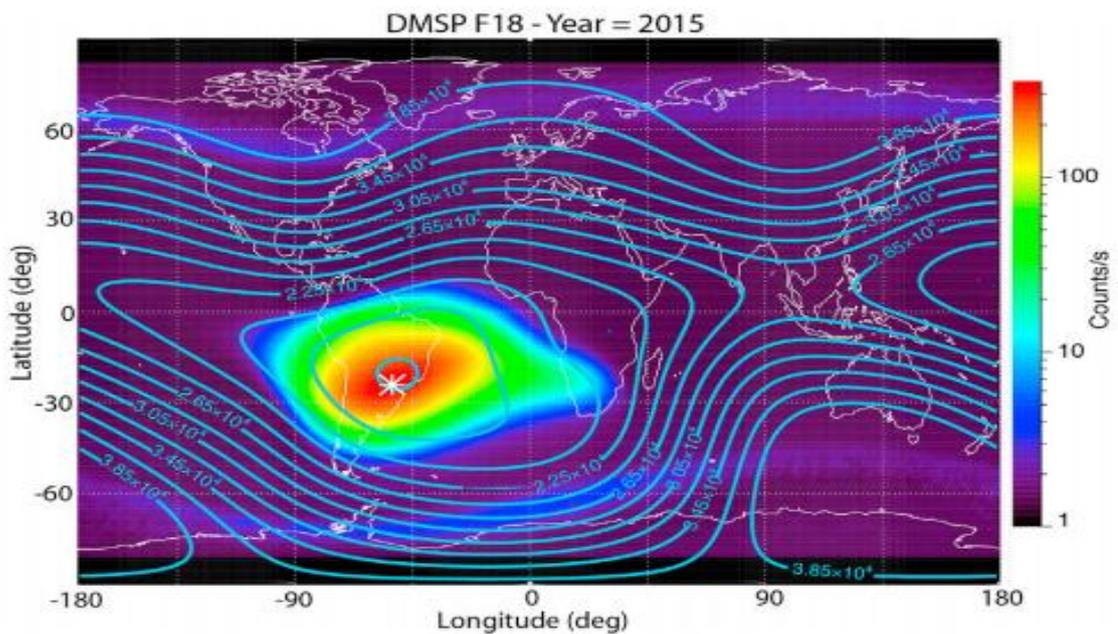


Figura7-2: Mapa geográfico del exceso en la radiación tomada por la nave espacial DMSP F18 en 2015 según la contaminación eliminada (conteos)

Fuente:(Anderson et al., 2018)

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Diseño de la Investigación

Es un diseño no experimental y de investigación cualitativa debido a que se va a realizar una simulación teórica.

3.2 Software utilizado en el desarrollo de la investigación

3.2.1 Corsika

(Cosmic Ray Simulation for Kascade, por sus siglas en inglés), es un programa creado sobre el método de Monte Carlo para estudiar la evolución de las cascadas atmosféricas extendidas o también llamadas EAS iniciadas por partículas primarias como: fotones, hadrones, electrones, núcleos o cualquier otra partícula con energía de hasta el rango de los EeV (10^{18} eV) o aún mayor (Heck et al., 1998). El desarrollo de CORSIKA permite reproducir las fluctuaciones correctas alrededor de los valores promedios y los valores correctos con este código de simulación.

Se realizan procesos como la persecución de todas las partículas secundarias después de sus interacciones con los primarios y partículas de la atmósfera, y estos datos son juntados en el momento de su detección, permitiendo así una detección precisa de las EAS. Tenemos un script-shell utilizado en Linux donde podemos realizar la escritura, en este deben ingresarse diferentes tipos de parámetros dependiendo de la zona donde se simulen, como son: la altura, rigidez magnética, ángulo cenital, ángulo azimutal, energía de corte, y varios más que ayudan a que la simulación sea de la manera más eficiente y específica posible.

3.2.2 Sistema de Coordenadas en Corsika

Dentro de CORSIKA tomamos en cuenta el campo magnético de la Tierra iniciando desde la altura del mar. Tenemos un sistema cartesiano con un eje (z) apuntando hacia arriba, un eje (x) apuntando al norte (este es el norte del meridiano magnético) y un oeste con el eje (y). Aquí se toma en cuenta el campo magnético de la Tierra iniciando desde la altura del mar.

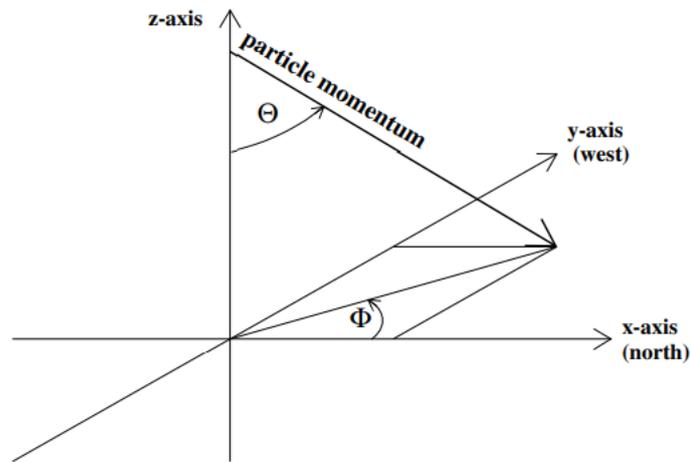


Figura 1-3: Sistema de coordenadas dentro del programa de simulación Corsika

Fuente: (Pierog, 2019)

El ángulo ϕ , como podemos observar en la Fig. 1-3 es el azimutal, este, es tomado entre el eje norte (x) y la componente horizontal de la partícula momento hacia la izquierda, mientras que el ángulo θ es el cenit y esta entre el eje de la Z negativa, y el eje de la partícula momento. Estas mediciones son diferentes con otras simulaciones dentro del estudio de la EAS, y su sistema de coordenadas por ende está establecidas de diferente forma.

3.2.3 Deflexión en el campo magnético terrestre

El campo magnético de la tierra puede desviar partículas cargadas como protones o electrones en sus líneas de campo, por ende, es importante considerar la información de este para poder determinar una información eficiente de las cascadas de los rayos cósmicos. Aunque puede estas líneas de campo son parecidas a la de un imán, no coincide el polo norte magnético terrestre con el geográfico, como se muestra en la Figura 2-3 (señalaremos entre paréntesis para comparación), es por eso por lo que se realiza una corrección angular donde se obtienen componentes tal como:

Tabla 1-3: Valores Geomagnéticos Riobamba-Ecuador

| Componente | Cambiando por año |
|--|-------------------|
| $B = 28,148.7 \text{ nT} \pm 145 \text{ nT}$ | -81.9 nT |
| $\vartheta = 18^\circ 8' \pm -0^\circ 8'$ | 0° 13' |
| $\delta = 3^\circ 28' \pm 0^\circ 20'$ | 0° 10' al oeste |
| $B_x = 26,700.4 \text{ nT} \pm 128 \text{ nT}$ | -55.3 nT |
| $B_z = 8,764.3 \text{ nT} \pm 157 \text{ nT}$ | -94.3 nT |

Realizado por: Iser Peña (2020)

Donde B (F) es la fuerza del campo magnético, ϑ (I) es el ángulo de inclinación, δ (D) ángulo de declinación. B_x son los componentes en el eje horizontal y B_z en el eje vertical. Estos valores fueron obtenidos el 19/12/19 para la localización de Riobamba-Ecuador con el programa Geomag en la web:

- <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm> en esta página se puede calcular los componentes del campo magnético de otras regiones del mundo.

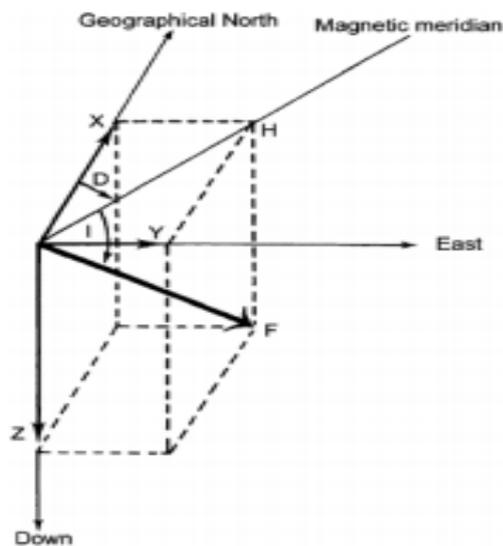


Figura 2-3: Imagen de referencia CORSIKA

Realizado por (Lowery, Klinkhachom, Ph, & Virginia, 2016)

Donde los ángulos de declinación (D), fuerza (F) e inclinación (I) del campo magnético terrestre. Además, en el eje (Y) tenemos al este, el eje (Z) hacia abajo, (X) es el norte geográfico y (H) esta denominado para el meridiano magnético.

3.3 Rigidez magnética y de corte

3.3.1 Rigidez magnética

En Corsika cuando nos da la opción “RIGIDITY” nos sirve para comprobar si los primarios de baja energía podrían alcanzar la superficie terrestre, aquí se toma en cuenta el campo magnético local terrestre y el ángulo con que incide, además las partículas que no llegan al suelo son no tomadas en cuenta.

3.3.2 Cut-off Energy

Denominado energía de corte a los datos con rangos mayores o mínimos de energía que se colocan en los cálculos para despreciar cantidades irrelevantes que se encuentren fuera de esos rangos. En Corsika se ingresa esta energía de corte dependiente de la altura y coordenadas geográficas colocadas en modelos matemáticos como el IGRF (Campo Internacional de Referencia Geomagnética , según sus siglas en inglés), estas son actualizadas debido a la variación secular magnética que existe en la tierra y la información puede ser tomada libremente de las páginas oficial <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, y calculada la rigidez de corte en <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Util/computeCR.php>, donde además están detallado los artículos sobre su modelación y parámetros.

3.4 Modelo atmosférico

El resultado total sobre la información de astropartículas depende de las interacciones que han sufrido a lo largo de su trayectoria, es por eso por lo que uno de los componentes necesarios que se debe tomar en ecuación es la atmósfera. Dentro de Corsika la altura y el núcleo con el que interactuará la partícula se da por efecto aleatoriamente, pero se pueden modificar estos datos dentro del software dependiendo de nuestros fines.

Consecuentemente encontramos un modelo para encontrar la variación de la densidad atmosférica creado por 5 capas que podemos encontrar actualizado juntamente con el mismo software cada año, sus datos específicos más recientes se pueden encontrar en su manual <https://www.ikp.kit.edu/corsika/70.php>. El modelo se describe:

$$T(h) = a_i + b_i e^{-h/c_i} \quad (7)$$

Donde $T(h)$ es la densidad de masa atmosférica con respecto a la altura (después de 112,8 km, en la termósfera esta se desvanece). a_i , b_i y c_i son los valores paramétricos dados por las capas, donde i va a variar en (7) si es del 1-4 y si su valor 5 (última capa) será:

$$T(h) = a_5 + b_5 \frac{h}{c_5} \quad (8)$$

Los datos más recientes obtenidos en Diciembre de 2019 se pueden observar en la Tabla 1-4.

3.5 Modelos de Interacción Hadrónica

3.5.1 Alta Energía

- **VENUS:** (VeryEnergeticNUclearScattering) principalmente maneja dispersión de energía ultra relativista entre nucleones, nucleos y entre ellos.
- **SIBYLL:** Utiliza colisiones hadrónicas suaves usando modelos de teoría en el campo de la QCD (Cromodinámica Cuántica).
- **HDPM:** ayuda a simular para altas energías, principalmente para protón-protón.
- **EPOS:** Enfoque dispersivo mecánico cuántico de conservación de la energía basado en partones con extensiones que permiten una extrapolación segura hasta energías más altas, EPOS activa también las secciones transversales inelásticas de interacción hadrón-núcleo a energías más altas.
- **DPMJET:** (Modelo de doble partón con JETs) describe interacciones hadrónicas energéticas hadrón-núcleo y núcleo-núcleo.

- **QGSJET y QGSII:**(Quark Gluon String Model with JETs) para interacciones hadrón-núcleo.
- **NEXUS:** (NEXT generation of Unified Scattering approach) mezcla a VENUS y QGSJET, trabaja para colisiones núcleo-núcleo con actuales modelos teóricos.

3.5.2 Baja Energía

- **GHEISHA:** (Gamma Hadron Electron Interaction Shower code) colisiones hadrónicas de hasta unos 100 GeV con Montecarlo.
- **URQMD :**(Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics) se utiliza para las interacciones elásticas e inelásticas de hadrones por debajo de 80 GeV en el aire y principalmente entre hadrón y núcleo.
- **FLUKA:** (FLUctuating Kascade) principalmente para interacciones entre hadrones y hadrón-núcleo.

3.6 Simulación en Corsika

3.6.1 Instalación

Las simulaciones de las lluvias atmosféricas se pueden obtener mediante la instalación de CORSIKA, la cual es obtenida de la página web:

➤ <https://web.ikp.kit.edu/corsika/download/>

En esta página uno puede escoger la versión más actual disponible (se necesita un usuario y contraseña, estos datos deben ser exigidos vía e-mail dependiendo de su necesidad investigativa). La instalación puede realizarse desde el terminal Linux donde se debe encontrar el archivo y descomprimir. En mi caso utilice la versión Corsika-76400 lanzada el 26 de Febrero del año 2018.

```
$ tarxvcorsika-76400.tar.gz
```

```
$ cd corsika-76400
```

Ahora para poder iniciar el ejecutable se debe hacer un:

```
$ ./coconut
```

Este nos va a ayudar a mostrar las distintas opciones que tiene el compilador. Si además le agregamos `-h` podemos desplegar información de ayuda sobre este comando, y si usamos el `expert` podemos configurar el ejecutable para otros fines de investigación.

Normalmente el programa ya viene configurado para las opciones de “Por defecto”, y son señaladas en cada parte por la palabra `DEFAULT`, aquí podemos compilar el programa según los bits de nuestra computadora, bien para 32 o 64 bits. En mi caso elegí la segunda opción.

```
| Please read the documentation for a detailed description |
| of the options and how to use it. |
| |
| Try './coconut -h' to get some help about COCONUT |
| Use './coconut --expert' to enable additional configuration steps. |
| |
|(press 'Enter' to select an option followed by "[DEFAULT]" or "[CACHED]") |
| |
|=====|
|
| Compile in 32 or 64bitmode?
| 1 - Force 32 bit mode
| 2 - Use compiler default ('-m64' on a 64bit machine) [DEFAULT]
|
| r - restart (reset all options to cached values)
| x - exit make
| (only one choice possible): 2
```

A continuación, tenemos unas opciones de este tipo para interacciones de alta energía en nuestro caso escogemos el `QGSJET 01C`:

```
| Which high energy hadronic interaction model do you want to use?
| 1 - DPMJET 2.55
| 2 - EPOS LHC
```

3 - NEXUS 3.97
4 - QGSJET 01C (enlarged commons) [DEFAULT]
5 - QGSJETII-04
6 - SIBYLL 2.1
7 - VENUS 4.12
r - restart (reset all options to cached values)
x - exit make
(only one choice possible): 5

Ahora elegimos los modelos hadrónicos de baja energía, por defecto el (1).

Which low energy hadronic interaction model do you want to use?
1 - GHEISHA 2002d (double precision) [DEFAULT]
2 - FLUKA
3 - URQMD 1.3cr
r - restart (reset all options to cached values)
x - exit make
(only one choice possible) :1

Aquí tenemos las geometrías del detector deseado.

Which detector geometry do you have?
1 - horizontal flat detector array [DEFAULT]
2 - non-flat (volume) detector geometry
3 - vertical string detector geometry
r - restart (reset all options to cached values)
x - exit make
(only one choice possible): 2

Necesitamos elegir opciones adicionales, 7a y luego la opción 9 y salimos con z.

options: QGSJETII TIMEAUTO VOLUMEDET GHEISHA

Which additional CORSIKA program options do you need?

- 1a - Cherenkov version for rectangular detector grid**
- 1b - Cherenkov version for telescope system (using bernlohr IACT C-routines)**
- 1c - apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.**
- 1d - Auger Cherenkov longitudinal distribution**
- 1e - TRAJECTory version to follow motion of source on the sky**
- 2 - THINning version**
- 2a - LPM-effect without thinning**
- 3 - PRESHOWER version for EeV gammas**
- 4 - NEUTRINO version**
- 4a - NUPRIM primary neutrino version with HERWIG**
- 5 - STACK INput of secondaries, no primary particle**
- 6 - CHARMed particle/tau lepton version with PYTHIA**
- 6a - TAU LEPTon version with PYTHIA**
- 7 - SLANT depth instead of vertical depth for longi-distribution**
- 7a - CURVED atmosphere version**
- 7b - UPWARD particles version**
- 7c - view-cone version**
- 8a - shower PLOT version (PLOTSH) (only for single events)**
- 8b - shower PLOT(C) version (PLOTSH2) (only for single events)**
- 8c - ANALYSISHISTos& THIN (instead of particle file)**
- 8d - Auger-histo file & THIN 8e - MUON-histo file**
- 9 - external atmosphere functions (table interpolation) (using bernlohr C-routines)**
- 9a - EFIELD version for electrical field in atmosphere**
 - a - CONEX for high energy MC and cascade equations**
 - b - PARALLEL treatment of subshowers**
 - c - CoREAS Radio Simulations**
 - d1 - Inclined observation plane**

e - interaction test version (only for 1st interaction)
f - Auger-info file instead of dbase file
g - COMPACT particle output file
h - MUPROD to write decaying muons
h2 - prEHISTORY of muons: mother and grandmother
k - annitest cross-section version (obsolete)

y - * Reset selection *****
z - * Finish selection *** [DEFAULT]**
r - restart (reset all options to cached values)
x - exit make
(multiple selections accepted, leading '-' removes option): 7a

Aquí se pone la opción 9.

options: QGSJETII TIMEAUTO VOLUMEDET GHEISHA

Which additional CORSIKA program options do you need?

- 1a - Cherenkov version for rectangular detector grid**
- 1b - Cherenkov version for telescope system (using bernlohr IACT C-routines)**
- 1c - apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.**
- 1d - Auger Cherenkov longitudinal distribution**
- 1e - TRAJECTory version to follow motion of source on the sky**
- 2 - THINning version**
- 2a - LPM-effect without thinning**
- 3 - PRESHOWER version for EeV gammas**
- 4 - NEUTRINO version**
- 4a - NUPRIM primary neutrino version with HERWIG**
- 5 - STACK INput of secondaries, no primary particle**
- 6 - CHARMed particle/tau lepton version with PYTHIA**
- 6a - TAU LEPTon version with PYTHIA**
- 7 - SLANT depth instead of vertical depth for longi-distribution**
- 7a - CURVED atmosphere version**
- 7b - UPWARD particles version**

7c - view-cone version
8a - shower PLOT version (PLOTSH) (only for single events)
8b - shower PLOT(C) version (PLOTSH2) (only for single events)
8c - ANALYSISHISTOS& THIN (instead of particle file)
8d - Auger-histo file & THIN
8e - MUON-histo file
9 - external atmosphere functions (table interpolation) (using bernlohr C-routines)
9a - EFIELD version for electrical field in atmosphere
a - CONEX for high energy MC and cascade equations
b - PARALLEL treatment of subshowers
c - CoREAS Radio Simulations
d1 - Inclined observation plane
e - interaction test version (only for 1st interaction)
f - Auger-info file instead of dbase file
g - COMPACT particle output file
h - MUPROD to write decaying muons
h2 - prEHISTORY of muons: mother and grandmother
k - annitest cross-section version (obsolete)

y - * Reset selection *****
z - * Finish selection *** [DEFAULT]**
r - restart (reset all options to cached values)
x - exit make
(multiple selections accepted, leading '-' removes option): z

Si esta todo correcto continuamos con "yes".

Are you sure you want to continue with these current option selection:
yes or no? (default: yes) >

Ahora ha finalizado todo y si queremos compilar todo y remover datos temporales ponemos "f".

Configuration is finished. How do you want to proceed?
f - Compiling and remove temporary files [DEFAULT]
k - Compile and keep extracted CORSIKA source code

n - Just extract source code. Do not compile!

r - restart (reset all options to cached values)

x - exit make

(only one choice possible): f

3.7 Archivos de entrada

Luego para trabajar en CORSIKA, debemos ir a la carpeta "run" de nuestro respectivo corsika-76400, y buscar "all-inputs" aquí encontraremos los siguientes parámetros que tendremos que modificar. A continuación, tenemos además sus definiciones.

| | |
|----------------------------------|---|
| RUNNR 1 | run number |
| EVTNR 1 | number of first shower event |
| NSHOW 1 | number of showers to generate |
| PRMPAR 14 | particle type of prim. particle |
| ESLOPE -2.7 | slope of primary energy spectrum |
| ERANGE 1.E41.E4 | energy range of primary particle |
| THETAP 20. 20. | range of zenith angle (degree) |
| PHIP -180. 180. | range of azimuth angle (degree) |
| SEED 123 0 0 | seed for 1. random number sequence |
| SEED 456 0 0 | seed for 2. random number sequence |
| OBSLEV 275400 | observation level (in cm) |
| ATMOSPHERE 1 Y | |
| FIXCHI 0. | starting altitude (g/cm**2) |
| MAGNET 27.7 25.32 | magnetic field centr. Europe |
| HADFLG 0 0 0 0 0 2 | flags hadr.interact.&fragmentation |
| ECUTS 0.3 0.3 0.003 0.003 | energy cuts for particles |
| MUADDI T | additional info for muons |
| MUMULT T | muon multiple scattering angle |
| ELMFLG T | Tem. interaction flags (NKG,EGS) |
| STEPFC 1.0 | mult. scattering step length fact. |

| | |
|---|---|
| RADNKG 200.E2 | outer radius for NKG lat.dens.distr. |
| LONGI T 10. T Tlongit.distr. & step size & fit & out | |
| ECTMAP 1.E4 | cut on gamma factor for printout |
| MAXPRT 1 | max. number of printed events |
| DIRECT ./output directory | |
| USER you user | |
| DEBUG F 6F 1000000 | debug flag and log.unit for out |
| EXIT | terminates input |

| |
|--|
| 1. RUNNR (Run Number): Es las veces que corre el programa $>1 \times 10^6$ veces. |
| 2. EVTNR (FirstEventNumber): Muestra los eventos por cascadas (n+1). |
| 3. NSHOW (NumberShower): Muestra el N° de lluvias generadas. |
| 4. PRMPAR (Particleprimary): Las partículas primarias tiene un N° específico en Corsika(Ver imagen 5 y 5.1) |
| 5. ERRANGE (Energy Range): Energía del primario. |
| 6. ESLOPE (Energy Slope): La pendiente del espectro del primario. |
| 7. THETAP (Zenith Angle): Colocar ángulo zenital para la simulación. |
| 8. PHIP (AzimuthAngle): Colocar ángulo azimutal para la simulación. |
| 9. SEED (RandomNumberGeneratorInitialization): Se coloca (n), estos son números aleatorios para simulación, normalmente se deja por defecto los que vienen. |
| 10. OBSLEV (ObservationLevel): Es la altitud sobre el mar (cm). |
| 11. ATMOSPHERE: Colocar aquí el modelo atmosférico (depende de la localización). |
| 12. FIXCHI (Starting Grammage): Altitud inicial en (g/cm**2). |
| 13. MAGNET (Magnetic Field): Campo magnético. |
| 14. ECUTS (Energy Cut-off): Energía de corte. |
| 15. LONGI (Longitudinal): Activación de componente longitudinales con T, y desactivación con F. |
| 16. DIRECT (Directory): Es el directorio de salida, donde se colocarán. |
| 17. USER: El nombre de usuario |
| 18. EXIT: Terminación de simulación. |
| 19. MUMULT, MUADDI: Modificación para parámetros muónicos |

Al haber modificado estos parámetros en “all-inputs” correctamente serán en la misma carpeta “run” donde encontraremos un ejecutable, por ejemplo

`corsika7*****Linux_QGSII` y corremos de la forma:

```
$ ./corsika76400Linux_QGSII_gheisha < all-inputs > DAT000001.lst
```

Entonces se creará un archivo de salida donde contiene la información de las cascadas.

3.8 Archivos de salida

Los archivos de salida creados serán que ser interpretados, como es los `DAT0001` con valores < a un millón es binario, así que para leerlo tenemos que utilizar un ejecutable encontrado en la carpeta `corsika-76400/src/utils` llamado “`corsikaread`”.

La ejecución se realiza:

```
$/corsikaread<entrada.txt>salida.txt
```

Entonces el “`entrada.txt`” es un archivo que debemos crear y colocar la dirección exacta del binario `DAT0001` previamente que obtuvimos y la `salida.txt` será por lo tanto donde se copiará para observación el archivo final, aquí observaremos 8 columnas:

- **Id:** Número de identificación de la partícula, observar Fig. 1-4 y Fig. 2-4
- **Px:** componente en x
- **Py:** componente en y
- **Pz:** componente en z
- **x:** posición en x
- **y:** posición en y
- **t:** tiempo de llegada de la partícula
- **E:** energía

Además, tendremos archivos terminados en `(.lst)` estos muestran: versión del programa, modelos atmosféricos que fueron usados, datos de entrada entre otros. Los terminados en `(.long)` en cambio contienen la información longitudinal de las EAS.

| Particle identifications | | | |
|--------------------------|------------------|----------------|---|
| Identification | Particle | Identification | Particle |
| 1 | γ | 50 | ω |
| 2 | e^+ | 51 | ρ^0 |
| 3 | e^- | 52 | ρ^+ |
| | | 53 | ρ^- |
| 5 | μ^+ | 54 | Δ^{++} |
| 6 | μ^- | 55 | Δ^+ |
| 7 | π^0 | 56 | Δ^0 |
| 8 | π^+ | 57 | Δ^- |
| 9 | π^- | 58 | $\overline{\Delta}^-$ |
| 10 | K_L^0 | 59 | $\overline{\Delta}^-$ |
| 11 | K^+ | 60 | $\overline{\Delta}^0$ |
| 12 | K^- | 61 | $\overline{\Delta}^+$ |
| 13 | n | 62 | K^{*0} |
| 14 | p | 63 | K^{*+} |
| 15 | \bar{p} | 64 | $\overline{K^*}$ |
| 16 | K_S^0 | 65 | $\overline{K^{*0}}$ |
| 17 | η | 66 | ν_e |
| 18 | Λ | 67 | $\bar{\nu}_e$ |
| 19 | Σ^+ | 68 | ν_μ |
| 20 | Σ^0 | 69 | $\bar{\nu}_\mu$ |
| 21 | Σ^- | | |
| 22 | Ξ^0 | 71 | $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ |
| 23 | Ξ^- | 72 | $\eta \rightarrow 3\pi^0$ |
| 24 | Ω^- | 73 | $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ |
| 25 | \bar{n} | 74 | $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ |
| 26 | $\bar{\Lambda}$ | 75 | μ^+ add. info. |
| 27 | $\bar{\Sigma}^-$ | 76 | μ^- add. info. |
| 28 | $\bar{\Sigma}^0$ | | |
| 29 | $\bar{\Sigma}^+$ | 85 | decaying μ^+ at start ⁸⁹ |
| 30 | $\bar{\Xi}^0$ | 86 | decaying μ^- at start ⁸⁹ |
| 31 | $\bar{\Xi}^+$ | | |
| 32 | $\bar{\Omega}^+$ | 95 | decaying μ^+ at end ⁸⁹ |
| 48 | η' | 96 | decaying μ^- at end ⁸⁹ |
| 49 | Φ | | |

Figura 3-3: Gráfico de la tabla de partículas en Corsika

Fuente: (Pierog, 2019)

| Particle identifications (continued) | | | |
|--------------------------------------|---|----------------|-----------------------|
| Identification | Particle | Identification | Particle |
| 116 | D^0 | 155 | Ξ_c^- |
| 117 | D^+ | 156 | Ξ_c^0 |
| 118 | \bar{D} | 157 | $\bar{\Omega}_c$ |
| 119 | \bar{D}^0 | | |
| 120 | D_s^+ | 161 | Σ_c^{*++} |
| 121 | \bar{D}_s^- | 162 | Σ_c^{*+} |
| 122 | η_c | 163 | Σ_c^{*0} |
| 123 | D^{*0} | | |
| 124 | D^{*+} | 171 | $\bar{\Sigma}_c^{*-}$ |
| 125 | \bar{D}^{*-} | 172 | $\bar{\Sigma}_c^{*0}$ |
| 126 | \bar{D}^{*0} | 173 | $\bar{\Sigma}_c^{*+}$ |
| 127 | D_s^{*+} | | |
| 128 | \bar{D}_s^{*-} | 176 | B^0 |
| | | 177 | B^+ |
| 130 | J/ψ | 178 | \bar{B} |
| 131 | τ^+ | 179 | \bar{B}^0 |
| 132 | τ^- | 180 | B_s^0 |
| 133 | ν_τ | 181 | \bar{B}_s^0 |
| 134 | $\bar{\nu}_\tau$ | 182 | B_c^+ |
| | | 183 | \bar{B}_c^- |
| 137 | Λ_c^+ | 184 | Λ_b^0 |
| 138 | Ξ_c^+ | 185 | Σ_b^- |
| 139 | Ξ_c^0 | 186 | Σ_b^+ |
| 140 | Σ_c^{*+} | 187 | Ξ_b^0 |
| 141 | Σ_c^+ | 188 | Ξ_b^- |
| 142 | Σ_c^0 | 189 | Ω_b^- |
| 143 | $\Xi_c^{\prime+}$ | 190 | Λ_b^0 |
| 144 | $\Xi_c^{\prime0}$ | 191 | Σ_b^+ |
| 145 | Ω_c^0 | 192 | $\bar{\Sigma}_b^-$ |
| | | 193 | Ξ_b^0 |
| | | 194 | Ξ_b^+ |
| 149 | $\bar{\Lambda}_c^-$ | 195 | Ω_b^+ |
| 150 | $\bar{\Xi}_c^-$ | | |
| 151 | $\bar{\Xi}_c^0$ | | |
| 152 | $\bar{\Sigma}_c^-$ | | |
| 153 | $\bar{\Sigma}_c^0$ | | |
| 154 | $\bar{\Sigma}_c^+$ | | |
| $A \times 100 + Z$ | nucleus of Z protons and A - Z neutrons ($2 \leq A \leq 56$) | | |
| 8888jjj | weights of preceding particle (MULTITHIN option) | | |
| 9900 | Cherenkov photons on particle output file | | |

Figura 4-3: Gráfico de la tabla de partículas en Corsika

Fuente: (Pierog, 2019)

3.9 Profundidad atmosférica

Previamente describimos los modelos atmosféricos de Corsika, para esta simulación se utiliza la altura de Riobamba-Ecuador a 2764 m.s.n.m. que nos otorga como resultado en g/cm^2 la profundidad atmosférica adecuada y con la que se visualizarán los datos en el capítulo final.

Tabla 2-3: Parámetros atmosféricos de Corsika de Diciembre 2019

| (Capa) | Altura (km) | Profundidad Atms. (g/cm^2) | Profundidad Atms. (g/cm^2) |
|--------|--------------|---|---|
| 1 | 0 - 9.6 | 1038.29 – 293.67 | $-1.35 \times 10^2 + 1.17 \times 10^3 * e^{-h/9.73}$ |
| 2 | 9.6 - 15.6 | 293.66 – 68.72 | $-2.20 \times 10^1 + 1.22 \times 10^3 * e^{-h/7.23}$ |
| 3 | 15.6 - 33.3 | 68.70 – 2.28 | $1.42 \times 10^{-1} + 1.58 \times 10^3 * e^{-\frac{h}{6}}$ |
| 4 | 33.3 - 100.0 | 2.28 – 1.20×10^{-4} | $-3.75 \times 10^{-4} + 6.91 \times 10^2 * e^{-h/7.38}$ |
| 5 | > 100.0 | $1.24 \times 10^{-4} - 4.33 \times 10^{-6}$ | $1.12 \times 10^3 - \frac{h}{1} \times 10^5$ |

Realizado por: Iser Peña (2020)

3.10 Análisis e interpretación de resultados

En este capítulo se muestran los resultados de la simulación de una hora de flujo de astropartículas considerando su espectro y composición química. Se eligió gráficos de distribución longitudinal iniciados por Gamma y Protón con energía de 1 TeV verticalmente, y la fluencia de partículas para 2764 m.s.n.m. la ciudad de Riobamba-Ecuador, así como su distribución según el centro de origen para determinar el área de detección de astropartículas. Los gráficos fueron obtenidos gracias a programación en Python (ver códigos en Anexos).

3.11 Simulación de una sola cascada por Gamma y Protón

Las simulaciones de las cascadas generadas por un protón y un gamma se realizaron utilizando el paquete computacional Corsika. Esta comparación permite establecer ciertos criterios para la distinción entre partículas secundarias de los dos tipos de primarios. En el siguiente gráfico se muestra las simulaciones de la distribución de energía de e^+ , e^- con un θ vertical donde se puede apreciar que la cascada iniciada por protones produce mayor número de e^- y empieza desde una menor energía en comparación con las EAS formadas por el fotón primario. Se puede decir que los e^+ producidos por la gamma alcanzan un mayor número durante el desarrollo de la cascada a diferencia de los protones.

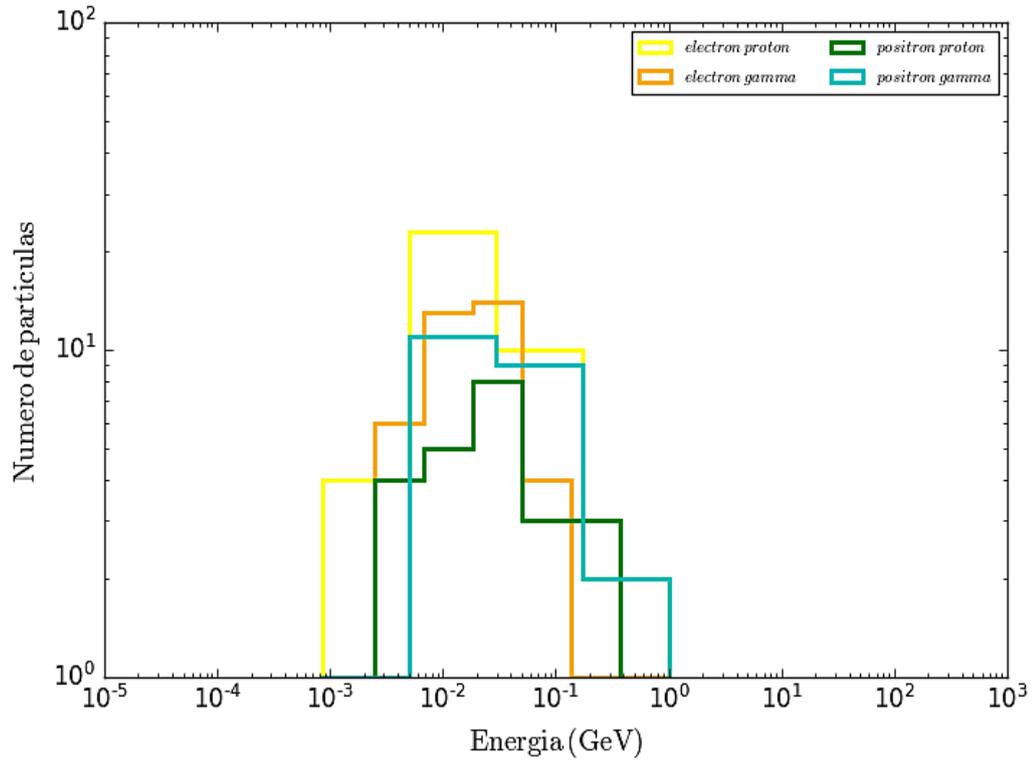


Gráfico 1-4: Relación entre la cantidad de electrones y positrones producidos por un gamma y protón con energía de 1 TeV, en escala logarítmica.

Realizado por Iser Peña (2020)

En el gráfico 2-4 se observa la distribución energética de las partículas gamma producidas por fotones y protones; se puede apreciar que los fotones mantienen una producción de gammas de mayor número y energía a lo largo del tiempo. En este gráfico se aprecia la energía límite de las gammas para la producción de pares alrededor de 1 MeV, por lo que la emisión gamma se ve limitada a energías superiores a este límite.

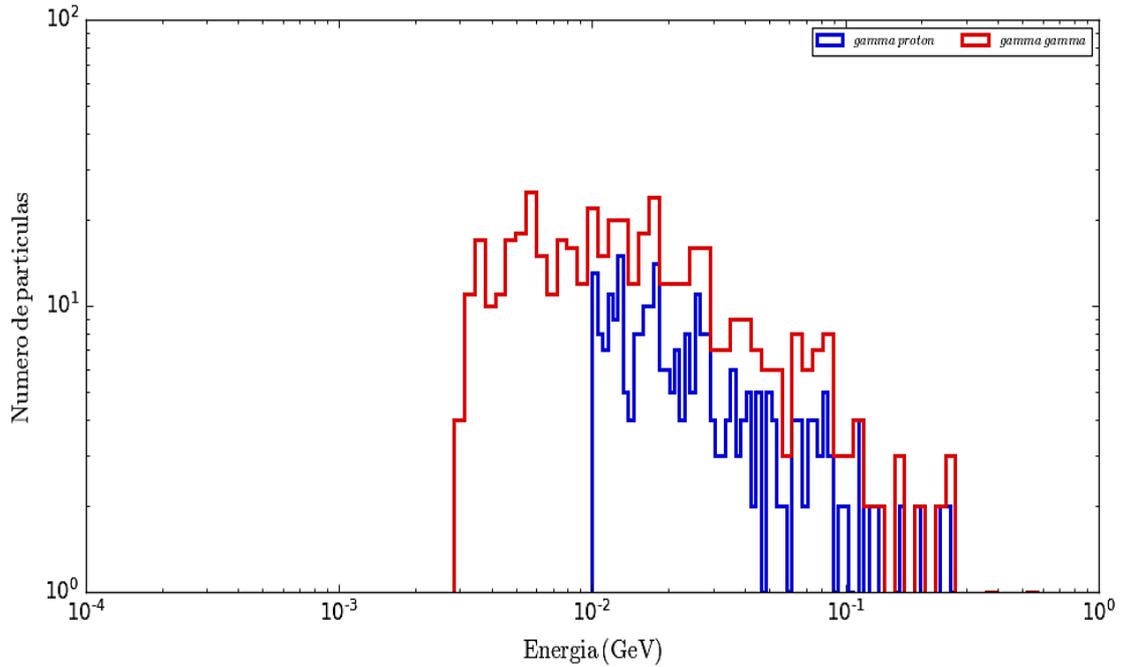


Gráfico 2-4: Distribución de fotones gamma producidos por un primario gamma y protón con energía de 1 TeV, y colocada en escala “log” para apreciarse mejor.

Realizado por Iser Peña (2020)

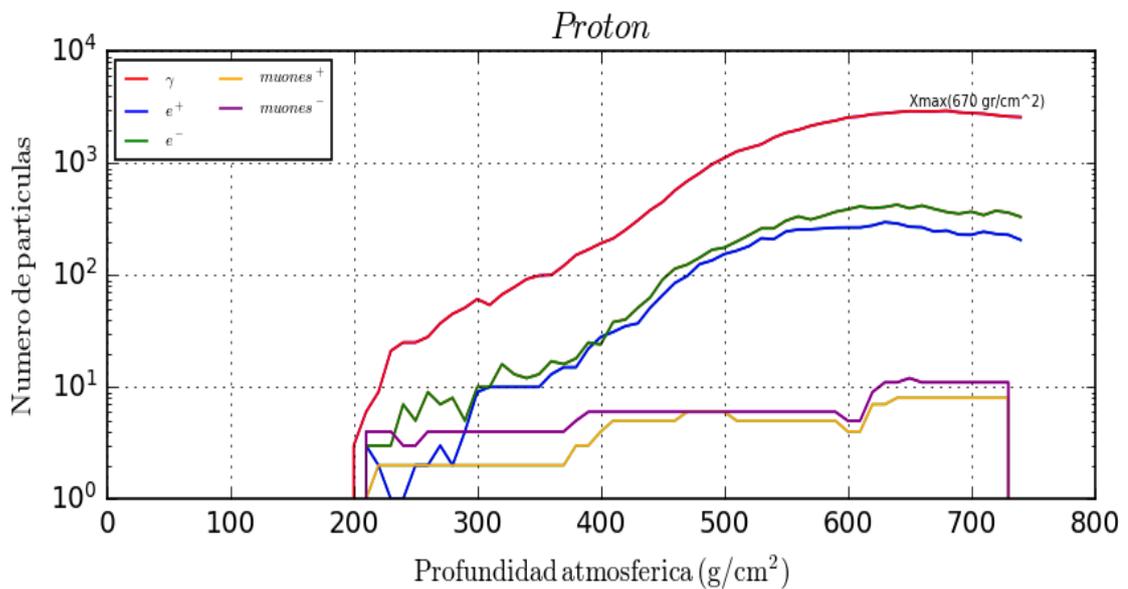


Gráfico 3-4: Desarrollo longitudinal de la EAS en Riobamba, para un protón de energía de 1 TeV.

Realizado por Iser Peña (2020)

En el gráfico 3-4 se observa la distribución longitudinal de secundarios para un protón primario incidente en un ángulo cenital de 90°, donde se aprecia un variación de la posición de ancho

máximo para las partículas gamma con un X_{max} de 670 gr/cm^2 es decir una altura de 3034 m.s.n.m si tomamos como consideración que a 746 gr/cm^2 es la densidad atmosférica según la tabla 1-4 para la ciudad de Riobamba (2764 m.s.n.m.), seguidos de partículas cargadas con un número menor a unos 600 gr/cm^2 en su pico máximo.

Además, al utilizar una escala logarítmica se puede observar que en la distribución longitudinal de u^- y u^+ tenemos un número despreciable pero que aumenta su número al acercarse a la altura de Riobamba, a diferencia de los γ y e^\pm que serían más notables para 1 TeV de energía.

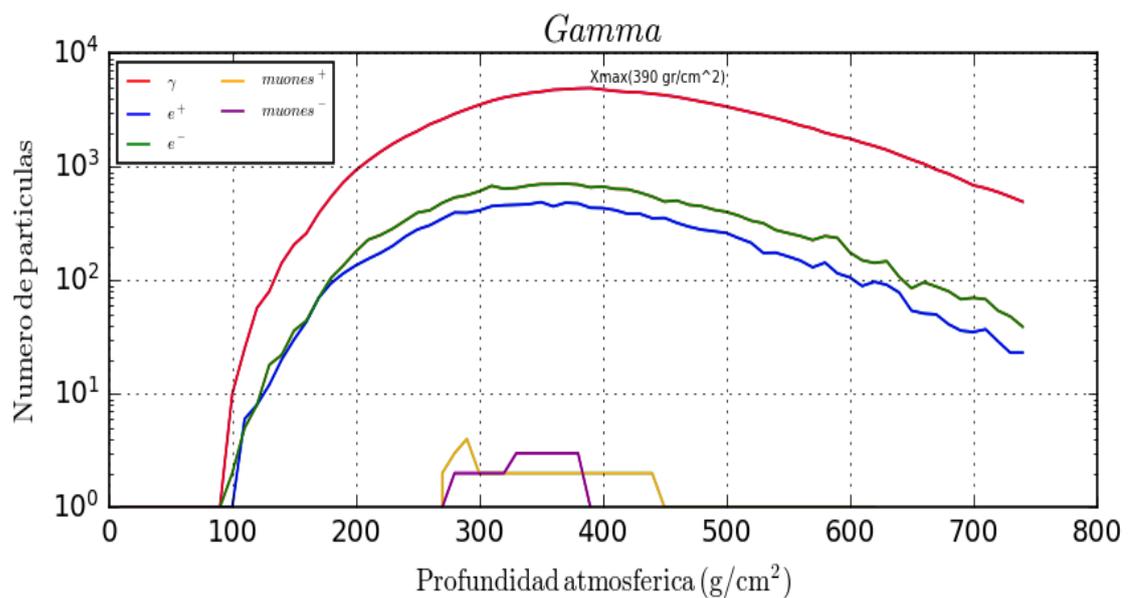


Gráfico 4-4: Desarrollo longitudinal de la EAS en Riobamba, para un gamma de energía de 1 TeV.

Realizado por Iser Peña (2020)

En el gráfico 4-4 se visualiza a un gamma primario a 90° de incidencia que muestra un número de gammas secundarios producidos aun mayor que la del protón primario descrito anteriormente, pero a un X_{max} de 390 gr/cm^2 como pico máximo en su flujo de gammas, es decir a una altura de 7.659m.s.n.m y que a partir de ahí decaen exponencialmente absorbiéndose en la atmósfera. Además, se aprecia que el flujo de gamma primario empieza desde una profundidad menor (100 gr/cm^2) que las del protón primario que ocurrió a casi 200 gr/cm^2 con 1 TeV de energía.

De la misma manera, también se puede observar los muones decaen en la mitad de su recorrido, con un característica de que los u^- decaen más rápido que los u^+ en su desarrollo, puede esto ser

explicado en la cromodinámica cuántica (QED) y su estudio, el cual es un trabajo de doctorado puede encontrarse en textos como (Grieder, 2010) y (Plyasheshnikov & Aharonian, 2002) donde se dice que al aumentar el ángulo cenital a diferencia de la vertical, por encima de un umbral de energía puede mejorar el gráfico muónico. De este gráfico concluimos que al nivel del detector no se observa muones.

De estas simulaciones podemos concluir que para primarios de 1 TeV verticales sólo se podría detectar muones originados por protones.

3.12 Simulación de una hora de flujo de EAS con el paquete ARTI

Para realizar el flujo de partículas de un tiempo específico tenemos un paquete que nos facilita el proyecto al usar CORSIKA, este se llama ARTI, el cual en un pasado era conocido por el nombre CrkTools. Compuesto por scripts `bash` y `perl` (instalarlos si no se los posee `sudo apt-get install perl`, por ejemplo), además de códigos analíticos como `fortran`, `C` y `C++` que colaboran a una ejecución automática y análisis de las simulaciones en diferentes entornos.

La última versión del paquete ARTI escrito por (Asorey, 2018) se obtiene del repositorio <https://github.com/lagoproject/arti> donde posteriormente se obtiene subdirectorios que crean niveles de scripts como: “`sims`” (donde se ejecutan las simulaciones) y “`analysis`” (donde se automatizan y analizan cálculos) estos trabajan conjuntamente para que el resultado sencillo al usuario.

Dentro de nuestra carpeta de Corsika podemos colocar:

```
useradmin@home:~/iser/run/ejemplo$ do_sims.sh ?
```

Este nos despliegue una descripción de cada valor que se debe colocar para simulación.

```
/home/useradmin/Software/arti/sims/do_sims.sh version v1r0
```

```
USAGE /home/useradmin/Software/arti/sims/do_sims.sh:
```

```
-w <working dir> : Working directory, where bin (run) files are located
```

-p <project name> : Project name (suggested format: NAMEXX)
-t <flux time> : Flux time (in seconds) for simulations
-v <CORSIKA version> : CORSIKA version
-h <HE Int Model (EPOS|QGSII)> : Define the high interaction model to be used
-u <user name> : User Name.
-s <site> : Location (several options)
-j <procs> : Number of processors to use
-y : Select volumetric detector mode (default=flat array)
-e : Enable CHERENKOV mode
-d : Enable DEBUG mode
-a : Enable high energy cuts for secondaries
-k <altitude, in cm> : Fix altitude, even for predefined sites
-? : Shows this help and exit.

Ahora que conocemos como ingresar los valores y su significado empezamos la simulación con:

```

useradmin@home:~/iser/run/ejemplo$ do_sims.sh -w /home/useradmin/iser/run/
-p ejemplo1 -t 3600 -v 76400 -h QGSII -u iser -s riobamba -j 8 -y -k 276400

```

Es decir, colocamos los parámetros para la simulación de una hora tiempo, a la altura de Riobamba (2764 m.s.n.m.) en cm, la carpeta donde se trabajará, el modelo de interacción hadrónica (QGSII), con 8 procesadores en detector por defecto (flat) con la versión de Corsika-76400 previamente instalado. Nos aparecerá esto:

```

# Working dir = /home/useradmin/iser/run/
# Project name = ejemplo1
# Flux time = 3600
# CORSIKA version = 76400
# High Energy Interaction Model = QGSII
# User name = iser
# Site location = riobamba
# Number of processors = 8
# Volumetric detector mode for = flat
# Corsika executable file (corsika76400Linux_QGSII_gheisha)

```

En los siguientes parámetros deberemos ingresar el ángulo cenital, aunque esta por defecto desde 0>90 y solo se debe colocar “ENTER” y continuar si así se lo desea.

Además, debemos colocar la energía de corte descrita en capítulos anteriores, energía límite, modelo atmosférico (19) por defecto, nivel de observación en (cm) y los valores de BX y BZ para Riobamba obtenidos de:

- <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcIGRFWMM>.

```
### Showerparameters ###

Low edge of zenith angle (THETAP) [deg]?
<THETPR(1) 0>:
<THETPR(2) 90>:
Lower limit of the primary particle energy (ERANGE) [GeV]?
<LLIMIT 5>: 5
Upper limit of the primary particle energy (ERANGE) [GeV]?
<ULIMIT 1000000>: 1000000

### Site parameters ###

Use rigidity cutoff? (0=no, Rigidity value=yes [GV])?
< 5>: 12.54
Atmospheric model selection. Start number with 'E' to use external atmospheres module?
<ATMOD 19>: 19
Observation level above sea level [cm]?
<OBSLEV 0>: 275400
Horizontal comp. of the Earth's mag. field (MAGNET) [North,muT],
see values at http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcIGRFWMM?
<BX 0>: 26.700
<BZ 0>: 8.764
```

En nuestro carpeta tendremos como:

```
003919--0000001747.run 060402--0000162955.run
004018--0000002545.run 070014--0000053384.run inject
```

Donde en `inject` después de haber ingresado los valores correctamente aparecen los valores de los primarios, el número de cascadas obtenidos entre los rangos de energía colocados para Riobamba-Ecuador, descrito posteriormente.

Ahora tendremos `.sh` como:

```
go-ejemplo1-all-01.sh
go-ejemplo1-all-02.sh
go-ejemplo1-all-03.sh
go-ejemplo1-he.sh
go-ejemplo1-pr-1.sh
go-ejemplo1-pr-2.sh
```

Donde se encuentra la información de la cascada que necesita ser descomprimida, al realizar un `./go-ejemplo1-all-01.sh` por ejemplo podremos observar comprimidos que mediante `bzip2 -d DAT000001.bz2` son liberados para su observación, en los terminados en `.input` estos se encuentra la información unitaria por cascada.

```
DAT002010-2010--0000043623.input
DAT002010-2010--0000043623.lst.bz2
```

Nuevamente después podemos manejar los binarios para manejo propio como anteriormente lo realizamos con:

```
$/corsikaread<entrada.txt>salida.txt
```

Realizada la simulación para la altura de Riobamba-Ecuador se describe aquí la distribución lateral de la cascada, así como el histograma de flujo y la distribución longitudinal del hierro con un ángulo cenital desde 0° hasta 90°.

3.12.1 Composición química

En la siguiente tabla presentamos las partículas que se produjeron a 2764 m.s.n.m., donde se usó la energía correcta de corte a la región (12.47 GeV), por lo tanto, se colocó de un rango de 13 GeV a 1000 TeV, se aprecia que la abundancia mayor de partículas primarias que se detectan son las del Hidrógeno con un número de 3205566.

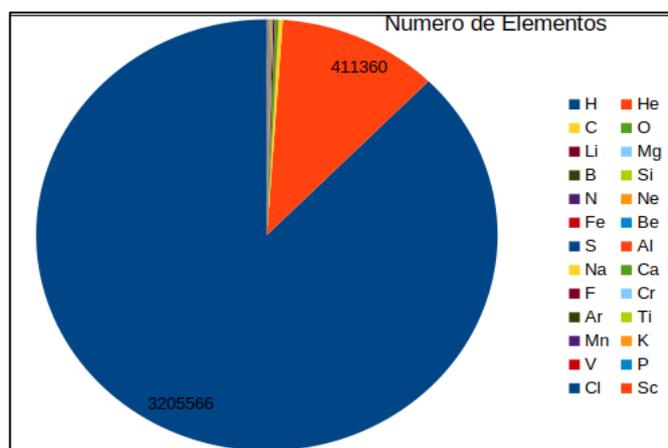


Gráfico 5-4: Composición química de las partículas primarias simuladas.

Realizado por: Iser Peñqa (2020)

Tabla 3-3: Número de partículas simuladas por CORSIKA sujeto a los rayos cósmicos que interactúan al llegar a nuestra atmósfera.

| <i>Partícula</i> | Nº de partículas | <i>Partícula</i> | Nº de partículas |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0_1H | 3205566 | ${}^{27}_{13}Al$ | 313 |
| 4_2He | 411360 | ${}^{23}_{11}Na$ | 271 |
| ${}^{12}_6C$ | 10411 | ${}^{40}_{20}Ca$ | 202 |
| ${}^{16}_8O$ | 9894 | ${}^{19}_9F$ | 172 |
| 7_3Li | 4672 | ${}^{52}_{24}Cr$ | 135 |
| ${}^{24}_{12}Mg$ | 2427 | ${}^{40}_{18}Ar$ | 130 |
| ${}^{11}_5B$ | 2245 | ${}^{48}_{22}Ti$ | 124 |
| ${}^{28}_{14}Si$ | 2123 | ${}^{55}_{25}Mn$ | 122 |
| ${}^{14}_7N$ | 1995 | ${}^{39}_{19}K$ | 77 |
| ${}^{20}_{10}Ne$ | 1880 | ${}^{51}_{23}V$ | 66 |
| ${}^{56}_{26}Fe$ | 1484 | ${}^{31}_{15}P$ | 60 |
| 9_4Be | 1127 | ${}^{35}_{17}Cl$ | 53 |
| ${}^{32}_{16}S$ | 397 | ${}^{45}_{21}Sc$ | 37 |

Realizado por: Iser Peña (2020)

El número final de cascadas fue de 3, 657,333.

3.13 Histograma de una hora de flujo para Riobamba-Ecuador

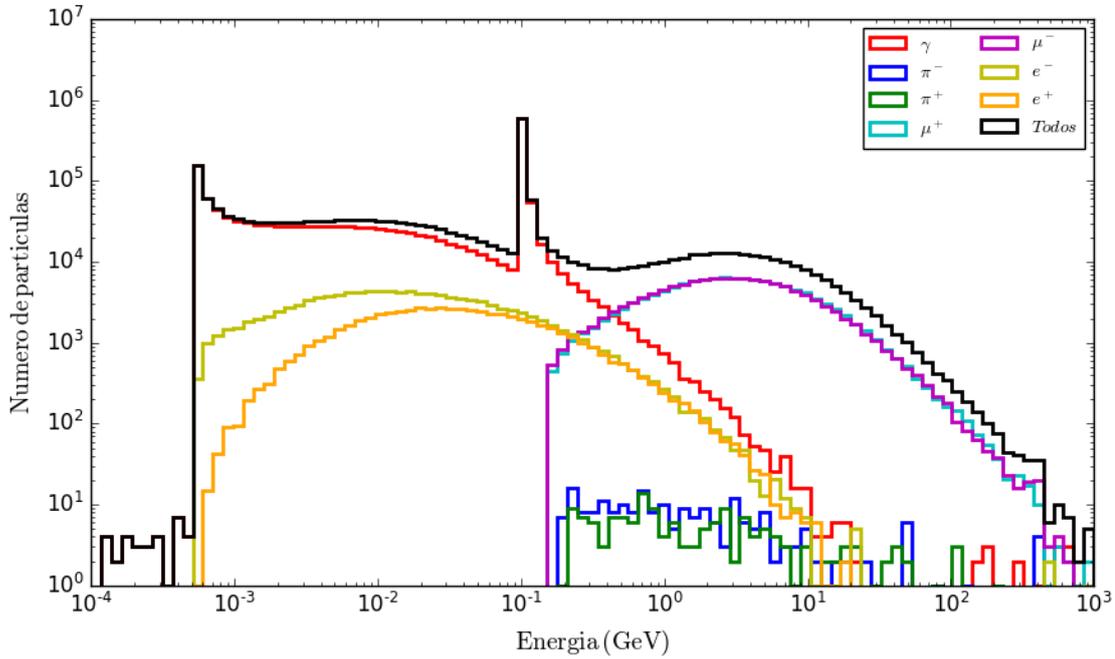


Gráfico 6-4: Flujo de partícula de una hora a 2764 m.s.n.m con energía desde 13 GeV a 1×10^3 TeV

Realizado por Iser Peña (2020)

Como previamente se describe son las partículas de hidrogeno (es decir protones) las que poseen el porcentaje mayoritario, seguidos de partículas alfa (Helio) las que forman la cascada principal que se observa en el gráfico 6-5. Así que dependiendo del primario y su energía estas EAS son formadas para su observación.

Los gamma tienen una abundancia considerablemente mayor y en la energía 10^{-1} el pico que se forma es debido al decaimiento de los π^0 en gammas explicados anteriormente. Los muones y partículas cargadas de la misma manera aparecen tan numerosos como los gammas y es por eso por lo que están serían las partículas más esperadas en su detección. En esta grafica se aplicó en la escala logarítmica nuevamente para poder apreciarse el flujo de partículas.

3.13.1 Distribución longitudinal del Hierro en una hora de flujo

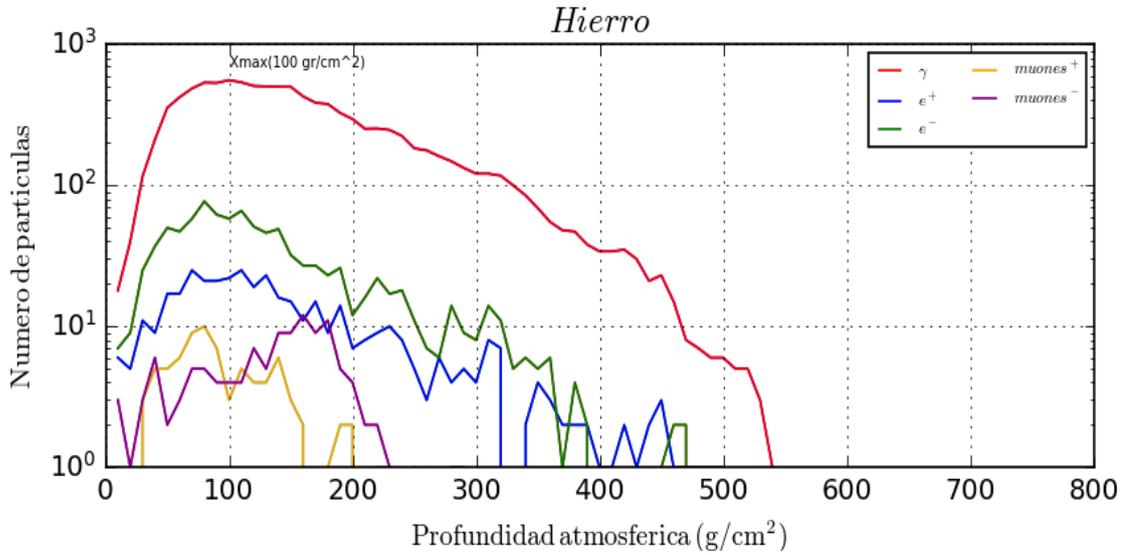


Gráfico 7-4: Distribución longitudinal del Hierro para una hora de flujo a 2764 m.s.n.m con energía de 13 GeV a 1×10^3 TeV

Realizado por Iser Peña (2020)

Esta vez en la gráfica 7-4 analizamos un primario de Hierro y resultado de la simulación de 3600 segundos, se observa un X_{max} (punto máximo del flujo de partículas) a 100 gr/cm^2 de profundidad en los gammas secundarios obtenidos con un número inferior que los del gamma y protón primario de 1 TeV anteriormente obtenidos, esto es debido a que estas tienen un camino libre medio más corto. La ocurrencia de una cascada de hierro es bastante rara y su energía es baja. Se observa que las partículas secundarias generadas están muy arriba de la altura de observación (Riobamba 2764 m.s.n.m.).

La distribución de estas partículas inicia a mayores alturas que las del hierro o gamma primarios por tener mayor sección eficaz, y decae antes de llegar a los 746 gr/cm^2 .

3.13.2 Distribución Lateral de la cascada (2D y 3D) de los gamma y muones

A continuación en los gráficos 8-4 y 9-4 podemos observar la distribución lateral realizada para los gamma en 2D (vista desde arriba) y 3D en la hora de flujo a 2764 m.s.n.m, aquí se observa que la cascada se vuelve más ancha con respecto al tiempo inicial debido a sus interacciones con núcleos atmosféricos, de la misma forma se puede observar que para los gamma a partir de los 2km desde el punto de detección sudensidad numérica empieza a disminuir aunque su distribución pueda llegar hasta los 4km, y estos tienden a ir hacia el eje negativo de la (y).

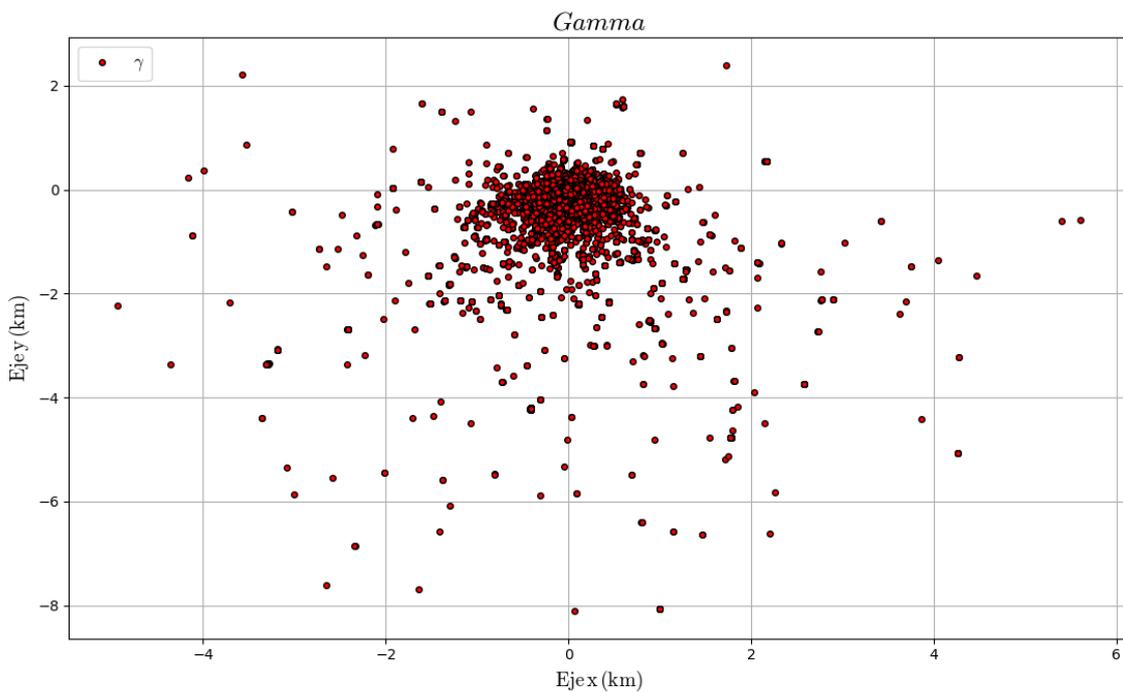


Gráfico 8-4: Distribución lateral en 2D de fotones gamma a 2764 m.s.n.m. para una hora de flujo.

Realizado por Iser Peña (2020)

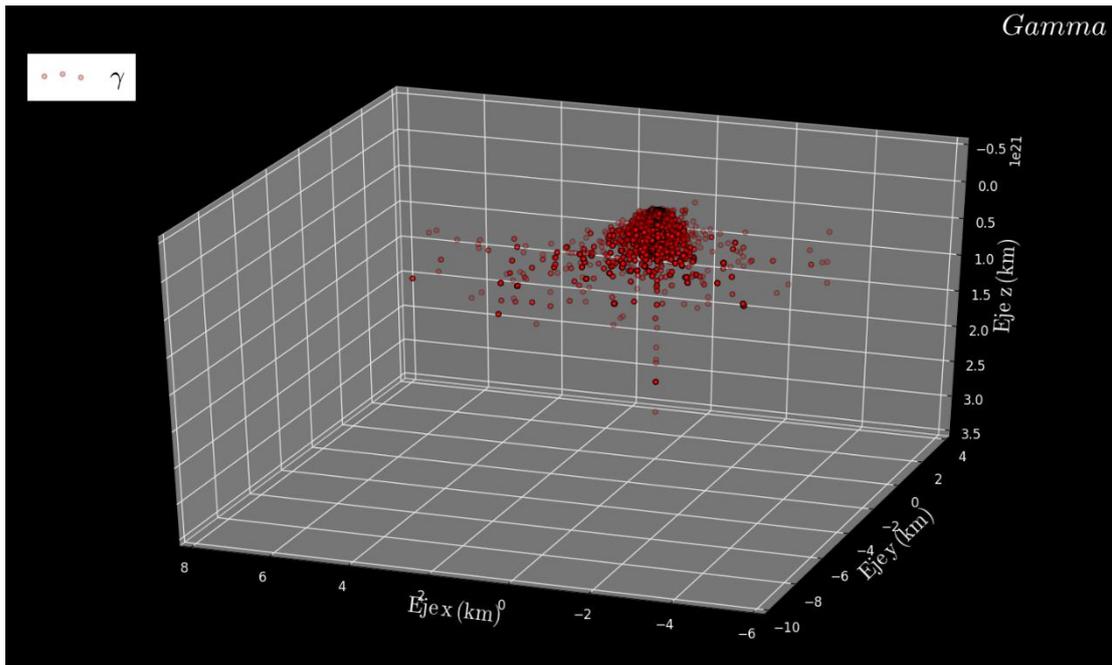


Gráfico 9-4: Distribución lateral en 3D de fotones gamma a 2764 m.s.n.m. con respecto al tiempo (eje z) para una hora de flujo.

Realizado por Iser Peña (2020)

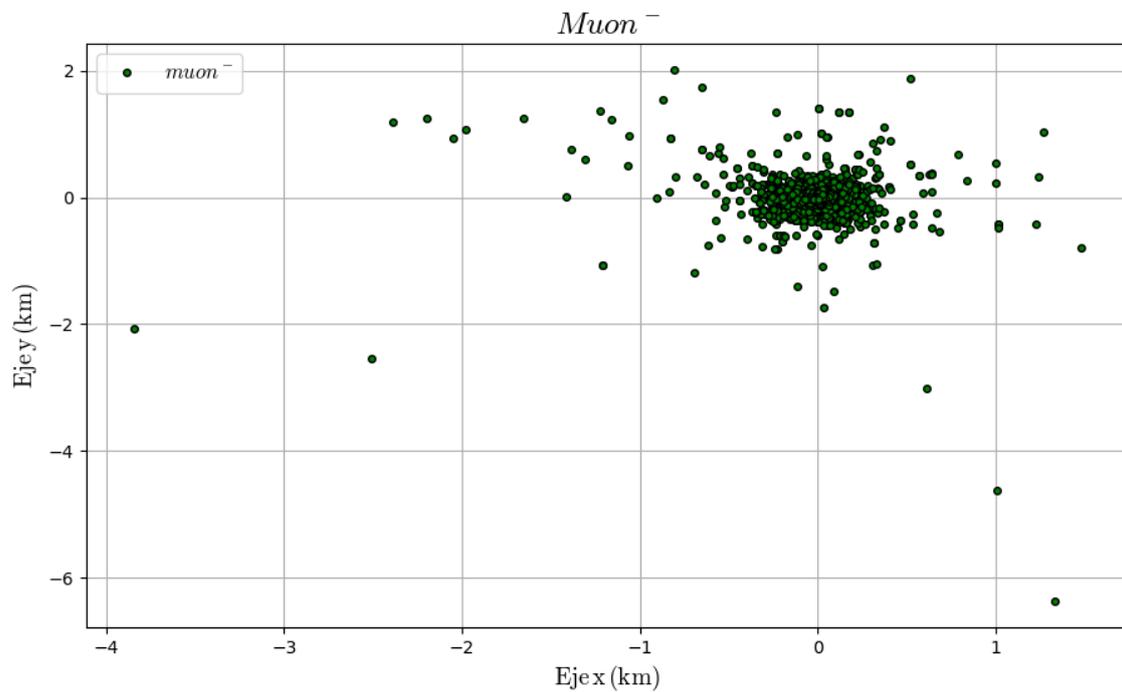


Gráfico 10-4: Distribución lateral en 2D de muones (-) a 2764 m.s.n.m. para una hora de flujo.

Realizado por Iser Peña (2020)

En esta distribución muón (-) de 2D de la gráfica 10-4 se observa que para la altura de Riobamba son mayoritariamente observables dentro de 1km desde el detector y a partir de esta distancia hacia su exterior empieza a disminuir notablemente, de la misma forma se observa el arco de caída en la gráfica 3D (gráfica 11-4) y su densidad se mantiene distribuida en el eje (y) desde 2 a -2.

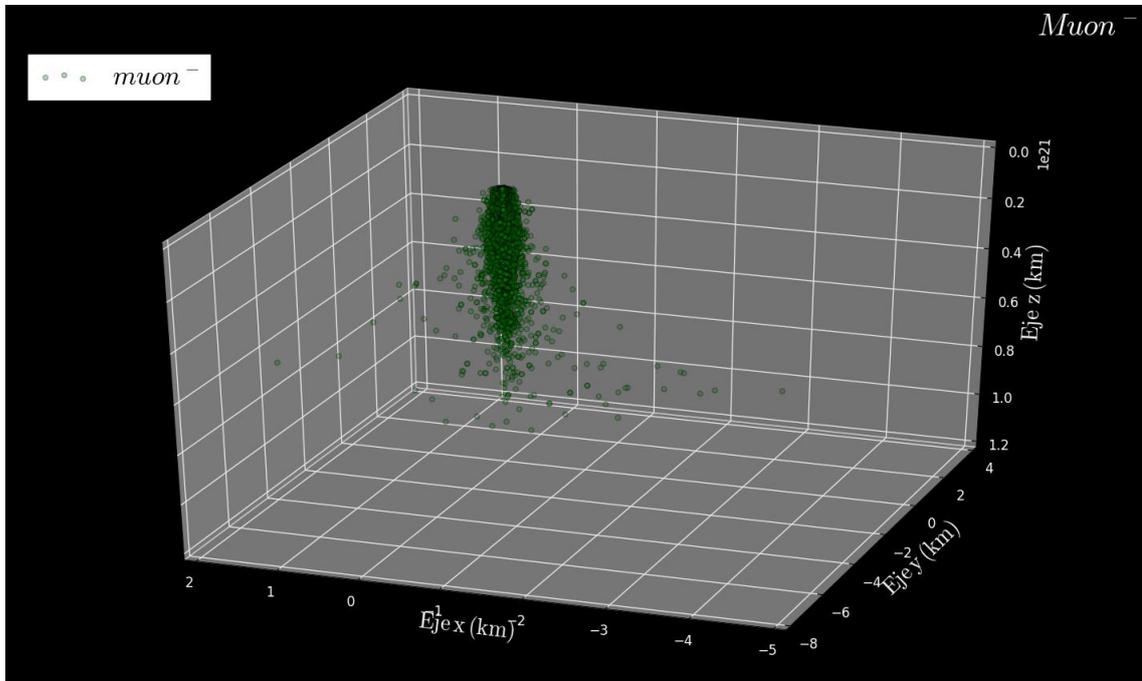


Gráfico 11-4: Distribución lateral en 3D de muones (-) a 2764 m.s.n.m. con respecto al tiempo (eje z) para una hora de flujo.

Realizado por Iser Peña (2020)

En la gráfica 12-4 y 13-4 se observa esta vez la distribución de partículas para la cascada muón (+) donde en el primer gráfico 2D en la hora de flujo puede llegar hasta más de 2 km de distancia desde el centro, pero su mayor densidad de partículas son visualmente notables en 1 km desde el detector, y aquí se puede determinar la cascada con respecto al tiempo que tiene una duración aun mayor que para el muón (-) por lo tanto se concentra hacia el eje (y) negativo.

En la gráfica 3D se observa nuevamente el arco aumentado desde el minuto inicial de su distribución.

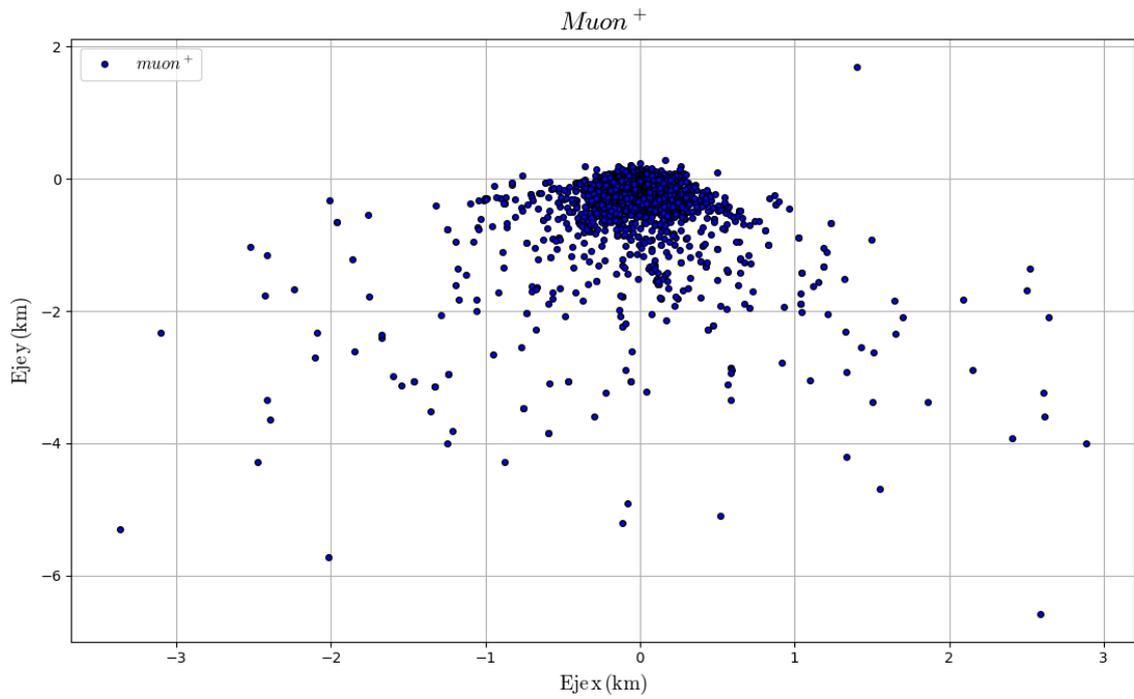


Gráfico 12-4: Distribución lateral en 2D de muones (+) a 2764 m.s.n.m. para una hora de flujo.

Realizado por Iser Peña (2020)

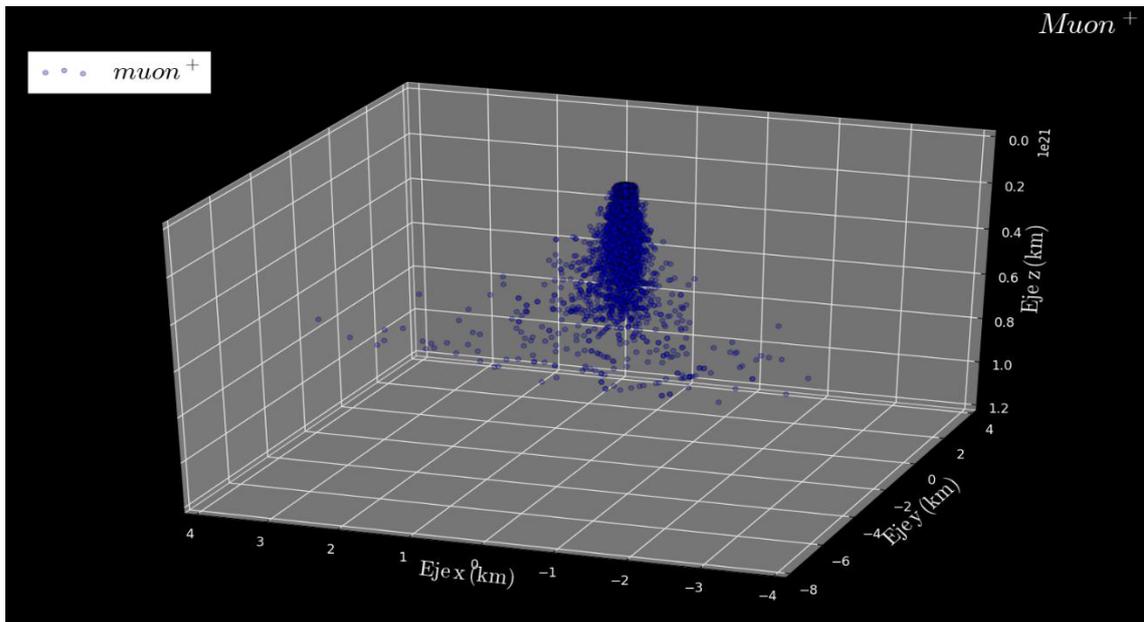


Gráfico 13-4: Distribución lateral en 3D de muones (+) a 2764 m.s.n.m. con respecto al tiempo (eje z) para una hora de flujo.

Realizado por Iser Peña (2020)

CONCLUSIONES

- En la simulación realizada para gamma y protón primario con 1 TeV de energía para la altura de Riobamba con un ángulo cenital de 90° se observó principalmente un flujo de electrones y positrones mayores con el γ primario, es decir depositaron mayor cantidad de energía en la atmósfera, aunque los datos recibidos del protón crean un ruido que complica la diferenciación entre un evento del protón del gamma. La producción de muones es nula para gammas con energías hasta de un TeV.
- Según la cantidad de moléculas que el primario interaccione en la atmósfera aumenta la producción de secundarios observados, por esta razón en el protón primario de 1 TeV se encuentra una densidad menor de gammas secundarios producidos en comparación con el gamma primario de la misma energía.
- La distribución longitudinal del protón primario de 1 TeV de la misma forma presenta un flujo mayor que las del hierro primario obtenido para una hora de flujo por tener un camino libre medio más grande que este.
- El protón primario con energía de 1 TeV genera mayor flujo de secundarios a 2764 m.s.n.m con una distribución de fotones entre $10^3 - 10^4$ es decir cubre un área mayor que la del gamma primario que solo llega a $10^2 - 10^3$ a esta altitud.
- El gamma primario de 1 TeV después de que alcanza su máximo desarrollo a 100 gr/cm^2 decrece exponencialmente al aumentar la profundidad atmosférica y posee un menor número de partículas secundarias que el protón primario al acercarse a la altura de Riobamba (2764 m.s.n.m.), de la misma forma el primario de hierro para una hora de flujo es absorbido en la atmósfera a 535 gr/cm^2 aproximadamente, es decir no alcanzan a ser observadas.
- La abundancia de u^\pm son iniciados con energías desde 10^{-1} GeV y para los e^\pm son desde 10^{-3} GeV , estos se encuentran un número entre 10^3 y 10^4 , mientras que los gamma en su pico máximo alcanzan una proporción entre 10^5 y 10^6 , siendo estos últimos los más notables en un flujo de partículas de una hora para Riobamba-Ecuador con energía desde 13 GeV a $1 \times 10^3 \text{ TeV}$, es decir, para 2764 m.s.n.m podemos esperar una detección de u^\pm de 100 GeV de energía y para los e^\pm solo hasta los 10 GeV.
- La hora de flujo simulada en Corsika para Riobamba- Ecuador nos proporcionó 26 partículas primarias, en estas el flujo de partículas que se observa mayoritariamente es de : γ , u^- , u^+ , e^- , e^+ , π^- y π^+ correspondientemente, donde las de mayor densidad fueron los núcleos de Hidrogeno y Helio.

- La distribución lateral de los gamma nos mostró que esta cascada solo puede ser considerable dentro de un rango de hasta 2 km de radio para energías 13 GeV a 1×10^3 TeV, pero que a mayor distancia su densidad numérica disminuye notablemente.
- La cascada muón (-) solo es observable dentro de 1 km de radio desde el core para la energía simulada para una hora de flujo y después empieza a reducirse exponencialmente con la distancia. En cambio, para el muón (+) el rango de detección desde el núcleo posee hasta casi 2 km de radio y un mayor número direccionadas hacia el eje (y).
- Por lo tanto, se puede decir que Riobamba es un sitio con potencial para el estudio de astropartículas por su posición geográfica y su cercanía la Anomalía del Sudeste Atlántico, sin embargo, se requiere al menos 3 detectores de tipo Cherenkov, cubriendo un área de 1 km^2 según los valores obtenidos de la distribución lateral. Este arreglo permitirá una detección no solo de la tasa de partículas secundarias, pero también número de EAS y su dirección de arribo.
- La rigidez de corte en la zona ecuatorial es alta ($\sim 13 \text{ GeV}$), partículas de menor energía no penetran en la atmósfera y también justificaría la observación de primarios de alta energía ($E > 1 \text{ TeV}$), lo que implica detectores de área grande y tiempos largos de exposición.

RECOMENDACIONES

- Simulaciones con otros paquetes para partículas de alta energía pueden servir para comparar datos e información valiosa para el estudio de rayos cósmicos
- Se espera que al aumentar la energía del primario se incrementen la producción muónica, por lo tanto, se debe trabajar con variaciones más amplias de ángulos cenitales, energías mayores a 1 TeV y número de cascadas a simular, de esta forma aumenta la precisión de las posibles EAS que lleguen a la región de Riobamba-Ecuador.
- Aunque las simulaciones son pesadas computacionalmente se sugiere realizar estudio de un tiempo más largo 24 horas sobre la zona específica.
- Se aconseja realizar simulaciones en computadoras con suficiente capacidad y memoria por la alta densidad de información que se obtiene de las duchas atmosféricas para que no existan problemas al trabajar con estas.
- Se sugiere realizar estas simulaciones a altitudes superiores a 4000 m.s.n.m que fácilmente son encontradas en Ecuador, como tenemos al Volcán Chimborazo (6,268 m) o en el Volcán Cotopaxi (5,897 m), de esta forma el flujo de partículas encontradas será de mayor amplitud.

BIBLIOGRAFÍA

- AAB, A., et. al**, The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.058>
- ABEYSEKARA, et. al**, On the sensitivity of the HAWC observatory to gamma-ray bursts. Astroparticle Physics, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.02.001>
- ABRAHAM, J., et. al**, The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.04.023>
- AGUILAR, L. R.** Simulación de cascadas aéreas extensas en corsika para la colaboración lago en guatemala. Universidad San Carlos De Guatemala, 2017.
- AHARONIAN, A., et. al**, Discovery of very-high-energy γ -rays from the Galactic Centre ridge. Nature, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature04467>
- ALLARD, D., et. al**, Use of Water-Cherenkov detectors to detect Gamma Ray Bursts at the Large Aperture GRB Observatory (LAGO). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008. 595(1), 70–72. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.041>
- ANDERSON, B., et. al**, Mapping the South Atlantic Anomaly continuously over 27 years. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.015>
- ASIKAINEN, T., et. al**, Filling the South Atlantic anomaly by energetic electrons during a great magnetic storm. Geophysical Research Letters, 2005. <https://doi.org/10.1029/2005GL023634>
- BAHMANABADI, B., et. al**, Simulation of the time structure of Extensive Air Showers with CORSIKA initiated by various primary particles at Alborz-I observatory level. New Astronomy, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2017.11.003>
- BATTISTONI, G., et. al**, Monte carlo study of the arrival time distribution of particles in extensive air showers in the energy range 1-100 tev. Astroparticle Physics, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(98\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(98)00052-8)
- BERINGER, A., et. al**, Review of particle physics. Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology, 2012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>

- BERTOU, A., et. al**, Detection of GRB with water Cherenkov detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ,2005. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.062>
- CNOSSEN, J., et. al**, Changes in solar quiet magnetic variations since the Maunder Minimum: A comparison of historical observations and model simulations. Journal of Geophysical Research: Space Physics 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA023211>
- CUCINOTTA, B., et. al**, Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings. Lancet Oncology, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(06\)70695-7](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(06)70695-7)
- DAS, A., et. al**, A simulation study on few parameters of Cherenkov photons in extensive air showers of different primaries incident at various zenith angles over a high-altitude observation level. AstroparticlePhysics ,2018. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.02.013>
- DE SOUZA, C., et. al**, Muon component of air showers measured by the KASCADE-Grande Experiment. Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, ICRC, 2007.
- DELGADO, A.,** Caracterización De Los Detectores Cherenkov De Agua De Lago-México Mediante Simulación, Para La Determinación Del Área Efectiva De Partículas Secundarias Generadas Por Un Gamma Primario De Energías Entre 200 Gev Y 1.1 Tev, 2017.
- DOGIEL, V.,** Origin of cosmic rays. Proceedings of the International Astronomical Union 2012. <https://doi.org/10.1017/S1743921314012344>
- DORMAN, L.,** Space Weather and Cosmic Ray Effects. In Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth: Second Edition ,2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00030-0>
- DOVA, M.,** The Pierre Auger Observatory. Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 2003. [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(03\)80373-0](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(03)80373-0)
- GLENN G. KNOLL.,** Radiation Detection and Measurement (4th Edition). In John Wiley & Sons, Inc ,2010.
- GRIEDER, P. K. F.** Extensive Air Showers - High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects. In Cosmic Rays at Earth ,2010. <https://doi.org/10.1016/B978-044450710-5/50003-8>
- HECK, D., et. al**, CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Forschungszentrum Karlsruhe ,1998. <https://doi.org/10.1096/fj.01-0736fje>

- LOWERY, A., et. al**, Development of a Near-Field Magnetic Projectile Location System by Submitted to 2016.
- MÉSZÁROS PÉTER**, The High Energy Universe: Ultra-High Energy Events in Astrophysics and Cosmology. In Cambridge University Press ,2010. <https://doi.org/1139490729>, 9781139490726
- MORLINO, G.**, Supernova Remnant-Cosmic Ray connection: a modern view. Proceedings of the International Astronomical Union, 230–241, **2017**, <https://doi.org/10.1017/S1743921317004793>
- PERKINS, D. H.**, Particle Astrophysics, Second Edition. OUP Oxford (Ed.), Journal of Chemical Information and Modeling (Oxford Uni, Vol. 53), 2009, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- PIEROG, D. H.**, Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: (Version 7.7100). User Guide, (2019).
- PLYASHESHNIKOV, A., et. al**, Characteristics of air showers produced by extremely high energy gamma-rays. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2012. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/2/307>
- QUISHPE, R., et. al**, “Panchito” Water Cherenkov Detector water studies for the LAGO collaboration. Nuclear and Particle Physics Proceedings ,2015. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.144>
- SIDELNIK, I., et. al**, LAGO: The Latin American giant observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.069>
- TONWAR, S.**, EAS results and interpretation. Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(03\)80368-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(03)80368-7)
- VEGA, E. C., et. al**, Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (costa y región andina) del Ecuador, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000300006>
- WALTER, M.**, From the discovery of radioactivity to the first accelerator experiments. In from Ultra Rays to Astroparticles: A Historical Introduction to Astroparticle Physics 2012. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5422-5_2