

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

CORRECCIONES BAROMÉTRICAS Y DE TEMPERATURA PARA EL FLUJO DE ASTROPARTÍCULAS PARA EL DETECTOR CHERENKOV DE AGUA UBICADO EN QUITO.

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
FÍSICO**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

ALEJANDRO DAVID ERAZO GUACHAMIN

alejandro.erazo@epn.edu.ec

DIRECTOR: NICOLÁS ALEJANDRO VÁSQUEZ PAZMIÑO, PH.D.

nicolas.vasquez@epn.edu.ec

Quito, abril 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alejandro David Erazo Guachamin, bajo mi supervisión.

Nicolás Vásquez, Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Alejandro David Erazo Guachamin , declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Alejandro David Erazo Guachamin

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Elizabeth Victoria Erazo Meza, quien fue mi inspiración y colocó un norte en mi vida y Andrea que siempre supo apoyarme en todo y convertirse en mi compañera de este viaje llamado vida.

Elizabeth, recuerda que "vivimos en un universo extraño y maravilloso. Se necesita una extraordinaria imaginación para apreciar su edad, tamaño, violencia, e incluso su belleza. Podría parecer que el lugar que ocupamos los humanos en este vasto cosmos es insignificante; quizá por ello tratamos de encontrarle un sentido y de ver cómo encajamos en él." Stephen Hawking Brevísima historia del tiempo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por haberme brindado su apoyo incondicional, a mis amigos (The Saules y otros que se añadieron después) por estar a mi lado acolitandome en las buenas y malas. Quiero Agradecer en especial a Nicolás que se convirtió en un mentor y amigo durante el trayecto de mi carrera estudiantil. Agradezco al Epicentro por haberme brindado un lugar de esparcimiento en el cual compartí con mis amigos.

CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
1 Astropartículas	5
1.1 Motivación para el estudio de las astropartículas	5
1.2 Origen	7
1.3 Mecanismo de Aceleración	13
2 Lluvia Atmosférica Extensa (EAS)	18
2.1 Lluvia Atmosférica Extensa	18
2.1.1 Lluvia Atmosférica Extensa Electromagnética	20
2.1.2 Lluvia Atmosférica Extensa Hadrónica	23
2.2 Influencia de los parámetros ambientales	28
2.2.1 Dependencia barométrica	29
2.2.2 Dependencia con la temperatura	31
2.3 Métodos de detección	32
2.3.1 Efecto Cherenkov	33
2.3.2 Detectores Cherenkov de Agua	35
2.4 CORSIKA	35
2.4.1 Modelos en CORSIKA para interacciones de alta energía	36
2.4.2 Modelos en CORSIKA para interacciones de baja energía	37
2.4.3 Modelo atmosférico en CORSIKA	37
2.4.4 Deflexión debido al campo magnético de la Tierra	38
3 METODOLOGÍA	40
3.1 Simulaciones en CORSIKA	41
3.1.1 Tratamiento de las simulaciones	43
3.2 Datos obtenidos por el detector	45
3.2.1 Aproximación lineal para el coeficiente barométrico y de temperatura	47

3.3	Aplicación de la transformada rápida de Fourier para la obtención del coeficiente barométrico y de temperatura	48
3.3.1	Correcciones con los coeficientes barométrico y temperatura obtenidos de la transformada rápida de Fourier	52
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1	Resultados obtenidos por las simulaciones	55
4.2	Resultados obtenidos de los datos del detector	64
4.2.1	Resultados obtenidos para la Presión, Temperatura y Tasa de partículas secundarias	64
4.2.2	Correlación entre el tasa de partículas secundarias con la Presión y Temperatura	71
4.2.3	Coeficientes de Presión y Temperatura	76
5	CONCLUSIONES	81
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
Anexos		I
A	Instalación de CORSIKA	I
B	Simulación de una hora en CORSIKA mediante CrkTools	VII
C	Códigos en pyhton para procesar las simulaciones	XI
C.1	Programa implementado para obtener los gráficos de la distribución de energía de las EAS	XV
C.2	Programa implementado para obtener los gráficos de las posiciones de las EAS	XVIII
D	Programas para el tratamiento de los datos obtenidos por el detector	XX

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Trayectoria de una astropartícula atrapada por el campo magnético de la Tierra. La figura izquierda presenta las trayectorias de las partículas para determinadas energías donde E_0 será la energía mínima. La figura de la derecha presenta las astropartículas que cambian de trayectoria debido a la energía que llevan [1].	6
1.2	Composición química de las astropartículas de origen cósmico que arriban a la superficie de la Tierra en comparación con las producidas en el Sistema Solar. Los puntos de color azul representan la distribución de los elementos químicos correspondientes a las astropartículas en función del número atómico presentes en el sistema Solar. Los puntos de color negro representan la distribución de los elementos químicos que conforman las astropartículas presentes en el medio interestelar en función del número atómico [11].	9
1.3	Síntesis nuclear para la producción de Li, Be y B en el medio interestelar mediante la espalación de astropartículas, donde cada sub-figura representa la producción de nuevos elementos [12].	10
1.4	Espectro de la distribución de energía para las astropartículas correspondiente al modelo de ley de potencia asociado con la ecuación (1.1). El eje vertical izquierdo corresponde al flujo de las astropartículas multiplicado por E^2 . El eje vertical derecho corresponde a la altitud donde se producen las EAS, considerando como referencia la superficie de la Tierra. El eje horizontal corresponde a la energía de las astropartículas considerando su origen desde los eventos solares hasta eventos extragalácticos [19].	12
1.5	Mecanismo de Fermi. Esquema de una partícula cargada ingresando a una nube con un campo magnético turbulento. La partícula ingresa a la nube con energía inicial E_i con un ángulo de incidencia θ_i , y abandona la nube con un ángulo θ_f y con energía E_f después de varias interacciones dentro de la nube [23].	14
1.6	La Figura presenta una partícula con velocidad v ingresando en un frente de onda de choque, mientras la onda de choque se aproximan con velocidad v_{shock} . Se observa que la dirección de incidencia de la partícula posee dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda de choque.[7].	16

2.1	La Figura presenta el desarrollo de una Lluvia Atmosférica Extensa iniciada por un fotón γ de alta energía, un núcleo de hidrógeno y un núcleo de hierro. El fotón γ producirá únicamente electrones y fotones. Un protón generará una EAS compuesta por, la componente electromagnética, la componente muónica y hadrónica Un núcleo de hierro que genera una EAS a una altura superior, se observa que abarca un área mayor que las EAS iniciadas por el fotón γ o el protón, pero la densidad de partículas en torno al núcleo será menor. Cada una de las astropartículas tienen una energía de 1 TeV, la componente electromagnética está marcada en rojo y el núcleo de la EAS en negro [27].	19
2.2	La Figura presenta la interacción de un fotón con energía $h\nu$ interactuando con un núcleo atómico, dando lugar a la creación de un par electrón-positrón, que se llevan consigo una determinada energía cinética [29]. . . .	20
2.3	La Figura muestra un electrón con una determinada energía E_e interactuando con un núcleo atómico con energía E_{nucleo} , que da lugar a la creación de un fotón con energía $h\nu$ y la emisión de un electrón con una determinada energía cinética debido al proceso de frenado [29].	21
2.4	Modelo de Heitler para el desarrollo de una cascada aérea extensa electromagnética iniciada por un fotón de energía E_0 , y camino en la atmósfera que el fotón recorrerá X_0 hasta interactuar con algún átomo presente en la atmósfera. La creación de par electrón-positrón entrega energía $E_0/2$ en promedio a cada uno. Los leptones seguirán interactuando y obtendrán la mitad de energía en promedio [30].	22
2.5	Desarrollo de una lluvia aérea extensa por la interacción de una astropartícula con la atmósfera de la Tierra, se puede visualizar las tres componentes electromagnética, hadrónica y muónica con sus respectivas partículas que son producidas durante la evolución temporal de la lluvia [31].	24
2.6	La figura izquierda ilustra el desarrollo lateral de la EAS. La figura derecha ilustra el desarrollo longitudinal de la EAS. Las Figuras presentan la dependencia de las partículas en función de la distancia al núcleo y la altura en la que inician [33].	26
2.7	Parte izquierda presenta una partícula atravesando un medio donde $v < c$, no existe ondas constructivas. La parte derecha presenta una partícula con $v > c$ donde existe una acumulación constructiva de ondas dando lugar a la radiación Cherenkov que es representado por las flechas de color azul [42].	34

2.8	Esquematización de un detector de agua tipo Cherenkov. El detector presentan las diferentes componentes que lo conforman para su correcto funcionamiento. Se puede observar que una partícula sigue la trayectoria (línea de color rojo) generando radiación (líneas segmentadas) que es reflejada en las paredes del tanque para ser finalmente detectada por los fotomultiplicadores [44].	35
3.1	Variables ambientales correspondientes a los datos de referencia. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.	49
3.2	Tasa de partículas secundarias correspondientes a los datos de referencia. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.	50
3.3	Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales en el tiempo aplicado la FFT. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).	51
3.4	Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentan una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d) representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.	53

3.5	Corrección a el flujo de partículas aplicando los coeficientes ambientales mediante los dos modelos. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo.	54
4.1	El panel superior representa el flujo de partículas secundarias del tipo γ , iniciadas por los diferentes núcleos que conforman las astropartículas. El panel inferior representa el flujo de partículas secundarias del tipo μ^\pm , iniciadas por los diferentes núcleos de las astropartículas. La mayor contribución de las partículas secundarias esta generada por núcleos de Hidrógeno seguidos por núcleos de Helio y el resto de núcleos.	56
4.2	El panel superior representa el flujo de partículas secundarias del tipo e^\pm , iniciadas por los diferentes núcleos que conformas las astropartículas. El panel inferior representa el flujo de partículas secundarias del tipo piones (π^\pm), iniciadas por los diferentes núcleos de las astropartículas. La mayor contribución de las partículas secundarias esta generada por núcleos de Hidrógeno seguidos por núcleos de Helio y el resto de núcleos.	58
4.3	Densidad de partículas conforme se alejan del del núcleo de la EAS. El panel superior presenta la distribución lateral de las partículas tipo gama (γ) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos. El panel inferior presenta la distribución lateral de las partículas tipo muon (μ^\pm) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos.	60
4.4	Densidad de partículas conforme se alejan del del núcleo de la EAS. El panel superior representa la distribución lateral de las partículas tipo electrón (e^-) y positrón (e^+) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos. El panel inferior representa la distribución lateral de las partículas tipo pión (π^\pm) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos.	61
4.5	Distribución superficial de una EAS iniciada por una astropartícula del tipo gama (γ), los puntos negros representan los electrones (e^-) y positrones (e^+) que llegan hasta la superficie de la Tierra. Los punto de color amarillo representan los fotones gamma (γ) que llegan hasta la superficie de la Tierra.	62

4.6	Distribución superficial de una EAS iniciada por una astropartícula del tipo protón, los puntos azules representan los electrones (e^-) y positrones (e^+) que llegan hasta la superficie de la Tierra. Los punto de color amarillo representan los fotones gamma (γ) que llegan hasta la superficie de la Tierra. Los puntos de color negro representan los muones μ^\pm que llegan hasta la superficie de la Tierra.	62
4.7	Variables ambientales correspondientes al mes de Agosto del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas	65
4.8	Variables ambientales correspondientes al mes de Octubre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas	66
4.9	Variables ambientales correspondientes al mes de Noviembre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas	67
4.10	Tasa de partículas secundarias correspondiente al mes de Agosto del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.	69
4.11	Tasa de partículas secundarias correspondiente al mes de Octubre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.	70
4.12	Tasa de partículas secundarias correspondiente al mes de Noviembre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.	71

4.13	Correlación del flujo de partículas secundarias con las variables ambientales aplicado la FFT del mes de Agosto del 2018. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas(línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).	72
4.14	Correlación del flujo de partículas secundarias con las variables ambientales aplicado la FFT del mes de Octubre del 2018. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas(línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).	73
4.15	Correlación del flujo de partículas secundarias con las variables ambientales aplicado la FFT del mes de Noviembre del 2018. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas(línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).	73
4.16	Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentan una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d)representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.	74
4.17	Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentan una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d)representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.	75
4.18	Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentan una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d)representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.	75

4.19 Flujo corregido correspondiente al mes de Agosto del 2018. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo	77
4.20 Flujo corregido correspondiente al mes de Octubre del 2018. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo	78
4.21 Flujo corregido correspondiente al mes de Noviembre del 2018. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo	79

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Rigidez de corte magnética para distintos observatorios en Latinoamérica y dos posibles lugares de estudio en Ecuador. Estos valores dependerán de la ubicación geográfica en la cual se encuentran ubicados los diferentes observatorios.	7
2.1	La tabla presenta los valores correspondientes a las constantes empleadas para el modelo atmosférico de Estados Unidos, el modelo implementado consta de 5 capas.	38
3.1	Parámetros del detector ingresados en las simulaciones para el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional. En la tabla se presenta el tiempo de flujo, el rango de energía, los ángulos de incidencia de las astropartículas, ubicación geográfica, modelo atmosférico, etc. Estos parámetros son ingresados por el usuario para llevar a cabo la simulación.	42
4.1	Intervalos de frecuencias para las variables ambientales y tasa de partículas secundarias. Estos valores fueron seleccionados considerando las frecuencias más altas presentes en el espacio de Fourier de las Figuras 3.1, 4.7, 4.8 y 4.9.	71
4.2	Coefficientes ambientales obtenidos con el análisis estadístico y mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier. Observamos que los modelos implementados para el coeficiente de temperatura presentan un error superior al 50%, lo cual implica que el modelo implementado para hallar el coeficiente de temperatura no es el más adecuado.	80

RESUMEN

En los últimos años el estudio de las astropartículas ha tenido un amplio interés, siendo desarrollado en lugares de gran altitud como la región andina de latinoamérica. Esto debido a las ventajas geográficas que presentan para el estudio de las astropartículas. El presente estudio se llevó a cabo en dos partes.

Primero: se realizó simulaciones para diferentes núcleos primarios con un rango de energía entre 12.47 GeV y 10^6 GeV, con la finalidad de obtener la fluencia de partículas secundarias que llegan al detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional (2850 m.s.n.m). Estas simulaciones fueron realizadas para un flujo de partículas durante un tiempo de 6 horas mediante el paquete computacional CORSIKA, los datos fueron analizados mediante scripts realizados en python. Los resultados se presentan en varios gráficos que permiten inferir en la cantidad de partículas secundarias que están llegando al detector. Estos gráficos están clasificados para distintos núcleos primarios.

Segundo: Los datos reales que fueron obtenidos por el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional fueron clasificados por mes, se analizó el promedio y desviación estándar mensual para la tasa de partículas detectadas, estos datos permitieron realizar el filtrado de datos para cada mes. Con los datos filtrados se realizó la correlación entre los valores de la presión y temperatura con la tasa de partículas detectadas, estos permitieron obtener los coeficientes entre presión y temperatura, permitiendo realizar la corrección del flujo con las variables presión y temperatura. Mediante el uso de la transformada rápida de Fourier se halló las frecuencias de la presión, temperatura y tasa de partículas secundarias, estas frecuencias nos indican que existe una periodicidad de las variables atmosféricas en el lugar donde se ubica el detector, mediante las relaciones existentes entre las variables ambientales y la tasa de partículas se obtuvo los coeficientes de presión y temperatura. Finalmente se presentan diferentes gráficos entre los valores corregidos para la tasa de partículas y los valores sin corregir con los dos métodos implementados.

ABSTRACT

In recent years the study of astroparticles has caught the interest of the scientific community, this field has been developed in high altitude places such as the Andean region of Latin America. Due to the geographical advantages the study of astroparticles physics is under development in the region. The present study was carried out in two parts.

First, simulations were carried out for different primary particles with energy range between 12.47 GeV and 10^6 GeV, in order to obtain the rate of secondary particles that reach the detector level located in the Escuela Politécnica Nacional (2850 m.a.s.l.). These simulations were performed for a particle flux for a period of 6 hours using the CORSIKA software, the data processing was done using scripts written in python. The results are presented in several graphs that allow to infer in the amount of secondary particles that are reaching the detector. These graphics are classified for different secondary particles.

In the second part, the experimental data acquired by the detector located at the EPN is classified monthly. The average and the monthly standard deviation of the detected particle rate were analyzed allowing the filtering of data for each month. With the filtered data, the correlation between the pressure and temperature values was calculated, and we obtained the coefficient of correction for pressure and temperature. Applying a Fast Fourier Transform we found the frequencies of pressure, temperature and secondary particle rate. These frequencies indicated that there is a periodicity of the atmospheric variables; the relations between the variable environment and particle rate obtained pressure and temperature coefficients were calculated. Finally, we showed different graphics with the corrected values for the rate of particles applying the two implemented methods.

INTRODUCCIÓN

Las astropartículas, o rayos cósmicos, son partículas energéticas, en su mayoría cargadas que bombardean la tierra desde todas las direcciones. Gran parte de estas partículas tienen un origen solar, galáctico o extragaláctico, que está determinado por su energía. Las astropartículas son denominadas partículas primarias que interactúan con los átomos de la capa menos densa de la atmósfera de la Tierra y colisionan para producir las denominadas lluvias extensas atmosféricas o Extensive Air Showers (EAS). La generación de EAS da lugar a partículas secundarias que poseen distintas componentes mismas que dependerán de la energía y el tipo de astropartícula que interactúa en la atmósfera de la Tierra.

Las partículas secundarias que conforman las EAS podrán o no llegar hasta el nivel de detección en la base. Su detección permite describir las principales características de las astropartículas que bombardean la Tierra, la detección de las partículas secundarias está definida por la configuración geométrica de los detectores, los modelos físicos teóricos implementados y las variables ambientales. Dentro de los parámetros físicos que intervienen en el desarrollo de las EAS consideramos variables como: la presión atmosférica, la temperatura, la rigidez de corte, el campo magnético de la Tierra entre otros. Estos parámetros afectan el desarrollo de las EAS desde su formación hasta su arribo a los detectores, el entendimiento de estas variables y sus efectos sobre las EAS permitirán un mejor estudio de las astropartículas así como el comportamiento de la atmósfera de la Tierra en la región donde se ubican los detectores.

El estudio de las astropartículas en la región andina es de gran interés en la comunidad científica debido a sus implicaciones como sus orígenes o mecanismos de aceleración. Debido a este interés han surgido diferentes proyectos para su detección en diferentes regiones del planeta, como son LAGO (Latin America Giant Observatory), HAWC (High Altitude Water Cherenkov), CTA (The Cherenkov Telescope Array) entre otros.

Para la elaboración de este proyecto de titulación se ha considerado únicamente la imple-

mentación de un modelo físico, en el cual el flujo de las partículas secundarias dependen únicamente de las variaciones atmosféricas (presión atmosférica y la temperatura) al nivel del detector. Se utilizarán los datos obtenidos por el Water Cherenkov detector (WCD) ubicado en la Escuela Politécnica Nacional.

El trabajo de titulación se encuentra estructurado de la siguiente forma.

En el capítulo uno se da una breve introducción sobre los orígenes y los modelos que se han implementado en el estudio de las astropartículas, de igual forma las ventajas de su estudio en lugares de gran altitud como la región andina de Latinoamérica.

En el capítulo dos se aborda el estudio de las lluvias extensas atmosféricas, su clasificación la cual esta relacionada con la astropartícula que inicia la lluvia atmosférica extensa. El modelo para su estudio, la influencia con los parámetros ambientales, los métodos utilizados en su detección y El programa que permite las simulaciones para el estudio de las EAS.

El capítulo tres presenta el procedimiento llevado a cabo en las simulaciones para distintos rangos de energía y su correspondiente análisis. Los datos proporcionados por el detector serán extraídos y analizados de dos formas diferentes para hallar los valores correspondientes a los coeficientes que relacionan la presión y temperatura con la tasa de partículas secundarias detectas.

El capítulo cuatro expone los resultados obtenidos por las diferentes simulaciones realizadas manifestando la idoneidad de lugar elegido para la instalación de arreglos de detectores. Se presenta los coeficientes de presión y temperatura que están relacionados con la tasa de partículas secundarias y las variables ambientales, se hace uso de la transformada rápida de Fourier para hallar una periodicidad en las variables ambientales y la tasa de partículas secundarias. Esto permite hallar los coeficientes de presión y temperatura que están relacionado con la variación de la tasa de partículas secundarias.

En el capítulo cinco se expone las conclusiones más relevantes respecto al trabajo realizado, finalmente se presentan ciertas recomendaciones para un mejor estudio y análisis de las EAS.

El capítulo seis muestra la bibliografía consultada para el presente trabajo, y finalmente los anexos que presentan los códigos implementados en este trabajo.

1 ASTROPARTÍCULAS

1.1 MOTIVACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LAS ASTROPARTÍCULAS

La mayoría de astropartículas poseen carga, debido a esto interactuarán con los campos magnéticos que son generados por la Tierra. Debido a la existencia de los campos magnéticos de la Tierra, ciertas partículas podrán o no llegarán hasta la ubicación de los detectores, esto dependerá de la denominada rigidez de corte magnética^a. El estudio de la rigidez de corte magnética empezó alrededor de 1950 con el Störmer, Lemaitre y Vallarda, mediante el uso de simulaciones para examinar el comportamiento que presentaban las partículas cargadas al interactuar con el campo magnético de la Tierra. Esto, proporciona información referente a la energía mínima (E_0) que las astropartículas deben poseer para lograr atravesar el campo magnético de la Tierra, y llegar hasta la ubicación de los detectores. La rigidez de corte se puede considerar como una medida de protección provista por el campo magnético del planeta.

Las partículas cargadas al interactuar con un campo magnético uniforme describirán trayectorias elípticas o circulares, esto dependerá de la dirección de las partículas respecto al campo magnético. Ahora, cuando el campo magnético no es uniforme como en el caso de la Tierra, se presentan trayectorias que no pueden ser descritas analíticamente, estas trayectorias se muestran en la Figura 1.1. Se puede observar que la trayectoria final de la astropartícula no describirá por completo su dirección de origen, en su lugar la trayectoria se vera alterada por el campo magnético que presenta el planeta, en gran medida esto

^a La llegada de partículas cargadas a la Tierra se puede estimar a partir de sus trayectorias. El momento mínimo por unidad de carga que debe poseer una partícula para alcanzar un punto específico en la superficie de la Tierra se define como la rigidez de corte geomagnética (R_c), que depende de la configuración geométrica y la extensión del campo magnético de la Tierra.

dependerá de la energía que lleva la astropartícula.

Las trayectorias que seguirán las astropartículas estarán determinadas por el denominado cono de Störmer, existiendo trayectorias permitidas y prohibidas, dando lugar a que ciertas partículas con determinado valor de energía puedan llegar hasta los detectores. Si una astropartícula tiene carga positiva, existirá un mejor flujo desde el Este que del Oeste. Por otra parte, si las astropartículas tienen carga negativa existirá un menor flujo desde el Oeste que del Este, esto es denominado el efecto Este-Oeste y es una consecuencia del origen dipolar del campo geomagnético. Experimentalmente se ha demostrado que el efecto Este-Oeste existe, midiéndose en la radiación cósmica proveniente desde la dirección del Oeste [1, 2].



Figura 1.1: Trayectoria de una astropartícula atrapada por el campo magnético de la Tierra. La figura izquierda presenta las trayectorias de las partículas para determinadas energías donde E_0 será la energía mínima. La figura de la derecha presenta las astropartículas que cambian de trayectoria debido a la energía que llevan [1].

La posición geográfica del detector juega un rol importante en el estudio de las astropartículas, así lugares de gran altitud requerirán arreglos de detectores con menor área que arreglos en lugares al nivel del mar. En la Tabla 1.1 se presentan la localización y rigidez magnética de distintos observatorios en Latinoamérica, como podemos observar la mayoría de estos observatorio están miles de metros por encima del nivel del mar. Se muestra adicionalmente los dos sitios de estudio en Ecuador para una posible detección de astropartículas.

Podemos notar que existe una mayor rigidez de corte en Ecuador que el resto de observatorios, esto permite inferir que en Ecuador se tendrá un mayor valor de E_0 . Este valor en la rigidez de corte magnético, nos permitirá conocer hasta cierta medida, el valor de la energía mínima de las astropartículas que llegarán hasta la superficie del planeta. Con esta información, se podrá llevar a cabo simulaciones con una determinada energía mínima para la región del Ecuador y determinar la fluencia de EAS que existirán al nivel del detector en

la superficie del planeta.

Localización	Longitud-Latitud	Altura m.s.n.m	Rigidez de corte
Pierre Auger, Argentina	-69.585294 , -35.474458	1400	9.05 GV
Chacaltaya, Bolivia	-68.131389, -16.353333	5240	11.82 GV
HAWC, México	-97.3085, 18.994722	4100	8.12 GV
Coaque, Ecuador	-80.0536 , 0.0701	0	12.47 GV
Quito, Ecuador	-78.50972 , -0.218611	2850	12.48 GV

Tabla 1.1: Rigidez de corte magnética para distintos observatorios en Latinoamérica y dos posibles lugares de estudio en Ecuador. Estos valores dependerán de la ubicación geográfica en la cual se encuentran ubicados los diferentes observatorios.

1.2 ORIGEN

El origen del estudio de las astropartículas, o rayos cósmicos, empezó de forma indirecta al observar cómo una esfera metálica cargada se descargaba sin una explicación aparente. A inicios del siglo XX durante el estudio de la conductividad de los gases, se descubrió que sin importar cuan bien aislados estuvieran los instrumentos que median las fuentes de radiación, estos seguían cargándose. Se consideró que el efecto era producido por la radiación natural de la Tierra, se postuló que a mayor altitud esta radiación debía disminuir.

Víctor Hess, quien realizó numerosos experimentos en globos meteorológicos, llegando hasta alturas de más de 5 km, determinó que la radiación a esa altura era mucho mayor que la registrada a nivel del suelo. Observó que no existía una diferencia en los registros obtenidos entre el día y la noche, incluso durante un eclipse solar. Esto implicaba que el Sol no podía ser la fuente principal de esta radiación, esto generó gran interés en la comunidad científica debido a los posibles orígenes o mecanismos que aceleraban a estas partículas [3].

Gran parte del conocimiento de la física de partículas de alta energía tuvo su origen gracias al estudio de los rayos cósmicos; el positrón e^+ , el muon μ^\pm fueron las primeras partículas de una larga lista en ser descubiertas. De forma teórica se estableció la existencia de otro tipo de partículas que serían descubiertas posteriormente [4].

Las astropartículas, conocidas antes como rayos cósmicos, tienen un rol importante en el entendimiento de la dinámica galáctica. El correcto estudio de las astropartículas podrían

ser herramientas que permitan un mejor entendimiento de la nucleosíntesis estelar^b, la evolución de las supernovas, entre otros fenómenos cósmicos [5, 6].

Las astropartículas, son partículas altamente energéticas en su mayoría cargadas, que tienen un origen en fuentes galácticas o extragalácticas, las mismas que se ven afectadas al atravesar el medio interestelar. La existencia de campos magnéticos en la región estelar pueden acelerar las astropartículas o cambiar su trayectoria, por lo cual el estudio directo de las astropartículas primarias no proporciona una información directa sobre la posición de las fuentes que las originó [7, 8].

Las astropartículas, están compuestas generalmente por un 86 % de protones, 11 % partículas alfa, 2 % electrones y 1 % de otros núcleos. Se debe mencionar que se incluyen también partículas neutras como los rayos gamma (γ) o neutrinos. La composición química de las astropartículas (otros núcleos) es muy similar a la composición química de las partículas producidas en el Sol, dando una explicación en un origen estelar. Se ha demostrado que algunos elementos tiene su origen debido a reacciones nucleares, dando un contexto estelar denominado nucleosíntesis estelar. La Figura 1.2 nos presenta la abundancia relativa de los elementos químicos que conforman las astropartículas en función del número atómico, las mismas que están clasificadas por los astropartículas producidas en el sistema solar y por la radiación cósmica [9, 10].

^b La nucleosíntesis estelar es la producción de elementos químicos debido a los distintos procesos nucleares producidas dentro de las estrellas

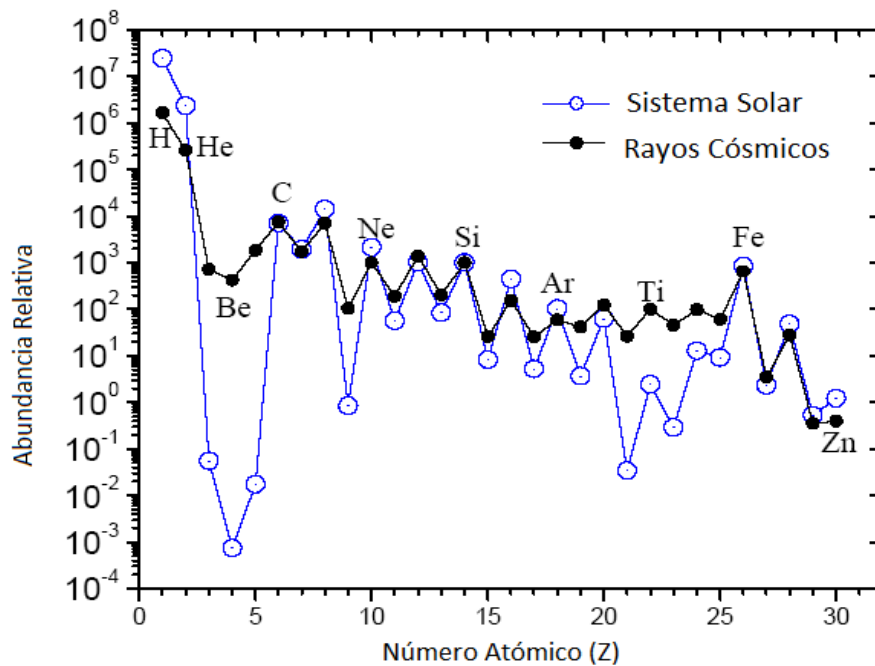


Figura 1.2: Composición química de las astropartículas de origen cósmico que arriban a la superficie de la Tierra en comparación con las producidas en el Sistema Solar. Los puntos de color azul representan la distribución de los elementos químicos correspondientes a las astropartículas en función del número atómico presentes en el sistema Solar. Los puntos de color negro representan la distribución de los elementos químicos que conforman las astropartículas presentes en el medio interestelar en función del número atómico [11].

Las astropartículas, pueden ser producidas en el interior de los núcleos calientes de estrellas o en eventos estelares muy energéticos tales como: supernovas, remanentes de supernovas, colisiones de estrellas de neutrones, AGNs.

Elementos como el Litio, Berilio y Boro no podrían ser producirse en este tipo de eventos, esto debido a las altas temperaturas, se considera aún a las fuentes que los generan un tema de debate. La teoría más aceptada, es que este tipo de elementos es producido por la espalación^c de las astropartículas al colisionar con otros núcleos.

La Figura 1.3 ilustra un ejemplo de cómo se producen estos elementos mediante la espalación. Se tiene que la imagen (a) presenta la colisión de dos átomos de Helio que producen un átomo de Litio, liberando un protón y neutrón. La imagen (b) presenta un protón colisionando con un átomo de Carbono produciendo un átomo de Boro, liberando dos protones. La imagen (c) presenta un protón colisionando con un átomo de Nitrógeno produciendo un átomo de Berilio, liberando dos protones y un átomo de Helio. La imagen (d) presenta

^c La espalación es un proceso nuclear mediante el cual se producen nuevos elementos debido a la colisión de las astropartículas con núcleos presentes en el medio interestelar.

un átomo de Helio colisionando con un átomo de Carbono produciendo un átomo de Litio, liberando un protón y dos átomos de Helio [9, 12, 13].

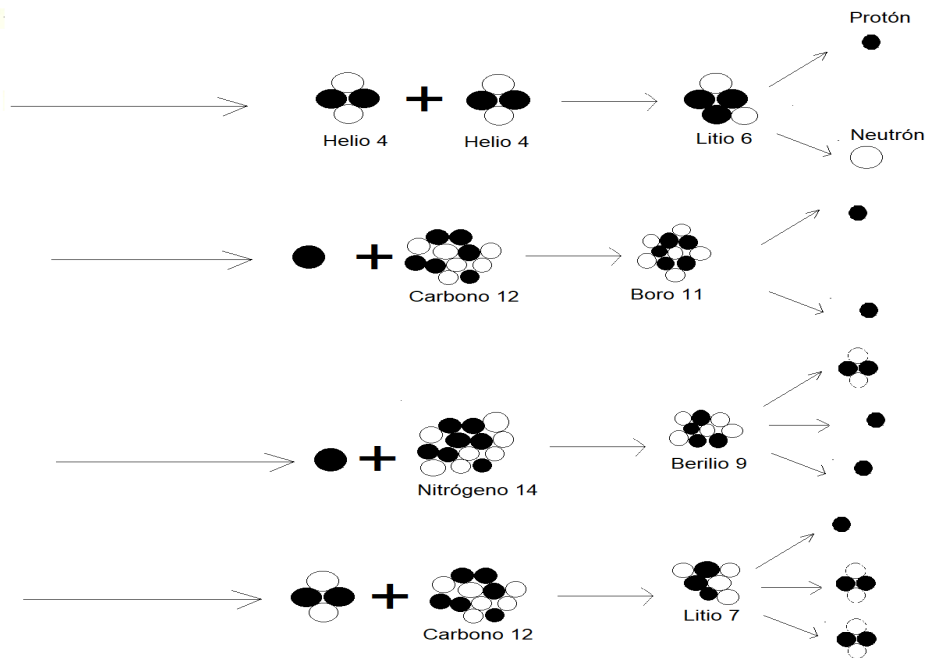


Figura 1.3: Síntesis nuclear para la producción de Li, Be y B en el medio interestelar mediante la espalación de astropartículas, donde cada sub-figura representa la producción de nuevos elementos [12].

Las astropartículas tienen diferentes orígenes, lo que permite clasificarlas dependiendo de su energía:

Astropartículas extragalácticas. Estas tienen su origen en eventos galácticos de muy alta energía así como: quásares, núcleos de galaxias activas, etc. Poseen energías superiores a los 10^{16} eV, viajan a través del medio intergaláctico hasta llegar a nuestra galaxia y finalmente llegando a la Tierra.

Astropartículas galácticas. Son relativas a nuestra galaxia, y son principalmente generados en supernovas y sus remanentes como en estrellas binarias y púlsares, tienen energías entre 10^{12} - 10^{15} eV.

Astropartículas solares. Generadas principalmente en la corona Solar en periodos de altas llamaradas solares, poseen energías comprendidas entre 10^5 - 10^{10} eV.

Astropartículas interplanetarias, tienen energías comprendidas entre 10-100 MeV son generadas en las fronteras de la heliosfera por fuertes ondas de choque.

Astropartículas planetarias. Generadas dentro de la magnetosfera del planeta tienen valores de 10 MeV para Júpiter y Saturno, y de 30 KeV para la Tierra

La Tierra es constantemente bombardeada por astropartículas con diferentes valores de energía, esto hace que se vuelve casi imposible determinar cual es el origen en específico de estas astropartículas. Por lo que se considera únicamente a las astropartículas con valores de energía $E > 10^6$ eV [14]. Gran parte de las astropartículas son desaceleradas debido al viento Solar y al campo magnético de la Tierra. Para las astropartículas con energías $E > 10^6$ eV, tendrán un comportamiento descrito mediante una ley de potencias

$$\frac{dN(E)}{dE} = kE^{-\alpha}, \quad (1.1)$$

donde α representa el índice espectral de las astropartículas, el mismo que abarca el rango de energías desde 10^6 eV hasta energías de 10^{20} eV. El espectro de las astropartículas esta compuesto por tres regiones. Dos de estas regiones se definen como rodilla (knee), las cuales abarcan los rangos de energía que van desde los 10^6 eV hasta 10^{18} eV, estos valores corresponden a eventos solares y galácticos. Mientras que la tercera región se denomina tobillo (ankle), esta abarca los valores de energía de 10^{18} eV en adelante correspondiente a eventos extragalácticos. Cada región posee un flujo de partículas, así para las regiones denominadas rodilla se tiene un flujo de partículas que van desde $10^3/m^2/s$ hasta $1/m^2/año$. Mientras que para la región denominada tobillo se tiene un flujo de partículas de $1/km^2/siglo$, esto se puede observar en la Figura 1.3 [15, 16].

El valor asociado al índice espectral no es único, este adquiere distintos valores debido a la naturaleza de las astropartículas, por lo tanto, por debajo de la «rodilla» el índice espectral toma el valor de $\alpha = 2.7$ con $E < E_{knee}$, estas energías corresponden a energías $< 10^{14}$ eV. Para las energías entre la «rodilla» y el «tobillo», el valor del índice espectral toma el valor de $\alpha = 3.2$, estas energías están comprendidas para energías $> 10^{14}$ eV y energías $< 10^{18}$ eV. Para energías $> 10^{18}$ eV, se tiene un índice espectral de $\alpha = 2.68$, este rango de energía corresponde a la transición de las energías entre el «tobillo» y la energía de corte GZK^d, estas energías han podido ser detectadas en observatorios con detectores para lluvias extensas atmosféricas como el observatorio de Pierre Auger en la Argentina [10, 17].

^d La energía de corte GZK es denominado por (Greisen, Zatsepin y Kuz'min) predice que existirá un valor muy alto en el que las astropartículas sufrirán una disminución drástica, se ha calculado ese valor en $E_{GZK} = 6 \times 10^{19}$ eV esta es la predicción de la teoría actual.

Para las astropartículas con energías $<10^{14}$ eV, las detecciones se las realiza de forma directa, mediante el uso de globos meteorológicos o satélites. Para las energías $\geq 10^{14}$ eV, su detección directa es más complicada, debido a que el flujo de tales partículas es de alrededor de $3/m^2/h$. Para estos valores de energías, las astropartículas pueden ser detectadas únicamente con arreglos de detectores especialmente diseñados para EAS que pueden abarcan áreas de más de $10^2 m^2$, aunque estas áreas dependerán del tipo de partículas y sus energías [18].

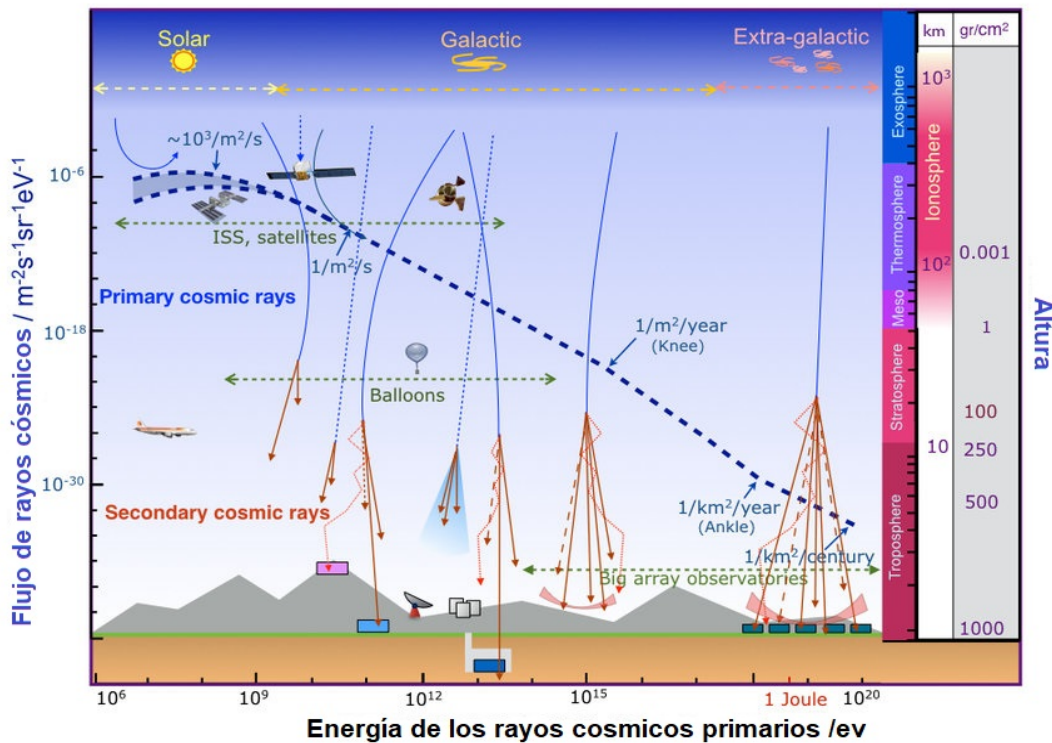


Figura 1.4: Espectro de la distribución de energía para las astropartículas correspondiente al modelo de ley de potencia asociado con la ecuación (1.1). El eje vertical izquierdo corresponde al flujo de las astropartículas multiplicado por E^2 . El eje vertical derecho corresponde a la altitud donde se producen las EAS, considerando como referencia la superficie de la Tierra. El eje horizontal corresponde a la energía de las astropartículas considerando su origen desde los eventos solares hasta eventos extragalácticos [19].

Desde el descubrimiento de las astropartículas, distintos observatorios alrededor de mundo han estudiado las componentes de las EAS, esto con el objetivo de conocer la naturaleza de las astropartículas. Mediante este estudio se ha logrado obtener el espectro de las astropartículas, donde cada una de las características observadas tienen distintas explicaciones, las que han sido relacionadas con su composición química o mecanismo de aceleración producidas durante su trayecto por el medio interestelar. La mayoría de modelos implementados a las astropartículas asocia a la transición existente entre la «rodilla» y el «tobillo», con la transición de las astropartículas de fuentes galácticas con las fuentes

extragalácticas.

1.3 MECANISMO DE ACELERACIÓN

El origen de las astropartículas, y cómo éstas logran obtener energías $\geq 10^{15}$ eV, es uno de los grandes enigmas de la astrofísica. Los posibles orígenes a sus altas energías están asociados con los eventos más energéticos que se producen en el universo. Cuando se trata sobre el origen de las astropartículas, se debe distinguir entre sus posibles procesos de origen, ya que las astropartículas pueden ser generadas en fuentes o generadas debido a los mecanismos de aceleración existentes en el universo. La teoría más aceptada, dice que las astropartículas pueden ser aceleradas hasta alcanzar las altas energías que las caracterizan [7, 20].

Enrico Fermi propuso el mecanismo de aceleración de partículas estocásticas para la generación de astropartículas de alta energía. Supongamos que las partículas cargadas interactúan con una nube de gas, que posee campos magnéticos turbulentos. Estos campos se encuentran en movimiento a través del medio interestelar. El principal propósito de los mecanismos de aceleración, es explicar la ley de potencias del espectro de las astropartículas. Este mecanismo considera a las nubes de gas magnetizadas, como «aceleradores» de partículas cargadas [21, 22].

Consideramos una partícula con energía inicial E_i , esta será la energía de una partícula que ingresa a una nube de gas con un campo magnético turbulento. El sistema de referencia laboratorio, estará determinado por la partícula y la nube aproximándose una hacia la otra. Se considera que la partícula es relativista con masa despreciable $E_i \approx p_i c$, la nube tiene una masa muy grande con una velocidad $v_{cl} \ll c$. El sistema de referencia centro de masa, estará determinado por el sistema de referencia en la nube de gas con un campo magnético turbulento.

La partícula, ingresa con un determinado ángulo incidente θ_i a la nube, posteriormente la partícula es dispersada varias veces dentro de la nube debido al campo magnético, eventualmente la partícula saldrá de la nube en sentido opuesto al que ingresó. Al abandonar la nube, la partícula emergerá con un ángulo θ_f y una energía final E_f , que corresponderá a la energía ganada dentro de la nube. La Figura 1.5 ilustra el mecanismo de aceleración de Fermi para una partícula cargada, que incide sobre una nube de gas con un campo magnético turbulento [7, 15, 23].

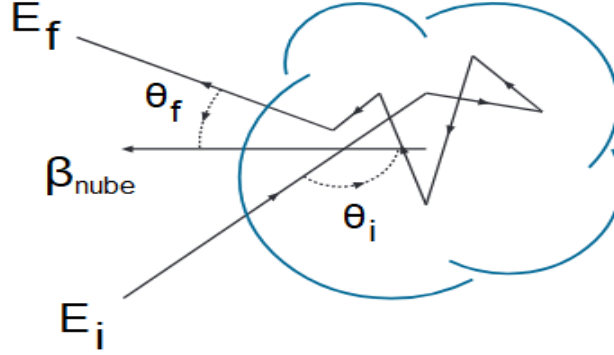


Figura 1.5: Mecanismo de Fermi. Esquema de una partícula cargada ingresando a una nube con un campo magnético turbulento. La partícula ingresa a la nube con energía inicial E_i con un ángulo de incidencia θ_i , y abandona la nube con un ángulo θ_f y con energía E_f después de varias interacciones dentro de la nube [23].

Se considera la transformación entre los sistemas de referencia laboratorio y centro de masa. Para el sistema laboratorio, se aplica la notación sin primar, mientras que para el sistema de referencia centro de masa la notación es primada. La partícula cargada con energía inicial E_i , que ingresa a la nube con un campo magnético turbulento, y luego sale con una energía final E_f se ilustra en la Figura 1.5. Aplicamos la transformación de la energía inicial entre los sistemas de referencia

$$E'_i = \gamma_{v_{cl}} (E_i - \beta_{v_{cl}} c p_i \cos \theta_i), \quad (1.2)$$

donde $\gamma_{v_{cl}} = (1 - v_{cl}^2/c^2)^{-1/2}$, y $\beta_{v_{cl}} = v_{cl}/c$ es la velocidad de la nube en unidades de la velocidad de la luz. Tomamos la componente x del momento correspondiente a la partícula $p_{xi} = p_i \cos \theta_i$, entonces se tiene que la componente x del momento en el sistema centro de masa para la partícula incidente es $c p'_{xi} = \gamma_{v_{cl}} (c p_{xi} - \beta_{v_{cl}} E_i)$. Se considera que las interacciones dentro de la nube son completamente elásticas, lo que quiere decir que la energía se conserva $E'_f = E'_i$, y el momento cambia únicamente su dirección en la componente x , por lo tanto $p'_{xf} = -p'_{xi}$.

Del sistema centro de masa transformamos al sistema laboratorio, dando como resultado la energía final de la partícula que abandona la nube

$$E_f = \gamma_{v_{cl}} (E'_f + \beta_{v_{cl}} c p'_{xf} \cos \theta_f). \quad (1.3)$$

Sustituimos E'_f por la ecuación (1.2) y obtenemos

$$E_f = \gamma_{v_{cl}} E'_f (1 + \beta_{v_{cl}} \cos \theta_f) = \gamma_{v_{cl}}^2 E_i (1 - \beta_{v_{cl}} \cos \theta_i) (1 + \beta_{v_{cl}} \cos \theta_f). \quad (1.4)$$

Si desarrollamos la ecuación (1.4) obtenemos

$$E_f = \gamma_{v_{cl}}^2 E_i (1 + \beta_{v_{cl}} \cos \theta_f - \beta_{v_{cl}} \cos \theta_i - \beta_{v_{cl}}^2 \cos \theta_i \cos \theta_f). \quad (1.5)$$

Expandimos mediante serie de Taylor la expresión $\gamma_{v_{cl}}^2 = (1 - \beta_{v_{cl}}^2)^{-1} \approx 1 + \beta_{v_{cl}}^2$ y la reemplazamos en la ecuación (1.5), consideramos únicamente los valores de segundo orden para $\beta_{v_{cl}}$, entonces la variación de la energía

$$\frac{\Delta E}{E_i} = \beta_{v_{cl}}^2 + \beta_{v_{cl}} \cos \theta_f - \beta_{v_{cl}} \cos \theta_i - \beta_{v_{cl}}^2 \cos \theta_i \cos \theta_f. \quad (1.6)$$

Dentro de la nube de gas magnetizada, la dirección de la partícula cargada se vuelve aleatoria, entonces la dirección de salida no posee necesariamente la misma dirección de entrada. Por lo tanto el valor $\langle \cos \theta_f \rangle = 0$, y el valor promedio de $\cos \theta_i$ dependerá de la velocidad relativa de la partícula cargada y la nube de gas magnetizada. La probabilidad de que exista una colisión entre la partícula y la nube de gas con un determinado ángulo θ_i , por unidad de ángulo sólido es proporcional a $(v - v_{cl})$, donde v es la velocidad de la partícula y v_{cl} es la velocidad de la nube. Para el caso relativista, consideramos que $v \approx c$ por lo tanto $dP/d\Omega \propto (1 - \beta_{v_{cl}})$, entonces el valor promedio del ángulo de incidencia

$$\langle \cos \theta_i \rangle = \frac{\int_{-1}^1 \cos \theta_i (1 - \beta_{v_{cl}} \cos \theta_i) d(\cos \theta_i)}{\int_{-1}^1 (1 - \beta_{v_{cl}} \cos \theta_i) d(\cos \theta_i)} = -\frac{\beta_{v_{cl}}}{3}. \quad (1.7)$$

Reemplazamos el valor de la ecuación (1.7) en la ecuación (1.6) y desarrollamos

$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E_i} = \frac{4}{3} \beta_{v_{cl}}^2. \quad (1.8)$$

Este incremento del promedio de la energía es proporcional a $\beta_{v_{cl}}^2 = (v_{cl}/c)^2$, conocido como la aceleración de Fermi de segundo orden [15, 22, 23, 24].

Otro mecanismo de aceleración más eficiente, consiste en partículas entrando y saliendo de un frente de onda de choque. Supongamos una onda de choque de plasma no relativista con una velocidad v_{shock} moviéndose por el medio interestelar, y una partícula en dirección hacia el frente de onda con una velocidad v . El frente de onda de choque tiene una velocidad v_{shock_1} , detrás de la onda el gas se aleja con una velocidad v_{shock_2} . Esto implica que la onda de choque del gas en el sistema laboratorio (onda de choque) tiene la velocidad $v_{shock} = v_{shock_1} - v_{shock_2}$, esto se ilustra en la Figura 1.6.

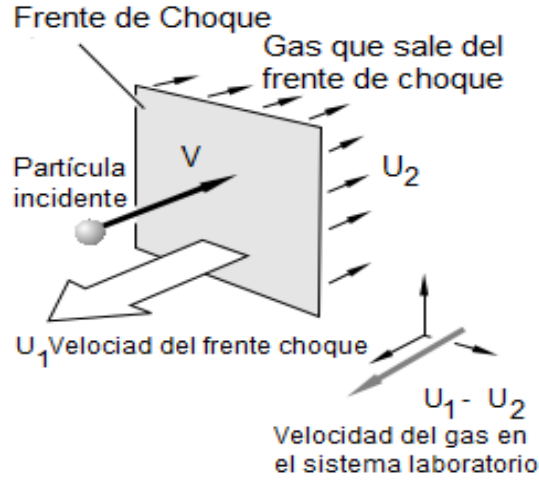


Figura 1.6: La Figura presenta una partícula con velocidad v ingresando en un frente de onda de choque, mientras la onda de choque se aproximan con velocidad v_{shock} . Se observa que la dirección de incidencia de la partícula posee dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda de choque.[7].

Una partícula que colisiona con el frente de onda y posteriormente es reflejada, ganará energía

$$\Delta E = \frac{1}{2}m(v + v_{shock})^2 - \frac{1}{2}mv^2. \quad (1.9)$$

Se considera que la partícula ingresará y saldrá del frente de onda con determinados ángulos, se desarrolla el término cuadrático y se considera únicamente los términos predominantes es decir $v \gg v_{shock}$, $v_{shock_1} > v_{shock_2}$. Además, se considera que la partícula que ingresa a la onda de choque es relativista $v \approx c$, entonces se obtiene que el promedio de la variación de la energía adquirida por la partícula será:

$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E_i} = \frac{4}{3} \frac{v_{shock}}{c}. \quad (1.10)$$

Este mecanismo de aceleración es conocido como de primer orden y es mucho mas eficiente, esto debido a que las ondas de choque de supernovas poseen más energía cinética que las nubes de gas magnetizadas [7, 10, 15, 22].

En cualquiera de los dos mecanismos de aceleración, siempre se obtiene que la variación de la energía promedio es $\Delta E = \eta E_i$. Por lo tanto, para la partícula que ingresó con energía E_i al sistema, luego de transcurridas «n» interacciones ganará energía ηE_i . La energía final con la partícula que abandona el sistema después de «n» interacciones será $E_n = E_i (1 + \eta)^n$. Consideramos que la energía con la que sale la partícula después de las «n» interacciones es la energía final $E_n = E_f$, para obtener dicha energía es necesario que las

«n» interacciones se defina como

$$n = \frac{\ln(E_f/E_i)}{\ln(1 + \eta)}. \quad (1.11)$$

Asumimos que la probabilidad de escape de una partícula en los mecanismos de aceleración es P , que la partícula se mantenga en los mecanismos de aceleración después de «n» interacciones es $(1 - P)^n$. Esto proporciona un número de partículas con energías $> E_f$, obtenemos el número de partículas con energías $> E_f$

$$N(E > E_f) \propto \sum_{i=n}^{\infty} (1 - P)^i. \quad (1.12)$$

Si realizamos un cambio de variable en $i - n = q$, y consideramos que $\sum_{a=0}^{\infty} x^a = 1/(1 - x)$, con $x < 1$,

$$N(E > E_f) \propto (1 - P)^n \sum_{q=0}^{\infty} (1 - P)^q \propto \frac{(1 - P)^n}{P}. \quad (1.13)$$

Aplicamos la función logaritmo natural a cada lado de la ecuación (1.13) y mediante el uso de la ecuación (1.11) obtenemos número de partículas con una determinada energía

$$N(E) \propto E^{-\alpha}, \quad (1.14)$$

donde se tiene que $\alpha \approx P/\eta$. Se observa, que los mecanismos de aceleración de los procesos estocásticos generan el espectro de ley de potencias que caracteriza a las astropartículas. Para el caso de la aceleración del mecanismo de Fermi, el coeficiente espectral depende del cuadrado de β_{cl} . Experimentalmente se ha encontrado que para el rango de energía entre 10^{15} eV y 10^{18} eV, el índice espectral adquiere el valor de $\alpha = 1.7$. Para valores $> 10^{18}$ eV, el valor del índice espectral toma un valor de $\alpha = 2$ [7, 15, 16, 24].

2 LLUVIA ATMOSFÉRICA EXTENSA (EAS)

2.1 LLUVIA ATMOSFÉRICA EXTENSA

Las astropartículas, al colisionar con los átomos presentes en la atmósfera superior de la Tierra, que en su mayoría está compuesto por átomos de Oxígeno O_2 , Nitrógeno N_2 , y Argón Ar , generan lo que se ha denominado lluvias atmosféricas extensas o EAS^a. Las EAS, son millones de partículas secundarias que están compuestas tanto por partículas cargadas como por partículas neutras. El estudio de las EAS, ha permitido de forma indirecta conocer las principales propiedades de las astropartículas con energías $> 10^{14}$ eV.

Cada lluvia de partículas secundarias será generada únicamente por una astropartícula, estas EAS pueden ser de dos tipos, se tiene las EAS electromagnéticas y las EAS hadrónicas, estas dependerán únicamente del tipo de astropartícula que llegará a la atmósfera de la Tierra. Las EAS hadrónicas generan tres componentes en la lluvia que son: la componente electromagnética, la componente hadrónica y la componente muónica. Las principales características de estas EAS son el área que abarca las partículas secundarias, su desarrollo longitudinal y transversal, las componentes presentes en la EAS, etc.

Un esquema en el desarrollo de una EAS iniciada por diferentes astropartículas se ilustra en la Figura 2.1, podemos observar que la mayor cantidad de partículas se concentra cerca del eje que lleva la misma dirección de la astropartícula incidente, muchas veces el eje principal de la EAS es conocido como el núcleo de la EAS. En el desarrollo de las EAS, el número de las partículas secundarias que son generadas se incrementaran hasta alcanzar un valor máximo, para luego disminuir hasta llegar a una energía crítica E_c . Este valor crítico de energía representa el límite energético que pueden tener las partículas secundarias para generar más partículas, una vez superado este límite no se permite generar más partículas secundarias [8, 25, 26].

^a Extensive Air Showers (EAS) por sus siglas en ingles, son lluvias de partículas secundarias producidas por la colisión de una astropartícula con los átomos de la atmósfera

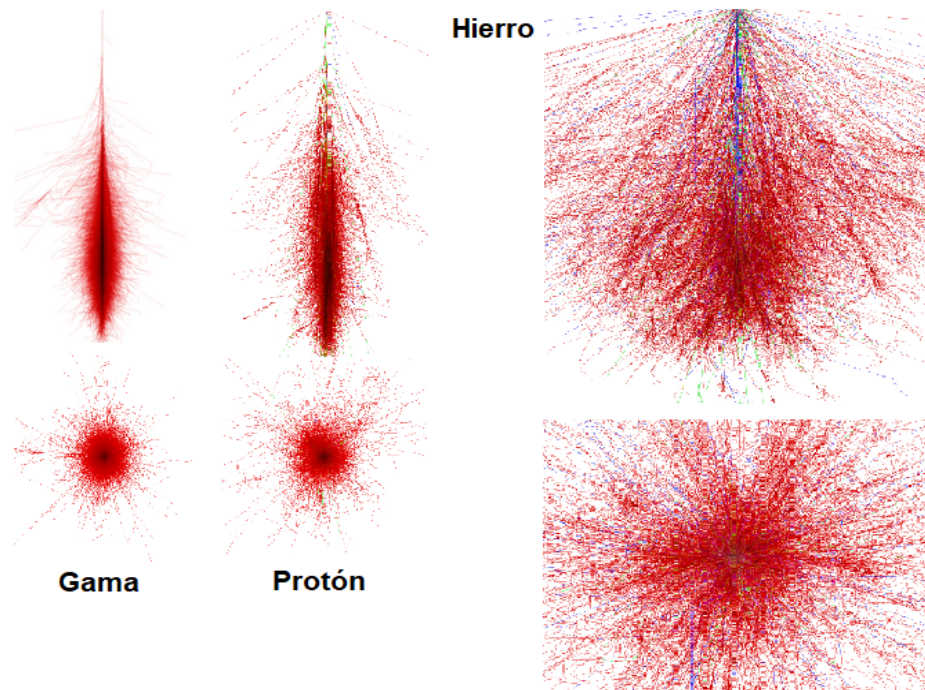


Figura 2.1: La Figura presenta el desarrollo de una Lluvia Atmosférica Extensa iniciada por un fotón γ de alta energía, un núcleo de hidrógeno y un núcleo de hierro. El fotón gama γ producirá únicamente electrones y fotones. Un protón generará una EAS compuesta por, la componente electromagnética, la componente muónica y hadrónica. Un núcleo de hierro que genera una EAS a una altura superior, se observa que abarca un área mayor que las EAS iniciadas por el fotón γ o el protón, pero la densidad de partículas en torno al núcleo será menor. Cada una de las astropartículas tienen una energía de 1 TeV, la componente electromagnética está marcada en rojo y el núcleo de la EAS en negro [27].

Toda la información referente a las astropartículas, son extraídas de las principales características de las EAS, aunque su estudio no proporciona información directa de la energía ni el tipo de la partícula primaria que las originó. La mayoría de la información esta basada en la comparación de los resultados obtenidos, esta comparación se realiza con los detectores y las diferentes simulaciones de los modelos implementados. La mayoría de simulaciones que se realizan para el estudio evolutivo de las EAS, esta basado en el método Monte Carlo^b y modelos para una determinada energía y tipo de astropartícula [15, 25, 28].

^b El método de Monte Carlo es un método numérico que nos permite el cálculo de probabilidades mediante el uso de secuencias numéricas aleatorias.

2.1.1 Lluvia Atmosférica Extensa Electromagnética

Estas lluvias, generalmente son iniciadas por un e^\pm o un rayo gamma (γ) ultra energético, el caso más sencillo de la evolución de esta EAS, considera la descripción introducida por Walter Heitler en el que solo existen dos canales de generación que son:

Creación de pares. La creación de pares, consiste en la transformación de la energía radiante $h\nu$, en energía de masa en reposo E_0 y energía cinética K . El proceso ocurre con la pérdida total de la energía $h\nu$ de un fotón γ al colisionar con un núcleo, dando como resultado la creación de un electrón y un positrón que se llevan consigo cierta energía cinética K_e y K_p . En la creación de pares electrón-positrón, la energía asociada al retroceso del núcleo se lo considera despreciable, por lo tanto el balance de energía en la creación de pares

$$h\nu = E_p + E_e = (m_p c^2 + K_p) + (m_e c^2 + K_e), \quad (2.1)$$

donde E_p y E_e son al energía total del positrón y electrón respectivamente. Como las $m_p = m_e$ de la ecuación (2.1) el balance de energía

$$h\nu = 2m_e c^2 + K_p + K_e. \quad (2.2)$$

De la ecuación (2.2) observamos que existirá una energía mínima o umbral para la creación de pares

$$h\nu = 2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}. \quad (2.3)$$

En resumen, mientras un fotón γ tenga energía $> 1.02 \text{ MeV}$ podrá crear un par electrón-positrón, siempre que el fotón γ interacciona con algún núcleo de la atmósfera como se ilustra en la Figura 2.2.

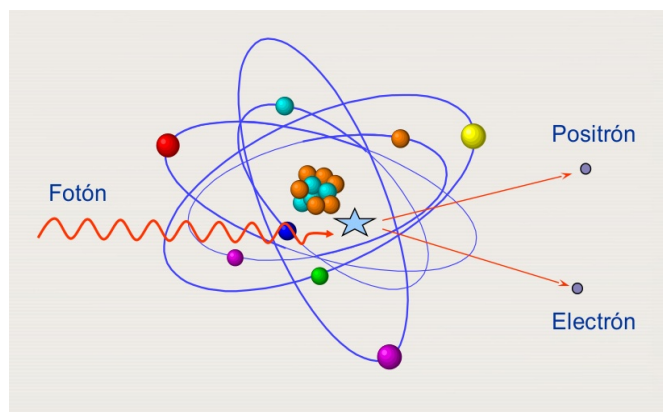


Figura 2.2: La Figura presenta la interacción de un fotón con energía $h\nu$ interactuando con un núcleo atómico, dando lugar a la creación de un par electrón-positrón, que se llevan consigo una determinada energía cinética [29].

Bremsstrahlung. Según la física clásica, la desaceleración de los electrones energéticos producen la emisión de un espectro continuo de radiación, que es conocido como radiación de frenado o Bremsstrahlung. El proceso se origina cuando un electrón con energía cinética K_e es frenado al interactuar con un núcleo, dando como resultado la emisión de un fotón con una determinada energía $h\nu$,

$$E_e + E_{nucleo} = E'_e + h\nu + E'_{nucleo}, \quad (2.4)$$

donde E_e , E_{nucleo} son las energías totales del electrón y el núcleo antes de interactuar. E_e y E'_{nucleo} son las energías totales del electrón y el núcleo después de interactuar, $h\nu$ es la energía del fotón producida en la desaceleración del electrón incidente. Si consideramos que el núcleo se encuentra en reposo, y después de interactuar con el electrón su energía cinética es despreciable obtenemos la energía del fotón resultante

$$h\nu = K_e - K'_e. \quad (2.5)$$

En resumen, este proceso se genera debido a la desaceleración de una partícula cargada al interactuar con el campo eléctrico de un núcleo, la energía cinética perdida por la desaceleración es emitida en forma de radiación dando lugar a la generación de un fotón como se ilustra en la Figura 2.3.

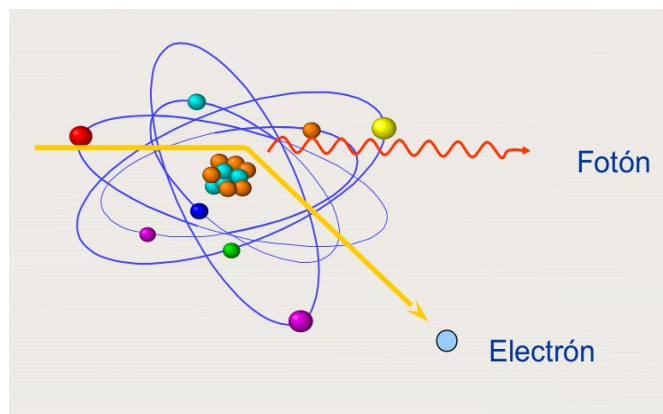


Figura 2.3: La Figura muestra un electrón con una determinada energía E_e interactuando con un núcleo atómico con energía E_{nucleo} , que da lugar a la creación de un fotón con energía $h\nu$ y la emisión de un electrón con una determinada energía cinética debido al proceso de frenado [29].

Para el estudio de las EAS electromagnéticas, vamos a considerar un fotón γ con una energía inicial E_0 , que deberá atravesar un camino de interacción definido como X_0 . Al

interaccionar con la atmósfera se crearán los pares e^\pm , donde cada uno tiene una energía asociada $E_0/2$ en promedio. Cada uno de esos leptones^c generará un nuevo e^\pm y un fotón γ debido al proceso de Bremsstrahlung, cada uno con una energía $E_0/4$.

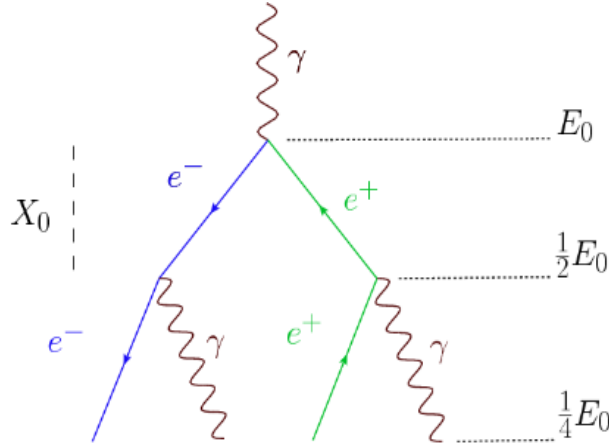


Figura 2.4: Modelo de Heitler para el desarrollo de una cascada aérea extensa electromagnética iniciada por un fotón de energía E_0 , y camino en la atmósfera que el fotón recorrerá X_0 hasta interactuar con algún átomo presente en la atmósfera. La creación de par electrón-positrón entrega energía $E_0/2$ en promedio a cada uno. Los leptones seguirán interactuando y obtendrán la mitad de energía en promedio [30].

Por cada interacción, la partícula pierde la mitad de su energía inicial E_0 al recorrer una distancia de interacción dentro de la lluvia $x = nX_0$, obtenemos un número de partículas igual a $N(x) = 2^n = 2^{x/X_0}$ con un promedio de energía $E(x) = 2^{-x/X_0} E_0$ para cada una de las partículas. Todo esto se desarrolla antes que la partícula alcance su energía crítica E_c , la energía crítica nos indica que no se podrán crear más partículas por cualquiera de los dos canales antes mencionados. La distancia máxima x_{max} donde las partículas alcanzarán su valor máximo se define

$$x_{max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln(2)} X_0. \quad (2.6)$$

Por lo que se obtiene que el número máximo de partículas $N(x_{max})$ será,

$$N(x_{max}) = \frac{E_0}{E_c} = 2^{x_{max}/X_0} E_0. \quad (2.7)$$

Dentro de estas EAS, ambos procesos están acoplados hasta que alcancen la energía crítica, bajo este punto las partículas tendrán un proceso de absorción que da lugar a una

^c Leptones son partículas subatómicas que responden solo a la fuerza electromagnética, la fuerza débil y la fuerza gravitacional y no se ven afectadas por la fuerza fuerte. Los leptones son partículas elementales; es decir, no parecen estar formados por unidades de materia más pequeñas. Los leptones pueden transportar una unidad de carga eléctrica o ser neutros. Los leptones cargados son los electrones, muones, taus, sus correspondientes antipartículas y neutrinos asociados a cada partícula.

disminución en el número de las partículas secundarias [15, 28, 30].

2.1.2 Lluvia Atmosférica Extensa Hadrónica

Las EAS hadrónicas, son producidas por la interacción de una astropartícula, en este caso un hadrón^d de alta energía con algún núcleo perteneciente a las moléculas que conforman la atmósfera de la Tierra. Las partículas secundarias emergerán desde la primera interacción aumentando su número hasta alcanzar un valor máximo para luego disminuir. El momento transversal adquirido por las partículas, causa una propagación lateral de la lluvia, esta propagación genera un esparcimiento de las partículas a medida que se adentran en la atmósfera. Conforme las partículas se adentran en la atmósfera pierden cada vez más energía, debido a decaimientos o interacciones que ocurren durante la evolución de la EAS. Todo esto también dependerá del camino libre medio, que implica que para una partícula con cierta energía su probabilidad de decaimiento o interacción será una función de la altura.

El número total de las partículas secundarias que son generadas en las EAS para una determinada altura, se denominan ancho de la lluvia y suelen representarse como N . La EAS iniciadas por un hadrón, generalmente poseen tres componentes en la lluvia que se clasifican como: electromagnética, hadrónica y muónica, tal como se presenta en la Figura 2.5. Durante la evolución de las EAS, las partículas se esparcirán respecto al eje principal de la lluvia, se considera al eje principal de la lluvia como el núcleo de la EAS. La dirección que lleva el núcleo de la EAS es la misma dirección de la astropartícula incidente, la distribución lateral que se desarrolla en la EAS toma como referencia la distancia desde el núcleo de la EAS.

Durante la interacción hadrónica, aproximadamente las dos terceras partes de la energía inicial son entregadas a los piones, mientras que la tercera parte de la energía es entregada a los piones neutros. La componente electromagnética poseerá un mayor número de partículas cargadas en comparación al resto de partículas en la lluvia, esto debido a que se produce el decaimiento de los piones^e neutros (π^0), los mismo que decaerán rápidamente^f

^d Los hadrones son partículas que se clasifican en mesones y bariones, que están constituidos por dos quarks o tres quarks respectivamente.

^e El pión es el nombre que reciben tres partículas subatómicas, π^+ , π^- y π^0 , pertenecientes a la familia de los mesones los que poseen un quark y un antiquark.

^f El tiempo de vida de los piones es aproximadamente de 2.6×10^{-8} segundos, mientras que para los piones neutros aproximadamente 10^{-17} segundos

como se presentan en la ecuación (2.8) [15, 25].

Los π^0 , tienen dos canales de desintegración,

$$\begin{aligned} \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma \quad [98.8\%], \\ \pi^0 &\rightarrow e^+ + e^- + \gamma \quad [1.2\%]. \end{aligned} \tag{2.8}$$

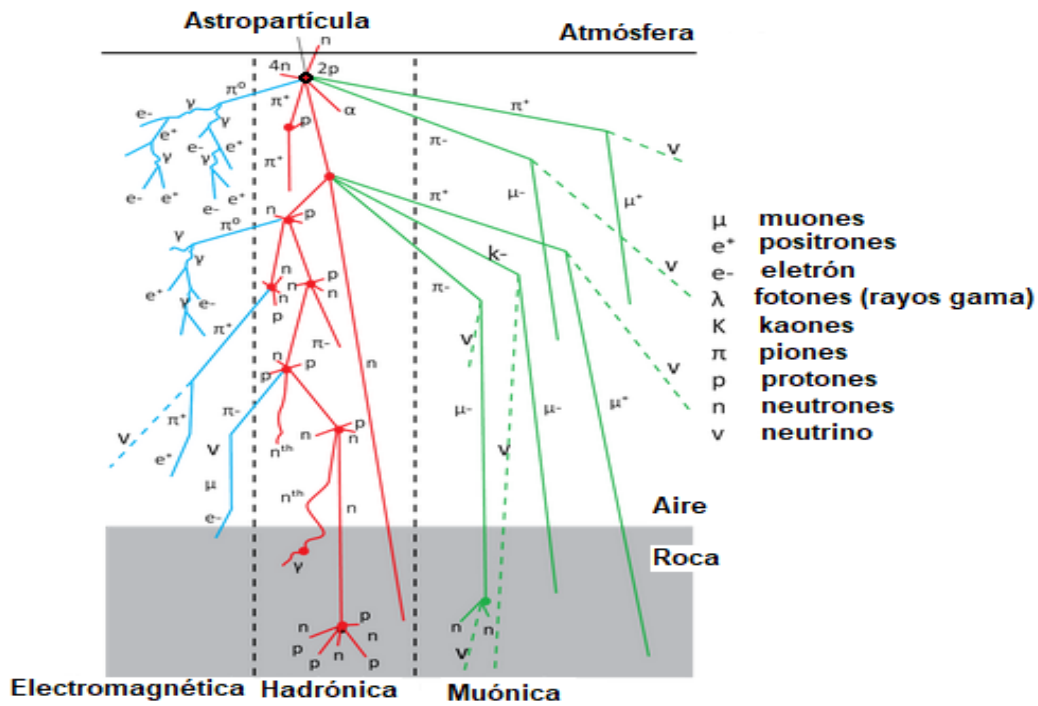


Figura 2.5: Desarrollo de una lluvia aérea extensa por la interacción de una astropartícula con la atmósfera de la Tierra, se puede visualizar las tres componentes electromagnética, hadrónica y muónica con sus respectivas partículas que son producidas durante la evolución temporal de la lluvia [31].

La interacción de los hadrones secundarios a lo largo de la lluvia producirán los piones neutros π^0 , dando lugar al decaimiento de fotones y electrones, que seguirán proveyendo a la componente electromagnética debido a los procesos de creación de pares y Bremsstrahlung. Las partículas de la componente electromagnética pueden llegar incluso al nivel del mar, si la energía de las astropartículas es lo suficientemente alta.

Los piones cargados π^\pm y los kaones K^\pm que son producidos durante las primeras interacciones poseen un tiempo de vida muy corto, aproximadamente de 100 nanosegundos decayendo rápidamente y proveyendo de partículas a la componente muónica. Sus princi-

pales canales de desintegración son los siguientes:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad [100\%]. \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad [100\%]. \\ K^\pm &\rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad [63.5\%]. \\ K^\pm &\rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad [21.2\%].\end{aligned}\tag{2.9}$$

Cuando el muón no tiene la suficiente energía para generar nuevas interacciones, o alcanzó su tiempo de vida suelen decaer mediante los siguientes canales: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ aportando de esta forma a la componente electromagnética.

Durante el transcurso evolutivo de la EAS hadrónica, se presentan dos tipos de propagación siendo una propagación longitudinal^g y una propagación lateral^h. La distribución lateral abarcara miles de metros cuadrados, todo esto dependerá del tamaño de la lluvia y la energía de la astropartícula incidente tal como se presenta en la Figura 2.6.

Como el flujo de las astropartículas incidentes poseen distintos valores de energía, se puede distinguir cierta característica. Las EAS generadas por astropartículas de baja energía, alcanzarán su máximo desarrollo en la atmósfera superior, para luego atenuarse lentamente conforme se incrementa la profundidad atmosférica dejando únicamente que los muones y neutrinos alcance el suelo. Para las EAS generadas por astropartículas de alta energía, el desarrollo máximo de las lluvias puede incluso generarse cerca del nivel del mar [25, 32].

^g Esta distribución muestra como las partículas secundarias incrementan su número hasta alcanzar un valor máximo para una determinada altura, una vez alcanzado este valor máximo el número de partículas secundarias empieza a disminuir.

^h Este distribución hace referencia a la densidad de partículas que se encuentran cerca del núcleo de la EAS, conforme se esparcen las partículas secundarias su densidad disminuye.

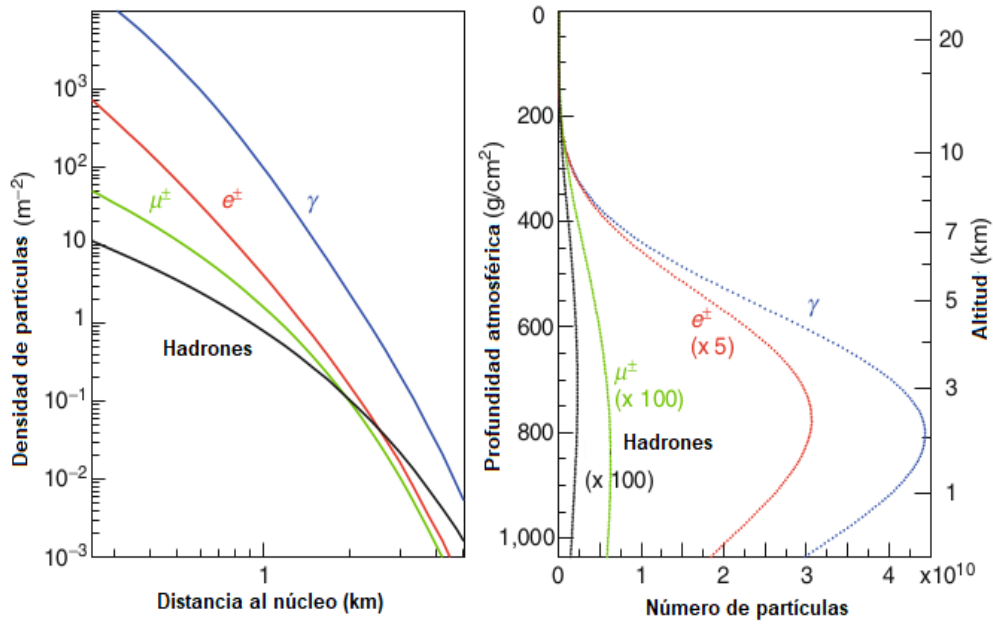


Figura 2.6: La figura izquierda ilustra el desarrollo lateral de la EAS. LA figura derecha ilustra el desarrollo longitudinal de la EAS. Las Figuras presentan la dependencia de las partículas en función de la distancia al núcleo y la altura en la que inician [33].

Se puede estimar que aproximadamente las partículas detectadas al nivel del mar son: el 90 % electrones y positrones, 10 % muones y apenas el 1 % constituyen los hadrones. Generalmente en la antigua literatura, son asociados los fotones junto con los electrones por ser las partículas más abundantes como la componente suave, mientras que a los hadrones y muones se los llama la componente dura o penetrante.

Debido a la dificultad que implica conocer el número de las partículas secundarias, que son generadas en las lluvias iniciadas por hadrones, estos valores pueden ser modelados mediante una aproximación con el modelo de Heitler para el desarrollo de la componente hadrónica y electromagnética. Para la componente electromagnética, asumimos que únicamente en la primera interacción los π^0 contribuyen a la misma. Supongamos un hadrón con una energía inicial E_0 , este interactúa en la atmósfera a una determinada profundidad λ_N . En el transcurso de la interacción el hadrón pierde una fracción de energía $(1 - K_{el})$, y generará $\langle N_\pi \rangle$ piones secundarios, la tercera parte corresponderán a piones neutros π^0 .

Los π^0 inmediatamente decaen como se presenta en la ecuación (2.8), posteriormente seguirán el modelo de Heitler. Podemos describir la profundidad máxima como la suma de las profundidades máximas de las lluvias electromagnéticas, y la longitud de interacción del hadrón incidente

$$X_{max} = X_0 \ln \left[\frac{2(1 - k_{el})E_0}{(\langle N_\pi \rangle / 3)\epsilon_0} \right] + \lambda_N(E_0). \quad (2.10)$$

El número de electrones para el máximo desarrollo,

$$N_e^{max} = \frac{1}{2} \frac{\langle N_\pi \rangle (1 - K_{el}) E_0}{3\epsilon_0}, \quad (2.11)$$

donde ϵ_0 representa la energía de ionización perdida por los electrones en la componente electromagnética. El factor 1/3 es debido a la estimación de la multiplicidad del π^0 , mientras que el factor 1/2 es debido a la división de la energía del π^0 .

Graisser, parametrizó el desarrollo longitudinal de la lluvia hadrónica a una determinada profundidad X_1 y X , siendo los parámetros λ el camino libre medio y N_{el}^{max} el número de electrones para el máximo desarrollo. Esto nos proporciona el número de electrones secundarios $N_e(x)$

$$N_{el}(X) = N_{el}^{max} \left(\frac{X - X_1}{X_{max} - \lambda} \right)^{\frac{X_{max} - \lambda}{\lambda}} \exp - \left(\frac{X - X_1}{\lambda} \right). \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12), es usada como un ajuste estándar para el desarrollo longitudinal de la lluvia, conocida como la formula de Greisser-Hillas.

J. Matthews, ajustó la aproximación de Heitler para la componente hadrónica, introdujo ciertos parámetros, y dentro de ellos se tiene que el número de muones presentes en la lluvia está relacionado con el número de piones que decaen

$$\ln N_\mu = \ln N_\pi = n_c \frac{2 \langle N_\pi \rangle}{3} = \beta \ln \left(\frac{E_0}{\epsilon_\pi} \right), \quad (2.13)$$

donde ϵ_π es una energía efectiva, y n_c se define como el número de generaciones de piones hasta que la energía E_π alcanza una energía crítica ξ_c^π

$$n_c = \frac{\ln(E_0/\xi_c^\pi)}{\ln((1 - N_{ch})/(1 - 1/3k))}, \quad (2.14)$$

donde N_{ch} representan el número de los piones cargados, y k representa la fracción de la energía. Esta energía será encaminada hacia la generación de nuevas partículas «piones» (π^\pm, π^0), por lo tanto el número de muones

$$N_\mu = \left(\frac{E_0}{\epsilon_\pi} \right)^\beta, \quad (2.15)$$

donde β representa la fracción de multiplicidad de los piones cargados. En la literatura se utiliza una energía $\epsilon_\pi = 20$ GeV para obtener un número total de muones que se aproximen a la realidad, con este valor tenemos que $\beta = 0.85$ [34].

Mediante el principio de superposición [15], se puede usar una fórmula que representa el desarrollo de las lluvias iniciadas por un hadrón con masa A y energía E_0 , como la superposición de las lluvias iniciadas por un hadrón de energía E_0/A . Obtenemos la profundidad promedio para el máximo desarrollo de las lluvias iniciadas por un hadrón de masa A ,

$$X_{max}^A = X_0 \ln \left[\frac{2(1 - k_{el})E_0}{(\langle N_\pi \rangle / 3)\epsilon_0 A} \right] + \lambda_N(E_0) = X_{max}^P - X_0 \ln A. \quad (2.16)$$

Realizamos ciertas sustituciones, y consideramos que la ecuación (2.16) se ha simplificado, de esta manera podemos comprobar la sensibilidad de las lluvias iniciadas por hadrones. Se obtiene la expresión que indica el número total de muones para un hadrón con masa A N_{max}^A ,

$$N_{max}^A = A \left[\frac{E_0/A}{\epsilon_\pi} \right]^\beta = A^{1-\beta} N_\mu^P. \quad (2.17)$$

Esta relación nos indica que la interacción de astropartículas con núcleos pesados, generará una mayor cantidad de muones que los producidos por un protón. Esto nos permite diferenciar el tipo de astropartícula que llegó a la atmósfera de la Tierra. De esta forma, si se obtiene un mayor flujo de muones a una determinada altura se tiene una mayor probabilidad de que la astropartícula que inició la lluvia haya sido un núcleo pesado, esto se puede conocer mediante la relación N_e/N_μ , donde se espera poder distinguir al mismo nivel de observación mismas lluvias iniciadas por diferentes hadrones [15, 25, 34].

2.2 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS AMBIENTALES

Las EAS, que son el resultado de las interacciones entre las astropartículas y la atmósfera de la Tierra, están sujetas a las variables ambientales como la presión atmosférica, temperatura, humedad, campo magnético, etc. Estas variables ambientales están presentes durante su arribo hasta los detectores, modificando características de las partículas secundarias como la atenuación, absorción, la trayectoria entre otros. Durante el trayecto de las partículas secundarias, se considera que los efectos ambientales tendrán diferentes valores debido a los procesos físicos que involucran su formación. De similar forma, cada uno de las variables ambientales pueden afectar en mayor o menor medida a la evolución de las partículas que conforman las EAS.

La mayoría de estas variables presentan una periodicidad debido a los cambios como día y noche, a las temporadas estacionales que presenta el planeta, eventos de ciclos solares, etc. Cuando el estudio de las EAS se realiza por medio de arreglos de detectores terrestres,

la presión ambiental y la temperatura son parámetros que no pueden ser ignorados. Los efectos de la presión y temperatura producen una variación de fondo en la tasa de partículas detectadas, la corrección de esta variación nos permite realizar distintos estudios sobre las EAS. Por lo tanto, el flujo de partículas secundarias total será las contribuciones de cada una de estas variables. De esta forma, considerando únicamente a la presión y temperatura se tiene que el flujo de partículas secundarias estará definido como

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{Total} = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_P + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_T. \quad (2.18)$$

Varios estudios realizados sobre las EAS, han demostrado que existe una anticorrelación muy evidente entre el flujo de astropartículas y el número de machas solares, en la modulación con períodos de 27 días asociados al efecto de la rotación del sol, incluso en modulaciones en periodos de días y horas. Estas modulaciones, pueden de forma indirecta afectar la variación de las variables como presión y temperatura, generando una anticorrelación que se puede presentar como una disminución en la tasa de partículas registradas necesitando de horas, o veces incluso días para alcanzar su nivel habitual [25, 35, 36, 37, 38].

2.2.1 Dependencia barométrica

La dependencia entre la presión atmosférica y el desarrollo de la EAS fue descubierto alrededor de 1925, pero la explicación de este fenómeno barométrico sería entendido varios años después con el descubrimiento de los muones y piones. La variación en la presión atmosférica implica un cambio en la densidad de la columna de aire, afectando el desarrollo de la EAS. Podemos considerar como ejemplo la componente muónica de la EAS y cómo esta se verá afectada por la variación de la presión. Los muones son producidos en su mayoría por el decaimiento de piones, para un valor numérico alto en la presión, esto implicará una mayor densidad en la columna de aire dando lugar a una alta probabilidad donde los piones tengan colisiones con algún núcleo del aire.

Esto a su vez, da como resultado un menor flujo de muones que llegarán a la superficie del planeta. Por otra parte, para un bajo valor numérico en la presión implicará que los piones tengan una mayor probabilidad de decaer en muones que interaccionar con algún núcleo, generando un mayor flujo de muones que llegan hasta la superficie del planeta. Esta variación implica también que las otras componentes de una lluvia hadrónica se verán igualmente afectas, debido a que recorrerán el mismo camino pero con una mayor densidad

atmosférica, lo que implica una mayor pérdida de energía generando una disminución en el flujo de partículas.

En el estudio de las EAS, se debe considerar la variación de este parámetro atmosférico (presión) antes de realizar cualquier estudio que permita inferir en las propiedades del primario que originó la EAS. El efecto barométrico que afecta a la tasa de partículas está definido como:

$$\frac{N(P)}{\bar{N}} = e^{\beta(P-\bar{P})}, \quad (2.19)$$

donde N representa la tasa de partículas registradas al nivel del detector, β es el coeficiente barométrico, el mismo que dependerá del tipo de EAS la ubicación y la altura donde se hallan los detectores, P es la presión al nivel del detector, \bar{P} y \bar{N} representan el promedio de la presión y la tasa de partículas al nivel del detector respectivamente.

Para la determinación del coeficiente barométrico, y cómo este afecta al desarrollo en la tasa de partículas, es suficiente con el registro de la presión a nivel del detector debido a que la densidad del aire es más alta cerca de la superficie de la Tierra. Esto implica que la variación de la presión adquiere valores pequeños, por lo que la ecuación (2.19) puede ser aproximado mediante una serie de Taylor, tomando únicamente la primera aproximación obtenemos la tasa de partículas en función del cambio de la presión.

$$\frac{(N - \bar{N})}{\bar{N}} = \beta(P - \bar{P}). \quad (2.20)$$

A partir de la ecuación (2.19) se obtiene que el coeficiente debe tener un valor negativo, debido a la relación inversa que posee la tasa de partículas con la variación de la atmósfera. El coeficiente β de la ecuación (2.19) muchas veces también puede ser representado como

$$\beta = -\frac{\partial \ln(G)}{\partial P} \text{ [hPa]}, \quad (2.21)$$

donde G representa la tasa de lluvias iniciadas por diferentes primarios y P representa la presión. Para poder determinar el coeficiente en la ecuación (2.21) es necesario arreglos de detectores que abarquen una gran área. De esta forma podemos inferir la tasa de EAS que son generadas por diferentes primarios, por lo que la mayoría de trabajos enfocados en obtener el coeficiente barométrico hacen uso únicamente de la ecuación (2.20) que muestra una tendencia lineal entre la tasa de partículas y la variación de la presión. Para la adecuada determinación del parámetro β se hace énfasis en ciertos pasos que se deben considerar [14]:

Es recomendable el uso de datos con un registro de tres a siete días para la tasa de partículas y la presión.

Analizar cuando se presente una baja actividad Solar o en periodos donde el flujo de partículas no presente variaciones atípicas.

Es recomendable usar la ecuación (2.19) para el análisis de astropartículas de baja energía. Todos estos análisis se realizan únicamente con el valor de $\beta = const$, cuando este valor no permanece constante es necesario realizar

$$N(P) = \bar{N}_e \left(\int_P^{\infty} \beta(P') dP' \right) \quad (2.22)$$

Para la obtención del coeficiente barométrico se asumirá que el valor de $\beta = const$ como la mayoría de bibliografía lo recomienda [14, 25, 39].

2.2.2 Dependencia con la temperatura

El cambio en la temperatura implica un cambio en la densidad del aire, este cambio en la temperatura está generado principalmente por las variaciones estacionales a las que está sometido el planeta, afectando la tasa de partículas que es detectada al nivel de la base. El registro de la variación de la temperatura dependerá de la ubicación de los detectores, existen regiones donde la temperatura tiene una variación en su periodicidad que no sobrepasará los pocos grados centígrados. Estos cambios de temperatura están regidos por modulaciones estacionales y en poca medida por modulaciones diarias. Generalmente, el flujo de partículas debido al efecto de la temperatura puede ser descrito por dos formas, estas se denominan como los efectos de la temperatura positiva y negativa.

$$\Delta N \propto \pm \Delta T. \quad (2.23)$$

Estos dos efectos son altamente competitivos, dependerán en gran medida de la energía de las partículas detectadas. El incremento en la temperatura atmosférica es una consecuencia de la expansión de la atmósfera, esto implica una disminución en la densidad de aire, por lo tanto la probabilidad de interacción de mesones (K^\pm, π^\pm) y núcleos del aire es relativamente baja. Esto implica la probabilidad de que los mesones decaigan en muones (μ^\pm) es alta.

La expansión en la atmósfera incrementará el camino que las partículas deben recorrer, perdiendo energía o decayendo durante su trayecto quedando únicamente partículas de baja energía. Las partículas secundarias que logran atravesar la atmósfera serán las domi-

nantes, esto nos da como resultado que la relación entre las tasa de partículas secundarias y variación de temperatura sea negativa.

$$\Delta N \propto -\Delta T. \quad (2.24)$$

Por otra parte, las partículas secundarias de alta energía como los muones (μ^\pm) no tendrán el tiempo suficiente para decaer, esto los convierte en las partículas más abundantes, esto nos da como resultado que la tasa de partículas secundarias y la variación de la temperatura sea positiva.

$$\Delta N \propto \Delta T. \quad (2.25)$$

Estas dos relaciones existentes entre la tasa de partículas secundarias y la variación de la temperatura, permite determinar de una forma aproximada las energías de las partículas secundarias que llegan hasta el detector. El método empleado para obtener el coeficiente de temperatura consiste en utilizar el método de la integral, este fue desarrollado por Kisselbach and Chasson. Este método sin embargo requiere que los datos de las variaciones de temperatura sean registrados aproximadamente cada hora para la distribución altitudinal de la atmósfera, algo sumamente complejo de obtener.

Debido a la inexistencia de una base de datos o estudios de la temperatura en la región donde se ubica el detector, se asumirá un método alternativo, este consiste en asumir que toda la columna atmosférica tendrá la misma variación de temperatura que la registrada al nivel del detector. De esta forma podemos asumir que $T_{eff} = T$ por lo que la variación en la tasa de partículas en función de la temperatura,

$$\frac{(N - \bar{N})}{\bar{N}} = \alpha(T - \bar{T}), \quad (2.26)$$

donde α será el coeficiente de la temperatura, este podrá ser positivo o negativo. Esto dependerá de la energía de las partículas secundarias registradas así como la tasa de estas partículas [39, 40, 41].

2.3 MÉTODOS DE DETECCIÓN

Debido a la naturaleza de las astropartículas, su detección está relacionada con sus rangos de energía, existiendo dos formas para su detección, por debajo del umbral de 10^{15} eV las astropartículas tienen suficiente energía para ser detectadas directamente. Por encima del

umbral de 10^{15} eV, la detección directa se vuelve complicada debido a que el flujo de astropartículas es muy pequeño, para ello es necesario realizar detecciones indirectas (Véase Figura 1.4), es decir arreglos con diferentes tipos de detectores. Estos métodos permiten definir la energía y la dirección de incidencia de las astropartículas.

Método Directo. Con este método, las astropartículas inciden directamente sobre el detector, gracias a esto la mayoría de estos detectores están ubicados en satélites, globos meteorológicos o aviones. Se conoce que conforme aumenta la energía de las astropartículas lo hace el área de detección, por lo tanto estos detectores tendrán una área condicionada. Para la detección aplicando el método directo la energía máxima que puede ser registrada por estos instrumentos no superará los 10^{15} eV.

Los mecanismos, implementados en este tipo de detectores es similar a los implementados en otros mecanismos terrestres que estudian la física de altas energías. El estudio con este tipo de detectores está enfocado en conocer la composición de las astropartículas, la interacción con el campo magnético de la Tierra, el estudio de las partículas provenientes del Sol, etc.

Método Indirecto. Debido a la naturaleza de las astropartículas, cuando su energía $> 10^{15}$ eV su detección se vuelve imposible, por lo tanto la única forma de analizar las astropartículas es mediante la reconstrucción de las EAS. Una desventaja de este método es no poder obtener de forma directa la composición de la astropartícula incidente que origina la EAS, se puede inferir mediante modelos hadrónicos a partir de los datos recolectados.

Actualmente, los arreglos de detectores terrestres de gran área son los más utilizados al momento de la detección de EAS, estos pueden tener áreas desde unos cientos de m^2 hasta los $3000 m^2$ como el observatorio de Pierre Auger ubicado en la Argentina. Muchos de estos observatorios tendrán incorporados distintos detectores tales como: detectores Cherenkov de agua (WCDⁱ), detectores de centelleo, telescopios de fluorescencia, etc. Muchas veces algunos observatorios incorporan todos estos tipos de detectores obteniendo arreglos híbridos, esto será una ventaja al momento de reconstruir la EAS.

2.3.1 Efecto Cherenkov

Se conoce que debido a la relatividad especial, que ninguna partícula puede superar la velocidad de la luz en el vacío, sin embargo, la velocidad de la luz tiene un valor menor en

ⁱ Acrónimo en inglés de Water Cherenkov Detector

un medio dieléctrico. De esta manera, cuando una partícula cargada que se mueve en un medio dieléctrico con velocidad constante superior a la velocidad de la luz en ese medio, emitirá radiación electromagnética, esta radiación es conocida como radiación Cherenkov. Consideremos una partícula con cierta velocidad v , esta se encuentra viajando a través de un medio dieléctrico y sea c la velocidad de la luz en ese medio. Si la velocidad de la partícula tiene un valor de $v < c$ ó $v > c$ se producirán una serie de ondas esféricas (véase Figura 2.7) debido al movimiento de la partícula en el medio.

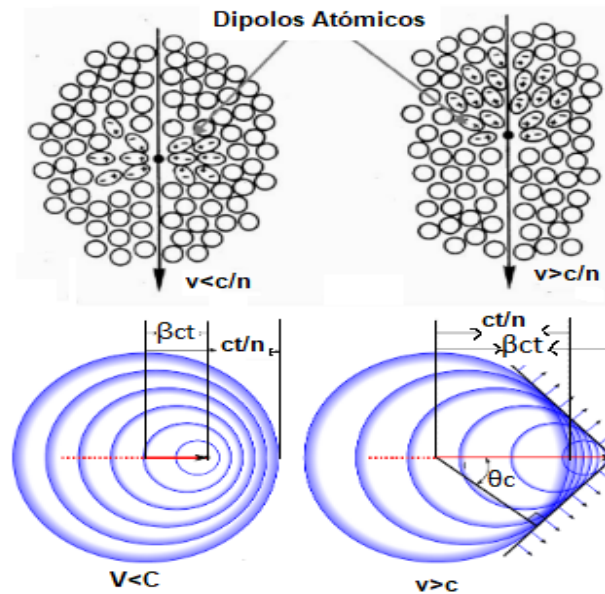


Figura 2.7: Parte izquierda presenta una partícula atravesando un medio donde $v < c$, no existe ondas constructivas. La parte derecha presenta una partícula con $v > c$ donde existe una acumulación constructiva de ondas dando lugar a la radiación Cherenkov que es representado por las flechas de color azul [42].

La ondas producidas se acumularán constructivamente y conducirán a una radiación coherente en un ángulo θ_c respecto a la dirección de la partícula,

$$\cos(\theta_c) = \frac{c}{v},$$

donde θ_c se lo conocer como ángulo Cherenkov, siendo ésta la dirección de propagación de la radiación Cherenkov [43].

La radiación Cherenkov, puede ser interpretada como una onda de choque electromagnética análogo a una onda de choque sónica. La mayoría de observatorios que estudian las EAS iniciadas por astropartículas, han implementado la utilización de detectores mediante la radiación Cherenkov.

2.3.2 Detectores Cherenkov de Agua

Un detector Cherenkov de agua, consiste en un tanque recubierto interiormente con un material altamente reflejante denominado Tyvek, agua purificada, un tubo fotomultiplicador y la electrónica que permite la adquisición de los datos. La partícula, al atravesar el medio dieléctrico en este caso el agua generará radiación Cherenkov, la misma que será captada por el fotomultiplicador amplificando esta señal para luego ser registrada por la electrónica implementada, un esquema de este funcionamiento puede ser visto en la Figura 2.8.

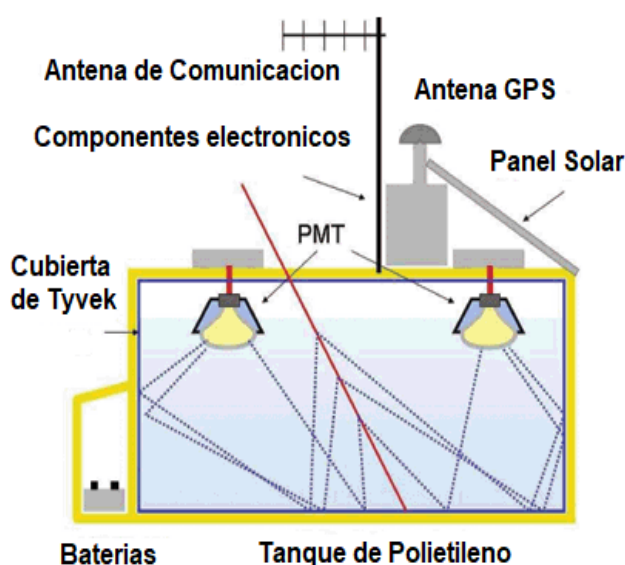


Figura 2.8: Esquematación de un detector de agua tipo Cherenkov. El detector presenta los diferentes componentes que lo conforman para su correcto funcionamiento. Se puede observar que una partícula sigue la trayectoria (línea de color rojo) generando radiación (líneas segmentadas) que es reflejada en las paredes del tanque para ser finalmente detectada por los fotomultiplicadores [44].

Los arreglos de detectores tipo WCD, entregarán información relevante respecto a la tasa de partículas secundarias que atraviesan el tanque, esta información nos permite conocer el ángulo de incidencia, la energía de las partículas que atraviesan el tanque, entre otras.

2.4 CORSIKA

CORSIKA^j, es un software computacional desarrollado en el lenguaje Fortran 77 que hace uso del método Monte Carlo, haciendo de este un programa con un completo conjunto de

^j abreviatura de **CO**smic **R**ay **S**imulations for **KA**scade

rutinas que no requieren de librerías externas. Este programa estaba inicialmente dirigido para simulaciones del proyecto KASKADE^k, un proyecto europeo dirigido hacia el estudio de las lluvias extensas atmosféricas.

CORSIKA, permite el estudio evolutivo de EAS iniciadas en la atmósfera por primarios como: protones, fotones u otros núcleos con energías en el rango de 10^{14} eV hasta 10^{18} eV. Este programa también permite la simulación de interacciones y decaimiento de núcleos, hadrones, muones, electrones y fotones en la atmósfera con energías de hasta algunos 10^{18} eV. Esto nos permite obtener la información como: energía, tipo de partícula, dirección y tiempo de arribo de todas las partículas secundarias que son creadas en las EAS y llegan hasta el detector.

El programa CORSIKA consta básicamente de 4 partes. La primera parte, efectúa el decaimiento de partículas inestables y examina las partículas considerando la pérdida de energía por ionización, la desviación por dispersión múltiple y el campo magnético de la Tierra. La segunda parte, trata las interacciones hadrónicas de núcleos y hadrones con los núcleos de la atmósfera a altas energías. La tercera parte, lleva a cabo simulaciones de las interacciones hadrónicas a bajas energías y la cuarta parte, describe el traslado y la interacción de electrones, positrones y fotones. Las diferentes interacciones hadrónicas ejecutadas en CORSIKA, serán ejecutadas mediante la utilización de diferentes modelos. Estos modelos, dependerán en gran medida de la energía en las interacciones hadrónicas que sean ejecutadas por el usuario.

Para las interacciones hadrónicas de altas energías, los modelos implementados pueden ser los siguientes: QGSJET, VENUS, DPMJET, SIBYLL o HDPM, mientras que para las interacciones de baja energía son ejecutados alternativamente mediante los modelos: FLUKA, GHEISHA o UrQMD.

2.4.1 Modelos en CORSIKA para interacciones de alta energía

QGSJET: (Quark Gluon String model with JETs) es una extensión del modelo (Quark Gluon String) que describe la interacción hadrónica de altas energías entre hadrón-nucleón.

VENUS: (Very Energetic Nuclear Scattering) es un programa desarrollado para simular colisiones de iones pesados ultra-relativistas.

DPMJET: (Dual Parton Model with JETs) es un programa desarrollado para describir las

^k abreviatura de Karlsruhe Shower Core and Array Detector

interacciones hadrónicas de alta energía de las colisiones hadrón-núcleo y núcleo-núcleo utilizando el Modelo de doble partón o (Model Parton Dual).

HDPM: usado como un modelo alternativo es un conjunto de rutinas para simular interacciones hadrónicas de alta energía.

SIBYLL: es un programa desarrollado para simular interacciones hadrónicas a altas energías basado en el modelo mini-jet de la cromodinámica cuántica (QCD).

2.4.2 Modelos en CORSIKA para interacciones de baja energía

FLUKA: (**FLU**ctuating **KA**scade) es un paquete de rutinas que sigue a las partículas a través de la materia mediante el método de Monte Carl, junto con CORSIKA es usado para describir interacciones hadrónicas de baja energía.

GHEISHA: (**G**amma **H**adron **E**lectron Interaction **S**hower code) es un paquete ampliamente usado para la descripción de interacciones hadrónicas de unos cuantos cientos de GeV mediante el método Monte Carlo.

UrQMD: (**U**ltra-relativistic **Q**uantum **M**olecular **D**ynamics) es un paquete diseñado para las interacciones hadrónicas de muy baja energía como las interacciones hadrón-núcleo.

2.4.3 Modelo atmosférico en CORSIKA

La atmósfera admitida en CORSIKA consiste principalmente en Nitrógeno N_2 , Oxígeno O_2 , y Argón Ar con las fracciones de volumen de 78.1 %, 21.0 % y 0.9 % respectivamente. La variación de la densidad atmosférica en función de la altura, se ha modelado en 5 capas obteniéndose que la densidad en las cuatro capas inferiores sigue un comportamiento exponencial en función de la altura,

$$T(h) = a_i + b_i e^{-h/c_i}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2.27)$$

donde $T(h)$ representa la sobrecarga masiva (presión atmosférica) de la atmósfera en función de la altura. Para la quinta capa esta sobre carga masiva decrece linealmente con la altura

$$T(h) = a_5 - b_5 \frac{h}{c_5}, \quad (2.28)$$

donde la sobrecarga masiva se desvanecerá cuando $h=112.8$ km. Los parámetros a_i , b_i y c_i se pueden elegir de tal manera que la función $T(h)$ siempre será una función continua en las fronteras de todas las capas. CORSIKA posee un conjunto de siete modelos atmosféricos

similares al modelo estándar de Estados Unidos.

Capa	altura (km)	$a_i(g/cm^2)$	$b_i(g/cm^2)$	$c_i(cm)$
1	0 4	-186.5562	1222.6562	994186.38
2	4 10	-94.919	1144.9069	878153.55
3	10 40	0.61289	1305,5948	636143.014
4	40 100	0	540,1778	772170.16
5	>100	0.001128292	1	10 ⁹

Tabla 2.1: La tabla presenta los valores correspondientes a las constantes empleadas para el modelo atmosférico de Estados Unidos, el modelo implementado consta de 5 capas.

El modelo implementado en este trabajo fue el modelo atmosférico correspondiente al de Estados Unidos mostrado en la Tabla 2.1.

2.4.4 Deflexión debido al campo magnético de la Tierra

Debido al análisis que se realiza con los diferentes tipos de partículas, y considerando que parte de estas partículas poseer carga, la interacción entre las partículas y el campo magnético generara una desviación en su trayectoria si la energía de las partículas es considerablemente baja. CORSIKA, considera en las simulaciones de lluvias atmosféricas extensas, que el campo magnético de la Tierra es un parámetro que no se puede desestimar. El campo magnético de la Tierra se caracteriza por su intensidad B_E , su ángulo de declinación α y su ángulo de inclinación β . Estos valores para la localización de KASKADE están presentados como:

$$B_E = 47.80\mu T \quad \alpha = -9' \quad y \quad \beta = 64^{\circ}44'.$$

Los que corresponden con las componentes

$$B_x = 20.40\mu T \quad y \quad B_z = -43.23\mu T.$$

Mientras que el valor de $B_y = 0$ por definición.

Para valores de diferentes sitios, estos pueden ser obtenidos desde el programa Geomag que esta disponible en <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/potfld/geomag.html> [31]. CORSIKA, permite al usuario ingresar distintos parámetros tales como: energía y tipo de primario, modelo atmosférico, altura a la que se encuentra el detector entre otros parámetros. Esto se encuentra detallado en el capítulo correspondiente a la metodología. Más información respecto a los modelos implementados en CORSIKA puede ser revisados en [31], donde

aborda con mayor detalle cada uno de ellos.

3 METODOLOGÍA

Este trabajo se divide en dos partes. La primera parte, consiste en la realización de simulaciones para un flujo de astropartículas en un tiempo de 6 horas, con rangos de energía entre 12.47 GeV y 10^6 GeV. Estas simulaciones se las realizará en el paquete computacional CORSIKA, fijando las condiciones iniciales del detector. Las simulaciones realizadas nos permitirán extraer distintos datos, estos datos permitirán determinar el flujo de las partículas secundarias en función de la energía. De igual forma, con los datos obtenidos podremos determinar la distribución lateral de las partículas secundarias para los diferentes tipos en las EAS. Estos resultados nos permitirán conocer en el número de partículas secundarias que llegan al nivel del detector, esto dependerá de la energía y naturaleza de las astropartículas. Con los resultados obtenidos de las simulaciones podríamos suponer estadísticamente que tipo de partícula esta siendo registrada por el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional.

La segunda parte, consiste en la utilización de los datos entregados por el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional que ha estado funcional desde 2018. Los datos proporcionados por el detector, presentaron ciertos problemas al momento de procesarlos, estos problemas no estaban contemplados en este proyecto de titulación. Los datos eran registrados cada 2 días y medio, y eran almacenados en un disco duro de 1 TB de capacidad. Cada mes tenia un registro promedio de 3 adquisiciones, y no existió registro de los meses correspondientes a vacaciones o fechas correspondientes a feriados. El problema con este registro, era que la mayor parte tenia errores en los datos extraídos del disco duro. Se encontró por ejemplo, existencia de valores constantes de presión y temperatura durante algunos periodos de adquisición, otro problema encontrado fue sobre escritura de datos en el disco duro, no adquiría datos durante el periodo ingresado, entre otros. Del año 2018 los datos que no presentaban errores fueron los meses de Agosto con un tiempo de 50 horas, Octubre con un tiempo de 32 horas y Noviembre 25 horas, los meses restantes no presentaban la cantidad de datos que se requerían para un adecuado procesamiento. Debido a que no existe un estudio similar realizado en Ecuador, con el que podamos rea-

lizar una comparación de los modelos que se implementaran y el poco tiempo de datos adquiridos por el detector, se utilizarán datos obtenidos de la Universidad de Adelaide. La Universidad de Adelaide se encuentra ubicada en Australia, se utilizarán los datos pertenecientes a esta Universidad, seleccionando únicamente la presión, temperatura y el flujo de partículas debido a que son datos libres, los cuales pueden ser descargados desde <http://www.physics.adelaide.edu.au/astrophysics/muon/data/>. Estos datos nos permitirán aplicar los modelos que describen la relación entre el flujo de partículas secundarias con la presión y temperatura. Utilizaremos estos datos como una referencia, esto nos permitirá comprobar si los modelos implementados con los datos proporcionados por el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional, presentan la tendencia del flujo de partículas corregida.

Los datos proporcionados en los meses de Agosto, Octubre y Noviembre, serán clasificados para obtener el flujo de partículas secundarias y las variaciones ambientales. Estos datos serán clasificados y filtrados, para luego mediante un análisis estadístico obtener los coeficientes de presión y temperatura. El coeficiente de presión y temperatura relaciona la variación del flujo de partículas secundarias con la variación de la presión y temperatura. Esto nos permitirá realizar la corrección sobre el flujo de partículas secundarias registradas por el detector. Los coeficientes de presión y temperatura serán obtenidos de dos formas diferentes, para luego comprobar la correlación entre el flujo de partículas secundarias con la presión y temperatura. Realizaremos el mismo procedimiento con los datos de referencia obtenidos de la Universidad de Adelaide.

3.1 SIMULACIONES EN CORSIKA

CORSIKA, es un paquete computacional que permite la simulación de EAS. Este programa se instaló en un servidor ubicado en Cuenca, perteneciente a la Red Cedia con dirección (Gonzalo Cordero 2-122 y J. Fajardo). Este servidor cuenta con 8 procesadores y una memoria RAM de 15 GB, que permitió llevar a cabo las simulaciones para la generación de EAS iniciados con distintos rangos de energía. El programa CORSIKA permite realizar simulaciones con diferentes astropartículas, estas simulaciones son realizadas en CORSIKA una a la vez.

Para la simulación de un flujo de astropartículas en un determinado tiempo, es necesario la utilización de un paquete computacional adicional denominado CrkTools, el mismo puede ser descargado desde <https://github.com/lagoproject/sims>. Este programa permite llevar

a cabo simulaciones que generarán varias EAS, considerando diferentes astropartículas durante el tiempo requerido. Los parámetros ingresados para iniciar las simulaciones, serán determinados por la ubicación del detector que se encuentra en la Escuela Politécnica Nacional véase la Tabla 3.1.

Tiempo de Flujo	6 horas
Energía mínima	12.48 GeV
Energía máxima	10^6 GeV
Ángulo cenital	$0 < \theta < 90$
Ubicación Long, Lat	-78.50972 , -0.218611
Altitud m.s.n.m	2850
Modelo atmosférico	19
Tipo de detector	Volumétrico
Rigidez Magnética (Cutoff Rigidity)	12.48 GV
Componente Magnética Bx	26.835μ
Componente Magnética Bz	10.499μ
Ángulo acimutal	$-180 < \phi < 180$

Tabla 3.1: Parámetros del detector ingresados en las simulaciones para el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional. En la tabla se presenta el tiempo de flujo, el rango de energía, los ángulos de incidencia de las astropartículas, ubicación geográfica, modelo atmosférico, etc. Estos parámetros son ingresados por el usuario para llevar a cabo la simulación.

El modelo atmosférico utilizado, corresponde al modelo de Estados Unidos descrito en la Tabla 2.1. Los valores correspondientes a la rigidez magnética se obtuvieron de la pagina web <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Util/rigidity.php>, y las componentes magnéticas de la ubicación del detector se obtuvieron de la pagina web <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>. Para obtener los valores correspondientes, es necesario ingresar los parámetros de Latitud y Longitud donde se encuentra el detector. La energía mínima necesaria, para que una astropartícula que pueda atravesar el campo magnético local se calcula en el GeoMagSphere <http://www.geomagsphere.org/>. Se ha considerado como energía mínima para todas las astropartículas el valor de 12.48 GeV, esto debido a que aproximadamente el 88 % de todas las astropartículas que llegan hasta la Tierra son núcleos de hidrógeno (véase Figura 1.2). Esto a su vez implica que existirán astropartículas con núcleos mas pesados y con energías menores a 12.48 GeV, que podrán atravesar el campo magnético pero en menor proporción. Se ha considerado únicamente este valor, debido a que existe un mayor flujo de núcleos de hidrógeno (protones) en relación al resto de núcleos. La instalación del programa CORSIKA está detallado en el Anexo A.

3.1.1 Tratamiento de las simulaciones

Para iniciar las simulaciones una vez instalado CORSIKA y CrkTools, se ingresa el siguiente comando en la ventana del terminal.

```
do\_sims.sh -w ****-p\ ****\ -t\ **** -v \ **** -h\ ****\ -u\ ****\  
-s\ ****\ -j\ #\ -y\ -k\ ****
```

donde -w indica que se creará un archivo en la dirección asignada, -p crea el nombre de la carpeta donde se almacena los archivos obtenidos por la simulación. El parámetro -t indica el tiempo de flujo a simular, este tiempo debe estar en segundos, -v es la versión correspondiente a CORSIKA que se está utilizando, -h indica el modelo hadrónico implementado para la simulación, -u indica el nombre del usuario, -j indica el número de núcleos disponibles en la computadora para las simulaciones, -y permite el modo “detector volumétrico” y finalmente -k permite el ingreso de la altitud donde se ubica el detector. Para realizar la simulación con tiempo de flujo correspondiente a una hora, se ha planteado el siguiente ejemplo de ejecución:

```
do\_sims.sh -w /home/useradmin/Fluencia\_Ecuador/run/ -p ejemplo  
-t 3600 -v 76400 -h QGSII -u david -s quito -j 8 -y -k 285000
```

Una vez ejecutado este comando, aparecerá una ventana que nos pedirá ingresar los parámetros correspondientes al detector, para una mejor explicación del ejemplo, véase Anexo B.

Una vez terminado los comandos que se presentan, se genera la carpeta con el nombre ingresado y se crean varios archivos ejecutables de la forma **go-abcd-efgh-#.sh** donde la primera parte corresponde al nombre de la carpeta, la segunda corresponde al tipo de astropartícula (he, pr, all), cabe mencionar que el número de archivos dependerá del tiempo de simulación. Esta parte se encuentra distribuida en tres grupos de archivos, cada grupo correspondientes al tipo de astropartícula generada. EL primer grupo, corresponde a núcleos de helio (he), el segundo grupo, corresponde a núcleos de hidrógeno(pr) y el tercer grupo, corresponde al restos de núcleos(all). El símbolo de numeral indica el número de archivos correspondientes para cada una de las astropartículas. Simultáneamente, se genera un archivo llamado *inject* sin extensión dentro de la carpeta creada. Para las simulaciones realizadas en este trabajo de titulación, el archivo *inject* entrega la siguiente información:

```
Flux time: 21600 s (23299684 showers, 12.48<E<1000000, 0<q<90 at site quito
```

(h=2850, atm=19), using volumetric detector for flux calculations, standard energy cuts and using rigidity cutoff.

```
0 1 H 20571669 -> -----
4 2 He 2484037 -> -----
12 6 C 62870 -> -----
16 8 O 59753 -> -----
7 3 Li 28198 -> -----
24 12 Mg 14654 -> -----
11 5 B 13569 -> -----
28 14 Si 12825 -> -----
14 7 N 12047 -> -----
20 10 Ne 11348 -> -----
56 26 Fe 8958 -> -----
9 4 Be 6805 -> -----
32 16 S 2395 -> -----
27 13 Al 1888 -> -----
23 11 Na 1633 -> -----
40 20 Ca 1220 -> -----
19 9 F 1039 -> -----
52 24 Cr 811 -> -----
40 18 Ar 784 -> -----
48 22 Ti 748 -> -----
55 25 Mn 675 -> -----
39 19 K 465 -> -----
51 23 V 394 -> -----
31 15 P 361 -> -----
35 17 Cl 316 -> -----
45 21 Sc 222 -> -----
```

La información presentada en el archivo *inject*, representa el número de astropartículas que llegarían a la atmósfera de la tierra con las características que se asignó al inicio de las simulaciones. Cada astropartícula generará una EAS, por lo que la mayor parte de las EAS registradas al nivel del detector serán producidas por núcleos de hidrógeno.

Al ejecutar los archivos *abcd.sh*, estos se convertirán en archivos *abcd.run*, el tiempo de

ejecución de estos archivos será de un par de horas incluso semanas. El tiempo de simulación dependerá de la energía de las astropartículas y el tiempo de flujo ingresado. Para las simulaciones realizadas en este trabajo el tiempo requerido fue de aproximadamente un mes.

Una vez finalizada la ejecución de todos los archivos *abcd.sh*, se creará dentro de la carpeta varios archivos del tipo *DATabcd.bz2*, *DATabcd-efgh-ijkl.lst.bz2* y *DATabcd.long*, donde cada uno contiene la información de las EAS generadas como la distribución longitudinal, la distribución de energía, ángulos de incidencia y energía de arribo para cada astropartícula. Los archivos con extensión *abcd.bz2* se encuentran comprimidos, ingresando el comando *bzip2 -dabcd.bz2* se los puede descomprimir.

Los archivos descomprimidos tendrán la forma *DATabcd*, son aquellos que proporcionan la información referente a las EAS, estos se encuentran codificados en forma binaria por lo que es necesario asignar un link simbólico^a al archivo binario para su posterior decodificación. Mediante el comando *./corsikaread <ejemplo> ejemplo.txt* se codifica el archivo binario que fue direccionado mediante un nuevo archivo llamado ejemplo.

Esto genera un archivo de nombre *fort.7*, que es ejecutado a través de un código realizado en perl. Ejecutando el comando *perl trans.pl*, una vez finalizado se creará una carpeta de nombre SH, la misma que contiene todas las EAS generadas por la astropartícula correspondiente al archivo binario. Para la clasificación y elaboración de los distintos histogramas para cada tipo de partícula secundaria, se elaboró un código en lenguaje python adjuntos en los Anexos C.

3.2 DATOS OBTENIDOS POR EL DETECTOR

El detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional es un detector tipo WCD, que fue desarrollado como un proyecto de titulación [45]. Consiste de varios elementos tales como: un fotomultiplicador que capta la radiación Cherenkov, el sistema de adquisición que permite el registro del flujo de partículas, los sensores de humedad, presión y temperatura, un panel solar que le proporciona la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

El registro del flujo de partículas secundarias, es realizado mediante la red Pitaya cada segundo. El registro determina número de partículas que atraviesan el tanque cada segundo.

^a Es un término para cualquier archivo que contiene una referencia a otro archivo o directorio en forma de una ruta absoluta o relativa.

Mientras que los datos de humedad, presión y temperatura son registrados cada minuto. Estos datos son almacenado en un disco duro externo con capacidad de 1 TB mediante conexión a la red Pitaya. Este dispositivo es el que permite la adquisición y el registro de los datos obtenidos. Los datos obtenidos por el detector pueden ser descargados de la pagina <http://201.159.223.36/poli/index.php>, alojada en el departamento de Física de la Escuela Politécnica Nacional.

Como se menciona en el inicio de la Metodología, existieron algunos problemas con los datos proporcionados por el detector. Se registraron casos en que no se obtuvo un registro del flujo de partículas secundarias, o solo se obtuvo el registro correspondiente a las variables ambientales. Estos problemas se reflejaba en líneas vacías registradas cada segundo, archivos completamente vacíos correspondientes a los periodos de registro y sobre-escritura de archivos en el disco duro. Esto puede ser debido a que la tarjeta no reconocía estos errores, sobre-escribía los datos en el disco duro o el tiempo de respuesta por parte de la tarjeta que no era lo suficientemente rápido. Mientras que los valores ambientales eran registrados normalmente cada minuto, existían casos que no se registraba el flujo de partículas secundarias. Estos problemas generaban errores al momento de relacionar los valores ambientales, con el flujo de las partículas registradas. Para solventar este problema escribimos códigos en python, que nos permitieron filtrar y clasificar los datos entregados por el detector, estos datos fueron analizados para los meses más adecuados y en los que el registro de las variables ambientales correspondían conjuntamente con el flujo de las partículas registradas. Se debe mencionar que el detector entrega los datos en forma de string o cadena de caracteres. Una vez que los datos fueron filtrados, se los clasificó por tasa de partículas secundarias, presión y temperatura. Para ello se realizó el promedio del flujo de partículas por cada minuto, y se lo relaciono con los valores ambientales registrados para ese minuto correspondiente. Esto nos permite generar un archivo que contiene el flujo de partículas, la presión y temperatura asociado a cada minuto. Se debe mencionar que los datos registrados en el flujo de partículas no son acumulativos, estos son registrados cada segundo, por lo cual se efectuó un promedio sobre el flujo de partículas en un minuto, de esta forma se lo pudo relacionar con el valor de la presión o la temperatura registrado en ese minuto. Los códigos implementados para el tratamiento de las EAS se encuentran en el Anexo C.

3.2.1 Aproximación lineal para el coeficiente barométrico y de temperatura

El primer modelo aplicado, para la obtención de los coeficientes es una relación lineal entre las variables ambientales y el flujo de partículas secundarias. Para obtener coeficientes de la presión y temperatura se utilizó la media \bar{x} , la desviación estándar σ_x y el error relativo r ,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i; \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2; r = \frac{1}{N\sigma_x\sigma_y} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \quad (3.1)$$

Hacemos uso de las ecuaciones (3.1), se obtiene que el coeficiente de presión es obtenido a partir de

$$\beta = r \frac{\sigma_R}{\sigma_P}, \quad (3.2)$$

mientras que el coeficiente de temperatura es obtenido a partir de

$$\alpha = r \frac{\sigma_R}{\sigma_T}, \quad (3.3)$$

donde P es la presión, T la temperatura y R es el flujo de partículas secundarias en cada minuto. Utilizando un código y librerías de python se obtiene los coeficientes de presión y temperatura para los datos obtenido por el detector. Los resultados del primer modelo aplicado a los datos proporcionados por el detector se presentan en la Sección de Resultados. Una vez obtenidos los coeficientes de presión y temperatura, se realizó las correcciones sobre el flujo de partículas secundarias, estas correcciones se realizaron aplicando la aproximación lineal existente entre el flujo de partículas y las variables ambientales como la teoría lo indica en la ecuaciones (2.20) y (2.26). Usaremos los datos adquiridos de la Universidad de Adelaide y aplicaremos el primer modelo, de esta forma obtendremos los coeficientes de presión y temperatura que serán usados como referencia. Luego, con los datos proporcionados por el detector aplicaremos el mismo modelo para obtener los coeficientes de presión y temperatura, para finalmente comparar con los datos de referencia. En esta comparación existirán variaciones debido a la ubicación, pero el resultado obtenido debería tener el mismo comportamiento con los resultados obtenidos por el detector y los datos de referencia.

Los códigos implementados para la obtención de los coeficientes se encuentran en el Anexo D.

3.3 APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE BAROMÉTRICO Y DE TEMPERATURA

El segundo modelo, consiste en la aplicación de la transformada rápida de Fourier, la transformada nos permite hallar la variación periódica existente de las variables ambientales y el flujo de las partículas registradas. Al encontrar y seleccionar las frecuencias adecuadas se hallará la relación entre los modelos ambientales y el flujo de partículas registrada. La frecuencia es obtenida gracias a la transformada rápida de Fourier, este método matemático permite ir del espacio temporal, al espacio de frecuencias.

En esta sección, presentaremos los resultados obtenidos al aplicar el segundo modelo con los datos adquiridos por la Universidad de Adelaide, correspondientes a un periodo de 30 días. Empezaremos normalizando todos los datos, para luego aplicar el método de la transformada rápida de Fourier. Estos resultados servirán como referencia y nos permitirán realizar la comprobación del modelo aplicado con los datos obtenidos por el detector.

Los resultados del segundo modelo aplicado a los datos proporcionados por el detector se presentan en la Sección de Resultados.

La Figura 3.1 presenta la variación de la temperatura y presión, así como la transformada rápida de Fourier (FFT) y la inversa de la transformada rápida de Fourier (IFFT) con las frecuencia seleccionadas, El procedimiento sobre las variables ambientales siguen el siguiente orden:

Primero, se presentan a las variables ambientales, estas corresponden a la presión y temperatura, esto se ilustra en las sub-figuras a) y e).

Segundo, se aplica la transformada rápida de Fourier para determinar las frecuencias de estas variables, esto corresponde a las sub-figuras b) y f).

Tercero, es seleccionado un intervalo de frecuencias del espacio de Fourier correspondiente a las variables ambientales, esto se presenta a las sub-figuras c) y g).

Cuarto, se aplica la transformada inversa de Fourier sobre el intervalo de frecuencia seleccionado previamente, de esta forma obtenemos una variación ideal de las variables ambientales, esto corresponde a las sub-figuras d) y h). Las unidades correspondientes en el espacio temporal corresponden a días, mientras que en el espacio de Fourier corresponden a ciclos por día (cpd)

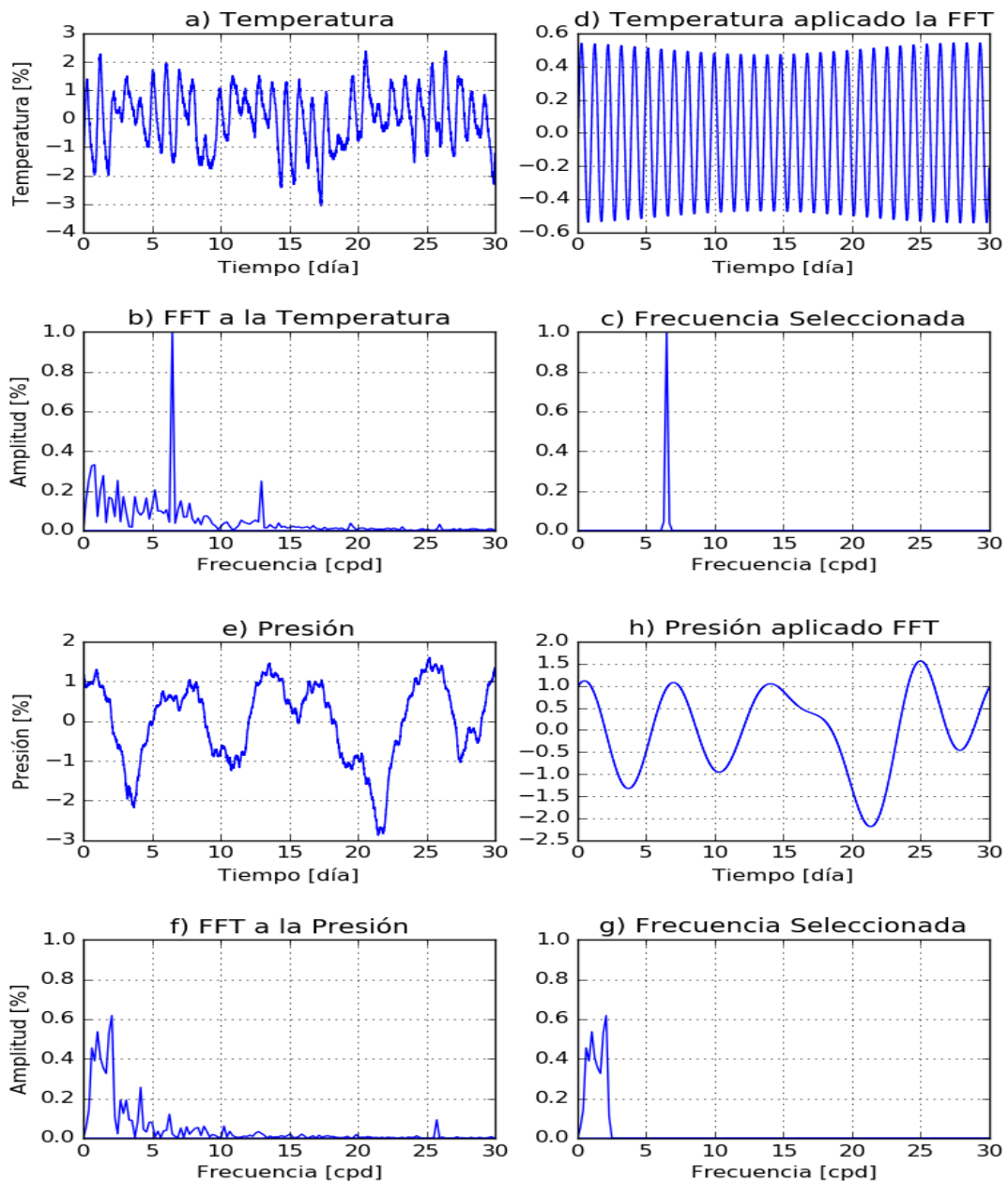


Figura 3.1: Variables ambientales correspondientes a los datos de referencia. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.

Las sub-figuras d) y g) mostradas en la Figura 3.1, nos permitirán hallar la relación existente entre el flujo de partículas registrada con las variaciones ambientales correspondientes.

Las gráficas que se ilustran en la Figura 3.2, presentan la variación de el flujo de partículas secundarias registradas durante treinta días. Para la obtención de las frecuencias generadas por la FFT se considera los intervalos de frecuencia de las variables atmosféricas correspondientes a la Figura 3.1. Podemos observar cómo será el comportamiento de el

flujo de partículas, al ser relacionada con las frecuencias de las correspondientes variables ambientales.

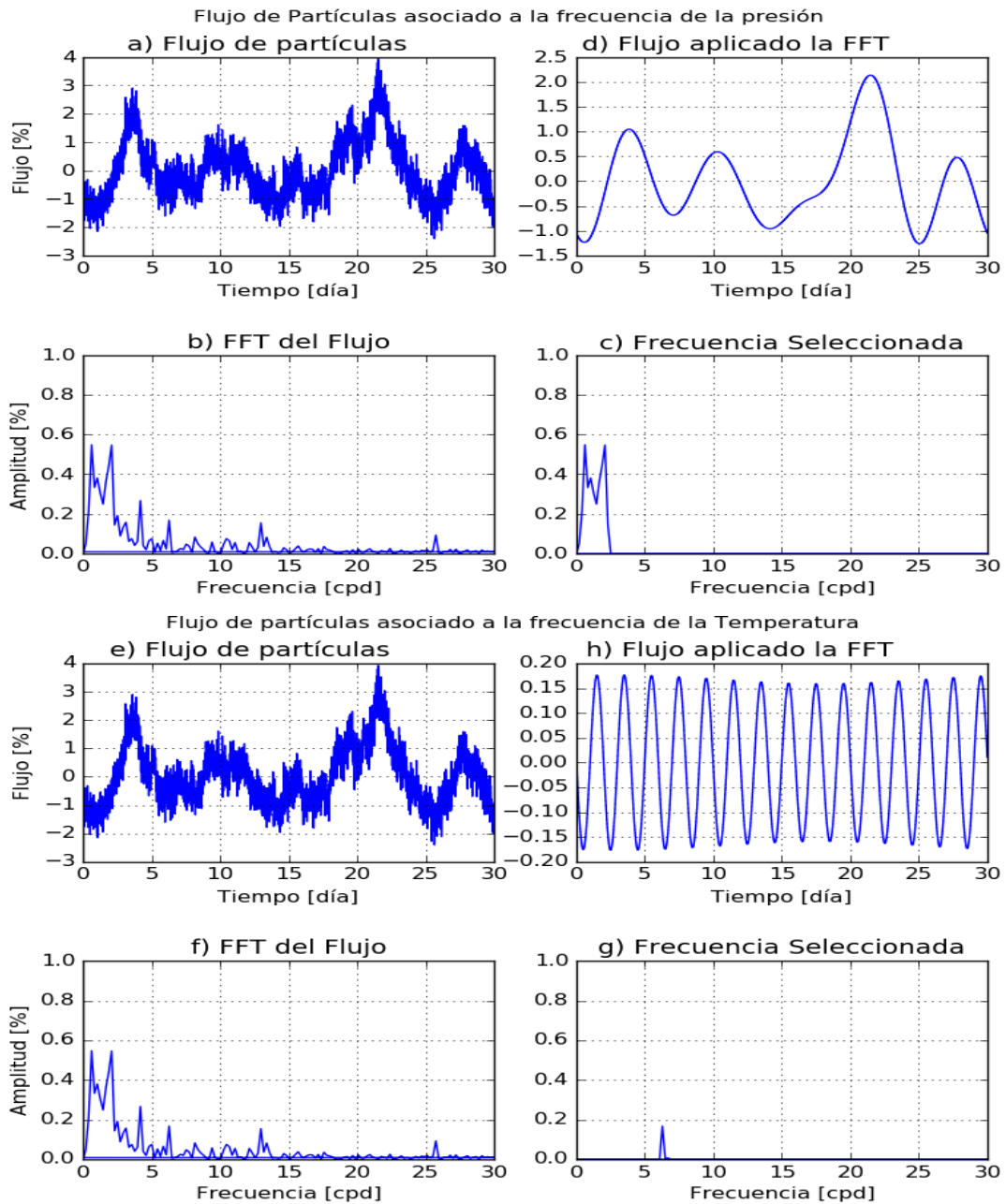


Figura 3.2: Tasa de partículas secundarias correspondientes a los datos de referencia. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.

El procedimiento sobre el flujo de partículas en la Figura 3.2 siguen el siguiente orden: Primero, se presenta el flujo de partículas que están asociadas a las variables ambientales, estas corresponden a la presión y temperatura, esto se ilustra en las sub-figuras a) y e). Segundo, se aplica la transformada rápida de Fourier para determinar las frecuencias co-

respondientes al flujo de partículas, esto corresponde a las sub-figuras b) y f).

Tercero, es seleccionado un intervalo de frecuencias del espacio de Fourier correspondiente al flujo de partículas, este intervalos de frecuencias corresponde a las variables ambientales, esto se puede observar en las sub-figuras c) y g).

Cuarto, se aplica la transformada inversa de Fourier sobre el intervalo de frecuencia seleccionado previamente, de esta forma obtenemos una variación ideal del flujo de partículas, esto corresponde a las sub-figuras d) y h).

Sobre los datos de referencia se debe considerar que cada punto es el valor promedio obtenido cada 900 segundos, este promedio es realizado por el detector correspondiente a la universidad de Adelaide.

La Figura 3.3, se presenta la relación existente entre el flujo de partículas secundarias con las variables ambientales. En la sub-figura a) correspondiente a la Figura 3.3 se observa que existe una relación inversa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la presión (línea de color negro), mientras que en la sub-figura b) correspondiente a la Figura 3.3 existe una relación directa entre el flujo de partículas secundarias (línea de color rojo) con la temperatura (línea de color azul). Estas variaciones temporales son el producto resultante de aplicar la FFT y la IFFT a los datos de referencia mostrados en las sub-figuras correspondientes a las Figuras 3.1 y 3.2. La Figura 3.3 es obtenida de las sub-figuras correspondientes a las Figuras 3.1 y 3.2.

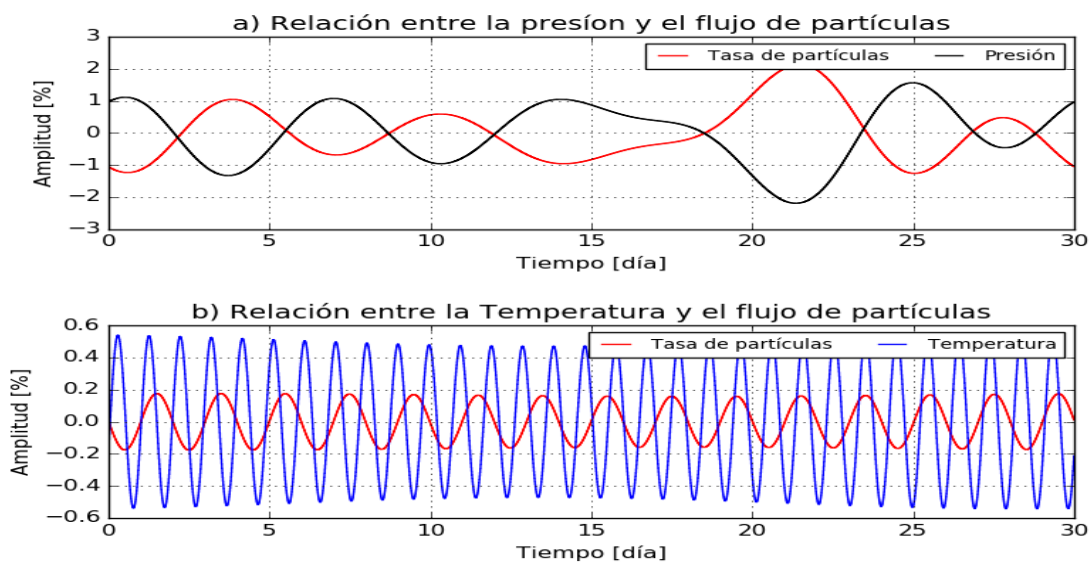


Figura 3.3: Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales en el tiempo aplicado la FFT. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).

3.3.1 Correcciones de presión y temperatura obtenidos de la transformada rápida de Fourier

Se desarrolló un código en python, este código permite la obtención de la FFT de los datos, al igual que la IFFT de los datos filtrados y normalizados con los diferentes histogramas. Este código se encuentra en el Anexo D.

Cuando se ha realizado la FFT sobre los datos del detector, se presenta distintas frecuencias, mediante la utilización de un filtro tipo pasa-banda es seleccionado un rango específico de frecuencias. Este rango de frecuencias mediante la aplicación de la IFFT, nos permite obtener el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales (véase Figuras 3.1 y 3.2). Se comprueba que existe una relación entre el flujo de partículas y las variables ambientales (véase Figura 3.3), esto nos permite encontrar los coeficientes de presión y temperatura mediante los datos proporcionados por la FFT. La FFT se aplicó sobre los datos obtenidos del detector, al igual que los datos de referencia.

La sub-figura a) y c) de la Figura 3.4, presenta la relación existente entre el flujo de partículas secundarias con la presión y temperatura aplicando el primer modelo a los datos de referencia. La sub-figura b) y d) de la Figura 3.4, presentan la relación cuando se aplicó la FFT sobre los datos de referencia.

Podemos observar que existe una relación lineal entre la presión y el flujo de las partículas registras, mientras que para la temperatura los modelos aplicados no permiten hallar la linealidad existente que predice la teoría entre estas dos variables. Esto puede ser resultado de las aproximaciones que se realiza sobre la temperatura, o que los modelos implementados sobre la temperatura no son los adecuados.

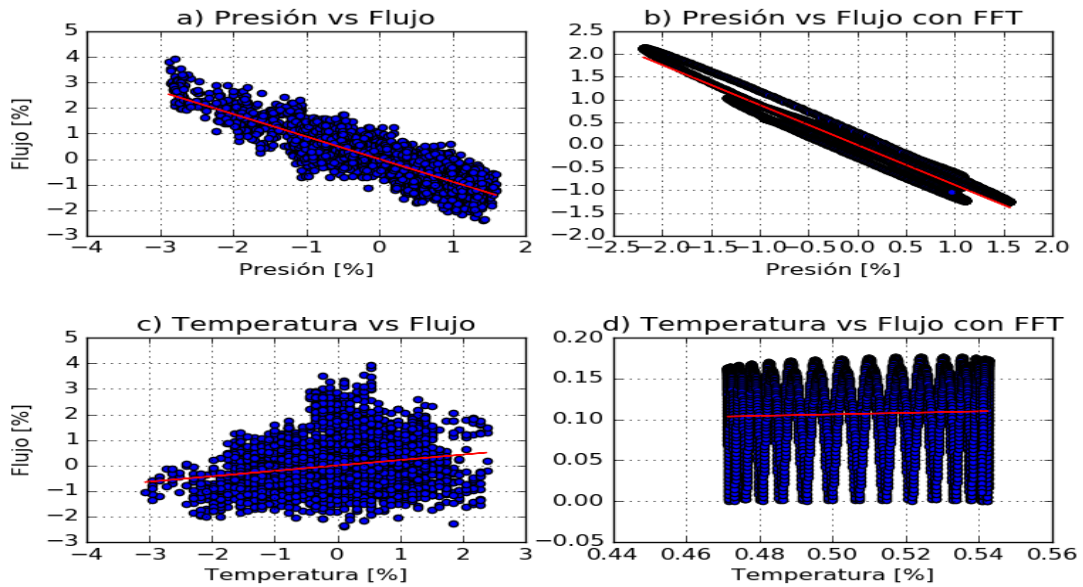


Figura 3.4: Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentan una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d) representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.

Finalmente, la Figura 3.5 muestra la corrección realizada al aplicar los coeficientes de presión y temperatura obtenidos por los dos modelos. La sub-figura a) correspondiente a la Figura 3.5, presenta la corrección del flujo de partículas al aplicar el coeficiente de presión mediante los dos modelos. La línea de color verde corresponde al flujo de partículas secundarias registradas sin la corrección, la línea de color negro corresponde al flujo de partículas aplicando la corrección del primer modelo y la línea de color rojo corresponde al flujo de partículas aplicando el segundo modelo. Podemos observar que no existe una variación entre estos dos modelos aplicados, y la corrección sigue la tendencia del flujo de partículas.

La sub-figura b) correspondiente a la Figura 3.5, presenta la corrección del flujo de partículas al aplicar el coeficiente de Temperatura mediante los dos modelos. La línea verde corresponde al flujo de partículas secundarias registradas sin la corrección, la línea de color negro corresponde al flujo de partículas aplicando la corrección del primer modelo y la línea de color rojo corresponde al flujo de partículas aplicando el segundo modelo. Podemos observar en este caso existe una variación entre estos dos modelos aplicados, y no existe una tendencia similar al flujo de partículas.

La sub-figura c) correspondiente a la Figura 3.5, presenta la corrección del flujo de partículas al aplicar el coeficiente de presión y temperatura mediante los dos modelos, y como la teoría lo indica en la ecuación (2.18). La línea verde corresponde al flujo de partículas secundarias registradas sin la corrección, la línea de color negro corresponde al flujo de

partículas aplicando la corrección del segundo modelo y la línea de color rojo corresponde al flujo de partículas aplicando el primer modelo. Podemos observar que no existe una alta variación entre estos dos modelos aplicados, y la corrección utilizando los dos modelos sigue la tendencia del flujo de partículas.

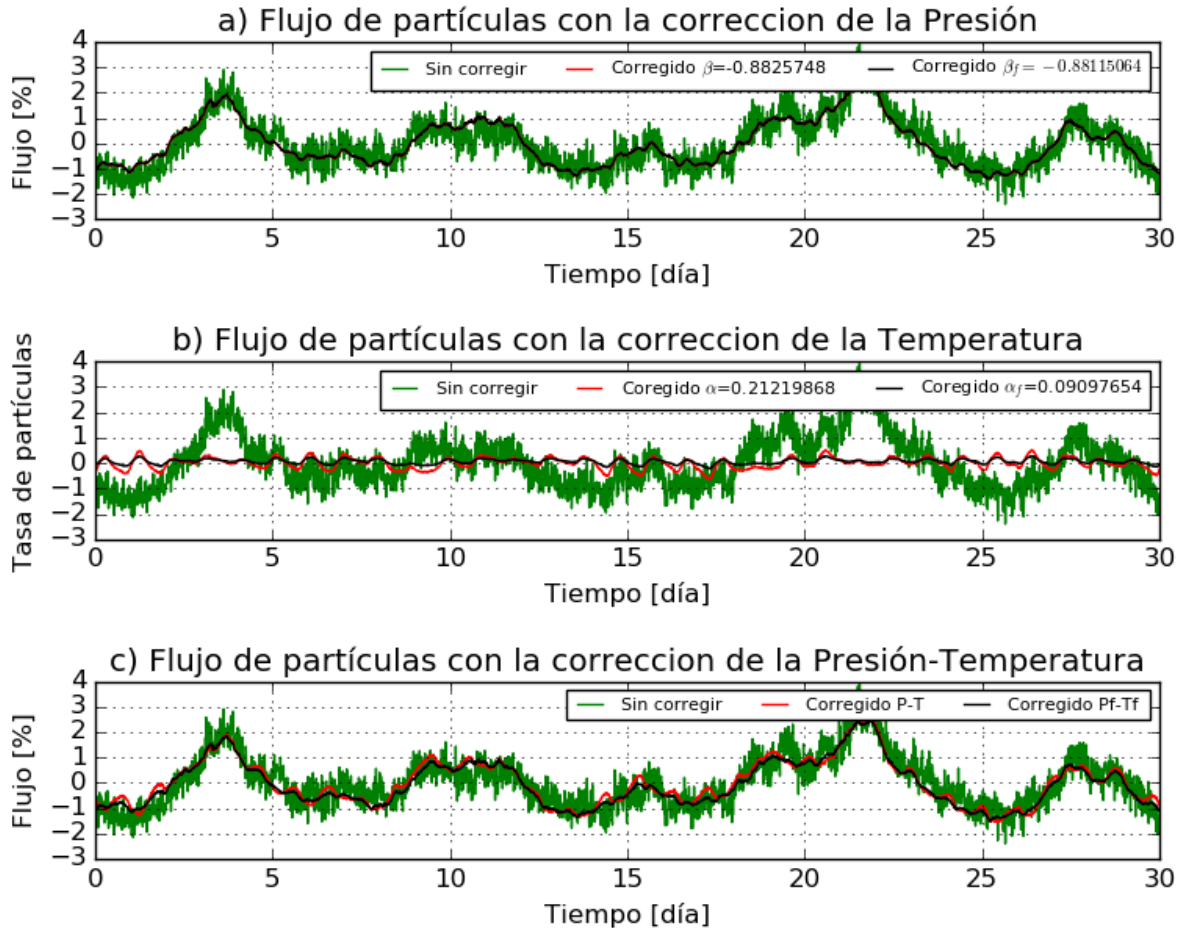


Figura 3.5: Corrección a el flujo de partículas aplicando los coeficientes ambientales mediante los dos modelos. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo.

Esto nos permite obtener como resultado, que los modelos implementados en los datos de referencia podrían ser usados para corregir el flujo de partículas considerando las dos variables ambientales.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente sección, se presentan los resultados obtenidos por las simulaciones realizadas en CORSIKA, y los resultados obtenidos al aplicar los dos modelos sobre los datos proporcionados por el detector. Los resultados de las simulaciones, corresponden a los flujos de las partículas secundarias que están en función de su energía y la distribución lateral. Los resultados obtenidos de los datos del detector, al aplicar los dos modelos entregan los coeficientes de presión y temperatura, para la corrección sobre el flujo de partículas.

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS POR LAS SIMULACIONES

Los datos obtenidos de las simulaciones, fueron clasificados en 4 grupos, estos grupos corresponden a los tipos de partículas secundarias generadas en las EAS. Las EAS fueron iniciadas por diferentes astropartículas, estas astropartículas tenían energías desde los 12.47 GeV hasta 10^6 GeV, el tiempo de flujo de las astropartículas fue de 6 horas. Estas simulaciones, nos dio como resultado el flujo de partículas secundarias en función de su energía, y la distribución lateral respecto a la distancia del núcleo que conforma la EAS.

Las Figuras 4.1 y 4.2, presentan el flujo de las partículas secundarias en función de su energía, cada Figura esta clasificada de acuerdo al tipo de partícula secundaria (gammas γ , muones μ^\pm , electrones y positrones (e^\pm) y piones (π^\pm). En las Figuras 4.1 y 4.2, observamos que existe un mayor flujo de partículas secundarias iniciadas por los núcleos de Hidrógeno seguidos por núcleos de helio y el resto de núcleos que conforman las astropartículas, se ha considerado el elemento químico Carbono debido a que es tercer elemento mas abundante registrado en las simulaciones. Este mayor número en el flujo de las partículas secundarias es debido a la existencia de un mayor flujo de núcleos de Hidrógeno y Helio, en comparación con el resto de núcleos que conforman la composición química de las astropartículas (véase Figura 1.2). Para las simulaciones llevadas acabo el porcentaje de núcleos de Hidrógeno es 88.29 %, el Helio 10.66 %, Carbono 0.27 % y el resto de núcleos 0.78 % del total de astropartículas generadas en las 6 horas de simulación.

Si comparamos las dos Figuras 4.1 y 4.2, podemos observar que existe un mayor flujo de partículas secundarias correspondientes a la componente electromagnética, lo cual esta acorde con la teoría. En el panel superior de la Figura 4.1, podemos observar que existe un exceso de fotones (γ) próximos al valor de energía 10^{-1} GeV, que fueron iniciados por las diferentes astropartículas. Estos valores en los fotones (γ) secundarios son el producto del decaimiento de los piones neutros (π^0) como se presenta en la ecuación (2.8). El decaimiento de estos piones neutros (π^0) contribuye con fotones (γ) secundarios a la componente electromagnética de la EAS.

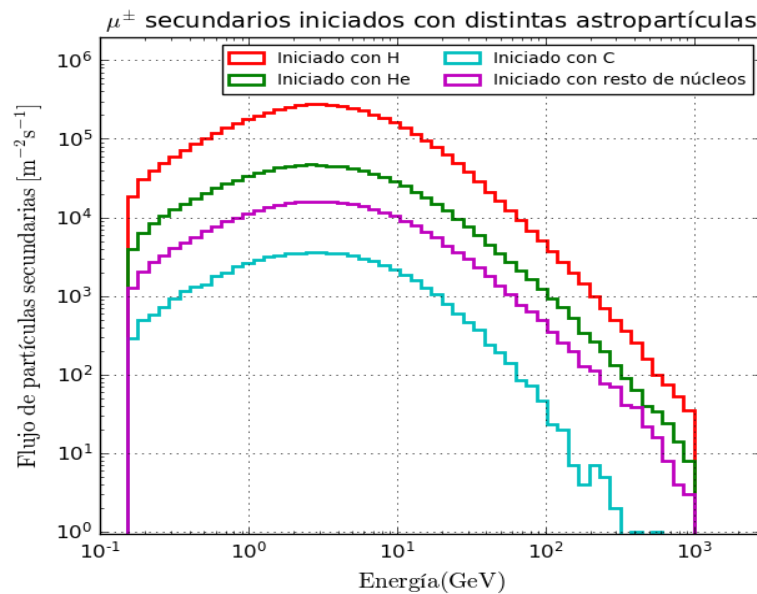
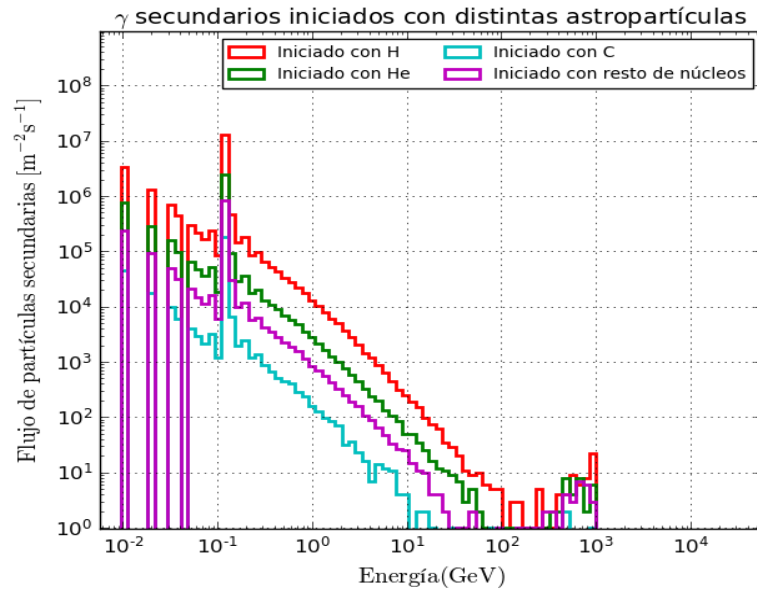


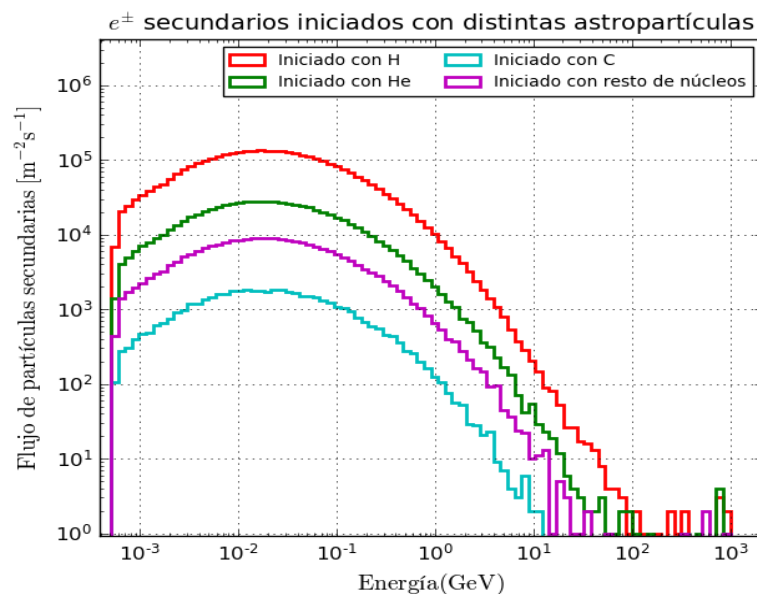
Figura 4.1: El panel superior representa el flujo de partículas secundarias del tipo γ , iniciadas por los diferentes núcleos que conforman las astropartículas. El panel inferior representa el flujo de partículas secundarias del tipo μ^\pm , iniciadas por los diferentes núcleos de las astropartículas. La mayor contribución de las partículas secundarias esta generada por núcleos de Hidrógeno seguidos por núcleos de Helio y el resto de núcleos.

En el panel superior de la Figura 4.1, observamos que a medida que aumenta la energía el número de fotones disminuye, por lo tanto podríamos asumir que la mayor cantidad de fotones que llegan hasta el detector tienen energías menores a 10 GeV.

En el panel inferior de la Figura 4.1, observamos que el número de muones (μ^\pm) se incrementa hasta alcanzar un máximo entre las energías de 1 GeV y 10 GeV. Conforme se incrementa el valor de la energía, el número de muones que llegarán hasta el detector irán disminuyendo. Esto nos permite asumir que la mayor cantidad de muones (μ^\pm) registrados al nivel del detector tendrán energías comprendidas en los intervalos de 1 GeV hasta 100 GeV.

En el panel superior de la Figura 4.2, podemos observar que el número de e^\pm se incrementa hasta alcanzar un máximo entre los intervalos de energía de 10^{-2} GeV y 10^{-1} GeV. Se observa que el número de e^\pm disminuye conforme se incrementa su energía, esto nos permite asumir que la mayor cantidad de e^\pm registrados por el detector tendrán energías comprendidas entre los intervalos de 10^{-2} GeV y 1 GeV.

En el panel inferior de la Figura 4.2, podemos observar que el número de piones (π^\pm) decrece conforme se incrementa la energía. Podemos asumir que la mayor cantidad de piones (π^\pm) registrados el nivel del detector tendrán una energía comprendida en el rango de 1 GeV hasta 100 GeV.



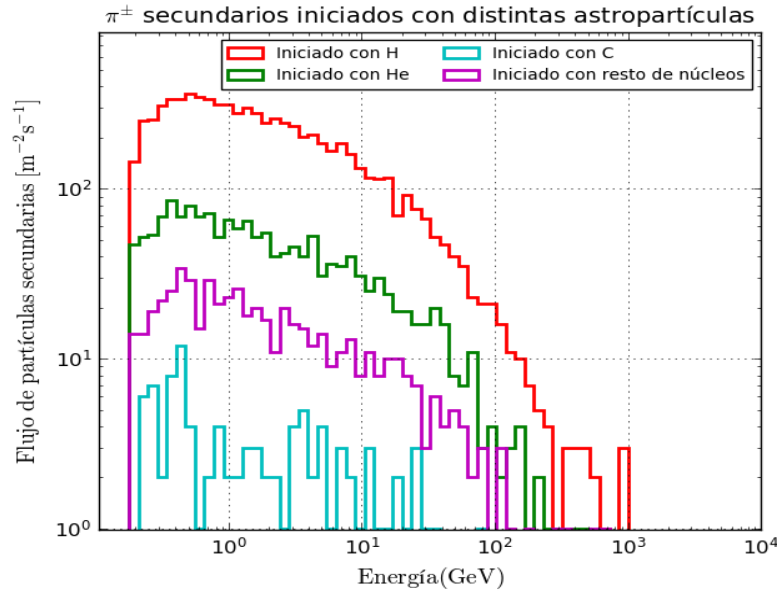


Figura 4.2: El panel superior representa el flujo de partículas secundarias del tipo e^\pm , iniciadas por los diferentes núcleos que conforman las astropartículas. El panel inferior representa el flujo de partículas secundarias del tipo piones (π^\pm), iniciadas por los diferentes núcleos de las astropartículas. La mayor contribución de las partículas secundarias está generada por núcleos de Hidrógeno seguidos por núcleos de Helio y el resto de núcleos.

De las Figuras 4.1 y 4.2, observamos que la mayor cantidad de partículas secundarias con energías < 1 GeV que llegan hasta el detector están compuestas por fotones (γ), electrones (e^-) y positrones (e^+), siendo más abundantes los fotones (γ), observamos que la componente electromagnética será la predominante en las EAS que fueron iniciadas por diferentes astropartículas.

Para energías ≥ 1 GeV la mayor cantidad de partículas que llegan hasta el detector están formadas por muones (μ^\pm) y piones (π^\pm), siendo más abundantes los muones. Podemos notar que existe un flujo de piones en el panel inferior de la Figura 4.2, aunque el número de piones registrado es 3 órdenes de magnitud menor en comparación con los muones, en este caso la componente muónica será la predominante en las EAS iniciadas por diferentes astropartículas.

Las Figuras 4.3 y 4.4, presenta la distribución lateral de las partículas secundarias que llegan hasta la altura de (2850 m.s.n.m) registrado en las simulaciones para este trabajo.

En el panel superior de la Figura 4.3, se presenta la distribución lateral de las partículas secundarias del tipo gama (γ). Se puede observar que conforme se incrementa la distancia al núcleo de la EAS, la densidad de partículas secundarias decrece. Podemos notar que existe una mayor densidad de partículas secundarias que fueron iniciadas con núcleos de Hidrógenos, en comparación al resto de las partículas secundarias. Esta diferencia, es producto

del gran porcentaje de núcleos de Hidrógeno en comparación al resto de astropartículas que generan las EAS.

En el panel inferior de la Figura 4.3, se presenta la distribución lateral de las partículas secundarias del tipo muon (μ^\pm). Se puede observar que conforme se incrementa la distancia al núcleo de la EAS, la densidad de partículas secundarias decrece. Al igual que en las partículas gama (γ), podemos notar que existirá una mayor densidad de partículas secundarias que fueron iniciadas con núcleos de Hidrógenos, en comparación al resto de las partículas secundarias.

Las Figuras 4.3 y 4.4, permiten visualizar que conforme la EAS evoluciona, la densidad de partículas secundarias disminuye al alejarse del centro del núcleo de la EAS. Esto quiero decir, que el mayor número de partícula se encuentra en las cercanías del núcleo. Esto lo podemos evidenciar en la Figura 2.1, de igual forma podemos notar que las Figuras 4.3 y 4.4 tiene similitud con el panel izquierdo de la Figura 2.6, dando como resultado que las partículas más abundantes estarán determinadas por la componente electromagnética de la EAS.

En el panel superior de la Figura 4.4, podemos observar de forma similar la distribución lateral de las partículas secundarias del tipo e^\pm . De similar forma, la mayor densidad de partículas secundarias en la distribución lateral, son iniciadas por núcleos de Hidrógeno en comparación al resto de astropartículas.

En el panel inferior de la Figura 4.4, podemos observar la distribución lateral de las partículas secundarias del tipo piones (π^\pm). De similar forma, la mayor densidad de partículas secundarias en la distribución lateral, son iniciadas por núcleos de Hidrógeno en comparación al resto de astropartículas.

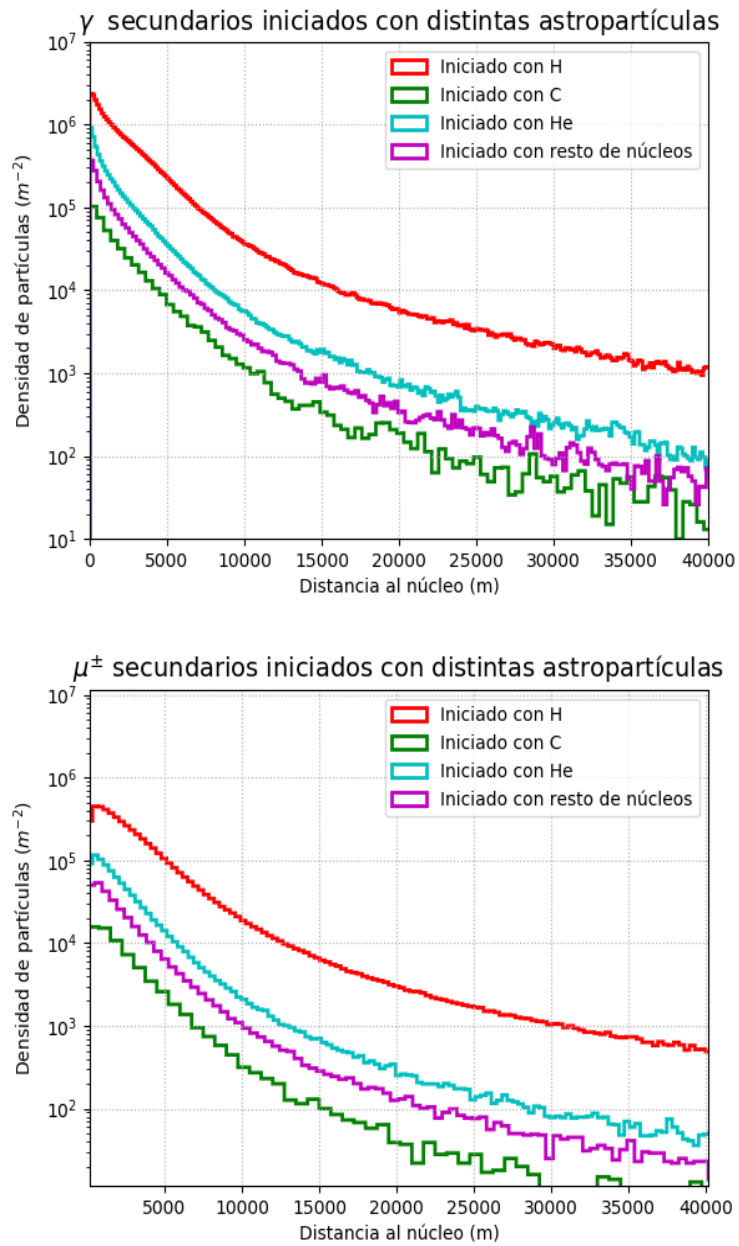


Figura 4.3: Densidad de partículas conforme se alejan del del núcleo de la EAS. El panel superior presenta la distribución lateral de las partículas tipo gama (γ) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos. El panel inferior presenta la distribución lateral de las partículas tipo muon (μ^{\pm}) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos.

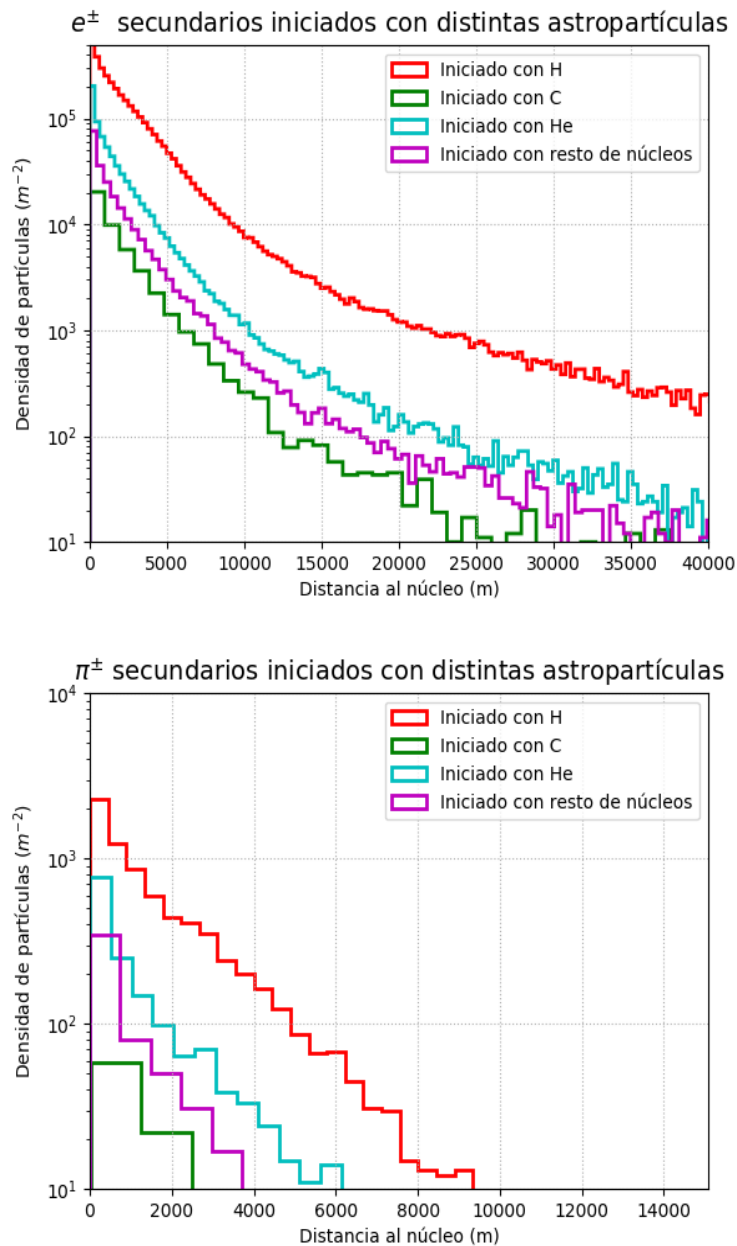


Figura 4.4: Densidad de partículas conforme se alejan del del núcleo de la EAS. El panel superior representa la distribución lateral de las partículas tipo electrón (e^-) y positrón (e^\pm) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos. El panel inferior representa la distribución lateral de las partículas tipo pión (π^\pm) iniciadas por núcleos de Hidrógeno, Helio, Carbono y el resto de núcleos.

De las Figuras 4.3 y 4.4, observamos que la distribución lateral de las partículas secundarias tendrán la misma distribución, y la mayor densidad de partículas que fueron iniciadas por núcleos de hidrógeno. Estos resultados se deben a que los núcleos de hidrógeno son mas abundantes en comparación al resto de núcleos atómicos que conforman las astropartículas.

Para estimar la distribución superficial que tendrán las EAS, se realizó dos simulaciones

considerando como dato una astropartícula del tipo protón y una del tipo gamma (γ), ambas con una energía de 1 TeV. Estas dos astropartículas generarán una EAS, esto nos permite conocer el área adecuada para una mejor detección de EAS que llegan hasta la superficie de la Tierra para la altura determinada en las simulaciones.

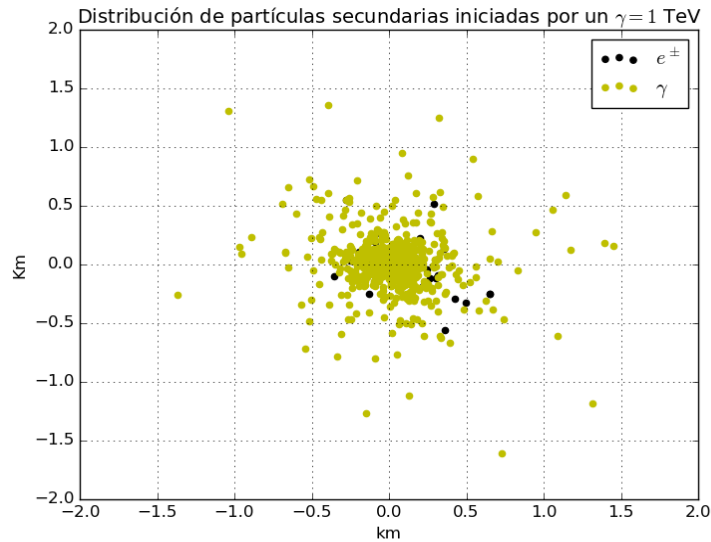


Figura 4.5: Distribución superficial de una EAS iniciada por una astropartícula del tipo gama (γ), los puntos negros representan los electrones (e^-) y positrones (e^+) que llegan hasta la superficie de la Tierra. Los punto de color amarillo representan los fotones gamma (γ) que llegan hasta la superficie de la Tierra.

En la Figura 4.5, se observa que una astropartícula gamma (γ) con una energía de 1 TeV no generó ningún muón, lo que está acorde con la teoría. El mayor número de partículas secundarias generadas en ésta EAS serán fotones gama (γ) y en una menor cantidad electrones (e^-) y positrones (e^+).

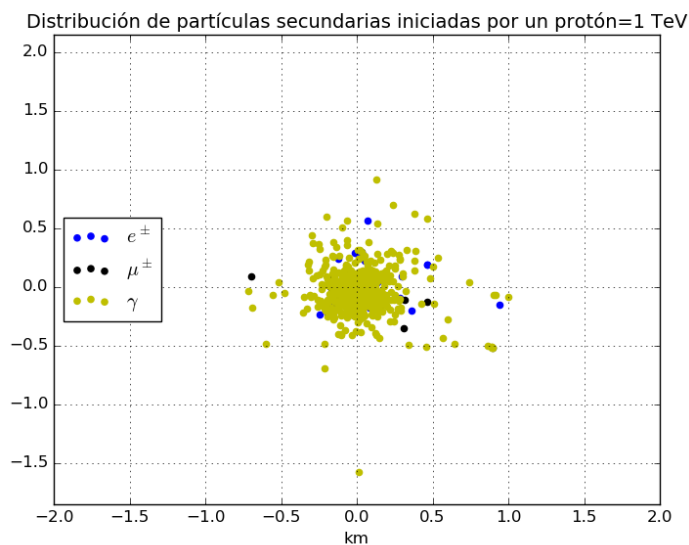


Figura 4.6: Distribución superficial de una EAS iniciada por una astropartícula del tipo protón, los puntos azules representan los electrones (e^-) y positrones (e^+) que llegan hasta la superficie de la Tierra. Los punto de color amarillo representan los fotones gamma (γ) que llegan hasta la superficie de la Tierra. Los puntos de color negro representan los muones μ^\pm que llegan hasta la superficie de la Tierra.

En la Figura 4.6, se observa que la mayor cantidad de partículas secundarias predominantes al nivel del detector son fotones gama (γ), en una menor cantidad se tienen electrones (e^-), positrones (e^+) y muones (μ^\pm). Para una astropartícula tipo hadrón la producción de muones ocurrirá como se muestra en la Figura 4.6, aunque el número de muones que se producen en la EAS es ínfimo en comparación con el resto de partículas secundarias. Por lo tanto, se sugiere que para el estudio de las EAS iniciadas por cualquier astropartícula sería necesario un arreglo de detectores que cubran un área mínima de 400 m^2 , esto permitiría la detección de partículas secundarias, estas partículas secundarias pueden pertenecer a la componente electromagnética o a la componente muónica.

De las Figuras 4.5 y 4.6, podemos observar que existe una mayor área cubierta por las partículas de la EAS iniciada por un fotón que la iniciada por un protón.

Estos resultados nos permiten determinar el flujo de partículas secundarias que estarían llegando hasta el detector, pero no podemos determinar el tipo de partícula que arriba al detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional. Esto debido a que no se ha calculado una matriz de respuesta del detector, esta matriz permitiría conocer el tipo de partículas que estarían arribando al detector, pero este calculo no esta contemplado en este proyecto de titulación.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DATOS DEL DETECTOR

Los dos modelos implementados y explicados en la Sección de la Metodología, fueron aplicados a los datos obtenidos por el detector, encontramos los coeficientes ambientales que están relacionados con el flujo de partículas secundarias. La obtención de estos coeficientes nos permitió realizar las correcciones correspondientes al flujo de las partículas secundarias.

4.2.1 Resultados obtenidos para la Presión, Temperatura y Tasa de partículas secundarias

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se presentan las variaciones de la temperatura y la presión de los datos obtenidos por el detector. Los tiempos de adquisición son, 50 horas durante el mes de Agosto, 35 horas para el mes de Octubre y 25 horas para el mes de Noviembre. El procedimiento sobre las variables ambientales de los datos obtenidos por el detector siguen el siguiente orden:

Primero, se presentan a las variables ambientales, estas corresponden a la presión y temperatura, esto se ilustra en las sub-figuras a) y e).

Segundo, se aplica la transformada rápida de Fourier para determinar las frecuencias de estas variables, esto corresponde a las sub-figuras b) y f).

Tercero, es seleccionado un intervalo de frecuencias del espacio de Fourier correspondiente a las variables ambientales, esto se presenta en las sub-figuras c) y g).

Cuarto, se aplica la transformada inversa de Fourier sobre el intervalo de frecuencia seleccionado previamente, de esta forma obtenemos una variación ideal de las variables ambientales, esto corresponde a las sub-figuras d) y h).

Las unidades correspondientes en el espacio temporal corresponden a horas, mientras que en el espacio de Fourier corresponden a ciclos por hora (cph)

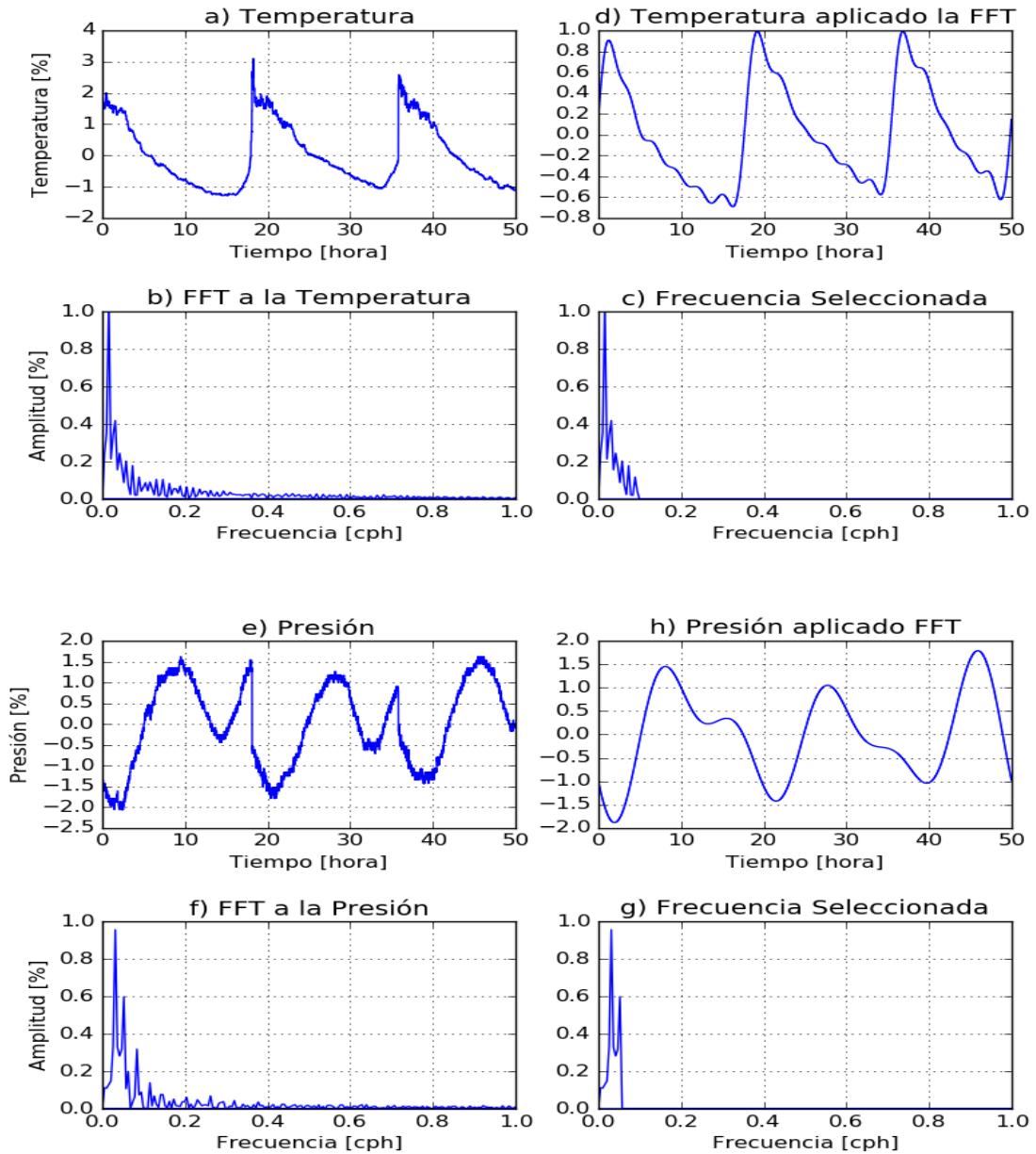


Figura 4.7: Variables ambientales correspondientes al mes de Agosto del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas

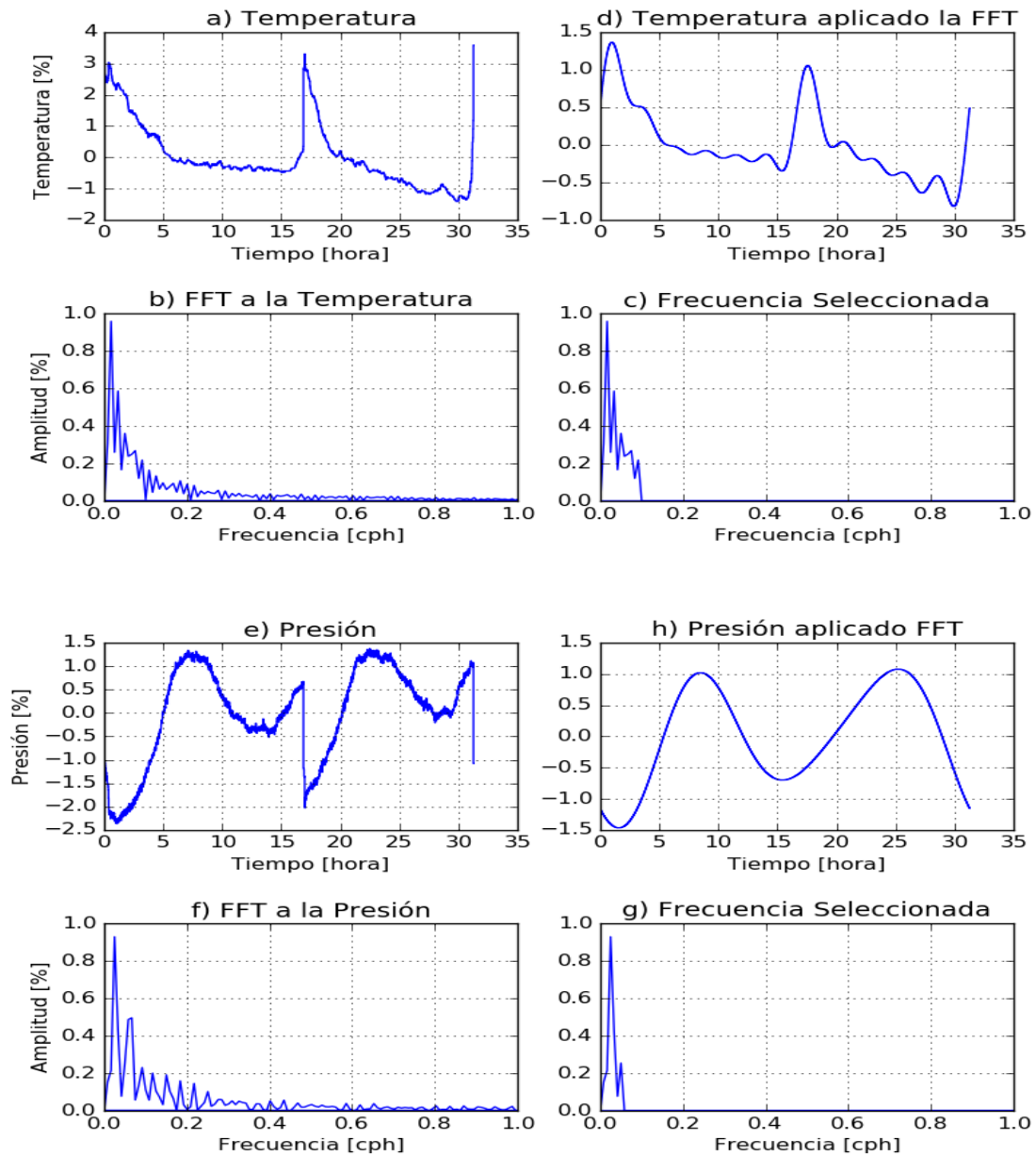


Figura 4.8: Variables ambientales correspondientes al mes de Octubre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas

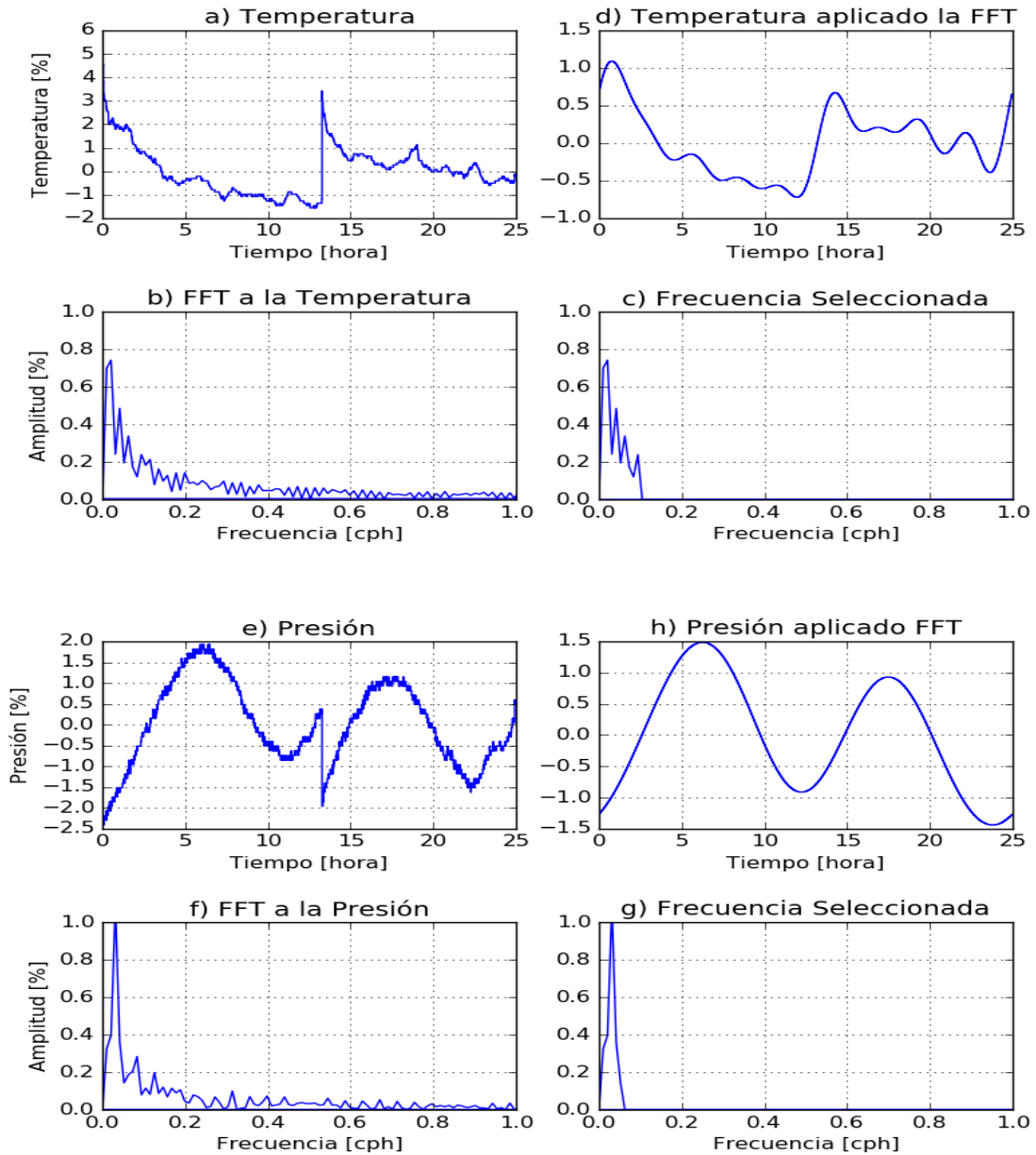


Figura 4.9: Variables ambientales correspondientes al mes de Noviembre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes a las variables ambientales. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT de las variables ambientales, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas

De las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, obtenemos los intervalos de frecuencia correspondientes a las variables ambientales, estos intervalos nos permitirán seleccionar las frecuencias correspondientes al flujo de partículas que está asociada a cada variable ambiental. Las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12, presentan la variación del flujo de partículas secundarias correspondientes a los periodos que se registraron los datos. Se ha considerado intervalos de frecuencia para las diferentes variables atmosféricas, de esta forma, el flujo de partículas asociada a

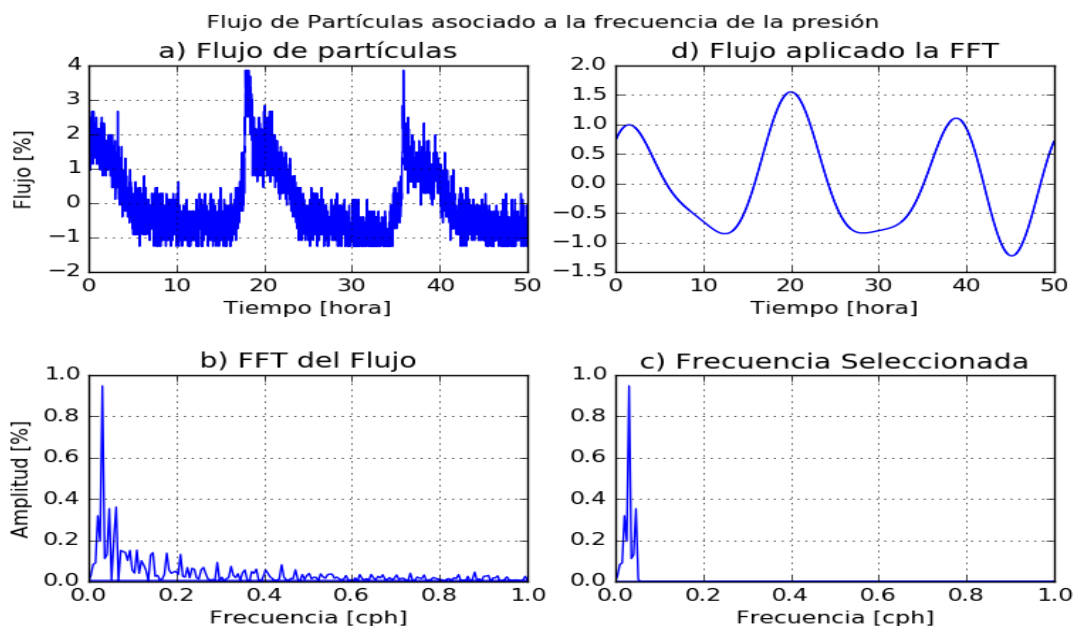
la temperatura tendrá el intervalo de frecuencia de la temperatura, lo mismo aplica para la presión. Con ello, podemos observar cómo será el comportamiento del flujo de partículas relacionada con las frecuencias de las variables ambientales. El procedimiento sobre el flujo de partículas en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12, siguen el siguiente orden:

Primero, se presenta el flujo de partículas que están asociadas a las variables ambientales, estas corresponden a la presión y temperatura, esto se ilustra en las sub-figuras a) y e).

Segundo, se aplica la transformada rápida de Fourier para determinar las frecuencias correspondientes al flujo de partículas, esto corresponde a las sub-figuras b) y f).

Tercero, es seleccionado un intervalo de frecuencias del espacio de Fourier correspondiente al flujo de partículas, este intervalos de frecuencias corresponde al intervalo de las variables ambientales, esto se puede observar en las sub-figuras c) y g).

Cuarto, se aplica la transformada inversa de Fourier sobre el intervalo de frecuencia seleccionado previamente, de esta forma obtenemos una variación ideal del flujo de partículas, esto corresponde a las sub-figuras d) y h).



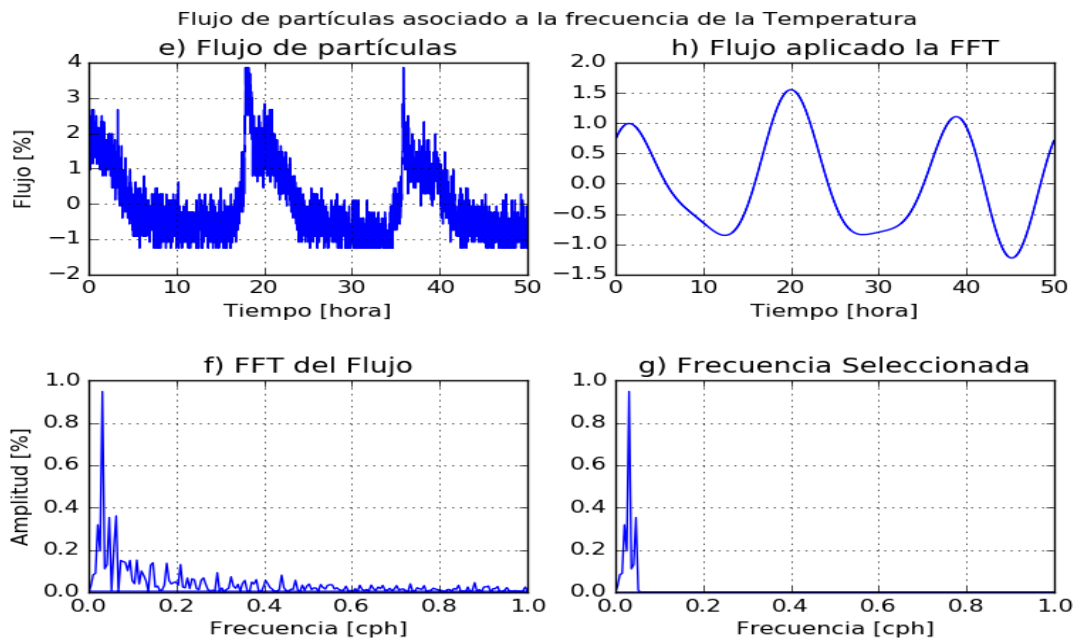
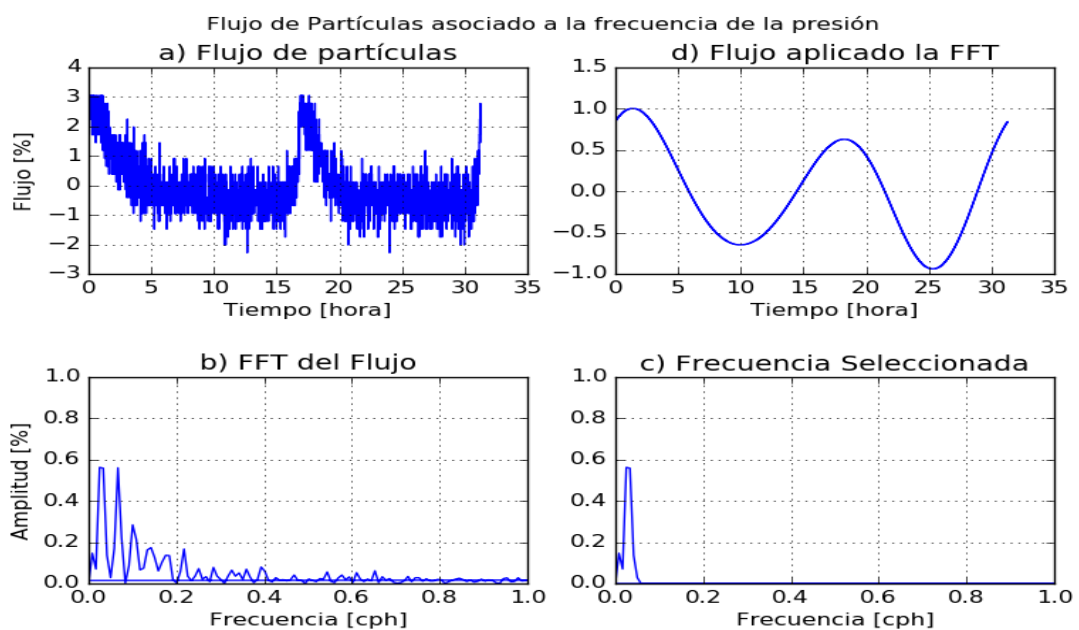


Figura 4.10: Tasa de partículas secundarias correspondiente al mes de Agosto del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.



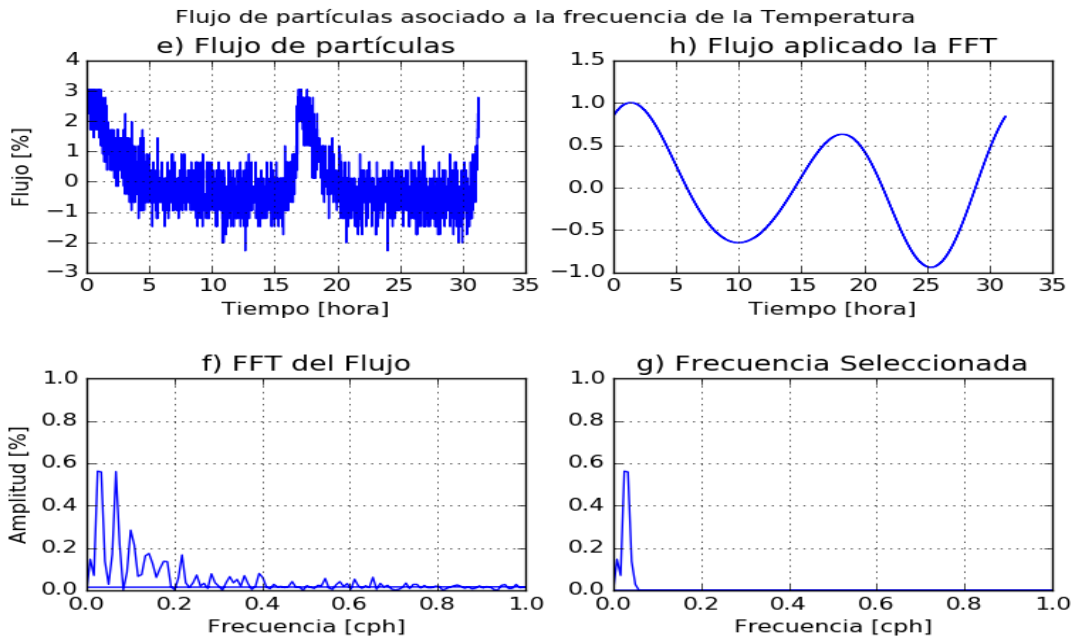
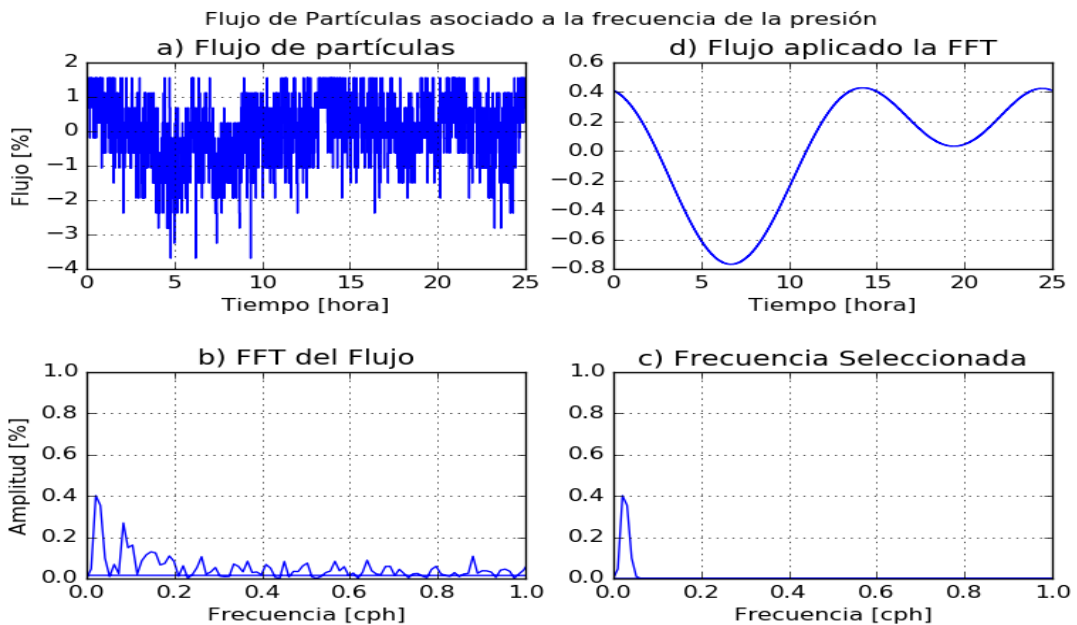


Figura 4.11: Tasa de partículas secundarias correspondiente al mes de Octubre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.



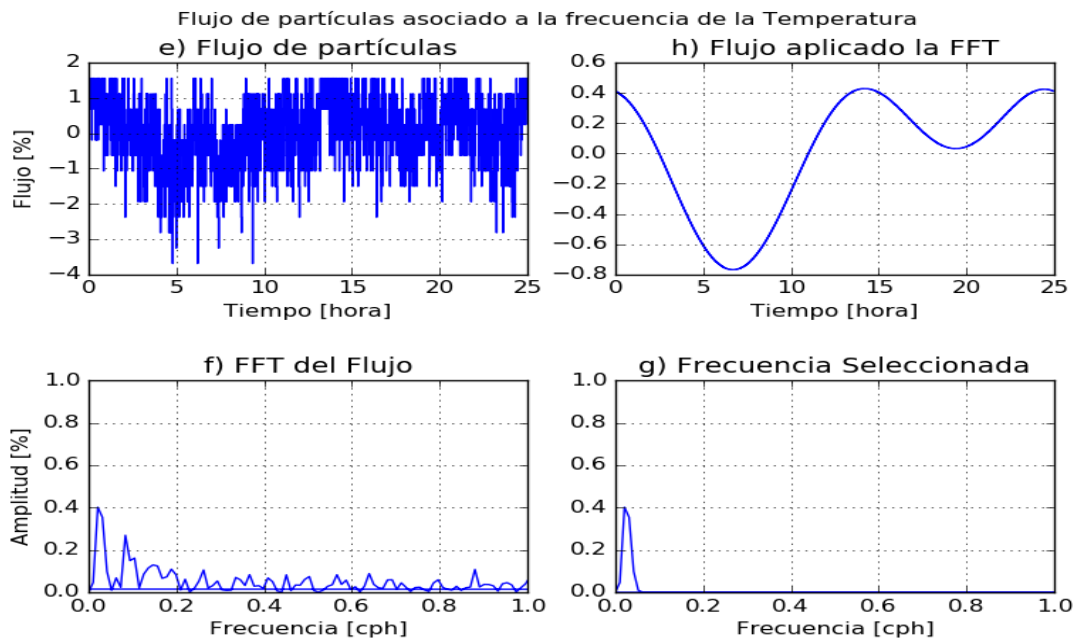


Figura 4.12: Tasa de partículas secundarias correspondiente al mes de Noviembre del 2018. Se presentan 8 sub-figuras, a) y e) correspondientes al flujo de partículas. La sub-figuras b) y f) correspondientes a la FFT del flujo, c) y g) correspondientes a las frecuencias seleccionadas. La sub-figura d) y h) correspondientes a la IFFT de las frecuencias seleccionadas.

Las frecuencias seleccionadas se presentan en la Tabla 4.1, donde éstas frecuencias están dadas en ciclo por día (cpd) para los datos de referencia, y ciclos por hora (cph) para los datos del detector.

	Referencia (cpd)	Agosto (cph)	Octubre (cph)	Noviembre (cph)
Presión	[0;2.5]	[0.5;1.35]	[0.5;1.35]	[0.5;1.35]
Temperatura	[6.4;6.75]	[0.1;2.35]	[0.1;2.35]	[0.1;2.35]
Flujo asociado a la temperatura	[6.4;6.75]	[0.1;1.35]	[0.1;1.35]	[0.1;1.35]
Flujo asociado con la presión	[0;2.5]	[0.5;1.35]	[0.5;1.35]	[0.5;1.35]

Tabla 4.1: Intervalos de frecuencias para las variables ambientales y tasa de partículas secundarias. Estos valores fueron seleccionado considerando las frecuencias más altas presentes en el espacio de Fourier de las Figuras 3.1, 4.7, 4.8 y 4.9.

4.2.2 Correlación entre el tasa de partículas secundarias con la Presión y Temperatura

Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, presentan la correlación existente entre el flujo de partículas secundarias con las variables ambientales. Estas relaciones existentes entre las variables ambientales y el flujo de partículas, fueron obtenidas de las sub-figuras que se encuentran en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9. Podemos observar que existe una correlación directa entra el

flujo de partículas secundarias (línea de color rojo) con la variación de la temperatura (línea de color azul) presentada en la sub-figura b), mientras que para la presión (línea de color negro) la relación con el flujo de partículas (línea de color rojo) es inversa, esto se presenta en la sub-figura a).

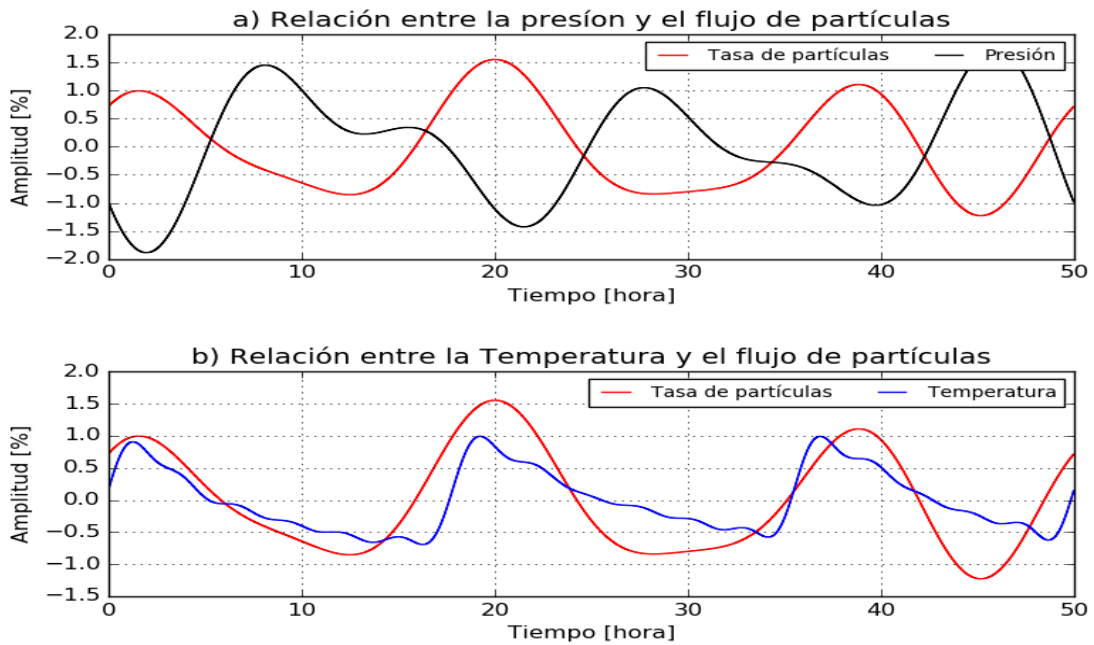


Figura 4.13: Correlación del flujo de partículas secundarias con las variables ambientales aplicado la FFT del mes de Agosto del 2018. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).

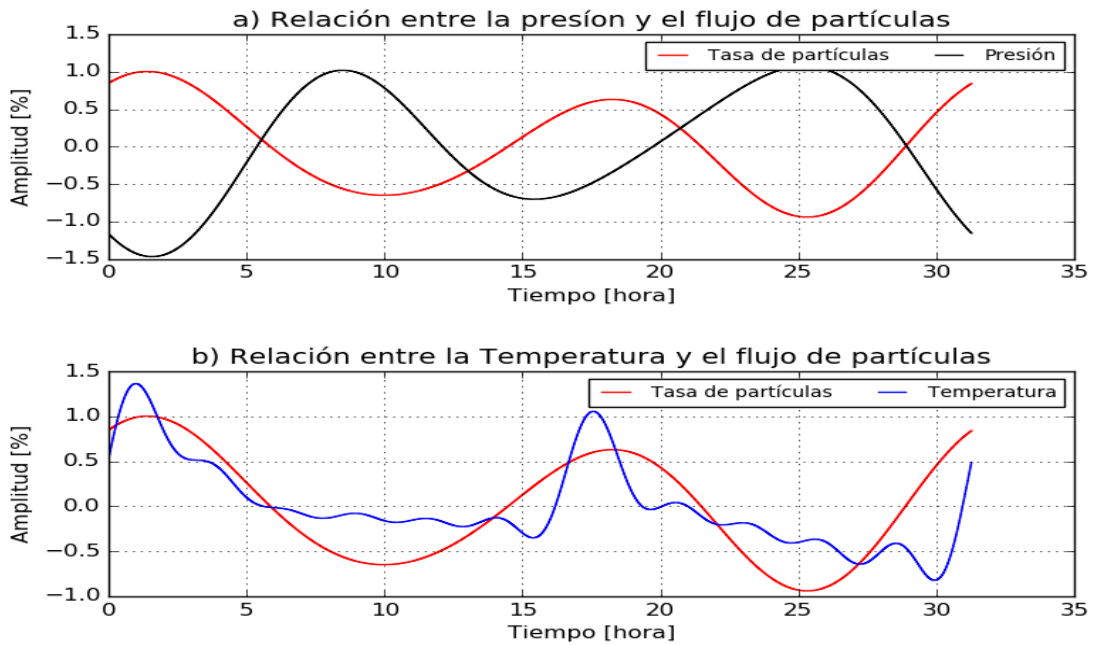


Figura 4.14: Correlación del flujo de partículas secundarias con las variables ambientales aplicado la FFT del mes de Octubre del 2018. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).

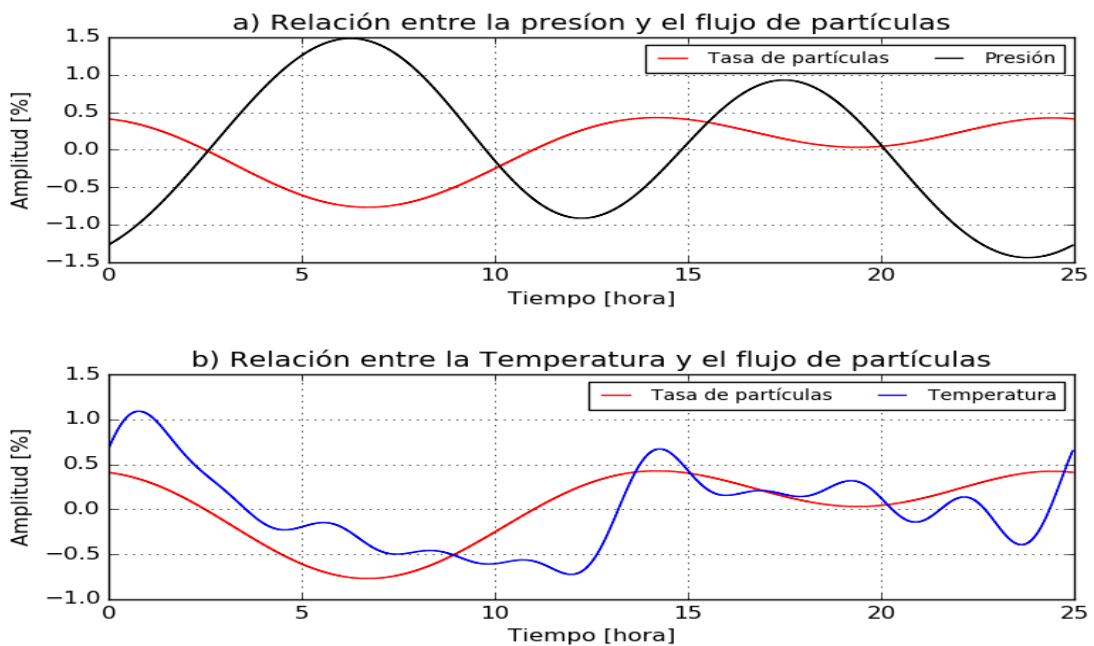


Figura 4.15: Correlación del flujo de partículas secundarias con las variables ambientales aplicado la FFT del mes de Noviembre del 2018. La sub-figura a), representa relación inversa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la presión (línea de color negro r). La sub-figura b) representa la relación directa entre el flujo de partículas (línea de color rojo) y la variación de la temperatura (línea de color azul).

Las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, presentan las tendencias que existen entre el flujo de partículas y las variables ambientales. La teoría explica que debe existir una tendencia lineal

entre las variables ambientales y el flujo de partículas, esta consideración se la realiza si la energía de las partículas secundarias es alta. La sub-figura a) presenta la relación entre la presión y el flujo de partículas considerando el primer modelo, mientras que la sub-figura b) considera la relación entre la presión y el flujo de partículas considerando el segundo modelo. La sub-figura c) presenta la relación entre la temperatura y el flujo de partículas considerando el primer modelo, mientras que la sub-figura d) considera la relación entre la presión y el flujo de partículas considerando el segundo modelo.

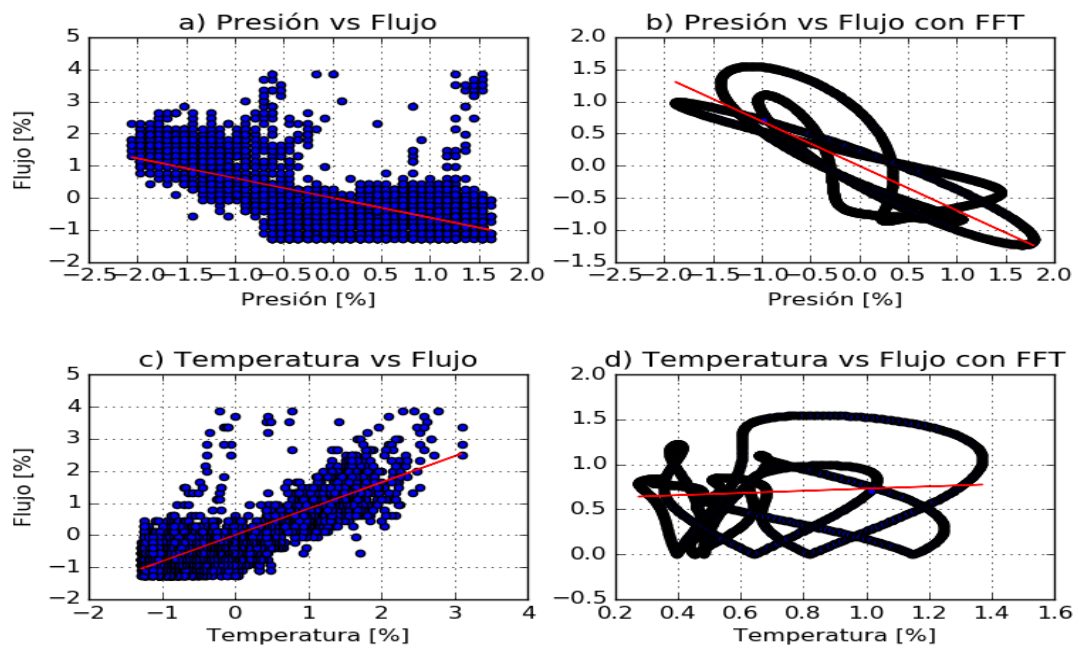


Figura 4.16: Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentan una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d) representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.

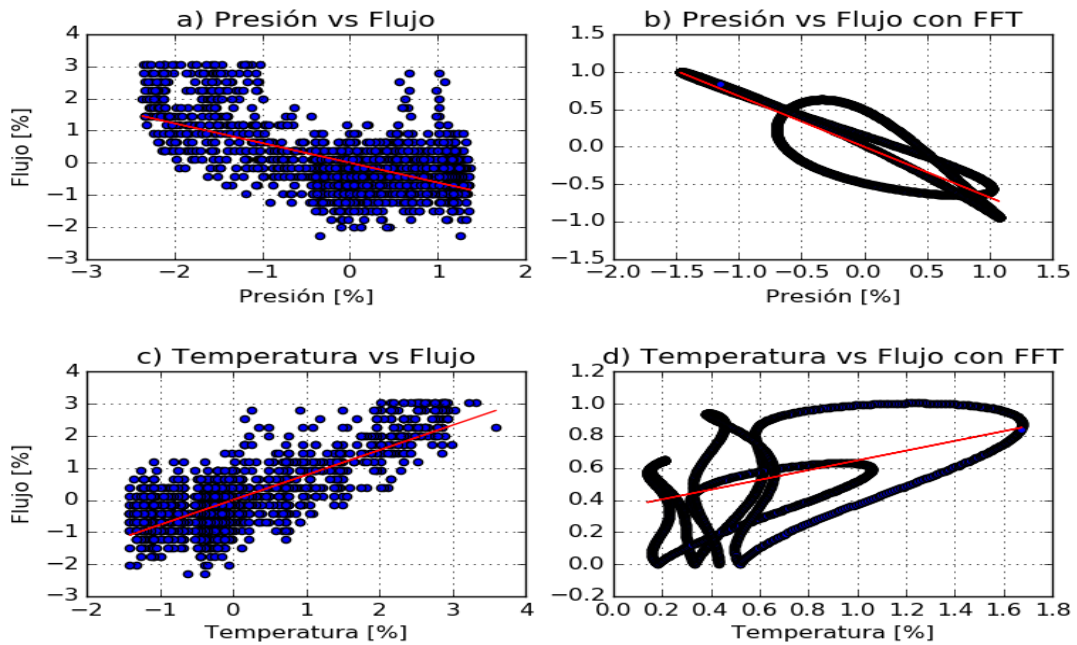


Figura 4.17: Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d) representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.

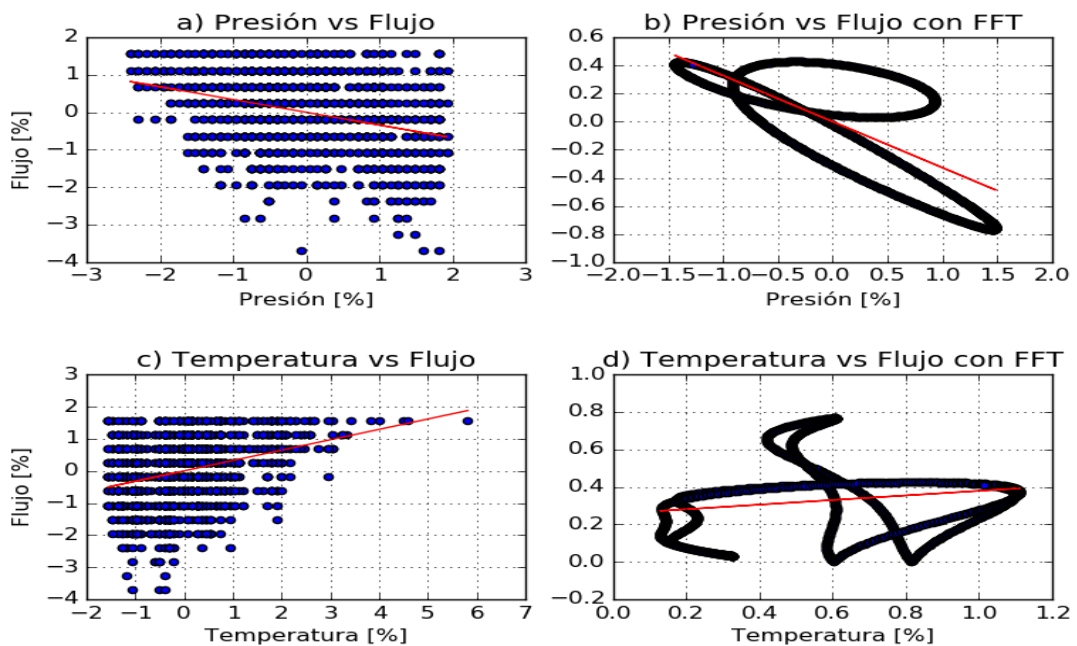


Figura 4.18: Correlación entre el flujo de partículas secundarias y las variables ambientales con los dos modelos aplicados. Las sub-figuras a) y b) representan la correlación entre la presión y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente negativa. Las sub-figuras c) y d) representan la correlación entre la temperatura y el flujo de partículas, presentando una tendencia lineal con pendiente positiva.

De las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, los modelos implementados presentan diferentes tendencias entre las variables ambientales y el flujo de partículas, por lo cual los modelos imple-

mentado no son los mas idóneos para hallar los coeficientes de presión y temperatura. Esto puede ser resultado de la falta de datos que permitan realizar un mejor análisis sobre las variables implementadas, o las consideraciones en los modelos no fueron los adecuados.

4.2.3 Coeficientes de Presión y Temperatura

Utilizando los códigos desarrollados en python, se obtuvieron los coeficientes de presión y temperatura mediante los dos métodos implementados. Los coeficientes encontrados corresponden a los meses de Agosto, Octubre y Noviembre del 2018, se ha considerado también los coeficientes obtenidos con los datos de referencia. En las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, presentamos la corrección realizada al aplicar los coeficientes de presión y temperatura sobre el flujo de partículas registradas por el detector. Podemos observar que las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, están compuesta de 3 sub-figuras.

La sub-figura a), corresponde a la corrección del flujo de partículas aplicando el coeficiente de presión encontrado por los dos modelos implementados. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin la corrección, la línea de color rojo representa la corrección aplicando el coeficiente de presión hallado con el primer modelo y la línea de color negro nos muestra la corrección del flujo aplicando el coeficiente de presión hallado con el segundo modelo.

La sub-figura b), corresponde a la corrección del flujo de partículas aplicando el coeficiente de la temperatura encontrado por los dos modelos implementados. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin la corrección, la línea de color rojo representa la corrección aplicando el coeficiente de la temperatura hallado con el primer modelo y la línea de color negro nos muestra la corrección del flujo aplicando el coeficiente de temperatura hallado con el segundo modelo.

La sub-figura c), corresponde a la corrección del flujo de partículas aplicando los coeficientes de presión y temperatura encontrados por los dos modelos implementados. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin la corrección, la línea de color rojo representa la corrección aplicando los coeficiente de presión y temperatura hallados con el primer modelo y la línea de color negro nos muestra la corrección del flujo aplicando el coeficiente de presión y temperatura hallados con el segundo modelo.

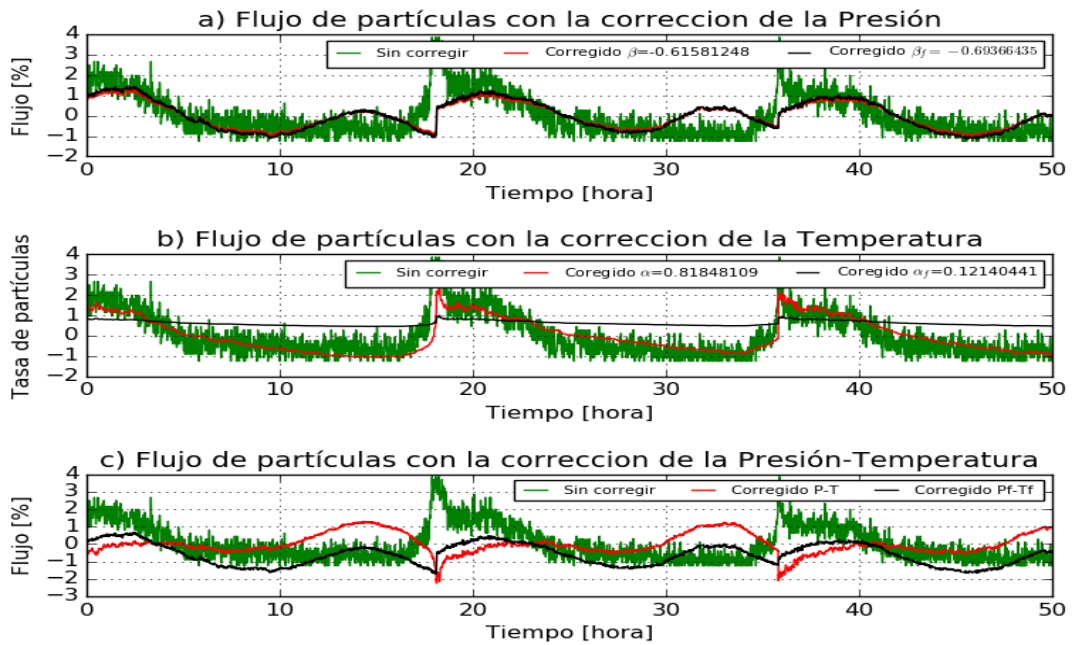


Figura 4.19: Flujo corregido correspondiente al mes de Agosto del 2018. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo

En la Figura 4.19, podemos observar que la corrección al aplicar el coeficiente de presión no sigue la tendencia del flujo de partículas secundarias. La corrección aplicando el coeficiente de temperatura tiene una tendencia similar al flujo de partículas secundarias, podemos inferir que el uso de este coeficiente nos permite obtener una corrección del flujo de partículas secundarias que están llegando hasta el detector. Al aplicar los dos coeficientes a la vez, podemos observar que no sigue la tendencia del flujo de partículas secundarias.

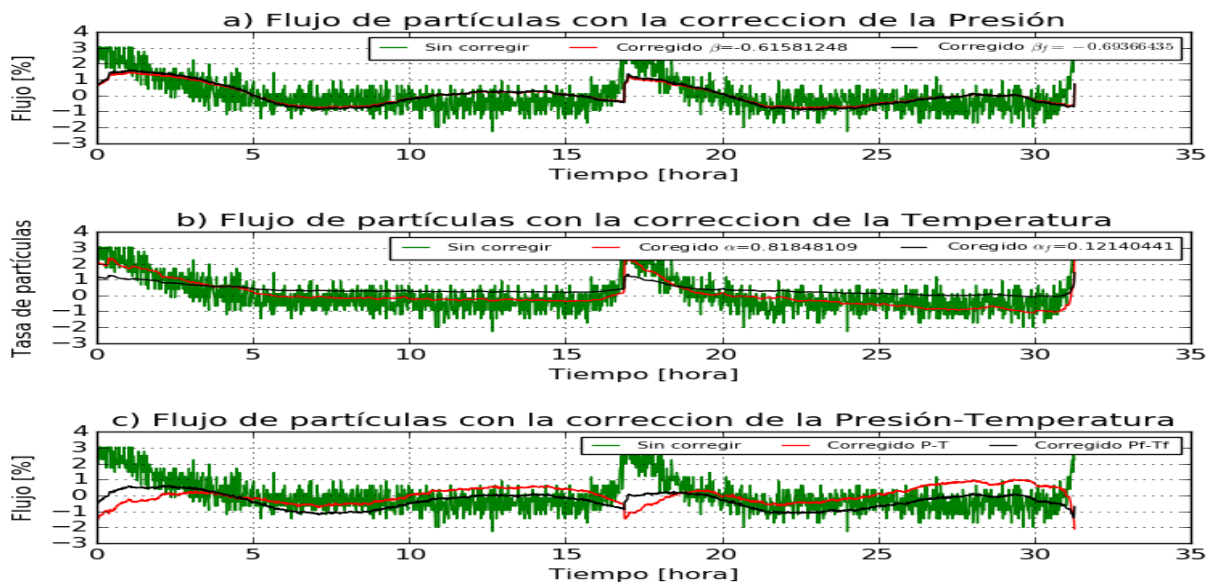


Figura 4.20: Flujo corregido correspondiente al mes de Octubre del 2018. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo

En la Figura 4.20 podemos observar que la corrección al aplicar el coeficiente de presión sigue la tendencia del flujo de partículas secundarias, podemos inferir que este coeficiente nos permite realizar la corrección del flujo de partículas secundarias. La corrección aplicando el coeficiente de temperatura tiene una tendencia similar al flujo de partículas secundarias, de forma similar podemos inferir que con este coeficiente se obtiene una corrección del flujo de partículas secundarias que están llegando hasta el detector. Al aplicar los dos coeficientes al mismo instante podemos observar que no sigue la tendencia del flujo de partículas secundarias, por lo cual no podemos corregir el flujo de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez.

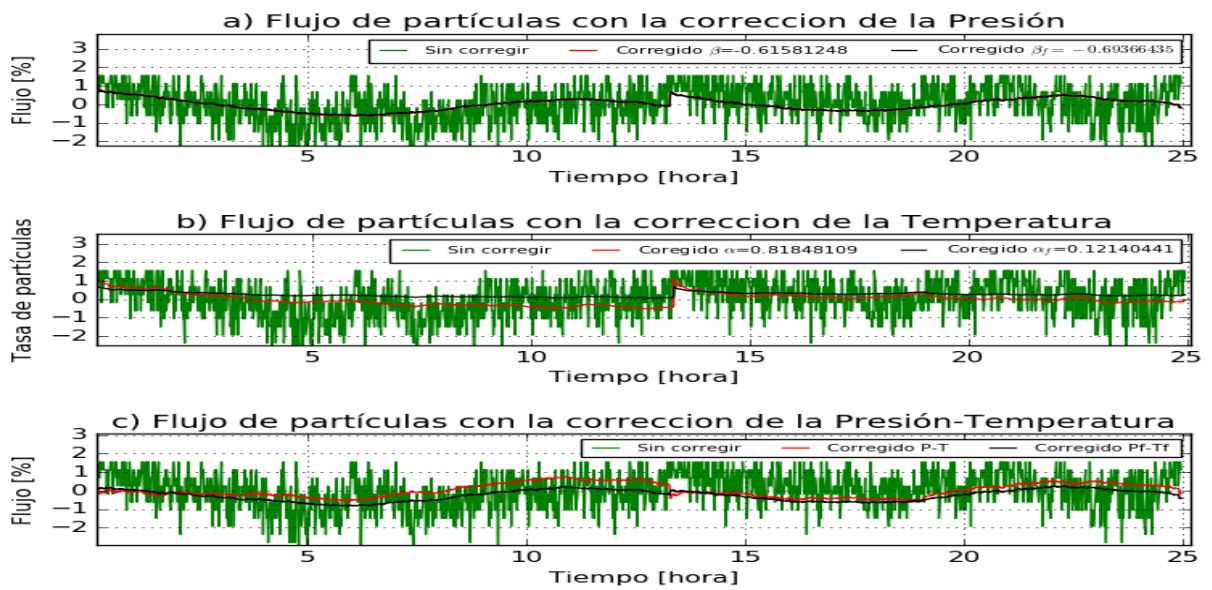


Figura 4.21: Flujo corregido correspondiente al mes de Noviembre del 2018. La sub-figura a) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de presión. La sub-figura b) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando el coeficiente de temperatura. La sub-figura c) corresponde a la corrección del tasa de partículas aplicando los dos coeficientes a la vez. La línea de color verde representa el flujo de partículas sin corrección, la línea de color rojo representa la corrección con el primer modelo. La línea de color negro representa la corrección aplicando el segundo modelo

En la Figura 4.21 podemos observar que la corrección al aplicar el coeficiente de presión parecería ser que sigue la tendencia del flujo de partículas secundarias, pero debido a la falta de datos en esta serie temporal no podemos inferir que con el uso de este coeficiente podamos realizar la corrección del flujo de partículas secundarias. La corrección aplicando el coeficiente de temperatura tiene una tendencia similar al flujo de partículas secundarias, de forma similar analizamos que debido a la falta de datos en esta serie temporal no podemos inferir que con el uso de este coeficiente podamos realizar la corrección del flujo de partículas secundarias.

Al aplicar los dos coeficientes a la vez, observamos que la corrección sigue la tendencia del flujo de partículas secundarias, pero de similar manera por la falta de datos en esta serie temporal no podríamos inferir que se pueda corregir el flujo de partículas aplicando los dos coeficientes en el mismo instante.

En las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, hemos presentado el flujo corregido aplicando el coeficiente de presión (véase ecuación (2.20)) y el coeficiente de temperatura (véase ecuación (2.26)) sobre el flujo de partículas registradas por el detector. Haciendo uso de la ecuación (2.18) hemos aplicado la corrección con las dos variables ambientales sobre el flujo de partículas registradas por el detector.

Observamos que en las tres Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, al aplicar las correcciones individuales siguen la tendencia del flujo de partículas en cierta medida, pero no presenta la tendencia como en las Figuras 3.5. Al aplicar la corrección utilizando los dos coeficientes, podemos observar que no existe una tendencia como se presenta en la Figura 3.5. Este resultado puede estar relacionado con la falta de datos para realizar un mejor análisis en la serie temporal, si consideramos que los datos de referencia han sido adquiridos durante un periodo de 30 días. Otro resultado que implica que los modelos implementados para obtener los coeficientes de presión y temperatura no fueron los adecuados.

La Tabla 4.2, nos presenta los coeficientes de la presión y temperatura obtenidos con el análisis estadístico y la aplicación de la FFT, se incluye el porcentaje de error que existe al comparar la FFT con el análisis estadístico en la obtención de estos coeficientes.

	α	α_f	β	β_f	$\% \alpha$	$\% \beta$
Referencia	0.212198	0.090976	-0.882574	-0.881150	57.12 %	0.16 %
Agosto	0.818481	0.121404	-0.615012	-0.693664	85.16 %	12.78 %
Octubre	0.775374	0.303186	-0.614268	-0.614268	60.89 %	0 %
Noviembre	0.323020	0.122669	-0.34073	-0.327752	62.02 %	3.8 %

Tabla 4.2: Coeficientes ambientales obtenidos con el análisis estadístico y mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier. Observamos que los modelos implementados para el coeficiente de temperatura presentan un error superior al 50 %, lo cual implica que el modelo implementado para hallar el coeficiente de temperatura no es el más adecuado.

De la Tabla 4.2, podemos observar que el error en el segundo modelo que corresponde al coeficiente de temperatura sobrepasa el 50 %. El error en el segundo modelo que corresponde al coeficiente de presión no sobrepasa el 15 %. Estos errores presentados pueden ser el resultado de las condiciones aplicadas sobre las variables ambientales y la energía en el flujo de partículas, o la falta de datos para realizar el análisis correspondiente.

5 CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas en CORSIKA, proporcionaron valores cuantitativos sobre el flujo y la densidad de partículas secundarias que estarían llegando hasta el detector. Si consideramos la relación entre la temperatura y el flujo de partículas que son presentados en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, observamos que la tendencia es linealmente creciente, esto implica que la energía de las partículas secundarias es alta. La teoría [36] explica que las partículas más energéticas, como los muones μ^\pm pueden llegar hasta la superficie de la Tierra siendo las partículas más abundantes, y presentando una tendencia lineal creciente entre la variación de la temperatura y el flujo de partículas. Las Figuras 4.1 y 4.2 presentan el flujo de partículas secundarias que estarían llegando hasta la superficie de la Tierra donde está ubicado el detector. Estos resultados en conjunto nos permiten concluir que la gran mayoría de partículas registradas por el detector ubicado en la Escuela Politécnica Nacional serán muones y en menor medida piones. Para obtener mejores resultados que permitan corroborar estos resultados, es necesario la obtención de una mayor cantidad de datos con los que podemos realizar un mejor análisis, y obtener la matriz de respuesta, la misma que nos permitiría conocer el tipo de partícula que es registrada por el detector.

Considerando el caso particular de un protón y un gamma con energías de 1 TeV, las simulaciones indican que la distribución de partículas secundarias abarca un área de 400 m^2 tal como se indica en las Figuras 4.5 y 4.6, lo que implicaría la instalación de arreglos de detectores que cubran un área mínima de 400 m^2 . Al considerar un flujo de astropartículas que arriban a la atmósfera durante seis horas y considerando la composición química de las astropartículas, sabemos que el elemento más abundante es el hidrógeno en una proporción de 88.26 % del total de astropartículas. Podemos concluir de los resultados obtenidos a partir de las Figuras 4.1 y 4.2, que la mayor cantidad de partículas secundarias al nivel del detector son gammas γ , electrones e^- y positrones e^+ , las energías de estas partículas serán $< 1 \text{ GeV}$. Por otra parte si consideramos únicamente las partículas secundarias con energías $\geq 1 \text{ GeV}$ podemos observar que la mayor contribución está dominada por muones μ^\pm , en menor contribución por electrones e^- , positrones e^+ y piones π^\pm , véase las Figuras 4.1,

4.2. Existirá igualmente una generación de piones neutros π^0 , que decaerán rápidamente en dos gamas (γ), esto se puede observar en la Figura 4.1, donde existe un incremento en la tasa de gamas (γ) con un valor de energía alrededor de 10^8 eV. Se recomienda para el estudio de las partículas secundarias la implementación de arreglos con detectores que logren cubrir áreas aproximadas de 400 a 600 m^2 , sin embargo otra solución es aumentar el nivel (altura) de observación ya que eso permitirá reducir el área de detección, y dependiendo de la inclinación de la EAS estar mas cercanos a la altura donde la EAS alcanza su máximo desarrollo lateral.

La obtención de los coeficientes de presión y de temperatura se encuentran en la Tabla 4.2, estos valores encontrados aplicando dos modelos diferentes, estos coeficientes nos permitió determinar una correlación entre el flujo de partículas detectadas y las variaciones presentadas por la presión y temperatura, esto lo podemos observar en las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21. Los resultados encontrados nos permiten concluir que la relación entre estos parámetros atmosféricos y la tasa de partículas registrada presenta un comportamiento lineal como la teoría predice, pero la tendencia que muestran los valores corregidos no es comparable con los resultados obtenidos con los datos de referencia. Se puede concluir que los modelos implementados para los datos obtenidos por el detector no permiten una adecuada corrección de la tasa de partículas secundarias.

Se recomienda la utilización de un mejor sistema para adquisición de datos, este sistema debe permitir una adquisición continua del flujo de partículas secundarias y las variables ambientales. El registro de las variables ambientales y el flujo de partículas deben estar relacionados en el mismo intervalo de tiempo. El incremento en el tiempo de adquisición permitirá tener un mejor resultado en el análisis de las frecuencias de las variables ambientales y nos permitirá determinar si los modelos lineales entre el flujo de partículas y las variables ambientales es el adecuado.

De la Tabla 4.2 se observa que el porcentaje de error al considerar la FFT para la presión no sobrepasa el 15 %, mientras que en el coeficiente de la temperatura su error sobrepasa el 50 %. Estos errores pueden ser los resultados al considerar únicamente a la presión y temperatura como las variables que afectan al desarrollo de la EAS, también puede ser el resultado de suponer que la columna de aire desde la base del detector hasta la altura donde se genera la creación de EAS tiene el mismo valor de temperatura registrado en la base, entre otras consideraciones.

Recomendamos realizar otras estimaciones que afectan el desarrollo en el flujo de las partículas secundarias, como el campo magnético en la región, la humedad del aire, considerar

que los coeficientes de presión y temperatura no sean constantes entre otros aspectos que puedan afectar al flujo de las partículas secundarias.

Al iniciar con el procesamiento de los datos proporcionados por el detector, observamos que el flujo, la temperatura y la presión registrada por el detector acarrea errores en su adquisición. Estos errores se presentaban desde el inicio de su funcionamiento hasta el instante en que fue suspendido, estos errores en la adquisición de los datos por parte de la red Pitaya dieron como resultado una mínima cantidad de datos para implementar los modelos descritos. Con respecto al funcionamiento de la red Pitaya utilizada en el detector, parece que el funcionamiento varía en el tiempo. Esto puede deberse a las condiciones climáticas donde se hallaba el detector o desgaste debido a condiciones ambientales.

Se recomendó anteriormente la implementación de un mejor sistema de adquisición de datos, al igual que mejores sensores ambientales que permitan el registro de estas variables con intervalos de tiempo menores a un minuto. Se recomienda que una vez implementado el nuevo sistema para la adquisición de datos, se apliquen los dos modelos que permiten corregir el flujo de partículas, esto nos permitirá determinar la fiabilidad de los modelos o descartarlos. Otra recomendación es que los datos registrados sean almacenados en archivos del tipo CSV, esto permitirá un mejor manejo de los datos registrados por el detector. Las recomendaciones para un mejor estudio del flujo de partículas secundarias son la implementación de un mínimo de cuatro detectores, estos permitirán determinar variables como el ángulo de las partículas secundarias que atraviesan el detector, la determinación de varias EAS que estén arribando hasta los detectores, un mejor registro en las variables ambientales, etc. Para una mejor estadística con los datos obtenidos por el detector, la adquisición de los datos debe ser continua, y en lo posible realizarse en un período de tiempo mínimo de tres meses. Estos datos podrían ser almacenados usando un servidor, esto nos permitiría ingresar y descargar los datos desde cualquier lugar para llevar a cabo los diferentes análisis. Se recomienda completar el estudio de la variación de la tasa de partículas considerando la variación de la humedad en el sitio donde está ubicado el detector, también se podría considerar el estudio relacionando la tasa de partículas secundarias con las precipitaciones producidas, buscando un posible efecto en la tasa de partículas secundarias detectadas. Se recomienda considerar la ubicación de los detectores, estos detectores deben estar alejados de la ciudad, ubicados principalmente en grandes extensiones de terreno donde no existan obstáculos que puedan perturbar los diferentes sensores. De esta forma se obtendrían valores más confiables que permitirían realizar un mejor análisis y entendimiento de las lluvias extensas atmosféricas.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Otaola, *Los rayos cósmicos : Mensajeros de las estrellas*. Mexico: Fondo de Cultura Economica, 1994, ISBN: 968-16-3739-9.
- [2] D. Smart y M. Shea, «A review of geomagnetic cutoff rigidities for earth-orbiting spacecraft», *Advances in Space Research*, vol. 36, págs. 2012-2020, dic. de 2005. DOI: 10.1016/j.asr.2004.09.015.
- [3] V. F. Hess, *Penetrating Radiation in seven free ballon flights 1912*.
- [4] J. G. Roederer, *LAS PRIMERAS INVESTIGACIONES DE RADIACIÓN CÓSMICA EN LA ARGENTINA 1949-1959: UN RELATO PERSONAL*, nov. de 2002. dirección: <http://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy71/investigaciones.htm>.
- [5] A. Uryson, *Ultra High Energy Cosmic Rays: A new tool for astrophysical research*. Nova Science Publishers, first edition, 2010.
- [6] D. O. Terry y G. Gerard, *Planets, Stars and Stellar Systems*, ene. de 2013.
- [7] C. Grupen, *Astroparticle physics*. Berlin New York: Springer, 2005, ISBN: 3-540-25312-2.
- [8] P. Mészáros, *The high energy universe : Ultra-high energy events in astrophysics and cosmology*. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2010, ISBN: 978-0-521-51700-3.
- [9] A. A. Pacini, *Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface*, oct. de 2016.
- [10] D. Perkins, *Particles Astrophysics, Oxford University, Second Edition 2009*.
- [11] Andrew Davis, *An Overview of Cosmic-Ray Elemental Composition*. dirección: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ACENews/ACENews83.html>.
- [12] V. Liccardo, *Production of chemical elements in Astrophysics*, nov. de 2015.
- [13] R. Schlickeiser, *Cosmic ray astrophysics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, ISBN: 9783662048146.

- [14] L. Dorman, *Cosmic rays in the earth's atmosphere and underground*, ép. Astrophysics and Space Science Library. Springer Netherlands, 2013, ISBN: 9781402021138. dirección: <https://books.google.com.ec/books?id=2ejSBwAAQBAJ>.
- [15] T. STANEV, *ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS: ORIGIN AND PROPAGATION*.
- [16] W. F. Hanlon, *THE ENERGY SPECTRUM OF ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS MEASURED BY THE HIGH RESOLUTION FLY'S EYE OBSERVATORY IN STEREOSCOPIC MODE*, 2008.
- [17] Angélica Bahena Blas y Wolfgang Bietenholz, *Las partículas más poderosas del Universo*.
- [18] A. Letessier-Selvon y T. Stanev, *Ultrahigh Energy Cosmic Rays*, feb. de 2011.
- [19] Antonio Ferriz Mas y Juan A. Garzón Heyd, *Los rayos cósmicos: una nueva ventana al universo*, Febrero 2018. dirección: <http://revista.iaa.es/content/los-rayos-c%C3%B3smicos-una-nueva-ventana-al-universo>.
- [20] T. Oswalt, *Planets, stars and stellar systems*. Dordrecht New York: Springer, 2013, ISBN: 978-94-007-5611-3.
- [21] V. L. GINZBURG y S. I. SYROVATSKII, *THE ORIGIN OF COSMIC RAYS*, P. N. Lebedev Institute of Physics Academy of Sciences of the USSR, Moscow.
- [22] M. Longair, *High energy astrophysics*. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2011, ISBN: 978-0-521-75618-1.
- [23] L. A. Anchordoqui, *Ultrahigh energy cosmic rays: Facts, myths, and legends*, 2011. arXiv: 1104.0509 [hep-ph].
- [24] S. Cartwright, *Senior Lecturer in Particle Physics and Astrophysics*, 2008. dirección: <https://www.sheffield.ac.uk/physics/people/academic/susan-cartwright>.
- [25] P. K. F. Grieder, *Extensive air showers : High energy phenomena and astrophysical aspects : A tutorial reference manual and data book*. Berlin: New York Springer, 2010, ISBN: 978-3-540-76941-5.
- [26] R. Weast, *Crc handbook of chemistry and physics : A ready-reference book of chemical and physical data*. Cleveland: CRC Press, 1974, ISBN: 0878194541.
- [27] Dirección: <https://www.ikp.kit.edu/corsika/index.php>.
- [28] P. Sokolsky, *Introduction to ultrahigh energy cosmic ray physics*. Boulder, Colo: Westview, 2004, ISBN: 978-0-8133-4212-2.

- [29] *Radiation Protection in Nuclear Medicine*, Febrero 2018. dirección: <https://es.slideshare.net/brucelee55/radiation-protection-in-nuclear-medicine-5578723>.
- [30] H. Stephanie, *Studies of cosmic-ray electrons with the h.e.s.s. experiment using an advanced reconstruction technique*. 2010.
- [31] K. I. of Technology, *Detecting theory*. dirección: <https://cosmicray.com.au/how-to-detect-a-cosmic-ray>.
- [32] Mok, *Cosmic rays : Climate, weather, and applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2012, ISBN: 9781622573301.
- [33] C. Grupen, *Handbook of particle detection and imaging*. Berlin New York: Springer, 2012, ISBN: 978-3-642-13270-4.
- [34] J. Matthews, «A Heitler model of extensive air showers», *Astropart. Phys.*, vol. 22, págs. 387-397, 2005. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2004.09.003.
- [35] E. A. Yurina, A. G. Bogdanov, A. N. Dmitrieva, R. P. Kokoulin y V. V. Shutenko, «Variations in the intensity of cosmic ray muon bundles according to DECOR data 2012-2017», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1189, pág. 012010, mar. de 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1189/1/012010. dirección: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012010>.
- [36] R. Mendonça, J.-P. Raulin, E. Echer, V. Makhmutov y G. Fernández, «Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements», *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, vol. 118, págs. 1403-1409, abr. de 2013. DOI: 10.1029/2012JA018026.
- [37] N. Romero, «Modulación del flujo de rayos cósmicos por actividad solar», jun. de 2012.
- [38] M. Barrantes, J. F. ValdÃ-Galicia, O. Musalem, A. Hurtado, M. Anzorena, R. GarcÃa, R. Taylor, Y. Muraki, Y. Matsubara, T. Sako, Y. Sasai, N. Hinaro, N. Tateiwa, H. Tsujihara, L. X. GonzÃlez, E. Ortiz, S. Shibata, K. Watanabe y T. Sakai, «Atmospheric corrections of the cosmic ray fluxes detected by the Solar Neutron Telescope at the Summit of the Sierra Negra Volcano in Mexico», en, *GEOFÍSICA INTERNACIONAL*, vol. 57, págs. 253-275, dic. de 2018, ISSN: 0016-7169. dirección: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692018000400253&nrm=iso.

- [39] K. Kudela, M. Storini, M. Hofer y A. Belov, «Cosmic rays in relation to space weather», *Space Science Reviews*, vol. 93, págs. 153-174, abr. de 2012. DOI: 10.1023/A:1026540327564.
- [40] S. Cecchini y M. Spurio, «Atmospheric muons: Experimental aspects», *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 1, ago. de 2012. DOI: 10.5194/gi-1-185-2012.
- [41] M. D. Berkova, A. V. Belov, E. A. Eroshenko y V. G. Yanke, «Temperature effect of the muon component and practical questions for considering it in real time», *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 75, n.º 6, págs. 820-824, jun. de 2011, ISSN: 1934-9432. DOI: 10.3103/S1062873811060086. dirección: <https://doi.org/10.3103/S1062873811060086>.
- [42] Ömer Penek, *Calculation of the Cherenkov Light Yield for High-Energy Particle Cascades*. dirección: https://www.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaarvzm.
- [43] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics*, 3rd ed. New York, NY: Wiley, 1999, ISBN: 9780471309321. dirección: <http://cdsweb.cern.ch/record/490457>.
- [44] R. C. Shellard, «First results from the Pierre Auger Observatory», en, *BRAZILIAN JOURNAL OF PHYSICS*, vol. 36, págs. 1184-1193, dic. de 2006, ISSN: 0103-9733. dirección: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-97332006000700012&nrm=iso.
- [45] Cando Cañar Jonathan David y Rosero Pozo Carlos Alberto, *Diseño e implementación de una estación autónoma de monitoreo de rayos cósmicos y variables ambientales*. dirección: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19588>.

A INSTALACIÓN DE CORSIKA

Se descarga el paquete computacional CORSIKA desde la página <https://www.ikp.kit.edu/corsika/>. En la página presenta los programas previos que deben ser instalados para el correcto funcionamiento de CORSIKA. Se descomprime del archivo descargado y se sigue la siguiente secuencia:

```
david@Zeus:~/Escritorio/Corsika$ tar -xzvf corsika-76400.tar.gz
```

Descomprimido el archivo se ingresa a la carpeta corsika-76400 y se ejecuta el comando `./coconut`

```
david@Zeus:~/Escritorio/Corsika/corsika-76400$ ./coconut
```

Se despliega una ventana con las opciones que se presentan a continuación (En este caso para el ejemplo se ha tomado algunos valores por defecto) A) seleccionar el sistema operativo del computador B) Modelo de interacción hadrónica a utilizar C) Modelo de baja energía D) Modelo de detector E) Programas adicionales utilizados en CORSIKA F) Damos por defecto (yes) al comando G) Seleccionamos el comando f para iniciar la instalación de CORSIKA

Se presentan varias líneas mientras se instala CORSIKA, si la instalación se llevó sin ningún problema se presentará un mensaje de instalación con éxito

```
|=====|
|                                     |
|               Welcome to COCONUT (v3.1)               |
|               -- the CORSIKA CONfiguration Utility --  |
|                                     |
```

```

=====|
|
|
|         create an executable of a specific CORSIKA version
|
|
|
|         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 64bit mode ?
  1 - Force 32bit 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

```

-----
Which high energy hadronic interaction model do you want to use ?
  1 - DPMJET-III (2017.1) with PHOJET 1.20.0
  2 - EPOS LHC
  3 - NEXUS 3.97
  4 - QGSJET 01C (enlarged commons) [DEFAULT]

```


- 5 - QGSJETII-04
- 6 - SIBYLL 2.3c
- 7 - VENUS 4.12

r - restart (reset all options to cached values)
x - exit make

(only one choice possible): 5

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

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): 1

options: TIMEAUTO GHEISHA HORIZONTAL QGSJETII

Which additional CORSIKA program options do you need ?

- 1a - Cherenkov version

- 1b - Cherenkov version using Bernlohr IACT routines (for telescopes)
- 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 - LPM-effect without thinning
- 2a - THINning version (includes LPM)
- 2b - MULTIPLE THINning version (includes LPM)
- 3 - PRESHOWER version for EeV gammas
- 4 - NEUTRINO version
- 4a - NUPRIM primary neutrino version with HERWIG
- 4b - ICECUBE1 FIFO version
- 4c - ICECUBE2 gzip/pipe output
- 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 - VIEWCONE version
- 8a - shower PLOT version (PLOTSH) (only for single events)
- 8b - shower PLOT(C) version (PLOTSH2) (only for single events)
- 8c - ANALYSIS HISTos & 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
- 9b - RIGIDITY Ooty version rejecting low-energy primaries entering

- Earth-magnetic field
- 10a - DYNamic intermediate particle STACK
- 10b - Remote Control for Corsika
- a - CONEX for high energy MC and cascade equations
- b - PARALLEL treatment of subshowers (includes LPM)

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)
l - hit Auger detector (steered by AUGSCT)

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
Are you sure you want to continue with these current option selection:

yes or no ? (default: yes) > yes

Your final selection to build CORSIKA is:

options: TIMEAUTO GHEISHA HORIZONTAL QGSJETII

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

VARIAS LINEAS MIENTRAS SE INSTALA CORSIKA

--> "corsika76400Linux_QGSII_gheisha" successfully installed in :
/home/david/Escritorio/Corsika/corsika-76400/run/

--> You can run CORSIKA in /home/david/Escritorio/Corsika/corsika-76400/run/

using for instance :

./corsika76400Linux_QGSII_gheisha < all-inputs > output.txt

B SIMULACIÓN DE UNA HORA EN CORSIKA MEDIANTE CRKTOOLS

Para realizar la simulación del flujo de astropartículas durante una hora, se debe seguir la siguiente secuencia se tomarán algunos valores por defecto para el ejemplo

Se ejecuta el siguiente comando: A) *do_sims* se despliega una ventana con diferentes opciones B) Ingresareln

```
useradmin@cepraxieracli:~$ do_sims.sh -w /home/useradmin/Fluencia_Ecuador/run/ -p ejemplo -
```

```
# Working dir                = /home/useradmin/Fluencia_Ecuador/run/
# Project name               = ejemplo
# Flux time                  = 3600
# CORSIKA version           = 76400
# High Energy Interaction Model = QGSII
# User name                  = david
# Site location              = quito
# Number of processors       = 8
# Volumetric detector mode for = quito
# Altitude                   = 285000
# Corsika executable file (corsika76400Linux_QGSII_gheisha)
```

```
### Shower parameters ###
```

```
Low edge of zenith angle (THETAP) [deg]?
```

```
<THETPR(1) 0>: 0
```

```
High edge of zenith angle (THETAP) [deg]?
```

```
<THETPR(2) 90>: 90
```

```
Lower limit of the primary particle energy (ERANGE) [GeV]?
```

<LLIMIT 5>: 12.48

Upper limit of the primary particle energy (ERANGE) [GeV]?

<ULIMIT 1000000>: 1000000

Site parameters

Use rigidity cutoff? (0=no, Rigidity value=yes [GV])?

< 5>: 12.48

Atmospheric model selection. Start number with 'E' to use external atmospheres module?

<ATMOD 19>: 19

Horizontal comp. of the Earth's mag. field (MAGNET) [North,muT],

see values at <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcIGRFWMM?>

<BX 0>: 26.835

Vertical comp. of the Earth's mag. field (MAGNET) [downwards,muT]?

<BZ 0>: 10.499

VARIAS LINEAS DE COMPLILACIÓN

Fluxes

Flux time: 3600 s (3883294 showers, 12.48<E<1000000, 0<q<90 at site quito (h=2850, atm=19),

0	1	H	3428612	->	-----
4	2	He	414007	->	-----
12	6	C	10479	->	-----
16	8	O	9959	->	-----
7	3	Li	4700	->	-----
24	12	Mg	2443	->	-----
11	5	B	2262	->	-----
28	14	Si	2138	->	-----
14	7	N	2008	->	-----
20	10	Ne	1892	->	-----
56	26	Fe	1493	->	-----
9	4	Be	1135	->	-----
32	16	S	400	->	-----
27	13	Al	315	->	-----

23 11 Na 273 -> -----
40 20 Ca 204 -> -----
19 9 F 174 -> -----
52 24 Cr 136 -> -----
40 18 Ar 131 -> -----
48 22 Ti 125 -> -----
55 25 Mn 113 -> -----
39 19 K 78 -> -----
51 23 V 66 -> -----
31 15 P 61 -> -----
35 17 Cl 53 -> -----
45 21 Sc 37 -> -----

Una vez terminado, son creados varios archivos del tipo ****.sh que contienen la información de las astropartículas

go-ejemplo-all-01.sh
go-ejemplo-all-02.sh
go-ejemplo-all-03.sh
go-ejemplo-he.sh
go-ejemplo-pr-1.sh
go-ejemplo-pr-2.sh
go-ejemplo-pr-3.sh
go-ejemplo-pr-4.sh
go-ejemplo-pr-5.sh
go-ejemplo-pr-6.sh
go-ejemplo-pr-7.sh
go-ejemplo-pr-8.sh

Se ejecuta mediante

```
useradmin@cepraxieracli:~/Fluencia_Ecuador/run$ ./go-ejemplo-he.sh
```

este archivo se convierte en un archivo xxxx.run y su información es guardada en la carpeta ejemplo con extensión xxxx.bz2

```
DAT070402-0402-00000049978.lst.bz2
```

```
DAT070402.bz2
```

```
DAT070402.long
```

Se descomprimen los archivos y se utiliza únicamente el archivo binario del tipo DAT**** en cual se crea un link simbólico y aplicando el programa corsikaread se genera un archivo fort.7 que será procesado con el programa trans.pl generando el archivo SH que contiene la información de las EAS en forma de archivos shower*.dat.

```
useradmin@cepraxieracli:~/Fluencia_Ecuador/run/ejemplo/$./corsikaread <ejemplo> ejemplo.txt
```

```
useradmin@cepraxieracli:~/Fluencia_Ecuador/run/ejemplo/$perl trans.pl
```

```
useradmin@cepraxieracli:~/Fluencia_Ecuador/run/ejemplo/SH/
```


C CÓDIGOS EN PYTHON PARA PROCESAR LAS SIMULACIONES

El siguiente código procesa los datos obtenidos por las simulaciones que se encuentran en la carpeta SH una vez que la extracción de los códigos binarios han finalizado. El programa crea un solo archivo con nombre `generador.dat` que contiene la información de las EAS iniciadas por los primarios. Luego son clasificados por tipo de partícula con su respectiva energía y posición de arribo se crean varios archivos que contienen únicamente la información referente a cada tipo de partícula.

```
import subprocess
import re
import math
file_names = []
for i in range(1,57000):
    file_names.append( "shower"+str(i)+".dat")

####Crear el archivo ###
with open("generador.dat", 'w') as outfile:
    for fname in file_names:
        with open(fname) as infile:
            for line in infile:
                outfile.write(line)
            #outfile.write('\n')
outfile.close()

#####
f1=open("generador.dat", "r")
```

```
content=f1.read().splitlines()
f=open("gamma.dat","w")
for line in content:
    if re.match("^[1]",line):
        f.write(line+"\n")
f.close()
```

```
f2=open("electron.dat","w")
for line in content:
    if re.match("^[3]",line):
        f2.write(line+"\n")
    if re.match("^[2]",line):
        f2.write(line+"\n")
f2.close()
```

```
f4=open("muon.dat","w")
for line in content:
    if re.match("^[5]",line):
        f4.write(line+"\n")
    if re.match("^[6]",line):
        f4.write(line+"\n")
f4.close()
```

```
f6=open("pion.dat","w")
for line in content:
    if re.match("^[9]",line):
        f6.write(line+"\n")
    if re.match("^[8]",line):
        f6.write(line+"\n")
    if re.match("^[7]",line):
```

```

        f6.write(line+"\n")
f6.close()

#####
# Energias
#####

m1=open('Energia_gamma.dat','w')
with open('gamma.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        n=round(float(line.split()[7]),2)
        m1.write(str(n)+'\n')
m1.close()

m1=open('Energia_e.dat','w')
with open('electron.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        n=round(float(line.split()[7]),7)
        m1.write(str(n)+'\n')
m1.close()

m1=open('Energia_pion.dat','w')
with open('pion.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        n=round(float(line.split()[7]),7)
        m1.write(str(n)+'\n')
m1.close()

m1=open('Energia_muon.dat','w')
with open('muon.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        n=round(float(line.split()[7]),7)

```

```

        m1.write(str(n)+'\n')
m1.close()

#####
# Posicion x e y

#####
m1=open('gamma_x_y.dat','w')
with open('gamma.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        k=line.split()[4]
        l=line.split()[5]
        h=float(k)
        p=float(l)
        z=math.sqrt(h*h+p*p)
        m1.write(str(z/100.0)+'\n')
m1.close()

m1=open('e_x_y.dat','w')
with open('electron.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        k=line.split()[4]
        l=line.split()[5]
        h=float(k)
        p=float(l)
        z=math.sqrt(h*h+p*p)
        m1.write(str(z/100.0)+'\n')
m1.close()

m1=open('pion_x_y.dat','w')

with open('pion.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        k=line.split()[4]
        l=line.split()[5]

```

```

        h=float(k)
        p=float(l)
        z=math.sqrt(h*h+p*p)
        m1.write(str(z/100.0)+'\n')
m1.close()

```

```

m1=open('muon_x_y.dat','w')
with open('muon.dat','r') as infile:
    for line in infile:
        k=line.split()[4]
        l=line.split()[5]
        h=float(k)
        p=float(l)
        z=math.sqrt(h*h+p*p)
        m1.write(str(z/100.0)+'\n')
m1.close()

```

```

f1.close()

```

C.1 PROGRAMA IMPLEMENTADO PARA OBTENER LOS GRÁFICOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DE LAS EAS

Cuando se encuentran creados los archivos que contienen la energía de arribo se utiliza el siguiente código. Este permite graficar la distribución de energía de las partículas secundarias clasificadas por el tipo de partícula, el bins utilizado es igual a 10 en escala logarítmica.

```

import numpy as np
import scipy.stats as st

```

```

import matplotlib.pyplot as plt
from math import *
from numpy import *
import time
from decimal import *
from matplotlib.gridspec import GridSpec
from mpl_toolkits.axes_grid1.inset_locator import zoomed_inset_axes
from matplotlib.ticker import ScalarFormatter
from datetime import date
import matplotlib.patches as patches
plt.style.use('classic')
#%%matplotlib notebook

def extraer_filter(filename):
    datos = loadtxt(filename, float)
    energia = []
    for i in range (0,len(datos)):
        energia.append(datos[i])
    return energia

energia_electrones=extraer_filter('Energia_e.dat')
energia_gammas=extraer_filter('Energia_gamma.dat')
energia_piones=extraer_filter('Energia_pion.dat')
energia_muones=extraer_filter('Energia_muon.dat')

all_data=np.concatenate((energia_gammas,energia_electrones,
energia_piones,energia_muones), axis=None)

fig=plt.figure(figsize=(6.0, 6.0), dpi=100)
fig.patch.set_facecolor('white')
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)

ax1.hist(energia_gammas,bins =10 ** np.linspace(np.log10(1e-4),

```

```

np.log10(1e3), 100),

    density=False,histtype='step',stacked=True,

    fill=False,linewidth=2.0,color='r',label='\gamma$')

ax1.hist(energia_piones,bins = 10 ** np.linspace(np.log10(1e-4),

np.log10(1e3), 100),

    density=False,histtype='step',stacked=True,

    fill=False,label='\pi^{\pm}$',linewidth=2.0,color='green')

ax1.hist(energia_muones,bins = 10 ** np.linspace(np.log10(1e-4),

np.log10(1e3), 100),

    density=False,histtype='step',stacked=True,

    fill=False,linewidth=2.0,color='c',label='\mu^{\pm}$')

ax1.hist(energia_electrones,bins = 10 **

np.linspace(np.log10(1e-4), np.log10(1e3), 100),

    density=False,histtype='step',stacked=True,

    fill=False,linewidth=2.0,color='m',label='$e^{\pm}$')

ax1.hist(all_data,bins = 10 ** np.linspace(np.log10(1e-4),

```

```

np.log10(1e3), 100),

    density=False,histtype='step',stacked=True,

    fill=False,linewidth=2.0,color='k',label='$All$')

plt.gca().set_xscale("log")
plt.gca().set_yscale("log")
ax1.set_ylim(1e0,1e7)
ax1.legend(loc=1,fontsize=10.,ncol=2)
ax1.set_xlabel('$\mathrm{Energía(GeV)}$',fontsize=12.)

ax1.set_ylabel('$\mathrm{Flujo \ \ de \ \ partículas \ \ secundarias \ \ }$'
[m^{-2}s^{-1}}]$',fontsize=12.)

plt.title("Carbono con energías entre 12.47 [GeV] y  $10^6$  [GeV]",fontsize=12)
plt.grid(True,linestyle=':')

plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.18, left=0.15, right=0.98,

hspace=0.5,wspace=0.2)
plt.show()

```

C.2 PROGRAMA IMPLEMENTADO PARA OBTENER LOS GRÁFICOS DE LAS POSICIONES DE LAS EAS

Con los archivos obtenidos de las posiciones y la utilización del siguiente código se puede obtener las gráficas de la distribución de las partículas secundarias respecto al centro de las EAS.


```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

filename1 = "muon_x_y.dat"
filename2 = "e_x_y.dat"
filename3 = "pion_x_y.dat"
filename4 = "gamma_x_y.dat"

data1 = np.loadtxt(filename1)
data2 = np.loadtxt(filename2)
data3 = np.loadtxt(filename3)
data4 = np.loadtxt(filename4)

hist, bin_edges1 = np.histogram(data1,'scott')
hist, bin_edges2 = np.histogram(data2, 'fd')
hist, bin_edges3 = np.histogram(data3, 'sqrt')
hist, bin_edges4 = np.histogram(data4, 'scott')

plt.hist(data1, bins=bin_edges1,histtype='step',label="$\mu\pm$")
plt.hist(data2, bins=bin_edges2,histtype='step',label="$e\pm$")
plt.hist(data3, bins=bin_edges3,histtype='step',label="$\pi\pm$")
plt.hist(data4, bins=bin_edges4,histtype='step',label="$\gamma$")

plt.ylabel("Densidad de partículas [ $m^{-2}$ ]")
plt.xlabel("Distancia al núcleo [m]")
#plt.xscale('log')
plt.yscale('log')
plt.xlim(1,5e4)
plt.ylim(10, 5e6)
plt.legend()
plt.title("Helio con energías entre 12.47 [GeV] y  $10^6$  [GeV]")
plt.grid(True,linestyle=':')
plt.show()

```

D PROGRAMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL DETECTOR

Los datos obtenidos por el detector están entregados en forma de caracteres, con el siguiente programa se une todos los archivos generados por un período determinado en un solo archivo.

```
import subprocess
import re

file_names = []
for i in range(1,299):
    file_names.append( "/home/david/Esritorio/Datos_rate/rate_datos/agosto/1/rate
                        _agos_0_"+str(i)+".dat")

with open("/home/david/Esritorio/Data/August/2018_8_6/detec_agosto
.dat", 'w') as outfile:
    for fname in file_names:
        with open(fname) as infile:
            for line in infile:
                outfile.write(line)
                #outfile.write(strip('\n'))
outfile.close()
```

Donde el usuario fija el número de archivos creados en el periodo. Luego que el archivo

se ha creado, se aplica el siguiente programa que verifica que existe un número exacto de 60 líneas correspondiente a los datos de la tasa de partículas, si no cumple ésta condición, no se considera ese minuto adquirido. El resultado es un archivo que contiene la tasa de partículas adquiridas y con el promedio correspondiente en un minuto.

```
import os
import numpy as np

def main(args):
    nombres=[]
    for fn in os.listdir('.'):
        if os.path.isfile(fn):
            #print (fn)
            nombres.append(fn)
            nombres.sort()
    print nombres[1:]

    with open('/home/david/Escritorio/Data/August/2018_8_6/agosto_r
ate_prom.dat', 'w') as outfile:
        for fname in nombres[1:]:
            li=0
            j=0
            pul=[]
            with open(fname) as file:
                for line in file:
                    i=True
                    li=li+1
                    #print(li)
                    if li>11:
                        vec=np.fromstring(line, dtype=int, sep=' ')
                        j=j+1
                    #print (vec)
```

```

if len (vec)==1:
pul.append(vec[0])

#print(pul)

if len(vec)==0:
i=False
if i==False:
if j==61:
tex=np.array(pul)
a=round(np.mean(tex),0)
#print(a)
outfile.write(str(a)+"\n")
j=0
pul=[]

return 0

if __name__ == '__main__':
import sys
sys.exit(main(sys.argv))

```

Luego con los siguientes dos programas obtenemos la presión y temperatura correspondientes a los valores de la tasa de partículas

```

lista = [];
def Variable(str, file):

for line in file:
for part in line.split():
if str in part:
lista.append(line);
return lista

file1=open("/home/david/Escritorio/Data/August/2018_8_6/pres_agosto.dat","w")
file2=open("detec_agosto.dat","r")

```

```
datos2=Variable("Presión",file2)
```

```
for i2 in datos2:  
    j2=list(i2)  
    separador=""  
    k2=str(separador.join(j2[11:17]))  
    # print (k2)  
    file1.write(str(k2)+"\n")  
file2.close()  
file1.close()
```

```
file4=open("/home/david/Escritorio/Data/August/2018_8_6/temp_agosto.dat","w")
```

```
lista = [];
```

```
def Variable(str, file):
```

```
    for line in file:  
        for part in line.split():  
            if str in part:  
                lista.append(line);  
    return lista
```

```
file2=open("detec_agosto.dat","r")
```

```
datos=Variable("Temperatura",file2)
```

```
for i1 in datos:  
    j1=list(i1)  
    separador=""  
    k1=str(separador.join(j1[15:20]))  
    # print (k1)
```

```
file4.write(str(k1)+"\n")
```

```
file2.close()
```

```
file4.close()
```

Una vez obtenidos los valores de la tasa de partículas, la presión y la temperatura, se aplica un programa que permite corregir los valores en la tasa detectada. Se ha considerado la variación de la desviación estándar presente en los datos de referencia para realizar este filtro.

```
import numpy as np # importando numpy
from scipy import stats # importando scipy.stats
import pandas as pd
A=np.loadtxt('agosto2.dat',skiprows=0)
B,C,D=np.loadtxt('agosto2.dat',skiprows=0,unpack=True)
archivo1=open('corregido.dat','w')
print(np.mean(B))
print(np.std(B))
print(len(A))
for j in range(0,len(A)):
    if A[j,0]<=210 and A[j,0]>=180:
        m=A[j,0:]
        archivo1.write(" ".join(map(str,m))+"\n")
        #archivo1.write(m)
        #print(m)
```

Con los valores corregidos se aplica el siguiente programa que normaliza los valores de presión, temperatura y tasa de partículas, para luego aplicar la transformada rápida de Fourier y su inversa con estos datos se obtiene el coeficiente de presión y temperatura, para luego aplicar la respectiva corrección, dando como resultado las gráficas correspondientes. Python implementa la librería que permite realizar la transformada rápida de Fourier mediante el comando `fft` para un sistema de datos discretos N , está `fft` se define como:

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-2\pi j \frac{kn}{N}} x[n]$$

y su transformada inversa se puede calcular mediante el comando `ifft`, que esta definida como:

$$n[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-2\pi j \frac{kn}{N}} y[k]$$

Python permite generalizar el intervalo de frecuencia en caso de no existir un valor de $N = 2^n$ valores mediante la librería `fftfreq`

```
import numpy as np
from scipy.fftpack import fft, rfft, irfft, fftfreq
import pylab as plt
#from sklearn import linear_model
#from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
import matplotlib.pyplot as plt
#from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn import linear_model
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import stats
plt.style.use('classic')
#####
Nor=np.loadtxt('corregido.dat',skiprows=0)
R_n=Nor[:,0]
P_n=Nor[:,1]
T_n=Nor[:,2]
rate_n=np.transpose(R_n)
pres_n=np.transpose(P_n)
temp_n=np.transpose(T_n)

media_rate=np.mean(rate_n)
des_stdr=np.std(rate_n)
```

```

media_pres=np.mean(pres_n)
des_stdp=np.std(pres_n)
media_temp=np.mean(temp_n)
des_stdtd=np.std(temp_n)

archivo=open("normalizado.dat",'w')
for j in range(0,len(Nor)):
    rate_nor=(R_n[j]-media_rate)/des_stdr
    pres_nor=(P_n[j]-media_pres)/des_stdp
    temp_nor=(T_n[j]-media_temp)/des_stdtd
    archivo.write(str(rate_nor)+' '+str(pres_nor)+' '+str(temp_nor)+'\n')
archivo.close()

```

```
#####
```

```
A=np.loadtxt('normalizado.dat',skiprows=0)
```

```
R=A[:,0]
```

```
P=A[:,1]
```

```
T=A[:,2]
```

```
rate=np.transpose(R)
```

```
pres=np.transpose(P)
```

```
temp=np.transpose(T)
```

```
ratet=np.transpose(R)
```

```
n=len(A)
```

```
h=n/60
```

```
time = np.linspace(0,h,n)
```

```
#signal = 1*np.cos(3.5*np.pi*time)+3*np.cos(5.5*np.pi*time)
```

```
w=2*np.pi
```

```
#####
```

```
# Calculo las frecuencias y sus inversas aplico el filtro pasa banda
```



```
#####3#####
```

```
Wt = fftfreq(temp.size,d=time[1]-time[0])
f_temp= np.fft.fft(temp) # Si el original esta en segundo esto es hz
cut_f_temp = f_temp.copy()
cut_f_temp[(Wt<=0.1/w)]=0
cut_f_temp[(Wt>=2.35/w)] =0
cut_tempa= np.fft.ifft(cut_f_temp)
cut_temp=np.abs(cut_tempa)
```

```
Wtr = fftfreq(ratet.size, d=time[1]-time[0])
f_ratet=rfft(ratet) # Si el original esta en segundo esto es hz
cut_f_ratet = f_ratet.copy()
cut_f_ratet[(Wtr<=0.1/w)]=0
cut_f_ratet[(Wtr>=1.35/w)] =0
cut_rateta = irfft(cut_f_ratet)
cut_ratet=np.abs(cut_rateta)
```

```
Wp = fftfreq(pres.size, d=time[1]-time[0])
f_pres= rfft(pres) # Si el original esta en segundo esto es hz

cut_f_pres = f_pres.copy()
cut_f_pres[(Wp<=0.05/w)]=0
cut_f_pres[(Wp>=1.35/w)] =0
cut_presa= irfft(cut_f_pres)
cut_pres=np.abs(cut_presa)
```

```
Wr = fftfreq(rate.size, d=time[1]-time[0])
f_rate= rfft(rate) # Si el original esta en segundo esto es hz
cut_f_rate = f_rate.copy()
cut_f_rate[(Wr<=0.05/w)]=0
cut_f_rate[(Wr>=1.35/w)] =0
```

```
cut_ratea= irfft(cut_f_rate)
cut_rate=np.abs(cut_ratea)
```

```
#####
```

```
plt.figure(1)
```

```
plt.subplot(221)
plt.grid(True)
plt.step(time,temp)
plt.ylabel('Temperatura [%]')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.title('Temperatura')
```

```
plt.subplot(223)
plt.grid(True)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.plot(Wt*w/24,abs(f_temp)/n*2)
plt.grid(True)
plt.ylabel('Amplitud [%]')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
plt.title('FFT a la Temperatura')
```

```
plt.subplot(224)
plt.plot(Wt*w/24,abs(cut_f_temp)*2/n)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.grid(True)
#plt.ylabel('Amplitud')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
plt.title('Frecuencia Seleccionada')
```

```
plt.subplot(222)
```

```

plt.step(time,cut_tempa)
plt.grid(True)
#plt.ylabel('Amplitud')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.title('Temperatura aplicado la FFT')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.18, left=0.10, right=0.95,

```

```

hspace=0.5, wspace=0.2)

```

```

#####

```

```

plt.figure(2)
plt.subplot(221)
plt.grid(True)
plt.step(time,pres)
plt.ylabel('Presión [%]')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.title('Presión')

```

```

plt.subplot(223)
plt.grid(True)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.plot(Wp*w/24,abs(f_pres)*2/n)
plt.grid(True)
plt.ylabel('Amplitud [%]')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
plt.title('FFT a la Presión')

```

```

plt.subplot(224)
plt.plot(Wp*w/24,abs(cut_f_pres)*2/n)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.grid(True)
#plt.ylabel('Amplitud')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')

```

```

plt.title('Frecuencia Seleccionada')

plt.subplot(222)
plt.step(time,cut_presa)
plt.grid(True)
#plt.ylabel('Amplitud')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.title('Presión aplicado FFT')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.18, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5, wspace=0.2)
#####

plt.figure(3)
plt.suptitle('Flujo de Partículas asociado a la frecuencia de la presión')
plt.subplot(221)
plt.grid(True)
plt.step(time,rate)
plt.ylabel('Flujo [%]')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')

plt.subplot(223)
plt.grid(True)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.plot(Wr*w/24,abs(f_rate)*2/n)
plt.grid(True)
plt.ylabel('Amplitud [%]')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
plt.title('FFT del Flujo')

plt.subplot(224)
plt.plot(Wr*w/24,abs(cut_f_rate)*2/n)
plt.xlim(0,1)

```

```

plt.ylim(0,1)
plt.grid(True)
#plt.ylabel('Amplitud')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
plt.title('Frecuencia Seleccionada')

plt.subplot(222)
plt.step(time,cut_ratea)
plt.grid(True)
#plt.ylabel('Amplitud')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
#plt.title('Tasa de partículas aplicado la FFT')
plt.subplots_adjust(top=0.90, bottom=0.10, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5,wspace=0.2)
#####

plt.figure(4)
plt.subplot(221)
plt.grid(True)
plt.step(time,ratet)
plt.ylabel('Flujo [%]')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.suptitle(' Flujo de partículas asociado a la frecuencia de la Temperatura')

plt.subplot(223)
plt.grid(True)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.plot(Wtr*w/24,abs(f_ratet)*2/n)
plt.grid(True)
plt.ylabel('Amplitud [%]')
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
#plt.title('FFT del Flujo')

```

```

plt.subplot(224)
plt.plot(Wtr*w/24,abs(cut_f_ratet)*2/n)
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(0,1)
plt.grid(True)
plt.xlabel('Frecuencia [cph]')
#plt.title('Frecuencia Seleccionada')
plt.subplot(222)
plt.step(time,cut_rateta)
plt.grid(True)

plt.xlabel('Tiempo [hora]')
#plt.title('Tasa de partículas asociado con la frecuencia de la temperatura')

plt.subplots_adjust(top=0.90, bottom=0.08, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5, wspace=0.2)
#####
plt.figure(5)
plt.subplot(211)
plt.step(time,cut_ratea,color='r',label='Tasa de partículas')
plt.grid(True)
#plt.ylim(-5,5)
plt.ylabel('Amplitud [%]')
plt.title('Relación entre la presión y el flujo de partículas')
plt.subplot(211)
plt.step(time,cut_presa,color='k',label='Presión')
plt.grid(True)
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.legend(loc=1,fontsize=10.,ncol=2)

plt.subplot(212)
plt.step(time,cut_rateta,color='r',label='Tasa de partículas')
plt.grid(True)

```

```

#plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.ylabel('Amplitud [%]')

plt.subplot(212)
plt.step(time,cut_tempa,color='b',label='Temperatura')
plt.grid(True)
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.legend(loc=1,fontsize=10.,ncol=2)
plt.title('Relación entre la Temperatura y el flujo de partículas')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.08, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5,wspace=0.2)

#plt.figure(6)

#plt.subplot(211)
#plt.scatter(cut_temp,cut_ratet,label='a')
#plt.ylabel('Amplitud')
#plt.xlabel('Temperatura')
#plt.subplot(212)
#plt.scatter(cut_pres,cut_rate)
#plt.ylabel('Amplitud')
#plt.xlabel('Presión')
#plt.legend(loc=1,fontsize=10.,ncol=2)

#####

Pf=(cut_presa)
Rfp=(cut_ratea)

#print(Pf)

fiteop=linear_model.LinearRegression()
Pf=Pf.reshape(-1,1)

```

```

Rfp=Rfp.reshape(-1,1)
fiteop.fit(Pf,Rfp)

# Veamos los coeficientes obtenidos, En nuestro caso, serán la Tangente
#print('Coeficients: \n', fiteop.coef_)
# Este es el valor donde corta el eje Y (en X=0)
#print('Independent term: \n', fiteop.intercept_)
Ratefp_pred = fiteop.predict(Pf)
#print(u'Error cuadrático medio: %.2f' % mean_squared_error(Pf,Ratefp_pred))
#print(u'Estadístico R_2: %.2f' % r2_score(Pf,Ratefp_pred))
bf0=fiteop.intercept_
bf1=fiteop.coef_
#####
Tf=abs(cut_tempa)
Rft=abs(cut_rateta)
fiteot=linear_model.LinearRegression()
Tf=Tf.reshape(-1,1)
Rft=Rft.reshape(-1,1)
fiteot.fit(Tf,Rft)
# Veamos los coeficienetes obtenidos, En nuestro caso, serán la Tangente
#print('Coeficients: \n', fiteot.coef_)
# Este es el valor donde corta el eje Y (en X=0)
#print('Independent term: \n', fiteot.intercept_)
Rateft_pred = fiteot.predict(Tf)
#print(u'Error cuadrático medio: %.2f' % mean_squared_error(Tf,Rateft_pred))
#print(u'Estadístico R_2: %.2f' % r2_score(Tf,Rateft_pred))
af0=fiteot.intercept_
af1=fiteot.coef_
#####

fiteo_Ap=linear_model.LinearRegression()
P=P.reshape(-1,1)
R=R.reshape(-1,1)
fiteo_Ap.fit(P,R)

```



```

#print('Coefficients: \n', fiteo_Ap.coef_)
# Este es el valor donde corta el eje Y (en X=0)
#print('Independent term: \n', fiteo_Ap.intercept_)
Ratep_pred = fiteo_Ap.predict(P)
#print(u'Error cuadrático medio: %.2f' % mean_squared_error(P,Ratep_pred))
#print(u'Estadístico R_2: %.2f' % r2_score(P,Ratep_pred))
# Veamos los coeficienetes obtenidos, En nuestro caso, serán la Tangente
b0=fiteo_Ap.intercept_
b1=fiteo_Ap.coef_

#####

fiteo_At=linear_model.LinearRegression()
T=T.reshape(-1,1)
R=R.reshape(-1,1)
fiteo_At.fit(T,R)
# Veamos los coeficienetes obtenidos, En nuestro caso, serán la Tangente
#print('Coefficients: \n', fiteo_At.coef_)
# Este es el valor donde corta el eje Y (en X=0)
#print('Independent term: \n', fiteo_At.intercept_)
Ratet_pred = fiteo_At.predict(T)
#print(u'Error cuadrático medio: %.2f' % mean_squared_error(T,Ratet_pred ),)
#print(u'Estadístico R_2: %.2f' % r2_score(T,Ratet_pred ))
a0=fiteo_At.intercept_
a1=fiteo_At.coef_

#####

plt.figure(6)

plt.subplot(221)
plt.scatter(P,R)
plt.plot(P,Ratep_pred,color='red')

```

```

plt.grid(True)
#plt.ylim(-5,5)
plt.ylabel('Flujo [%]')
plt.xlabel('Presión [%]')
plt.title('Presión vs Flujo')
plt.subplot(222)
plt.scatter(Pf,Rfp)
plt.plot(Pf,Ratefp_pred,color='red')
plt.grid(True)
plt.xlabel('Presión [%]')
plt.title('Presión vs Flujo con FFT')
plt.subplot(223)
plt.scatter(T,R)
plt.plot(T,Ratet_pred,color='red')
plt.grid(True)
plt.ylabel('Flujo [%]')
plt.xlabel('Temperatura [%]')
plt.title('Temperatura vs Flujo')
plt.subplot(224)
plt.scatter(Tf,Rft)
plt.plot(Tf,Rateft_pred,color='red')
plt.grid(True)
plt.xlabel('Temperatura [%]')
plt.title('Temperatura vs Flujo con FFT')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.08, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5, wspace=0.2)

#####
archivo1=open('rate_corregido.dat','w')
for j in range(0,len(A)):
    ratep=b0[0]+b1[0]*A[j,1]
    rateT=a0[0]+a1[0]*A[j,2]
    rate_total=ratep-rateT

```

```

ratepf=bf0[0]+bf1[0]*A[j,1]
rateTf=af0[0]+af1[0]*A[j,2]
rate_totalf=ratepf-rateTf
archivo1.write(str(ratep[0])+ ' '+str(rateT[0])+ ' '+str(ratepf[0])+ ' '+str(rateTf[0])+
'+str(rate_totalf[0])+'\n')
archivo1.close()

plt.figure(7)
B=np.loadtxt('rate_corregido.dat',skiprows=0)
Rate_P=np.transpose(B[:,0])
Rate_T=np.transpose(B[:,1])
Rate_Pf=np.transpose(B[:,2])
Rate_Tf=np.transpose(B[:,3])
Rate_total=np.transpose(B[:,4])
Rate_totalf=np.transpose(B[:,5])

plt.subplot(311)

plt.plot(time,R,color='blue',label='Sin corregir')
plt.plot(time,Rate_P,color='red',label='Corregido $\beta=-0.61581248$')
plt.plot(time,Rate_Pf,color='k',label='Corregido $\beta_f=-0.69366435$')
plt.grid(True)
#plt.ylim(40,50)
plt.ylabel('Flujo [%]')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.2, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5,wspace=0.2)
plt.legend(loc=1,fontsize=8.,ncol=3)
plt.title('Flujo de partículas con la correccion de la Presión')

```

```

plt.subplot(312)
plt.plot(time,R,color='blue',label='Sin corregir')
plt.plot(time,Rate_T,color='red',label='Coregido  $\alpha=0.81848109$ ')
plt.plot(time,Rate_Tf,color='k',label='Coregido  $\alpha_f=0.12140441$ ')
plt.grid(True)
#plt.ylim(40,50)
plt.ylabel('Tasa de partículas')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.2, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5,wspace=0.2)
plt.legend(loc=1,fontsize=8.,ncol=3)
plt.title('Flujo de partículas con la correccion de la Temperatura')

plt.subplot(313)

plt.plot(time,R,color='blue',label='Sin corregir')
plt.plot(time,Rate_total,color='red',label='Corregido P-T')
plt.plot(time,Rate_totalf,color='k',label='Corregido Pf-Tf ')
plt.grid(True)
#plt.ylim(40,50)
plt.ylabel('Flujo [%]')
plt.xlabel('Tiempo [hora]')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.18, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.5,wspace=0.2)
plt.legend(loc=1,fontsize=8.,ncol=3)
plt.title('Flujo de partículas con la correccion de la Presión-Temperatura')
plt.subplots_adjust(top=0.95, bottom=0.08, left=0.10, right=0.95,

hspace=0.8,wspace=1.8)

```

```

#print(b0[0])
#print(a0[0])
#print(b1[0])
#print(a1[0])
#print(bf0[0])
#print(af0[0])
#print(bf1[0])
#print(af1[0])

plt.show()

```

Una vez obtenido el archivo normalizado se aplica el siguiente programa que permite calcular los coeficientes de presión y temperatura considerando sus variables estadísticas.

```

import numpy as np # importando numpy
from scipy import stats # importando scipy.stats
Nor=np.loadtxt('normalizado.dat',skiprows=0)
R_n=Nor[:,0]
P_n=Nor[:,1]
T_n=Nor[:,2]
rate_n=np.transpose(R_n)
pres_n=np.transpose(P_n)
temp_n=np.transpose(T_n)

media_rate=np.mean(rate_n)
des_stdr=np.std(rate_n)
media_pres=np.mean(pres_n)
des_stdp=np.std(pres_n)
media_temp=np.mean(temp_n)
des_stdtd=np.std(temp_n)

```

```
s=0
s1=0
for i in range(0,len(Nor)):
    s=s+(rate_n[i]-media_rate)*(pres_n[i]-media_pres)
    s1=s1+(rate_n[i]-media_rate)*(temp_n[i]-media_temp)
r=s/(des_stdr*des_stdp*len(Nor))
r1=s1/(des_stdr*des_stdtd*len(Nor))
print('coeficiente de la presion')
print(r*des_stdr/des_stdp)
print('coeficiente de la temperatura')
print(r1*des_stdr/des_stdtd)
```