

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física



**Caracterización de detectores de centellador plástico para tomografía
de muones**

TRABAJO DE GRADO

Para optar el título profesional de:
Físico

Tatiana Carolina Cusis Castro

San Juan de Pasto, Colombia
Diciembre 2020

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física

Caracterización de detectores de centellador plástico para tomografía de muones

Tatiana Carolina Cusis Castro

TRABAJO DE GRADO

Director:

MSc. Jaime Alfredo Betancourt

San Juan de Pasto, Colombia

Diciembre 2020

©2020 - Tatiana Carolina Cusis Castro

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Todos los derechos reservados.

Nota de Aceptación

Jaime Alfredo Betancourt Mingaquer MS.c

Director

David Alejandro Martnez Caicedo Ph.D

Jurado

Alex Tapia Casanova Ph.D

Jurado

San Juan de Pasto, Diciembre 2020

Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme sabiduría y entendimiento para alcanzar mis metas y proyectos.

A mi asesor MSc. Jaime Betancourt, a mis jurados Ph.D. David Martinez, Ph.D. Alex Tapia, por brindarme su conocimiento, dedicación, paciencia y motivación para poder realizar este trabajo de grado.

Mis profundos agradecimientos al grupo de trabajo de la universidad South Dakota, universidad de Medellín y universidad de Nariño, por su paciencia y ayuda en la realización en cada paso de este trabajo, a Jhon Revelo por su colaboración en el desarrollo de los diferentes códigos macro, al estudiante de doctorado Jairo Rodriguez por guiarme en el proceso de programación, a Alex Riascos por brindarme su conocimiento de simulación, y a cada persona de las diferentes áreas del grupo de trabajo que brindaron su ayuda en la realización de este trabajo de grado.

A la universidad de Nariño en especial a los profesores del departamento de física por brindarme todos estos años su conocimiento.

A cada miembro de mi familia mi madre Ines, mi Padre Ligio, mis hermanas Jhoana, Mónica, Judy, mi abuela Luz Maria, Mis tios Edgar, Eliza, por toda su cofianza y motivación de seguir adelante.

Dedicado a mis padres, Inés y Ligio, por brindarme la oportunidad de crecer profesional y humanamente. A mis hermanas, Mónica, Judy, en especial a Jhoana por demostrarme muchas veces que una enfermedad no para las ganas de seguir luchando, soñando y que crezca el nivel intelectual, te amo hermosa gracias por brindarme tu apoyo desde que era una niña, siempre serás mi mayor ejemplo a seguir.

Caracterización de detectores de centellador plástico para tomografía de muones

Resumen

En este trabajo de grado se presenta la caracterización de detectores de centellador plástico para tomografía de muones, en el que se encuentra presente un nuevo material de detección de luz el cual es el silicon photomultiplier, con dicho dispositivo y con las barras de centellador plástico se tiene un detector prototipo el cual es expuesto en una zona del departamento de Nariño, además cada barra se encuentra conectada a diferentes canales de la front-end-board (sistema de adquisición de datos), es así que se procede a realizar una toma de datos a una superficie determinada por días prolongados, llevando un registro de la variación de los ángulos cenital y azimutal, para poder analizar y estudiar el número de partículas que inciden la superficie, además se realizó una toma de datos a cielo abierto para observar el funcionamiento del detector. Haciendo uso de herramientas como ROOT, se logró crear códigos macros para estudiar y dividir el número de eventos del tramo de días seleccionado registrados en la front-en-board, herramientas como CORSIKA para observar la variación angular de la estructura del detector como también el funcionamiento de este. Finalmente se encuentra presente los diferentes datos obtenidos, como también un ADC adecuado para su análisis, queriendo de esta manera dar una información acertada del funcionamiento de dichos detectores en la tomografía de muones.

Palabras claves: Tomografía de muones, CORSIKA, ROOT, azimutal, cenital.

Characterization of plastic scintillation detectors for muon tomography

Abstract

In this degree work, the characterization of plastic scintillator detectors for muon tomography is presented, in which a new light detection material is present, which is photomultiplier silicon, with said device and with the plastic scintillator bars It has a prototype detector which is exposed in an area of the department of Nariño, in addition each bar is connected to different channels of the front-end-board (data acquisition system), that is why it proceeds to take a data to a determined surface for long days, keeping a record of the variation of the zenith and azimuthal angles, to be able to analyze and study the number of particles that affect the surface, in addition a data collection was carried out in the open sky to observe the operation the detector. Using tools such as ROOT, it was possible to create macro codes to study and divide the number of events of the selected stretch of days registered in the front-in-board, tools such as CORSIKA to observe the angular variation of the detector structure as well as the operation of this. Finally, the different data obtained is present, as well as a suitable ADC for its analysis, thus wanting to give accurate information on the operation of said detectors in muon tomography.

Keywords: Muon tomography, CORSIKA, ROOT, azimuthal, zenith.

Contenido

Título	i
Aceptación	iv
Agradecimientos	v
Dedicatoria	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xv
Glosario	xvi
1 Introducción	1
2 Marco teórico	3
2.1 Rayos cósmicos	3
2.1.1 Rayos cósmicos primarios	3
2.1.2 Rayos cósmicos secundarios	6
2.1.3 Evolución de cascadas y producción de muones	7
2.2 Interacción muon-materia	12
2.3 Detección de muones	14
2.3.1 Detección directa	15
2.3.2 Detección indirecta	15
2.4 Detectores de Centelleo	17
2.4.1 Fotomultiplicadores de silicio (SiPM)	19
2.5 CORSIKA	23
2.6 Tomografía de muones	24
2.6.1 Muones atmosféricos como herramienta de imagen	28
3 Estado del arte	30
3.0.1 Volcán Asama	31
3.0.2 Volcán USU	34
3.0.3 Pirámide de Keops	35
4 Detector de Centellador Plástico	38
4.1 Descripción del Detector	38
4.1.1 Material Centellador EJ-200	39
4.2 Descripción del montaje	40
4.3 Adquisición de datos	43

5 Mediciones	46
5.1 Toma de datos	46
5.2 Resultados Obtenidos	53
6 Conclusiones y recomendaciones	73
ANEXOS	75
A Código del programa	75
Bibliografía	80

Listas de Figuras

2.1	Espectro de energía de los rayos cósmicos, entre 10^9 y $10^{20}eV$, y su comparación en energía con los aceleradores de partículas Tevatrón y LHC [5].	5
2.2	Cascada secundaria originada por un protón como partícula primaria [5].	6
2.3	Izquierda: Desarrollo longitudinal y lateral de una lluvia atmosférica extendida vertical iniciada por un fotón de energía $E_p = 5,4 \times 10^{14}eV$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: Electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Donde es muy notable que la lluvia es dominada mayormente por la componente EM. Derecha: Se puede notar las diferentes interacciones a las que son sometidas las partículas [9].	8
2.4	Izquierda: Desarrollo longitudinal y lateral de una lluvia atmosférica extendida vertical iniciada por un núcleo de hierro de energía $E_p = 5,4 \times 10^{14}eV$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: Electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Donde es muy notable que la lluvia es dominada mayormente por la componente hadrónica. Derecha: Se puede notar las diferentes procesos a las que son sometidas las partículas [9].	9
2.5	Izquierda: Desarrollo longitudinal y lateral de una lluvia atmosférica extendida vertical iniciada por un protón de energía $E_p = 5,4 \times 10^{14}eV$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: Electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Donde es muy notable que la lluvia es dominada mayormente por la componente muónica. Derecha: Se puede notar las diferentes procesos a las que son sometidas las partículas [9].	10
2.6	Diagrama de feynman del decamiento más probable de un muon y un antineutrino muónico.	11
2.7	Perdida de energía de muones en cobre (<i>Cu</i>), se señala los procesos relevantes en cada región de energía [11].	13
2.8	Esquema de forma directa e indirecta para detectar rayos cósmicos [12].	14
2.9	Distintas técnicas de detección indirecta de rayos cósmicos [14].	16
2.10	Sistema de centelleo acoplado a un tubo multiplicador [17].	18
2.11	Matriz de microcélulas de un SiMP [18].	20
2.12	Plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), Superficie terrestre y el sistema de coordenadas [19].	25
2.13	Energía mínima en función de longitud atravesada en roca estándar[30].	27

3.1	Distribuciones horizontales de intensidades de muones de rayos cósmicos. Los datos se comparan entre el 12 de octubre y el 6 de enero (cuadrado verde) y el 6 de enero y el 1 de febrero (círculo azul) y el 2 de febrero y el 8 de febrero (círculo rojo). (a) Una elevación de $\theta = 240 \pm 30\text{mrad}$; (b) una elevación de $\theta = 180 \pm 30\text{mrad}$; (c) una elevación de $\theta = 120 \pm 30\text{mrad}$; (d) y una elevación de $\theta = 60 \pm 30\text{mrad}$.[1].	32
3.2	Distribución de densidad promedio proyectada en el plano de sección transversal que es paralelo al plano del detector y que incluye el piso del cráter de Asama. (a) Datos recopilados entre el 6 de enero y el 1 de febrero; y (b) datos recopilados entre el 2 de febrero y el 5 de marzo [1].	33
3.3	Perfil de densidad del volcán USU [37].	35
3.4	a)Ubicación de los diferentes detectores dentro de la pirámide. b) Resultado de Nagoya. c) Resultado de KEK. d) Resultado de CEA [38].	37
4.1	Características del material centellador [40]	39
4.2	Espectro de emisión de luz del centellador plástico EJ-200 con un máximo en 425 nm [39].	40
4.3	Estructura y Detector de centellador plástico, ubicados para toma de datos.	41
4.4	a) Distribución de canales para placas superiores. b) Distribución de canales para placas superiores ensamblado en la estructura del detector.	42
4.5	a) Distribución de canales para placas inferiores. b) Distribución de canales para placas inferiores ensamblado en la estructura del detector.	43
4.6	Diagrama de adquisición de datos.	44
4.7	Esquema de dos partículas atravesando las placas de centellador plástico.	45
5.1	Simulación en CORSIKA de la variación de ángulos cenital y azimutal.	47
5.2	Ángulos finales cenitales registrados en los tramos de días.	50
5.3	Ángulos finales azimutales registrados en los tramos de días.	50
5.4	Variación del angulo cenital para los diferentes tramos de días, tomando como referencia 23°.	51
5.5	Variación del angulo azimutal para los diferentes tramos de días, tomando como referencia 223°.	51
5.6	Temperaturas registradas en los días señalados por las diferentes estaciones cercanas al punto analizado, Banda gris: Temperatura promedio de los días registrados.	53
5.7	Número de eventos con ADC de todos los canales 8-13 de enero 2020, cada color hace referecia a los 32 canales.	54
5.8	Número de eventos con ADC apartir de 2000 y ADC superior a 4000, cada color hace referencia a los 32 canales.	54
5.9	Número de eventos registrados en cada canal 8-13 de enero 2020.	55

5.10 Número de eventos con un ADC inicial de 2000, 8-13 de enero 2020.	56
5.11 ADC mayor a 2000. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	57
5.12 ADC mayor a 2100. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	58
5.13 ADC mayor a 2200. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	59
5.14 ADC mayor a 2300. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	60
5.15 ADC mayor a 2400. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	61
5.16 ADC mayor a 2500. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	62
5.17 ADC mayor a 2600. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	63
5.18 ADC mayor a 2700. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	64
5.19 ADC mayor a 2800. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	65
5.20 ADC mayor a 2900. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	66
5.21 ADC mayor a 3000. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	67
5.22 ADC mayor a 3100. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	68
5.23 ADC mayor a 3200. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	69

5.24 ADC mayor a 3300. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	70
5.25 ADC mayor a 3400. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	71
5.26 ADC mayor a 3500. Izquierdo: Placas superiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; <i>eje x</i> placa vertical, <i>eje y</i> placa horizontal.	72

Lista de Tablas

5.1	Tramos de días registrados.	48
5.2	Datos registrados de los ángulos cenital y azimutal.	49

Glosario

CORSIKA: COsmic Ray Simulation for KAscade

J: Flujo de partículas.

ROOT: Framework, para el desarrollo de aplicaciones de análisis de datos.

SiPM: Fotomultiplicadores de silicio.

FEB: Front-end-board.

Capítulo 1

Introducción

Debido al gran desarrollo que han logrado los Detectores de Centellador plástico es de mucha importancia el análisis específico que estos le hacen a cada partícula la cual atraviesa una determinada superficie ya que este utiliza la propiedad de ciertos materiales de emitir luz cuando sus atomos o moléculas se desexitan tras el paso de la radiacion ionizante. La luz emitida debe ser transformada posteriormente en señal eléctrica, capaz de ser medida mediante un fotomultiplicador. El contacto debe ser óptico (por ejemplo con grasa transparente) para que no haya pérdidas. Esto tiene como objeto aumentar la eficiencia de separación de las señales provenientes de las tres componentes de las cascadas, y muy especialmente, poder construir las curvas de distribución lateral de las componentes electromagnéticas y muónicas en forma independientes, lo cual tiene un gran interés por la relación entre estas distribuciones y el tipo de primario. Cabe resaltar que dichos detectores estan siendo estudiados para que sean capaces de soportar las difíciles condiciones ambientales que puedan aparecer en ciertos sitios de detección. La tomografía es una técnica empleada para explorar estructuras complejas y heterogéneas debajo de la superficie terrestre mediante la construcción de imágenes.

Los modelos tridimensionales (3-D) de la estructura terrestre, permiten dar respuesta a algunos cuestionamientos básicos de su geodinámica. En regiones volcánicas, las imágenes pueden aportar información sobre sus cámaras magmáticas o sistemas hidrotermales y otros rasgos estructurales.

La reconstrucción de la estructura interna de un volcán se constituye en un insumo para la interpretación geofísica del comportamiento de la actividad eruptiva y para determinaciones más precisas de hipocentros de señales sismo-volcánicas, entre otras.

Las investigaciones mas relevantes en cuanto al uso de detectores de centellador plástico utilizadas netamente a la tomografía de muones abren paso a seguir realizando estudios como

capturar Imágenes de alta resolución en la corteza no homogénea con radiografía muónica de rayos cósmicos: la estructura de densidad debajo del piso del cráter volcánico del monte. Asama, Japón [1]. O inclusive como un equipo de expertos del Instituto de Investigación sobre los fundamentos del Universo del Comisariado de Energía Atómica francés (CEA) descubren una nueva cavidad dentro de la gran Pirámide de Keops [2]. Este hallazgo se trata de una nueva investigación de estas características; con la primera se identificó en la esquina noroeste de la Pirámide una cámara de aproximadamente 9 m de superficie, escondida tras un muro de roca de 20 m. Ahora se ha confirmado la existencia de otra cavidad oculta en el lado norte, que podría ser un pasillo que conecta con el interior. Los investigadores se centraron en una zona de la cara norte que tenía unas grandes piezas oblicuas (denominadas "chevrones" por su parecido con el logotipo de la marca Chevron). Estas piezas no son decorativas, sino que tienen una utilidad muy específica: se colocaban para proteger una cavidad o espacio vacío y evitar que el techo se derrumbara.

Actualmente se desea utilizar la técnica de detectores de centelleo [1] en la zona del volcán Galeras específicamente en el cono volcánico o en una zona previamente estudiada, con el único fin de proporcionar un estudio detallado de las partículas que atraviesan a este.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas masivas de alta energía (hasta $30 \times 10^{20} eV$), en general procedentes de fuera del sistema solar.

2.1.1 Rayos cósmicos primarios

Los rayos cósmicos primarios son partículas de alta energía compuestas principalmente por (89%) protones, núcleos de hidrógeno, el elemento más ligero y común del universo, pero también incluyen núcleos de helio (10%) y núcleos más pesados (1%). todo el camino hasta el uranio. La energía de los rayos cósmicos primarios están en un intervalo de los $10^{11} eV$ a $10^{21} eV$. Producidos por mecanismos astronómicos como por ejemplo: Núcleos activos de galaxias, explosiones de supernovas, mareas solares etc. Los rayos cósmicos primarios fueron descubiertos por Victor Hess, quien en 1912 realizó tres medidas llevando un electrómetro de Wulf en un globo aerostático hasta una altitud de 5300 m, observó que la tasa de ionización aumentaba con la altitud, cuando una partícula cargada de alta energía incide sobre el electrómetro, el gas del interior se ioniza, un voltaje aplicado entre placas internas de este, hace que los iones generados se muevan hacia el cátodo, creando una corriente medible, de manera que la ionización es proporcional a la corriente, esta corriente aumentaba con la altitud. Es así que el descubrimiento de que la intensidad de radiación depende de la altitud indica que las partículas que provienen del espacio están eléctricamente cargadas y que son desviadas por el campo magnético terrestre [3].

El espectro de los rayos cósmicos se refiere al flujo de partículas como función de la energía

y su comportamiento puede ser ajustado a una ley de potencias dada por E^α , el espectro presenta tres regiones marcadas: rodilla, tobillo, y supresión (figura 2.1). La rodilla comprende el intervalo de energía hasta los $10^{16}eV$ en el cual el índice espectral toma un valor aproximado de 2, 7; entre la rodilla y el tobillo la energía está en el intervalo de $10^{16}eV$ y $10^{18}eV$ con un índice espectral de 3, entre el tobillo y la supresión la energía está en el intervalo de $10^{18}eV$ y $10^{19}eV$ con un índice espectral de 2, 7; y finalmente la región por encima de la supresión con energía de $10^{19}eV$ y $10^{21}eV$ con un índice espectral de 4, 2 [4].

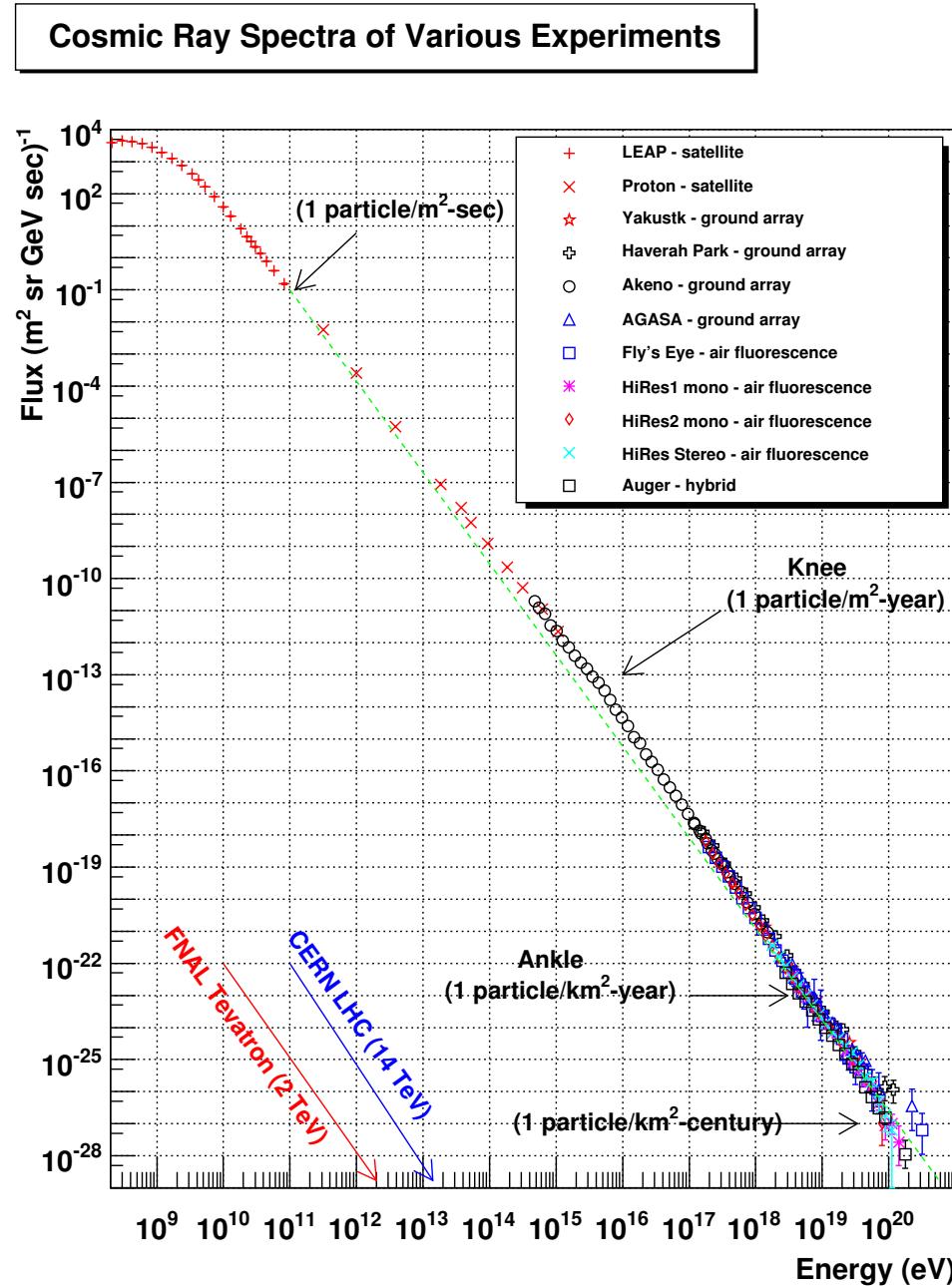


Figura 2.1: Espectro de energía de los rayos cósmicos, entre 10^9 y 10^{20} eV, y su comparación en energía con los aceleradores de partículas Tevatrón y LHC [5].

2.1.2 Rayos cósmicos secundarios

Cuando los rayos cósmicos primarios golpean las capas más externas de la atmósfera, sufren colisiones con los núcleos que allí se encuentran, dando origen a una avalancha de partículas secundarias llamadas rayos cósmicos secundarios. De estas colisiones resultan lluvias de nuevas partículas iniciales como: Protones, neutrones, kaones, y piones. Piones y kaones comienzan una serie de decaimientos mediante interacción débil a muones, neutrinos, electrones; al final del proceso, la cascada secundaria está constituida por tres componentes: electromagnética, hadrónica, y muónica. En la figura 2.2, se muestra un diagrama de la cascada secundaria de partículas iniciada por la incidencia de un protón primario en la atmósfera, como también la componente electromagnética, hadrónica, y muónica [5].

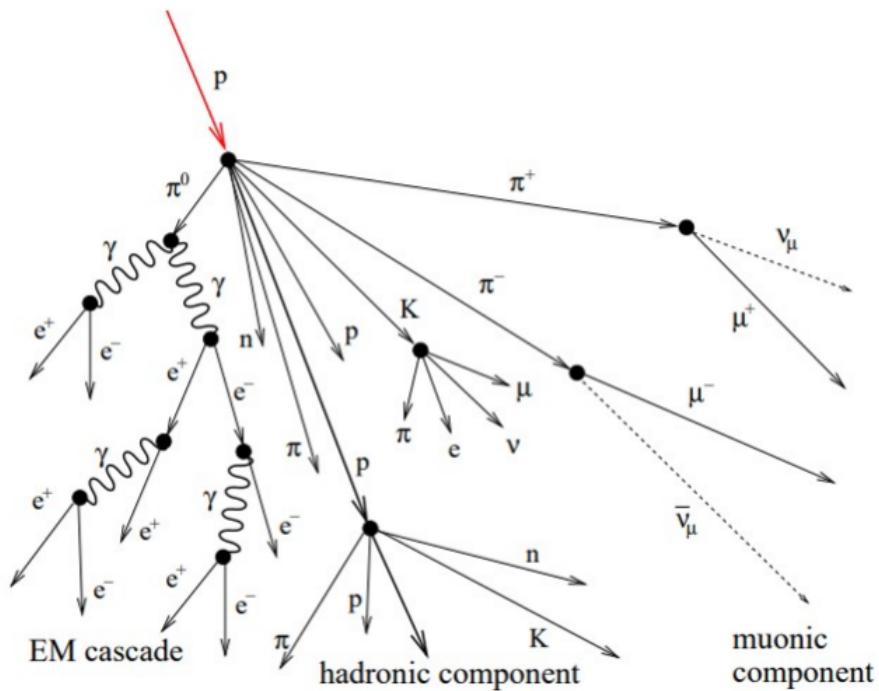


Figura 2.2: Cascada secundaria originada por un protón como partícula primaria [5].

2.1.3 Evolución de cascadas y producción de muones

La atmósfera posee una baja densidad atómica que permite una extensa dispersión de las partículas secundarias, además el espesor vertical es suficiente para que las cascadas alcancen el desarrollo máximo de partículas, permitiendo relacionar proporcionalmente el número total de partículas con la energía total. Como se observa en la figura 2.1, el flujo decrece con la energía de los eventos. Por ejemplo, partículas con energías de $10^{20} eV$ llegan a la tierra a una tasa de una por km^2 por milenio. Por otro lado tenemos claro que los rayos cósmicos o primarios interactúan con la atmósfera terrestre produciendo billones de partículas secundarias, o simplemente secundarios, que se generan apartir de esta interacción. Estas cascadas de partículas fueron descubiertas por P.Auger, R.Maze y T.Grivet-Meyer en 1938 [6], es así como entre las partículas secundarias generadas por rayos cósmicos se pueden distinguir tres componentes [7]:

- La componente electromagnética se origina cuando la partícula incidente del primario es un electrón o un fotón γ (figura 2.3), además está compuesta por electrones, positrones y rayos gamma, los cuales resultan del decaimiento de los piones neutros y del acople de las siguientes interacciones [7]:

$$e^\pm \longrightarrow e^\pm \gamma \quad (2.1)$$

$$\gamma \longrightarrow e^+ e^- \quad (2.2)$$

Por otro lado esta componente se multiplica vía la producción de pares y la emisión de **bremsstrahlung**, que son procesos físicos llevados a cabo por los rayos gamma y los electrones respectivamente [8]:

- Se conoce como **bremsstrahlung** o radiación de frenado a aquel proceso por el cual, una partícula se desacelera al ser deflectada por un núcleo atómico o un electrón. Así pues al perder energía cinética, la partícula libera radiación electromagnética.

- La creación de pares es un proceso en el cual una partícula incide sobre un núcleo atómico, creando dos o más partículas diferentes.

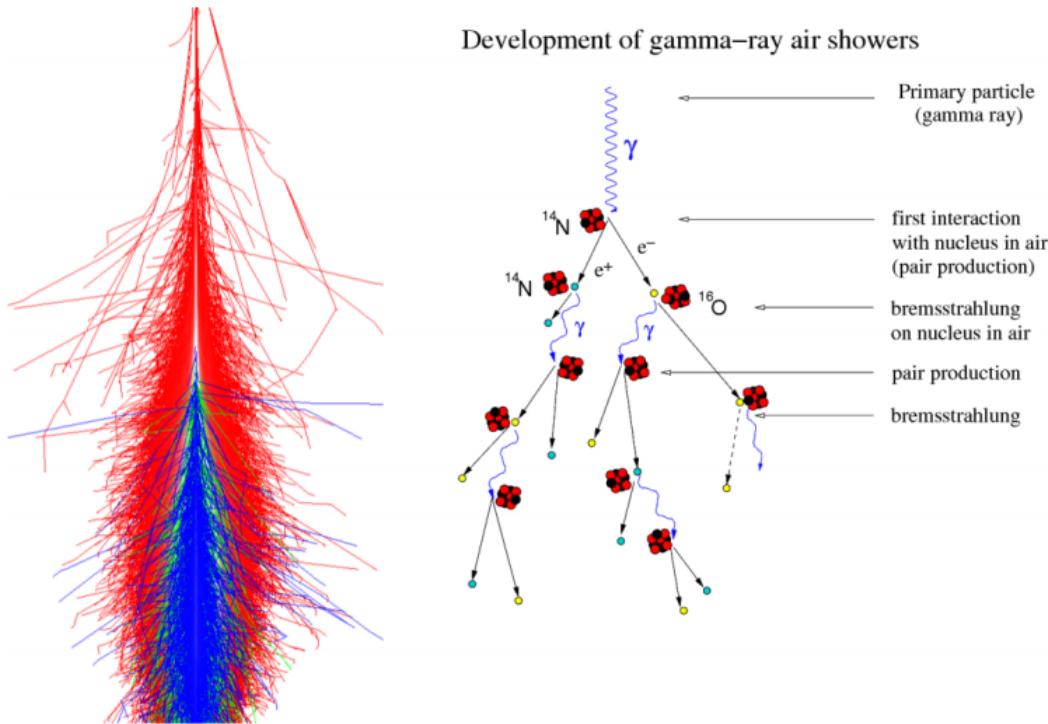


Figura 2.3: Izquierda: Desarrollo longitudinal y lateral de una lluvia atmosférica extendida vertical iniciada por un fotón de energía $E_p = 5,4 \times 10^{14} eV$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: Electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Donde es muy notable que la lluvia es dominada mayormente por la componente EM. Derecha: Se puede notar las diferentes interacciones a las que son sometidas las partículas [9].

- La componente hadrónica sucede cuando la partícula incidente es un nucleón (figura 2.4). Así las primeras interacciones generan piones neutros que alimentan la componente electromagnética de la cascada, mientras que los piones y kaones cargados, producen otro tipo de partículas como muones energéticos, neutrinos y nuevos piones. Por otro lado la componente puramente hadrónica de la lluvia, posee un nivel de dispersión lateral mucho más pequeño que para el de las otras dos componentes. Es

por esto que el núcleo hadrónico se encuentra en general en regiones cercanas al eje de la lluvia totalmente desarrollada, se estima que la misma permanece concentrada en un radio no mayor a los 150 m para una lluvia iniciada por un protón de 10^8 eV [7].

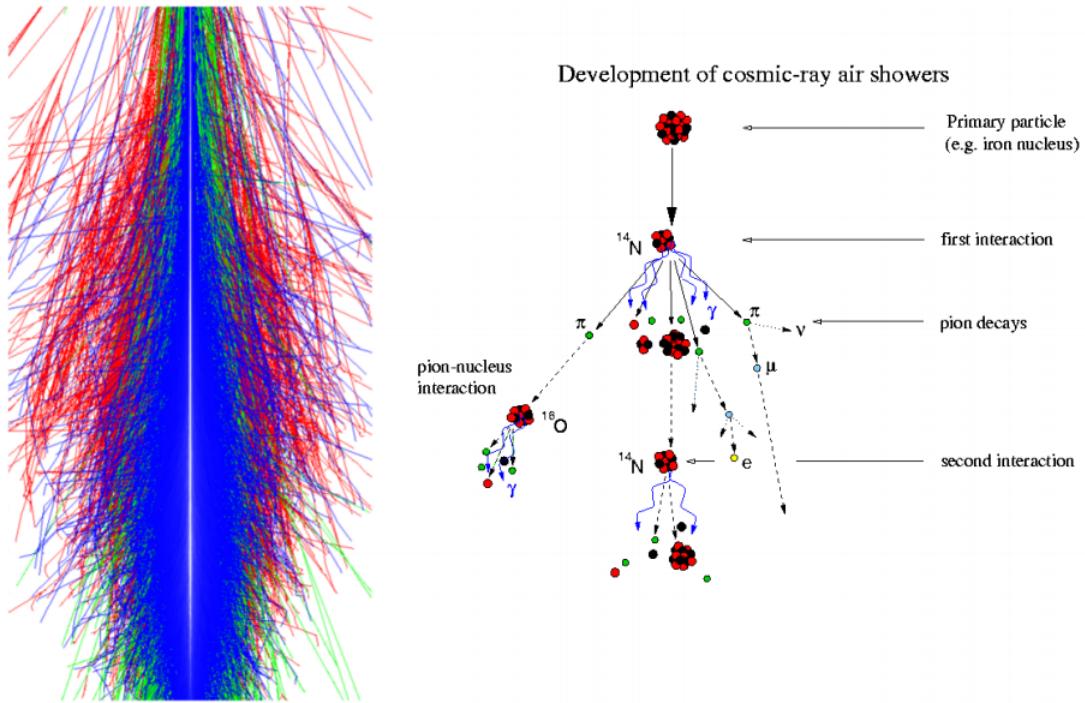


Figura 2.4: Izquierda: Desarrollo longitudinal y lateral de una lluvia atmosférica extendida vertical iniciada por un núcleo de hierro de energía $E_p = 5,4 \times 10^{14} \text{ eV}$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: Electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Donde es muy notable que la lluvia es dominada mayormente por la componente hadrónica. Derecha: Se puede notar las diferentes procesos a las que son sometidas las partículas [9].

- La componente muónica conformada por muones llamada también componente penetrante, se origina apartir del decaimiento de los piones cargados y algunas veces de los kaones cargados, los cuales a su vez, decaen rápidamente en muones y neutrinos muónicos (figura 2.5), es así que el muón representa una partícula de interés para el presente trabajo. A continuación se muestran los decaimientos que generan la componente muónica de las cascadas de secundarios y sus respectivos porcentajes de ocurrencia [7]:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad [99, 99\%] \quad (2.3)$$

$$\kappa^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad [63, 43\%] \quad (2.4)$$

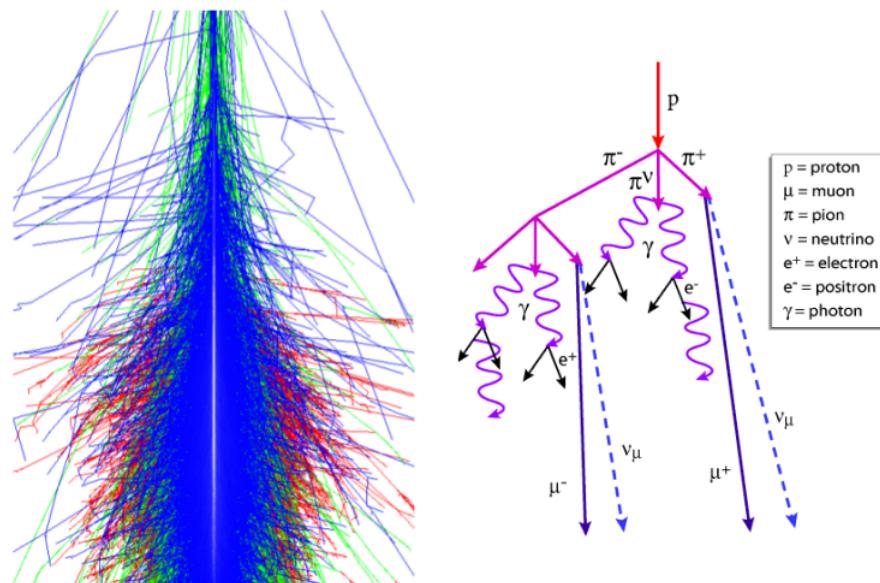


Figura 2.5: Izquierda: Desarrollo longitudinal y lateral de una lluvia atmosférica extendida vertical iniciada por un protón de energía $E_p = 5,4 \times 10^{14} eV$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: Electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Donde es muy notable que la lluvia es dominada mayormente por la componente muónica. Derecha: Se puede notar las diferentes procesos a las que son sometidas las partículas [9].

El muón es una partícula elemental masiva perteneciente a la segunda familia de los leptones, es decir es un fermión (partícula elemental que obedece el principio de exclusión de Pauli), con masa de $105,65\text{MeV}/c^2$, espín $1/2$, carga eléctrica $-1,602^{-19}\text{C}$, y vida media de $2,2\mu\text{s}$, además no experimenta la interacción fuerte. El descubrimiento del muón se dio en 1936 por el físico estadounidense Carl Anderson, cuando estaba estudiando la radiación cósmica mediante campos electromagnéticos [10], Anderson observó que unas partículas provenientes del espacio se desviaban en curvaturas mayores que las de los electrones, pero menores que las de los protones. Lo cual sólo podía significar que debía tratarse de una partícula con carga negativa, pero que tuviese una masa mayor que el electrón. El muón es el resultado del decamiento de piones cargados mediante interacción débil, como se observa en el diagrama de Feynman (figura 2.6). La energía media de los muones que alcanzan el nivel del mar, es aproximadamente 4GeV , su baja interacción con la materia y los efectos relativistas; existe un continuo flujo de muones sobre la superficie terrestre, además estos poseen un alto poder de penetración sobre estructuras geológicas [7].

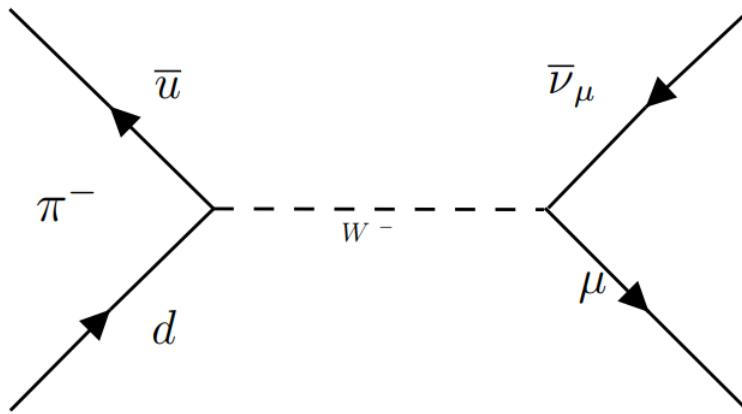


Figura 2.6: Diagrama de feynman del decamiento más probable de un muon y un antineutrino muónico.

2.2 Interacción muon-materia

Los muones siendo partículas, interactúan con la materia mediante mecanismos de ionización, bremsstrahlung, producción de pares (explicados en la sección anterior) y procesos fotonucleares. Cuando los muones se disparan a través de un material, desprenden electrones ionizando átomos. Este proceso de ionización drena la energía cinética de los muones haciéndolos un poco menos frenéticos. En el proceso fotonuclear un muon con suficiente energía es capaz de excitar al núcleo haciendo que este emita radiación electromagnética en el espectro de rayos gamma. Es así como todas estas interacciones se ven reflejadas en perdida de energía de muon cuando este penetra un determinado volumen [3].

Ahora bien se puede mostrar que la perdida promedio de energía de un muon por unidad de longitud atravesada en un determinado material, depende del tipo de interacción, de la energía del muon incidente y de la densidad del material atravesado, esta expresada por la siguiente ecuación [11]:

$$-\frac{dE}{d\chi} = a(E) + b(E)E \quad \chi(L) = \int_L \rho(x)dx \quad (2.5)$$

Donde $\chi(L)$ es la opacidad, definida como la densidad del material integrada a lo largo de la trayectoria L que recorre el muon.

El parámetro $a(E)$ incuye el mecanismo de ionización electrónica y corresponde a la ecuación de Bethe-Bloch para partículas relativistas pesadas, e incluye correcciones de densidad y radiación de los electrones producto de la ionización, como lo muestra la siguiente ecuación, válida para las regiones de baja energía [11]:

$$-\frac{dE}{dx} = a(E) = K \frac{Z}{A\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} + \frac{Q_{max}^2}{8(\gamma Mc^2)^2} \right] + \Delta \left| \frac{dE}{dx} \right| \quad (2.6)$$

Donde se identifica que K/A es una constante, Z es el número atómico del material, I es la energía media de la excitación, Q_{max} es la energía cinética máxima, δ es la corrección debida a la densidad, y $\Delta \left| \frac{dE}{dx} \right|$ representa las pérdidas dadas por bremsstrahlung de electrones y viene

dada por la ecuación [11]:

$$\Delta | \frac{dE}{dx} | = \frac{KZ}{4\pi A} \alpha \left[\ln \frac{2e}{Mc^2} - \frac{1}{3} \ln \left(\frac{2Q_{max}}{mc^2} \right) \right] \ln^2 \left(\frac{2Q_{max}}{mc^2} \right) \quad (2.7)$$

En las regiones de alta energía, el parámetro $b(E)$ caracteriza los procesos radioactivos de bremsstrahlung, producción de pares, e interacción fotonuclear. Los parámetros $a(E)$ y $b(E)$ varían lentamente con la energía, son característicos de cada material, y han sido medidos experimentalmente. Un ejemplo claro para observar la perdida de energía total de muones es en el cobre (Cu), figura 2.7, donde se observa que para energías menores a los 10GeV el proceso dominante es el de ionización electrónica, para energías superiores, los procesos radiactivos se vuelven más relevantes y la perdida de energía aumenta linealmente con la energía [11].

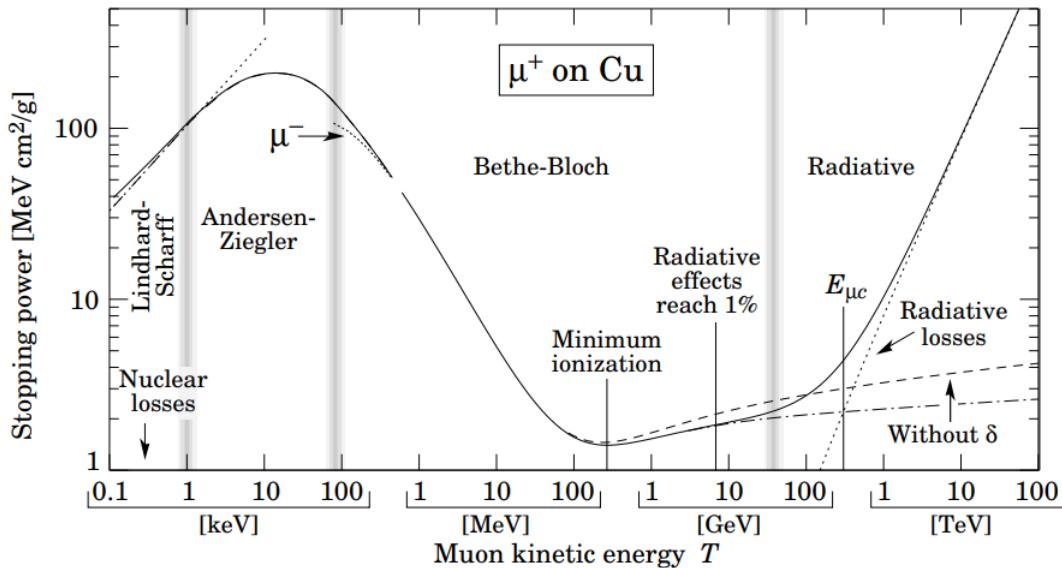


Figura 2.7: Perdida de energía de muones en cobre (Cu), se señala los procesos relevantes en cada región de energía [11].

2.3 Detección de muones

Por mucho tiempo uno de los primeros objetivos experimentales ha sido la caracterización de la radiación cósmica de la tierra, ya que la energía de radiación varía en muchos ordenes de magnitud ($10^7 - 10^{20} \text{ eV}$) y por tanto, es necesario emplear diversos métodos experimentales dependiendo del intervalo de energía estudiado. En la figura 2.8 se puede observar como los rayos cósmicos pueden ser detectados de forma directa en globos y satélites o de forma indirecta con dispositivos en el suelo los cuales van a detectar las cascadas de las partículas. Por otro lado se debe tener en cuenta que los fotones gamma, núcleos cargados no mantienen su direccionalidad excepto los que por tener muy alta energía no deberían ser desviados por el campo magnético galáctivo.

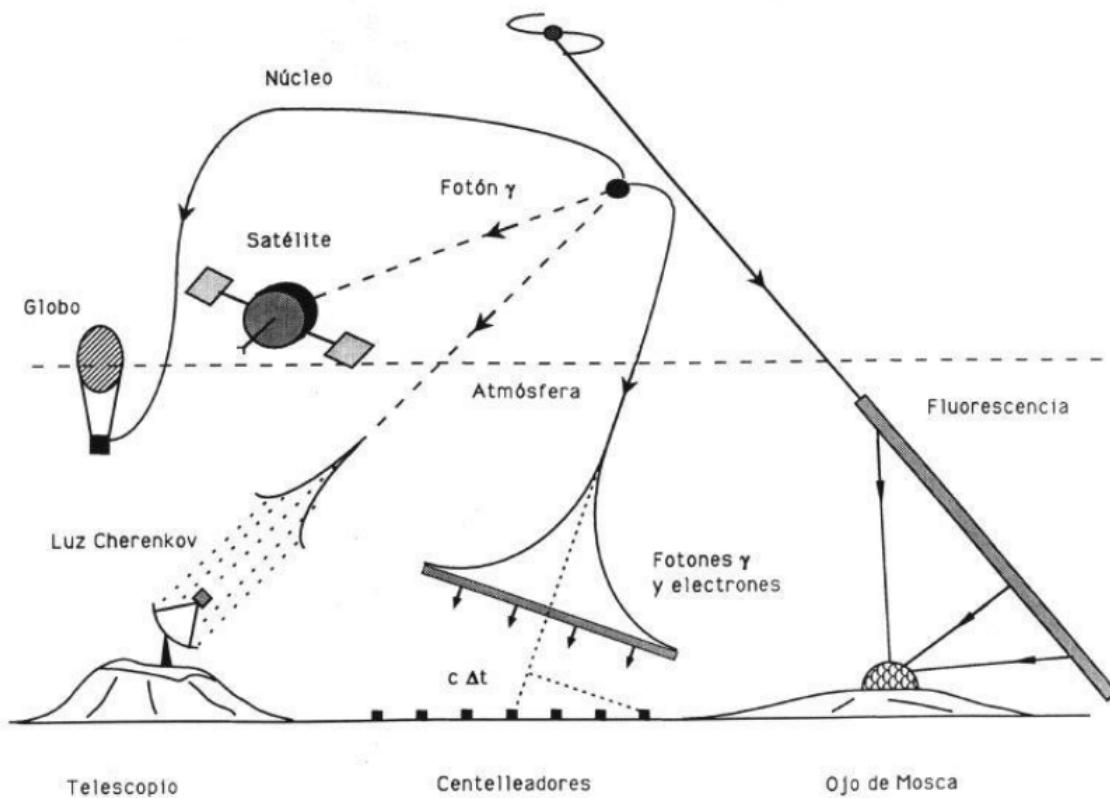


Figura 2.8: Esquema de forma directa e indirecta para detectar rayos cósmicos [12].

Los diferentes métodos que se utilizan actualmente para detectar rayos cósmicos son muy variados. El objetivo de esto es caracterizar su energía y dirección de incidencia. Estos pueden ser clasificados en dos grupos: métodos directos e indirectos [12].

2.3.1 Detección directa

Existe un antes en el tiempo de observación y es alrededor de un valor de energía de 10^{15} eV , donde bajo este umbral de energía, el flujo de rayos cósmicos es lo suficientemente alto como para permitir ser detectados por mediciones directas, es así como las partículas primarias inciden directamente en el detector, razón por la cual los dispositivos de detección están situados en satélites, globos o aviones.

Las técnicas y herramientas utilizadas para éste tipo de detección son similares a las usadas en otros experimentos en Física de Altas Energías. Calorímetros, emulsiones y detectores de transición de radiación son colocados en globos aerostáticos, en satélites y en transbordadores espaciales. Estas técnicas proporcionan mediciones directas del espectro de energía y la composición de los rayos cósmicos hasta energías del orden de 10^{15} eV . En esta región se encuentran involucrados aquellos experimentos conocidos como los aceleradores de partículas, siendo el Gran Colisionador de Hadrones el CERN en suiza (“Large Hadron Collider, LHC”), el experimento más prometedor para estudiar colisiones tal como las que suceden en las primeras capas de la atmósfera generadas por los rayos cósmicos. El LHC está diseñado para producir colisiones a energías más allá de 10^{14} eV en el sistema de centro de masa, lo que permitiría poner a prueba los modelos de interacción hadrónica más precisos que los actuales a muy altas energías y podrá estimar de forma más acertada la composición de las partículas primarias en los rayos cósmicos en estos rangos de energía [13].

2.3.2 Detección indirecta

Los rayos cósmicos (protón o núcleos pesados) interactúan con los núcleos de nitrógeno y oxígeno de la atmósfera, generando lo que se conoce como lluvia de partículas. En la figura 4.1 se muestra las distintas técnicas de detección de lluvias dependiendo de la componente

que se quiere estudiar.

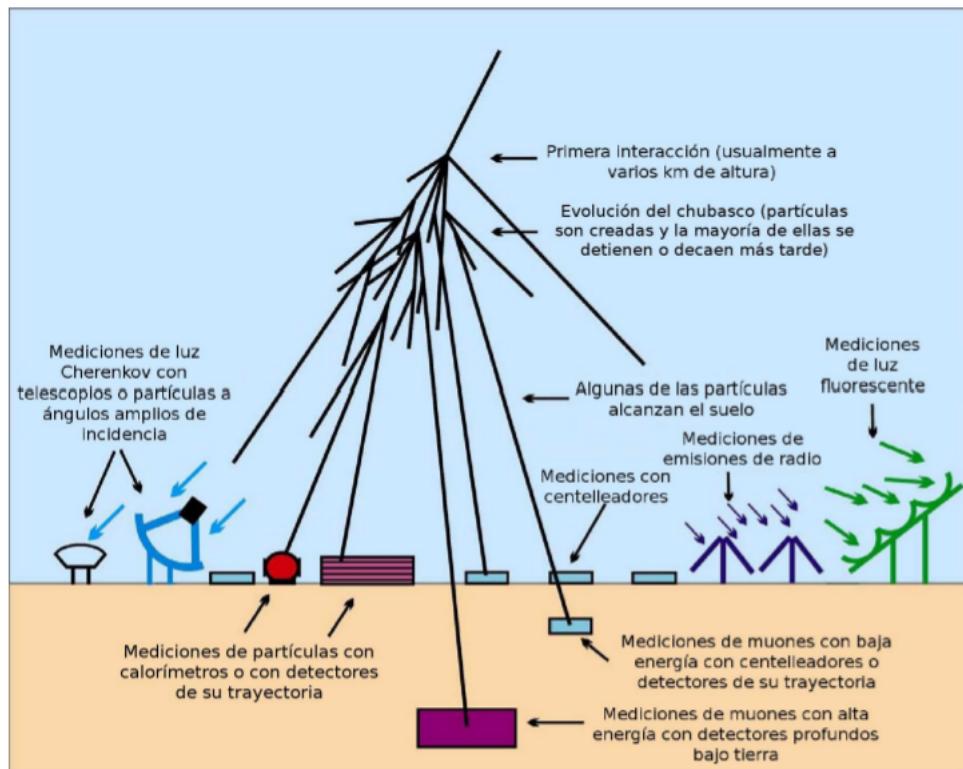


Figura 2.9: Distintas técnicas de detección indirecta de rayos cósmicos [14].

A través de este método se pueden detectar y analizar a nivel del piso los rayos cósmicos secundarios y apartir de estás reconstruir el espectro de energía y estudiar la composición de las partículas primarias. Además se puede estudiar la dirección de arriba como su distribución, así como también otras propiedades [13].

Por el momento la mejor forma para detectar lluvias atmosféricas es utilizando redes de detectores a nivel del suelo, y de gran extensión. El tamaño de las redes van desde algunos cientos de metros cuadrados, hasta 300 km². Como ejemplo está el observatorio Pierre Auger ubicado en la Pampa Amarilla, Argentina [15],[16].

2.4 Detectores de Centelleo

Para definir los detectores de centelleo primero se debe saber que un material centellador exhibe luminiscencia cuando por él pasa radiación ionizante (electrones, positrones, muones u otras partículas o iones más pesados). Esto se produce porque el material absorbe parte de la energía de la partícula incidente y la remite en forma de un corto destello de luz. Al hablar de un detector de centelleo o detector centellador se esta uniendo un material centellador a un sensor de luz, como por ejemplo un fotomultiplicador o fotodiodo. Por su parte el foto multiplicador absorbe la luz emitida por el centellador y la reemite como electrones por efecto fotoeléctrico, lo que hace que los electrones se multipliquen en una cascada de dinodos a mayor potencial eléctrico y acaban por producir una corriente eléctrica [17].

En los detectores de centelleo se pueden distinguir dos procesos de emisión de luz: fluorescencia y fosforescencia. Existen dos tipos de materiales centelladores materiales orgánicos e inorgánicos, ejemplo de un sistema de centelleo se observa en la figura 4.1. Para fijar ideas, podemos resumir el funcionamiento de un detector tipo centelleo con los siguientes pasos [17]:

1. La radiación ionizante interactúa con el material centellador, transfiriendo parte de su energía (o toda) como ionización y excitación.
2. Parte de la energía absorbida es liberada en forma de luz visible, a través de los mecan-

ismos de centelleo.

3. Mediante reflectores, guías de luz, fibras ópticas, la luz emitida se le encauza hacia el fotodetector.
4. El photocátodo del fotomultiplicador absorbe los fotones y emite fotoelectrones.
5. El arreglo multiplicador de electrones magnifica los electrones incidentes en el orden de 10^6 .
6. La corriente eléctrica de salida del fotomultiplicador es procesada electrónicamente, primero en una etapa analógica, y luego en otra digital.

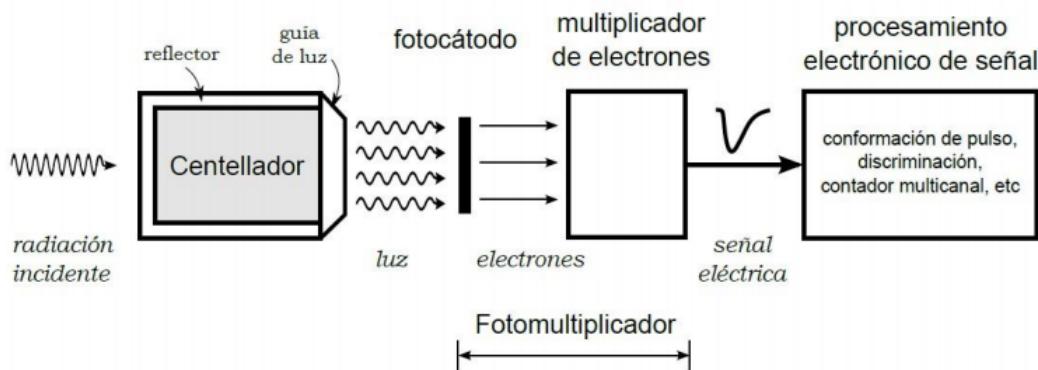


Figura 2.10: Sistema de centelleo acoplado a un tubo multiplicador [17].

Los detectores de centelleo se basan en el hecho de que cuando ciertos materiales son atravesados por la radiación sus átomos o moléculas son excitados, produciéndose su casi inmediata desexcitación mediante emisión de luz cuya longitud de onda es próxima al espectro visible. En este trabajo de grado se caracteriza detectores de centellador plástico los cuáles tienen fotomultiplicadores de silicio (SiPM).

2.4.1 Fotomultiplicadores de silicio (SiPM)

Un fotomultiplicador de silicio o SiPM es un sensor capaz de detectar, sincronizar y cuantificar señales de poca luz. Son dispositivos fotodetectores semiconductores que se encuentran todavía en fase de desarrollo, los SiPM basan su estructura en la integración de una gran cantidad de microcélulas idénticas e independientes y con capacidad de respuesta limitada a un solo fotón. Es así como cada microcélula consiste en un fotodiodo de avalancha funcionando en modo Geiger¹ en serie con una resistencia llamada resistencia de *quenching*. La resistencia *quenching* tiene un valor elevado ya que su misión principal es limitar corriente y detener el proceso de avalancha para devolver al diodo su voltaje anterior a través de la constante de tiempo τ [20].

$$\tau = R_{quenching} \cdot C_{diodo} \quad (2.8)$$

Debido a que la respuesta de cada microcélula se limita a un solo fotón, por lo que no proporcionan información sobre la intensidad de un evento luminoso. Para ello se agrupan una gran cantidad de microcélulas en paralelo. Con esta estructura, la corriente de salida será la suma de las corrientes generadas en todas las microcélulas, proporcionando al SiPM la característica de poder contar el número de fotones incidentes.

¹Produce una avalancha de electrones cuando recibe al menos un fotón independientemente de su número o energía.

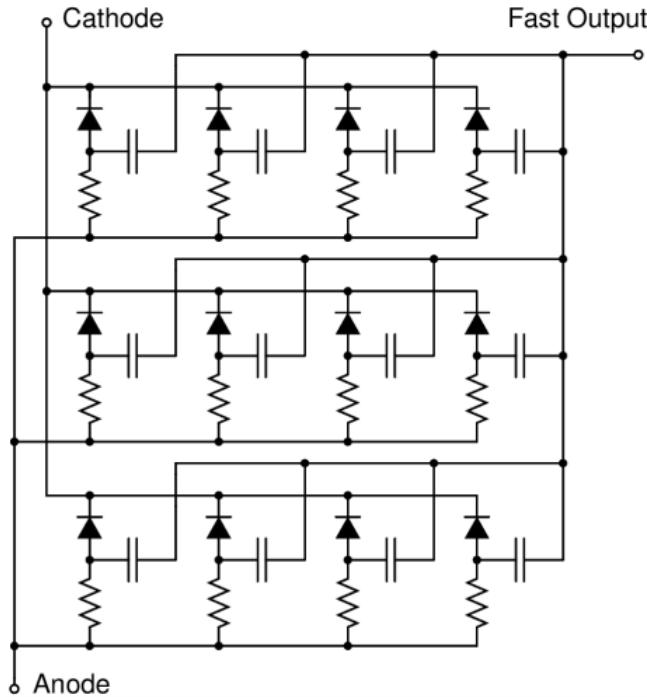


Figura 2.11: Matriz de microcélulas de un SiPM [18].

Características importantes de los SiPM

- **PDE:**

En los SiPM, en lugar de hablar de eficiencia cuántica como en el caso de los PMT, se utiliza el término PDE (Eficiencia en la Detección de Fotones) y en su cálculo se han de tener en cuenta factores diferentes a los tenidos en cuenta en la eficiencia cuántica. Dicho factor viene definido por la siguiente ecuación [20]:

$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot \varepsilon(V) \cdot F \quad (2.9)$$

Donde $\eta(\lambda)$ es la eficiencia cuántica del silicio, $\varepsilon(V)$ probabilidad de iniciación de avalancha por encima de la tensión de ruptura, F factor de llenado (factor geométrico) del dispositivo además contempla la fracción del área activa respecto del área total.

El factor de llenado se determina en la etapa de diseño, la eficiencia cuántica depende de la longitud de onda y su valor típico se sitúa entre 80% y 90% [21] y la probabilidad

de iniciación de avalancha puede estar cercana al 80% [21], éste valor se incrementa al aumentar V_{bias} .

- **Ancho de banda:**

Cada microcélula que se activa tiene un tiempo de descarga y recuperación $\sim 100ns$. Por lo tanto se puede pensar que cada microcélula tiene una velocidad de conteo de $10MHz$, pero esta aproximación no es del todo cierta ya que durante esos $100ns$ puede haber otras microcélulas preparadas, por lo tanto, el ancho de banda va a depender del nivel de la señal incidente aproximándose el límite a los $10MHz$ para las señales de saturación.

- **Rango Dinámico [22]:**

Podemos definir el rango dinámico como el nivel de señal óptica incidente para el cual el detector proporciona una buena salida. En los detectores SiPM, el rango dinámico viene limitado por el número total de microcélulas.

Cada microcélula puede detectar un único fotón, por lo tanto el número máximo de fotones que puede ser detectado coincide con el número de microcélulas. Por otra parte, sabemos que cada microcélula tiene un tiempo de descarga de $100ns$ y por lo tanto:

- Para un pulso incidente de duración menor que T_d , el rango dinámico viene limitado por el número de microcélulas.
- Para pulsos de larga duración, mayor que T_d , el rango dinámico aumenta aproximadamente de forma proporcional a la cantidad de tiempo que la señal está siendo adquirida.

Además del número de microcélulas, el rango dinámico depende de la PDE del dispositivo y es independiente de la temperatura a la cual trabaje el SiPM.

- **Ganancia:**

Cada microcélula proporciona una cantidad fija de carga cada vez que se activa, independientemente del número de fotones incidente. La información de la intensidad se

obtiene al conectar en paralelo y a una salida común gran cantidad de microcélulas. Con la configuración mencionada, la respuesta del SiPM es proporcional al número de microcélulas que han detectado fotones.

La ganancia de una microcélula se define como la relación de la carga de salida por evento de ruptura. En la figura siguiente se muestra la ganancia de una microcélula dependiente de la V_{bias} aplicada y de la temperatura de operación del SiPM.

La V_{bias} afecta a la ganancia que se incrementa de forma lineal con el voltaje según indica la siguiente ecuación [23].

$$G = \frac{C \cdot (V_{bias} - V_{br})}{q} \quad (2.10)$$

Donde G es la ganancia, C es la capacidad de la microcélula, V_{br} es la tensión de ruptura y q es la carga del electrón.

• Relación señal a ruido

En la relación señal a ruido de los SiPM, hay que tener en cuenta el tiempo durante el cual está siendo capturada o muestreada. Cada pulso de ruido es equivalente a la señal de un fotón y éste se produce de forma aleatoria con una frecuencia aproximada de $1MHz/mm^2$ (operando a temperatura ambiente). Por lo tanto, una ráfaga de fotones emitidos instantáneamente (y adquiridos) tendrá una relación señal a ruido significativamente mayor que el mismo número de fotones adquiridos durante un largo periodo de tiempo. La componente de ruido es equivalente al ruido shot en las diferentes componentes que forman la corriente total, dichas componentes son corriente de señal, corriente de fondo y corriente en oscuridad y la relación señal a ruido viene definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{S}{N} = \frac{I_s}{\sqrt{2 \cdot q \cdot F \cdot B \cdot G \cdot (I_s + (2 \cdot I_D + I_B))}} \quad (2.11)$$

Donde I_s es la correinte de señal del ánodo y viene dada por:

$$I_s = \frac{P \cdot PDE \cdot G \cdot q}{h \cdot V} \quad (2.12)$$

I_B Corriente de fondo, I_D corriente en oscuridad, G ganancia de una microcélula, F factor de exceso de ruido, B ancho de banda, q carga electrónica.

En los cálculos de la relación señal a ruido solamente se contempla el ruido shot ya que la componente de ruido térmico no se considera estrictamente ruido. Aunque no se tenga en cuenta en las ecuaciones descritas anteriormente, el ruido de origen térmico puede provocar disparos aleatorios de células, incrementándose éste efecto de forma importante con la temperatura y la tensión de polarización. No obstante, las frecuencias medias de aparición de los pulsos de ruido en oscuridad, así como su magnitud no son preocupantes para su uso en PET [24]. Las frecuencias medias oscilan entre $20kHz$ y $1MHz$ y decrecen rápidamente con el número de fotones equivalente. La probabilidad de que se produzcan pulsos de ruido equivalentes a más de tres fotones es más de tres órdenes de magnitud inferior a la probabilidad de que se produzcan pulsos equivalentes a un fotón. Al refrigerar los SiPM el ruido decrece exponencialmente con la temperatura. Al contrario que en los PMT, la ganancia de un diodo en modo Geiger no viene definida por la naturaleza estadística del proceso de multiplicación, pero es fijada por la capacidad del diodo y la tensión overbias (V_{over}), que se define como [23]:

$$V_{over} = V - V_{br} \quad (2.13)$$

Donde $V = V_{bias}$ aplicada al circuito, V_{br} tensión de ruptura.

2.5 CORSIKA

CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for Kascade) [25] es un programa basado en simulaciones de Monte Carlo, que permite simular las cascadas de secundarios generadas por un rayo cósmico o primario que ingresa en la atmósfera terrestre e interactúa con las moléculas de aire allí presentes. Basándose en varios modelos teóricos de interacciones hadrónicas y en el porcentaje de ocurrencia de estas, CORSIKA recrea el desarrollo de la cascada de secundarios, teniendo en cuenta las interacciones de las partículas con los núcleos de elementos presentes en la atmósfera y el decaimiento de partículas inestables como piones, muones y kaones, CROSINKA contiene diferentes modelos los cuales facilitan la simulación de las interacciones de las partículas cargadas a diferentes energías. Las interacciones hadrónicas a alta

energía pueden simularse mediante la implementación de modelos como VENUS, QGSJET, y DPMJET, mientras que para las interacciones hadrónicas a bajas energías se tienen los modelos GHEISHA e ISOBAR. Adicionalmente, cuenta con modelos atmosféricos (como U.S standard atmosphere, South pole y Middle Europe) que se ajustan a la composición que posee la atmósfera en diferentes puntos geográficos y posibilita la modificación de las componentes de campo geomagnético, en corcordancia con las presentes en el punto de observación seleccionado por el usuario. Así pues, todos estos aspectos influyen en el desarrollo de la cascada de secundarios y la propagación de la misma hacia la superficie terrestre.

Cabe resaltar que los datos de salida que proporciona CORSIKA, brindan información sobre el tipo de secundario, su energía, la dirección de incidencia, el tiempo de llegada y la posición, respecto al punto de observación ingresado por el usuario. Gracias a estas características, CORSIKA resulta ser una herramienta útil para el estudio de las interacciones de rayos cósmicos.

2.6 Tomografía de muones

La tomografía de muones o muongrafía es una técnica por medio de la cual, se construye una imagen de la distribución de densidades internas de algún objeto, con base en la detección de muones generados en cascadas de rayos cósmicos. Además el estudio de las lluvias atmosféricas extendidas permite obtener el flujo de muones, así como la distribución lateral de muones (MLD), la cuál permite obtener el número de muones por metro cuadrado en función de la distancia desde el punto de impacto con respecto al plano de lluvia (Figura 2.12). Así que se pueden medir lluvias a diferentes ángulos cenitales (por ejemplo: $\theta = 0^\circ$ para obtener un número máximo de muones que arriban a la superficie y para valores mayores de θ un número menor de muones).

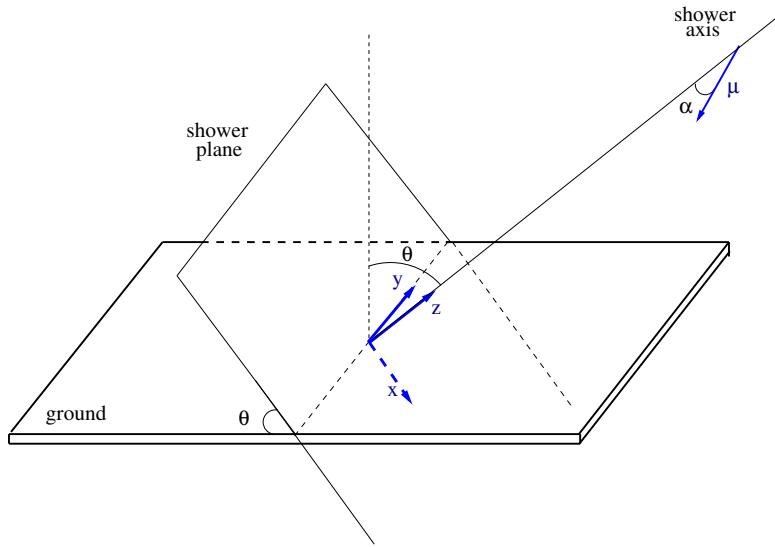


Figura 2.12: Plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), Superficie terrestre y el sistema de coordenadas [19].

Por otra parte debido a su gran poder de penetración en la materia y a que su flujo es mayor respecto al de otras partículas como protones o piones para altitudes por debajo de $\approx 5\text{km}$ [26], los muones han sido utilizados como principal elemento en técnicas de tomografía. La muografíía utiliza la detección de muones de la cascada secundaria, para determinar el coeficiente de atenuación de muones en un determinado objeto, este está relacionado con la densidad y estructura interna del objeto. Esta técnica se usa en el estudio de estructuras geológicas como montañas, volcános, túneles; debido a que existe un continuo flujo de muones sobre la superficie terrestre, y el alto grado de penetración de estas partículas ($\sim 2\text{km}$). En primer lugar, se debe medir el flujo de muones de la cascada secundaria a cielo abierto, es decir, apuntando el detector de tal manera que no exista obstáculos entre el camino de los muones y el detector, el flujo se define como el número de partículas incidentes (N) sobre un detector, por unidad de área (A), por unidad de tiempo (t), y por unidad de ángulo sólido (Ω):

$$J = \frac{dN}{dAd\Omega dt} \quad (2.14)$$

donde el área y el ángulo sólido se refieren a las características geométricas del detector. Por otro lado el flujo de muones sobre la superficie de la tierra se ha medido empíricamente, las

diferentes mediciones indican que este flujo es independiente del ángulo azimutal, y tiene una dependencia del ángulo cenital de la forma [27]:

$$J(\theta, \phi) = \frac{N}{\Delta t \Delta A \Omega} = J_v \cos^2(\theta) \quad (2.15)$$

donde J_v es el flujo vertical. El flujo total por unidad de área, por unidad de tiempo, es aproximadamente de 1 muon $\text{min}^{-1} \text{cm}^{-2}$ al nivel del mar.

Es así como el flujo a cielo abierto sigue una distribución de la forma $J_{amed}(\theta, \phi) = J_v \cos^2(\theta)$. En segundo lugar, se debe medir el flujo de muones a través de regiones individuales de la estructura geológica $J_{emed}(\theta, \phi)$; esta medición de flujos permite obtener experimentalmente el coeficiente de atenuación de muones en la estructura, y es definido como la razón entre el flujo medido a través de la estructura y el flujo medido a cielo abierto [28]:

$$n_{emed}(\theta, \phi) = \frac{J_{med}(\theta, \phi)}{J_{aexp}(\theta, \phi)} \quad (2.16)$$

de manera que se obtiene un mapa con coeficientes de atenuación de muones para cada una de las regiones que comprenden la estructura. Este coeficiente debe ser comparado con el coeficiente de atenuación obtenido a partir de una simulación de paso de muones a través de la estructura. CORSIKA es un programa que permite simular el flujo de muones a cielo abierto $J_{asim}(\theta, \phi)$ y su espectro diferencial de energía $j_{asim}(\theta, \phi, E)$ en el sitio en el cual se ubica el detector [29], a partir del flujo diferencial, es posible calcular el flujo de muones simulado a través de la estructura, utilizando la siguiente ecuación [30]:

$$J_{esim}(\theta, \phi, \rho) = \int_{E_0}^{\infty} J_{asim} dE \quad (2.17)$$

donde E_0 es la energía inicial mínima necesaria para que un muon pueda cruzar una longitud L de la estructura geológica en una región determinada; y se calcula a partir de la ecuación 2.5:

$$E_0 = \int_0^{\chi(L)} \frac{dE}{d\chi} d\chi + E_\mu \quad (2.18)$$

donde E_μ es la masa en reposo del muon. En este paso se debe realizar un modelo de la estructura geológica que incluya su densidad, estructura interna, y distancias recorridas por el

muon; este modelo permite obtener la opacidad en cada una de las regiones estudiadas $\chi(L)$ de la estructura [30]. Por lo general, como modelo, se escoge uno con densidad uniforme y valor medio que recoja las características geológicas de la estructura, es común escoger como densidad de montañas el valor de densidad de roca estándar de valor $2,650 \text{ g cm}^{-3}$, en la figura 2.13, se muestra una gráfica de energía inicial mínima en función de distancia atravesada para roca estándar.

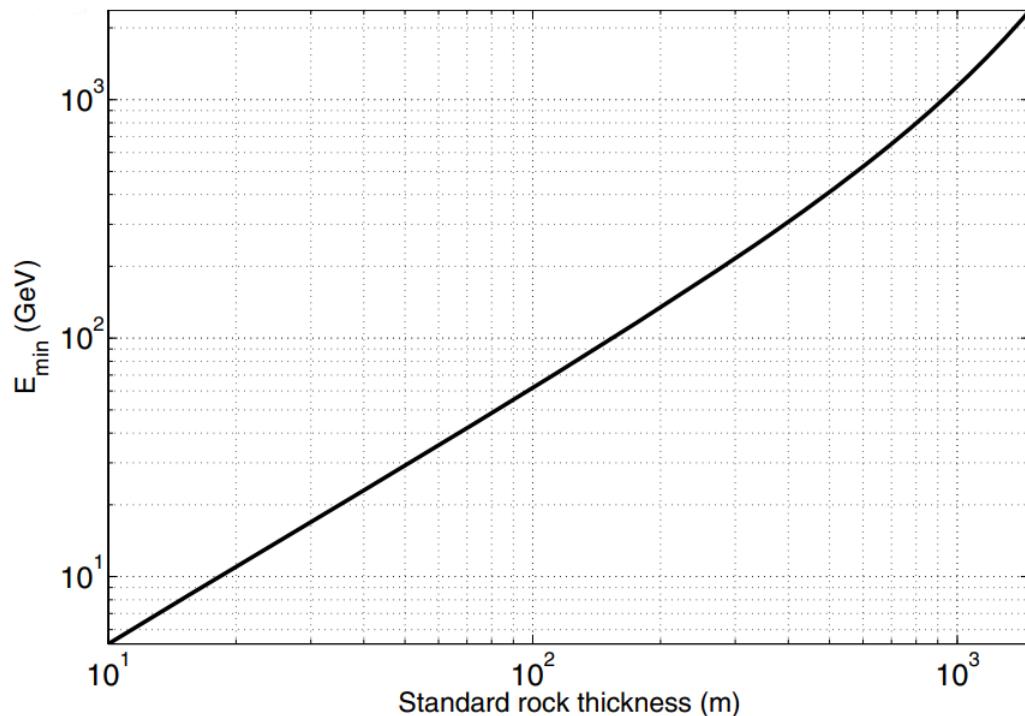


Figura 2.13: Energía mínima en función de longitud atravesada en roca estándar[30].

Para calcular las distancias recorridas por el muon a través de la estructura, se debe realizar un levantamiento topográfico a partir de modelos digitales de terreno (MDT), el MDT se puede obtener en la página de la NASA para la región de interés. El MDT de la NASA utilizó mediciones realizadas por el satélite Aster GDEM para realizar un levantamiento topográfico que abarcaba el 80% de la superficie de la tierra [31]. Con el MDT de la región de interés, se puede realizar perfiles transversales y longitudinales de la montaña en programas como ArcGis [32], estos perfiles permiten obtener las distancias recorridas por el muon a través de la montaña en cada una de las regiones de estudio. Con esta información se obtiene el coeficiente simulado de atenuación de muones por la estructura:

$$n_{esim}(\theta, \phi, \rho) = \frac{j_{esim}(\theta, \phi, \rho)}{J_{asim}(\theta, \phi)} \quad (2.19)$$

El coeficiente de atenuación relativo R de la estructura, se define como el cociente entre la atenuación medida y la atenuación simulada, usando como modelo de estructura, uno de densidad uniforme y sin cavidades [33]:

$$R = \frac{n_{emed}(\theta, \phi)}{n_{esim}(\theta, \phi, \rho)} \quad (2.20)$$

El valor de R es un indicativo de la densidad y de la estructura interna del objeto que se este estudiando. Además el bajo flujo de muones en la superficie de la tierra, y la presencia de un alto ruido en las mediciones, implica la necesidad de una toma de datos de alto tiempo de duración, de manera que la estadística recolectada sea suficiente para disminuir al máximo las barras de error. Es por esto que el tiempo de duración de la toma de datos debe ser tenido en cuenta para el mantenimiento del detector.

2.6.1 Muones atmosféricos como herramienta de imagen

Se ha realizado un estudio detallado respecto al los métodos de obtención de imágenes basados en la absorción o dispersión de muones atmosféricos, en la secciones anteriores se dio a conocer como se mide el flujo de muones y los factores que se deben tener en cuenta; el objetivo del artículo muones atmosféricos como herramienta de imagen [34] es proporcionar una introducción a esta área de investigación, partiendo de los principios físicos en la base

de los métodos y describiendo las principales tecnologías de detección y herramientas de imagen, incluida su combinación con técnicas convencionales de otras disciplinas. Pero cabe resaltar que en la práctica, lo que se mide directamente con un detector de muones es el flujo de muones que proviene de las diversas direcciones; en comparación con el flujo de "cielo libre", esto produce la probabilidad de que un muón sea absorbido por un objetivo determinado a lo largo de una determinada línea de visión (también conocida como "transmisión de muones"), que es la base de la muograffía basada en la absorción (AM), esto se puede interpretar directamente en términos de "opacidad" a lo largo de esa línea de visión, definida como la densidad integrada a lo largo de una ruta, además el método AM también necesita como entrada el espectro de impulso de los muones atmosféricos. Por otro lado esta presente la muongraffía basada en la dispersión (SM), en la cuál se busca el contraste entre un material de un número atómico alto y uno inferior. Es así que ambos tipo sde muongraffía AM y SM estan basados en las distribuciones estadísticas de grandes muestras de muones, donde AM es un método poderoso para objetivos muy grandes mientras que SM es más apropiado para objetivos pequeños y medianos, SM exige reconstruir la trayectoria del muon tanto antes como después del objetivo, lo cuál es poco práctico para objetivos como montañas o grandes edificios, mientras que AM no sufre esta limitación ya que solo necesita un único rastreo. Cuánto mayor sea el objetivo menos muones sobrevivirán a su recorrido, para mas detalle leer la información en el articulo [34].

Capítulo 3

Estado del arte

Muchos proyectos se han realizado utilizando la técnica de tomografía de muones, abriendo paso a los detectores de centellador plástico. En este capítulo se dara a conocer algunos trabajos realizados con la tomografía de muones y con ello como fueron detectadas estas partículas.

Inicios de la muongrafía

Inicialmente la técnica de tomografía con partículas de cascadas generadas por rayos cósmicos fué utilizada en 1955 por E.P. George, quien midió flujo de muones dentro de un túnel en Australia para explorar cavidades por encima del túnel [35].

Posteriormente la técnica, se hizo famosa gracias al experimento realizado por Luis Alvarez en 1970, en el cual se empleó tomografía de muones para obtener imágenes de la pirámide de Chephren en Giza, en búsqueda de túneles o cámaras secretas al interior de la estructura [36]. Al ubicar los detectores al interior de una cavidad bajo la base de la pirámide, logró medir el flujo a diferentes ángulos cenitales y compararlo con sus mediciones del fondo natural de muones. Sin embargo, aunque Alvarez no encontró ninguna cavidad nueva, demostró que la tomografía de muones puede ser una técnica exitosa a la hora de determinar la configuración material de una estructura. Con estos avances se ha venido explorando otras aplicaciones geofísicas con ello la información de imágenes de montañas, volcánnes.

3.0.1 Volcán Asama

Conocido como la primera aplicación de la muongrafía para predecir la secuencia de erupción del Monte Asama, Japón, durante los disturbios del 2 de febrero del 2009. En la que se encontró que la caída de ceniza volcánica cerca del cráter tenía una densidad de masa superficial de $400 - 500\text{g/m}^3$ y se extendía mucho más hacia el sureste. Realizaron un sistema de monitoreo en tiempo real, usando un sistema de módulo de telescopio de muones de rayos cósmicos tipo ensamblaje portatil. El sistema de telescopio consistia en tiras de centelleo segmentadas cruzadas con un ancho de $7,8\text{cm}$ que apuntaban hacia el volcán y permite el seguimiento de los muones después de pasar por la montaña, la salida del fotomultiplicador PMT consistió en una serie de pulsos eléctricos, cada uno de los cuales representa el paso de un muón a través del centellador. El sistema fue instalado en una bóveda subterránea construida a 1.2km del pico de modo que se rechazaron las lluvias y los eventos de muones múltiples. La distancia entre dos planos detectores de centelleo segmentados es de 128cm , lo que implica que la resolución angular sea $\sim 60\text{mrad}$ [1].

Los datos de muones fueron tomados y analizados entre (1) el 12 de octubre y el 6 de enero, (2) el 6 de enero y el 1 de febrero, y (3) el 2 de febrero y el 8 de febrero; por un sistema de lectura de muones de potencial efectiva, en la figura 3.1 se presentan las distribuciones horizontales de intensidades de muones de rayos cósmicos que se comparan entre (1) y (2), (2) y (3) para diferentes elevaciones.

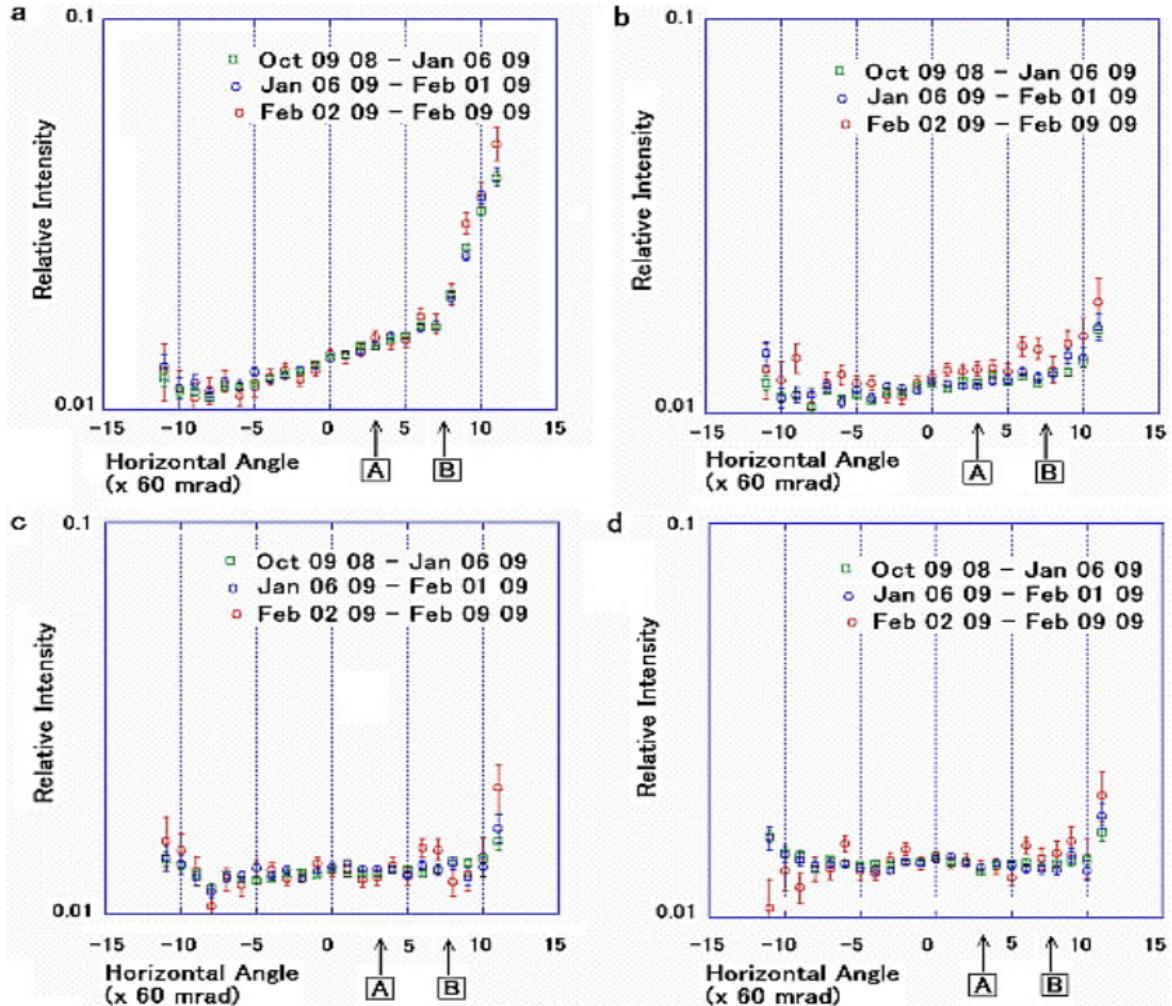


Figura 3.1: Distribuciones horizontales de intensidades de muones de rayos cósmicos. Los datos se comparan entre el 12 de octubre y el 6 de enero (cuadrado verde) y el 6 de enero y el 1 de febrero (círculo azul) y el 2 de febrero y el 8 de febrero (círculo rojo). (a) Una elevación de $\theta = 240 \pm 30\text{mrad}$; (b) una elevación de $\theta = 180 \pm 30\text{mrad}$; (c) una elevación de $\theta = 120 \pm 30\text{mrad}$; (d) y una elevación de $\theta = 60 \pm 30\text{mrad}$.[1].

Cuando compararon los datos de cada elevación entre (1) y (2), y entre (2) y (3), encontraron una característica interesante. Aunque no pudieron encontrar ninguna diferencia estadísticamente significativa en la intensidad del muón entre (1) y (2) para cualquier elevación, encontraron alguna desviación entre (2) y (3) para $\theta = 180 \pm 30\text{mrad}$. Esta región corre-

sponde a un lugar cercano al borde norte del cráter. El flujo de muones medido en esta región antes de la erupción difería en aproximadamente un 10% en comparación con el medido después de la erupción. Esta diferencia correspondía a una reducción de $\sim 3\%$ del espesor de roca de 700m [1]. La figura 3.2 muestra la distribución de densidad promedio proyectada en el plano de sección transversal que incluye el piso del cráter, además se superpone una sección transversal topográfica. Por otro lado las líneas punteadas indican la forma del suelo del cráter antes de la erupción de 2004, y las líneas continuas indican la forma del suelo después de la erupción de 2004, es así que el aumento de la intensidad del muón encontrado en la región (B) indicaba una cierta pérdida de masa durante la erupción de 2009 en la región entre la mitad de la profundidad del cráter y el fondo del cráter. Cabe resaltar que al encontrar cambios estadísticamente significativos, no parecía haber movimientos de una gran masa debajo del cráter, la pérdida de masa en el fondo del cráter se pudo estimar cuantitativamente haciendo referencia al aumento observado en la intensidad del muón [1].

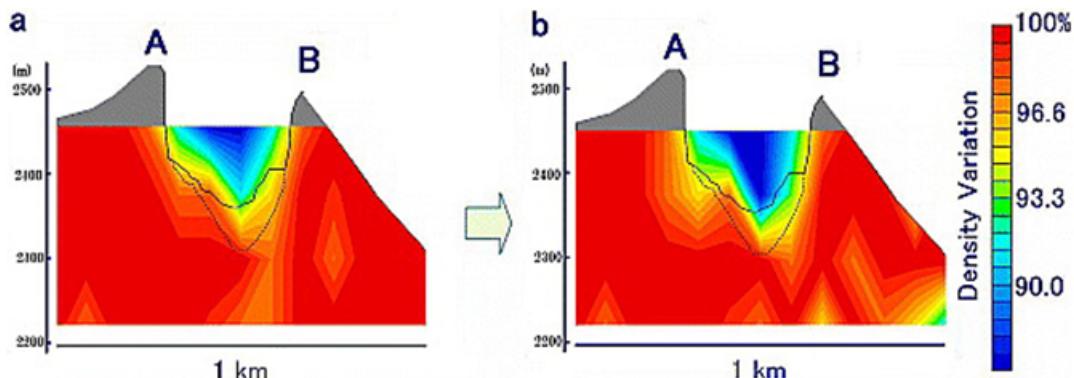


Figura 3.2: Distribución de densidad promedio proyectada en el plano de sección transversal que es paralelo al plano del detector y que incluye el piso del cráter de Asama. (a) Datos recopilados entre el 6 de enero y el 1 de febrero; y (b) datos recopilados entre el 2 de febrero y el 5 de marzo [1].

Los datos presentados aquí fueron evidencia de que detectaron visualmente movimiento de masas dentro del cráter debido a erupciones volcánicas con muongrafía. En la etapa actual, se necesita una semana para visualizar la diferencia debido al flujo limitado de muones de

rayos cósmicos. Sin embargo, este tiempo se puede reducir fácilmente ampliando el tamaño del área de detección.

3.0.2 Volcán USU

Varios investigadores como Carloganu, Saracino y Tanaka elaboran estudios sobre volcánes y en particular sobre erupción y Japón. Es así que Tanaka en el año 2006 en una toma de datos que duro 6 meses, obtuvo a partir de la medición de flujo de muones a través del volcán Uso ubicado en Hokkaido Japón, un perfil de densidad del volcán. Utilizo como detector dos cámaras de emulsión de bromuro de plata, cuando un muon atraviesa las dos cámaras, deja una traza que permite establecer la trayectoria del muon cuando estas son reveladas, las trayectorias son digitalizadas y de esta manera se determina flujo y dirección de incidencia. Las cámaras tienen un área de 6000 cm² y están ubicadas en una estructura de aluminio que permite medir flujo de muones en función del ángulo azimutal y cenital (θ, ϕ) [37].

El detector fue ubicado a 500 m del volcán, para cada valor de coordenadas (θ, ϕ), el tamaño de la región que se analiza es $(R\Delta\theta, R\Delta\phi)$, donde R es la distancia entre el volcán y el detector y $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ es la apertura entre los dos detectores [37].

En cada región estudiada del volcán Usu, se calculó las distancias recorridas por el muon dentro del volcán a partir de mapas topográficos, y se midió el flujo de muones; al comparar este flujo con el flujo a cielo abierto se obtiene el coeficiente de atenuación para cada región, las mediciones se cotejaron con una simulación de flujo de muones a través del volcán. Esta información permite obtener un mapa de densidad del volcán, que determinan su estructura interna y revela la forma del domo de lava del volcán [37].

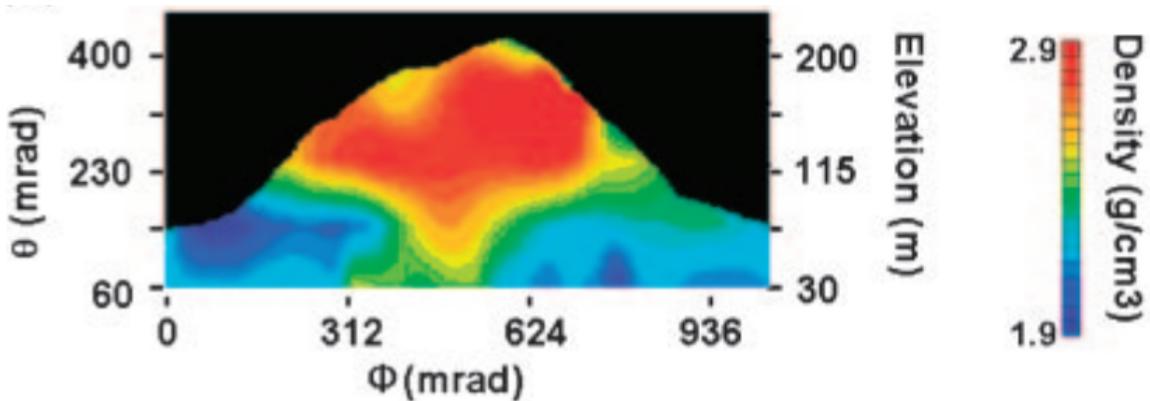


Figura 3.3: Perfil de densidad del volcán USU [37].

3.0.3 Pirámide de Keops

El primero en obtener imágenes de la pirámide de Kefrén usando atenuación de muones fue Luis Álvarez quien utilizó como detector, una cámara de chispas para identificar cavidades ocultas dentro de la pirámide, estas se verían reflejada como un exceso medido de flujo de muones con respecto a trayectorias sin cavidades, el experimento no identificó vacíos dentro de la pirámide, y abrió paso a la técnica de muografía. En 2016 se realizó una muografía de la pirámide de Keops usando tres diferentes detectores. El primero (Nagoya), consiste en dos películas de emulsión nuclear construidas con cristales de bromuro de plata con un diámetro de 200nm dispersadas en una capa de emulsión sensible de $70\mu\text{m}$ de espesor, en medio de ellas hay una capa de poliestireno transparente de $175\mu\text{m}$, cuando una partícula cargada pasa a través de las dos películas, su trayectoria tridimensional se registra, luego del revelado, se determina el flujo en cada dirección de incidencia en el detector. El segundo detector (KEK) consiste en un arreglo bidimensional de 2 pares de planos uno encima del otro, cada par de planos están separados por 1500mm , cada plano contiene un arreglo de 120 barras centelladoras; cada barra tiene dimensiones de $(1200 \times 10 \times 10)\text{mm}$. La luz producida por las barras centelladoras cuando las golpea un muón, es llevada por fibra óptica hacia contadores de fotones de múltiples píxeles MPPC, la señal análoga de los MPPC se digitaliza mediante tarjetas DAQ que permiten la coincidencia de señales de las barras, de manera que

se puede determinar la dirección de incidencia del muon en el detector y la medición de flujo en cada dirección. El tercer detector (CEA) consiste en cuatro micro-detectores Gaseosos (MPGD) cada uno con área activa de $50\text{cm} \times 50\text{cm}$, cada detector proporciona coordenadas X e Y de incidencia de muones por medio de una tarjeta de lectura 2D, el detector se llena con una mezcla de gases Argón-C4H10-CF 4, en una mezcla de 95-2-3. Cuando un muon atraviesa el volumen de gas, el gas se ioniza desprendiendo un electrón, un campo eléctrico de deriva de aproximadamente $1,5\text{KVcm}^{-1}$ entre el cátodo y el ánodo del MPGD, lleva a este electrón hacia una placa que contiene pequeños agujeros, debido a la geometría, el campo en los agujeros es tan intenso (40KVcm^{-1}) que el electrón ioniza el gas nuevamente, de manera que se produce una cascada de electrones que pueden ser analizadas por la tarjeta de adquisición de datos 2D, para determinar trayectoria y flujo de los muones incidentes [38]. Se ubicó estos tres detectores en sitios diferentes en la pirámide de Guiza para medir flujo de muones a través de la pirámide, el detector Nagoya y KEK se ubicaron dentro de la pirámide, el detector CEA por fuera (Figura 3.4 a). La figura 3.4 b, muestra la medición de flujo en el detector Nagoya (izquierda) y su comparación con la simulación con cavidades (derecha), se identifica las cavidades conocidas (A,B) y un exceso de flujo indicativo de existencia de una cavidad desconocida. La figura 3.4 c, muestra la imagen de la normalización del flujo medido por el detector KEK con el flujo simulado sin cavidades donde se observa las cavidades conocidas (izquierda), la cavidad desconocida (rectángulo amarillo) se observa como un exceso entre la normalización de flujo medido por KEK y el flujo simulado con cavidades que eliminan las cavidades conocidas (derecha). La figura 3.4 d, muestra un exceso (rectángulos negros) en la normalización entre el flujo medido por CEA y flujo simulado con cavidades. Los tres detectores muestran la presencia de una cavidad no identificada dentro de la pirámide como un exceso entre el flujo medido y el flujo simulado, la triangulación del exceso en flujo medido por los tres detectores, permite ubicar la cavidad desconocida dentro de la pirámide [38].

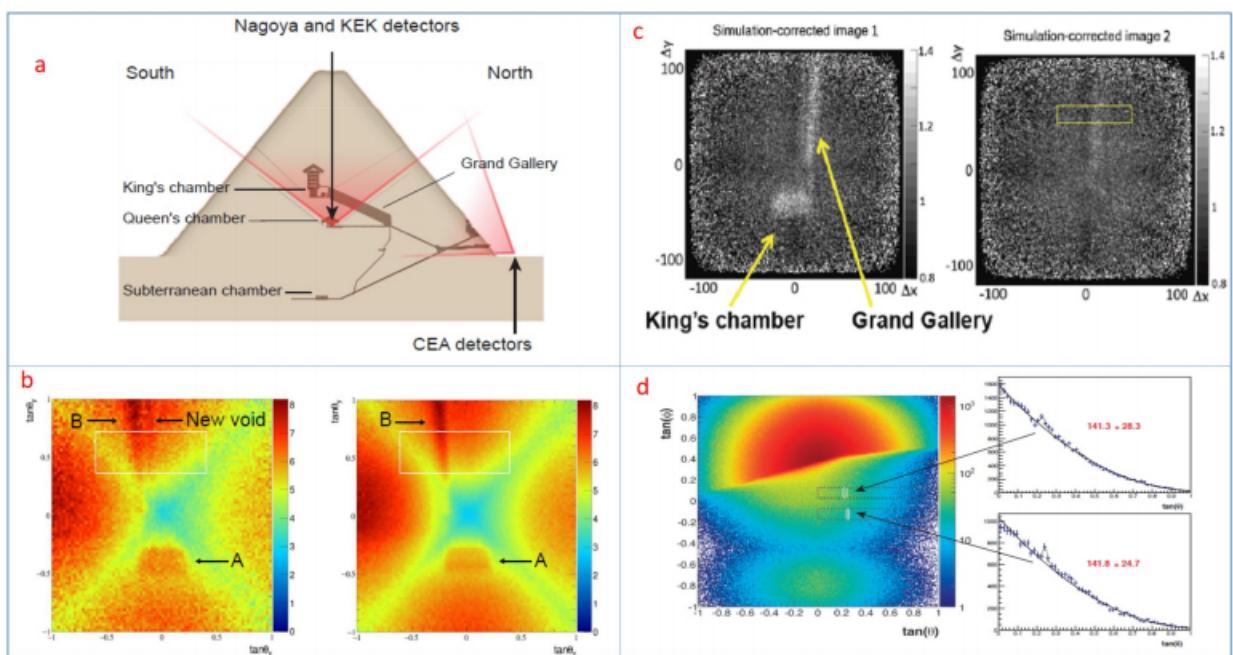


Figura 3.4: a) Ubicación de los diferentes detectores dentro de la pirámide. b) Resultado de Nagoya. c) Resultado de KEK. d) Resultado de CEA [38].

Capítulo 4

Detector de Centellador Plástico

En esta sección se realiza la descripción del detector prototipo de muones tipo hodoscopio. El cuál fue diseñado y ensamblado por el grupo de trabajo de la universidad South Dakota, universidad de Medellín y la universidad de Nariño, está constituido por láminas y barras centelladoras cuya luz son leídas por los SiPM. Este detector está montado sobre una estructura metálica de aproximadamente 3 m de longitud es decir tiene una parte superior y una inferior, además en dicha estructura es posible posicionar el detector a diferentes ángulos cenital y azimutal. También se detalla el funcionamiento del detector, la electrónica de la lectura y la adquisición de datos.

4.1 Descripción del Detector

Se cuenta con un detector de muones tipo hodoscopio, el cuál contiene 6 placas de centellador plástico, donde 2 de estas placas corresponden a los extremos del detector (superior, inferior) y son tomadas como trigger, es decir tienen una señal de coincidencia para que sólo los muones que golpean a la placa superior (placa cercana a la superficie de estudio) activen la electrónica de lectura, ya que dicha placa es la primera en recibir una señal de un muon que atravesie la superficie. Las 4 placas restantes se encuentran conformadas cada una por 6 barras individuales de centellador plástico las cuales son ubicadas en medio de las dos barras anteriores.

Cada una de las placas y barras descritas anteriormente se encuentran acopladas a un sistema de detección de luz SiPM, el cuál se conectara al sistema de adquisición de datos front-end-board (FEB). Las placas son un plástico centellador orgánico de referencia **EJ-200**.

4.1.1 Material Centellador EJ-200

Este material centellador combina dos propiedades importantes una gran longitud de atenuación óptica y la rápida respuesta en tiempo. Esta última propiedad es utilizada por el tiempo de emisión de luz para centelladores de un metro de longitud de largo, las características se indican en la figura 4.1.

PROPIEDADES	EJ-200	EJ-204	EJ-208	EJ-212
Salida de luz (% antraceno)	64	68	60	sesenta y cinco
Eficiencia de centelleo (fotones / 1 MeV e ⁻)	10,000	10,400	9.200	10,000
Longitud de onda de emisión máxima (nm)	425	408	435	423
Longitud de atenuación de luz (cm)	380	160	400	250
Tiempo de subida (ns)	0,9	0,7	1.0	0,9
Tiempo de decaimiento (ns)	2.1	1.8	3.3	2.4
Ancho de pulso, FWHM (ns)	2.5	2.2	4.2	2,7
No. de átomos de H por cm ³ (x10 ²²)	5.17	5.15	5.17	5.17
No. de átomos de C por cm ³ (x10 ²²)	4.69	4.68	4.69	4.69
No de electrones por cm ³ (x10 ²³)	3.33	3.33	3.33	3.33
Densidad (g / cm ³)	1.023	1.023	1.023	1.023
Base de polímero	Poliviniltolueno			
Índice de refracción	1,58			
Punto de ablandamiento	75 ° C			
Presión de vapor	Compatible con vacío			
Coeficiente de expansión lineal	7,8 x 10 ⁻⁵ por debajo de 67 ° C			
Salida de luz frente a temperatura	A 60 ° C, LO = 95% de eso a 20 ° C Sin cambio de 20 ° C a -60 °			
Rango de temperatura	-20 ° C hasta 60 ° C			

Figura 4.1: Características del material centellador [40]

El espectro de emisión de las placas de centelleo se presenta en la figura 4.2.

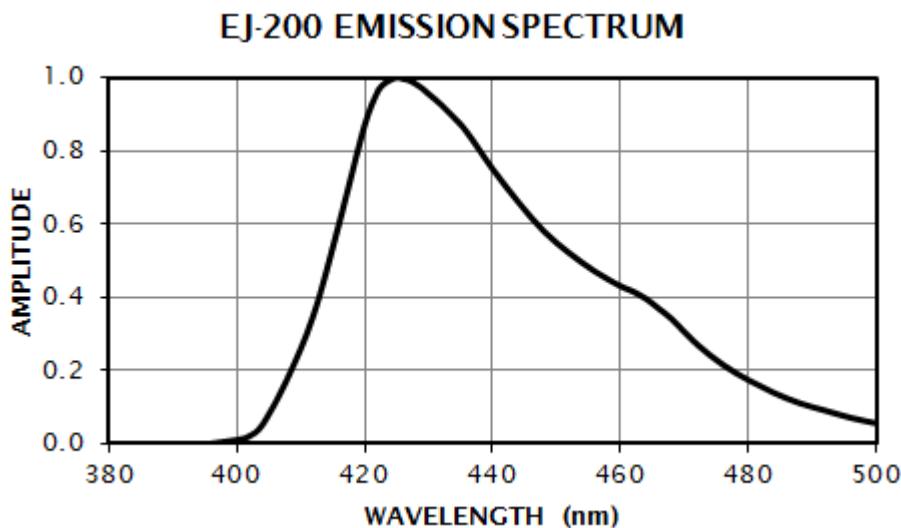


Figura 4.2: Espectro de emisión de luz del centellador plástico EJ-200 con un máximo en 425 nm [39].

4.2 Descripción del montaje

Al contar con un detector tipo hodoscopio, este consta de un brazo móvil de aproximadamente 3 m de largo que contiene una parte superior e inferior, además de una base que permite dirigir los ángulos cenital y azimutal, donde el ángulo azimutal se mide con respecto al norte geográfico y el ángulo cenital se mide con respecto a la vertical del lugar donde se encuentra ubicado el detector. El detector es sujetado a la estructura con alambres especiales para evitar cualquier tipo de complicaciones que alteren su funcionamiento.

En la figura 4.3 está presente el detector con su respectiva estructura, donde se encuentra señalado la ubicación de las placas superiores e inferiores, como también la ubicación de la FEB. La distribución de las placas en dicha estructura es la siguiente:

- En la parte superior de la estructura del detector, se ubican tres placas en el siguiente orden:

- * Placa con una lámina centelladora (Placa tomada como trigger)
- * Placa con seis barras centelladoras, ubicada de forma vertical respecto a la estructura.
- * Placa con seis barras centelladoras, ubicada de forma horizontal respecto a la estructura.

Las tres placas anteriores unidas de tal forma que no exista separación entre ellas.

- A una separación de 3 m, en la parte inferior de la estructura del detector se ubican las tres placas restantes en el siguiente orden:

- * Placa con seis barras centelladoras, ubicada de forma horizontal respecto a la estructura.
- * Placa con seis barras centelladoras, ubicada de forma vertical respecto a la estructura.
- * Placa con una lámina centelladora (Placa tomada como trigger)

Las tres placas anteriores unidas de tal forma que no exista separación entre ellas.



Figura 4.3: Estructura y Detector de centellador plástico, ubicados para toma de datos.

A cada una de las seis barras descritas anteriormente y a las placas tomadas como trigger se les asigna un canal diferente en la FEB, ya que ésta tiene disponibilidad de 32 canales, para realizar la respectiva adquisición de datos. Los canales tienen la siguiente distribución:

Parte superior de la estructura

En la figura 4.4 se presenta la configuración para las placas ubicadas en la parte superior.

- Trigger canal 0.
 - Placa vertical respecto a la estructura canales: 26, 27, 28, 29, 30, 31.
 - Placa horizontal respecto a la estructura canales: 20, 21, 22, 23, 24, 25.

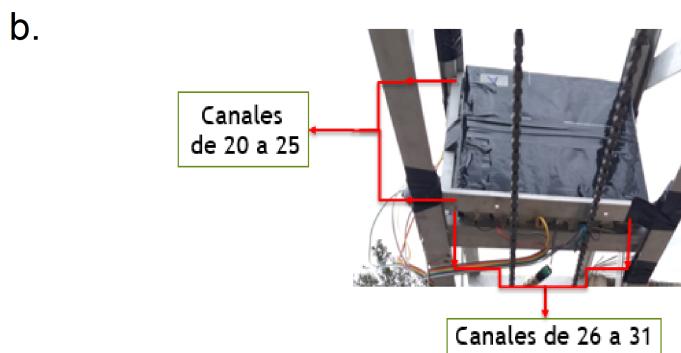
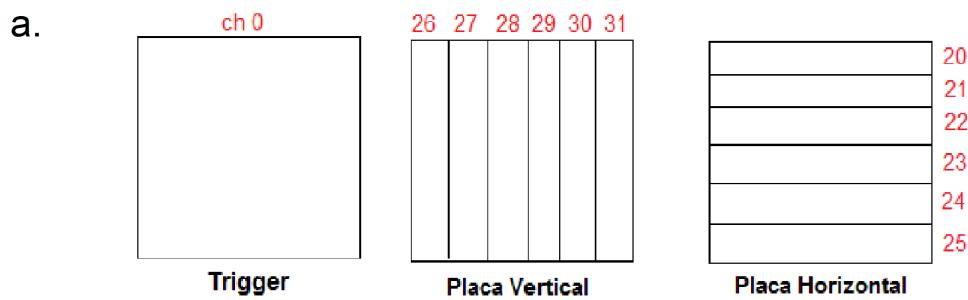


Figura 4.4: a) Distribución de canales para placas superiores. b) Distribución de canales para placas superiores ensamblado en la estructura del detector.

Parte inferior de la estructura

En la figura 4.5 se presenta la configuración para las placas ubicadas en la parte inferior.

- Trigger canal 1.
- Placa vertical respecto a la estructura canales: 13, 14, 2, 3, 4, 5.
- Placa horizontal respecto a la estructura canales: 6, 7, 8, 9, 10, 11.

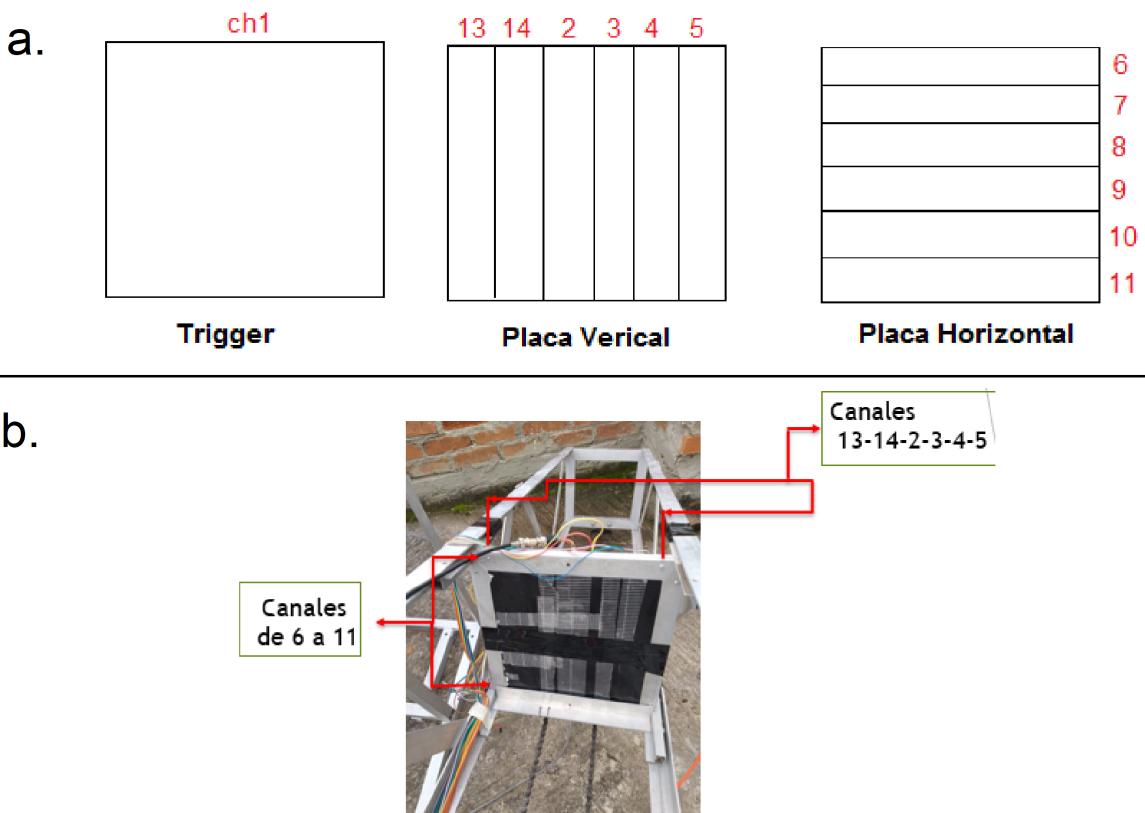


Figura 4.5: a) Distribución de canales para placas inferiores. b) Distribución de canales para placas inferiores ensamblado en la estructura del detector.

4.3 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se sabe que nos referimos al proceso de realizar mediciones de fenómenos físicos, a través de un medio o superficies y registrarlos de alguna manera

para analizarlos, en este caso ese fenómeno físico son las partículas procedentes de los rayos cósmicos y que particularmente se desea registrar muones, para ello cuando los rayos cósmicos atraviesan una determinada superficie la radiación incidente interacciona con los átomos y moléculas del material centellador plástico excitándolos, estos se desexcitan emitiendo luz visible de fluorescencia. Esta luz llega a una superficie fotosensible arrancando fotoelectrones dichos electrones se aceleran y se multiplican para formar un pulso eléctrico que es captado por el SiPM, que a su vez es conectado a la FEB para poder filtrar la señal y que esta se capte en una conversión analógica-digital Así de una manera u otra nos proporciona en el ordenador los datos respectivos de ese pulso es decir los diversos pulsos de las partículas que tocan al material centellador plástico (ver figura 4.6). Cabe resaltar que para obtener resultados satisfactorios de las partículas registradas es necesario un tiempo de exposición prolongado, puesto que se gana mayor número de eventos proporcionando así mayor estadística a la hora de analizar los datos.

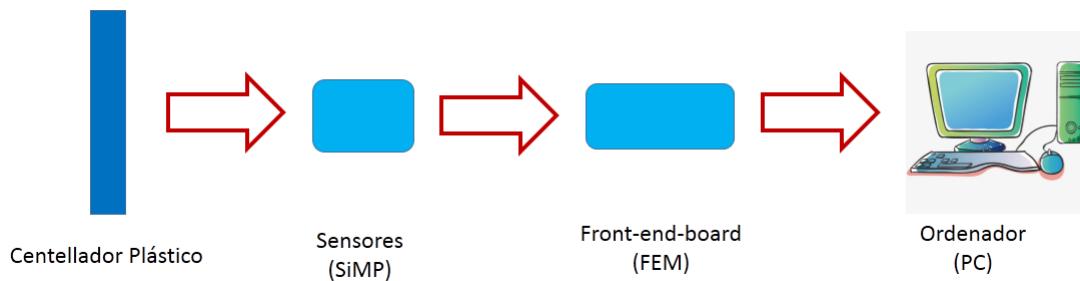


Figura 4.6: Diagrama de adquisición de datos.

El recorrido que realiza un muon a través de las placas centelladoras del detector prototipo queda representado en la figura 4.7, donde se logra observar como dos partículas pasan por las placas superiores del detector y se dirigen hacia las placas ubicadas en la parte inferior, es así como los muones atraviesan todas las placas del detector y cada dato queda registrado como se lo explicó anteriormente.

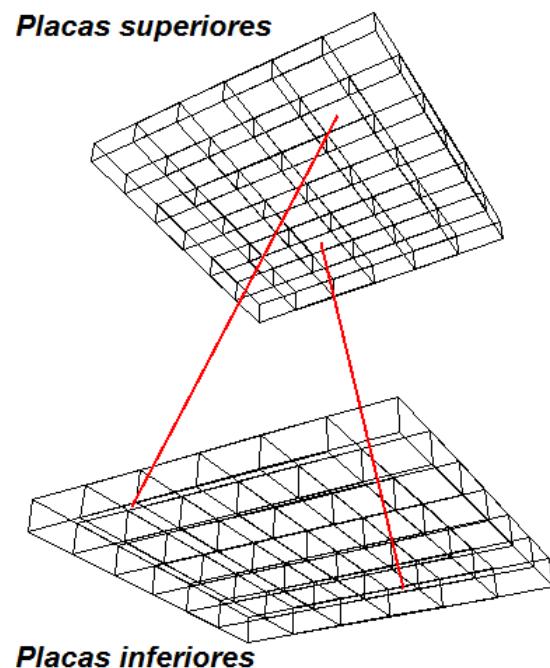


Figura 4.7: Esquema de dos partículas atravesando las placas de centellador plástico.

Capítulo 5

Mediciones

En este capítulo se presenta los datos registrados en la FEB, de los diferentes tramos de días en los que el detector estuvo expuesto en la zona del departamento de Nariño, además los resultados obtenidos del tramo de días seleccionado, permitiendo realizar una buena caracterización de los detectores de centellador plástico para tomografía de muones.

5.1 Toma de datos

Para realizar una buena toma de datos se analiza previamente la zona de campo, esto implica si es una área accesible o tiene otro tipo de características relevantes. Como también estudiar previamente los valores del ángulo cenital y azimutal, para poder realizar una toma de datos acertada, por lo que con ayuda de CORSIKA se realizó con el grupo de trabajo de la universidad South Dakota, universidad de Medellín y la universidad de Nariño, una simulación la cual consistió en hacer atravesar muones sólo al detector, es decir el detector a cielo abierto, haciendo incidir 296206 muones. Se obtuvo la variación angular de la estructura del detector, dicho resultado es presentado en la figura 5.1, con ello se optó por un ángulo cenital de referencia igual a 23° y un ángulo azimutal de referencia igual a 223° , puesto que en dichos valores el número de eventos es favorable para una buena toma de datos.

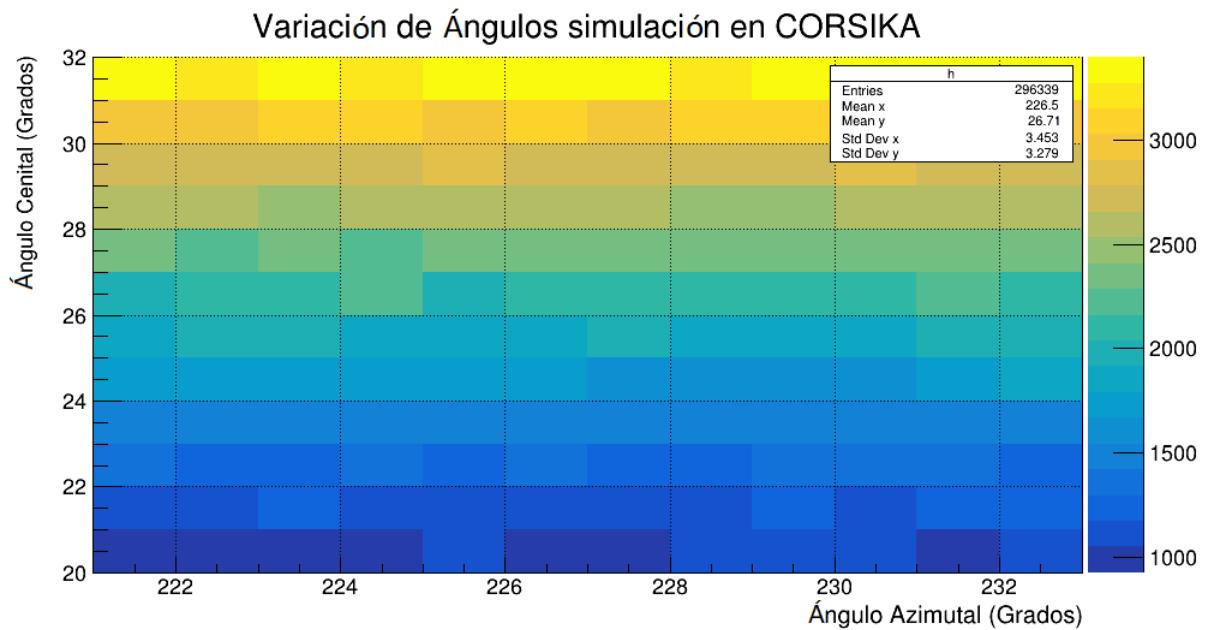


Figura 5.1: Simulación en CORSIKA de la variación de ángulos cenital y azimutal.

Es así que se deja expuesto el detector en una zona del departamento de Nariño. Se inició realizando una división de diferentes tramos de días de los cuales se puede tener en cuenta los datos registrados en la Tabla 5.1, en la que está presente fecha de inicio y final de cada tramo, hora de inicio y final de cada tramo, la dirección en la que apunta el detector prototipo y como adicional el peso de cada archivo de los tramos de días, con extensión .root que es generado por la FEB. Se instaló en un computador el software de la FEB, desde aquí es posible controlar la configuración para los diferentes tramos de días registrados. Con esto permitiendo ganar un mayor número de eventos los cuales son estudiados para poder dar certeza que los detectores de centellador plástico son aptos para la tomografía de muones.

Tramo	Fecha de Inicio	Fecha Final	Hora de Inicio	Hora Final	Dirección	Peso root file (MB)
1	16-12-2019	20-12-2019	12:00 pm	9:06 am	Superficie	529.7
2	20-12-2019	23-12-2019	9:06 am	10:18 am	Superficie	392.4
3	23-12-2019	27-12-2019	10:18 am	10:20 am	Superficie	504.5
4	27-12-2019	30-12-2019	10:20 am	11:20 am	Superficie	48.2
5	2-01-2020	8-01-2020	13:35 pm	10:25 am	Cielo Abierto	459
2	8-01-2020	13-01-2020	10:35 am	10:25 am	Superficie	509.4

Tabla 5.1: Tramos de días registrados.

En la Tabla 5.2 se presentan los ángulos cenital y azimutal tanto inicial como final de los diferentes tramos de días registrados de la estructura del detector, estos datos son tomados con ayuda de apps del sistema android. Con una de ellas se obtuvo el ángulo cenital, está app sólo cálculo la inclinación de la estructura del detector. La app faltante era una brújula con la que fue posible calcular el ángulo azimutal respecto al norte geográfico. Esto se realizó en cada control de los diferentes tramos de días. La dirección de los ángulos cenital y azimutal se realiza como se lo explicó en el capítulo anterior, además se tiene en cuenta los ángulos de referencia anteriormente mencionados, pero cabe resaltar que se excluye el ángulo azimutal del tramo 2 a 8 de enero del 2020, ya que el detector apunto a cielo abierto.

Tramos	Ángulo Cenital inicial	Ángulo Cenital final	Ángulo Azimutal inicial	Ángulo Azimutal final
1	23.2°	23°	223°	222°
2	23°	22.9°	223°	215°
3	23.2°	23°	223°	232°
4	24°	23°	223°	213°
5	24.3°	24.4°	272°	280°
6	24.3°	24.2°	220°	209°

Tabla 5.2: Datos registrados de los ángulos cenital y azimutal.

Apartir de los datos registrados en la tabla 5.2, se realiza las gráficas de las figuras 5.2, 5.3, donde estan presentes los ángulos finales cenital y azimutal registrados en los tramos de días. En la gráfica presente de la figura 5.2, se observa que entre los diferentes días la variación no es mayor a 2° y esto es sostenible en la gráfica de la figura 5.4, donde se registra la variación angular cenital de la estructura del detector para los diferentes tramos de días. La variación del ángulo final cenital respecto a 23° (ángulo de referencia), se encuentra en el rango de 0 a 2°, además cabe resaltar que la variación de los días 20, 27 y 30 de diciembre del 2019, es igual a cero. Como también la gráfica presente en la figura 5.3, se encuentran los ángulos azimutales finales de los diferentes tramos de días en lo que no se encuentra registrado el ángulo azimutal final del tramo 2-8 de enero puesto que el detector apunto a cielo abierto, además en la figura 5.5, se encuentra presente la variación de dichos ángulos, tomando como referencia 223°, donde es notorio observar que existe una gran variación.

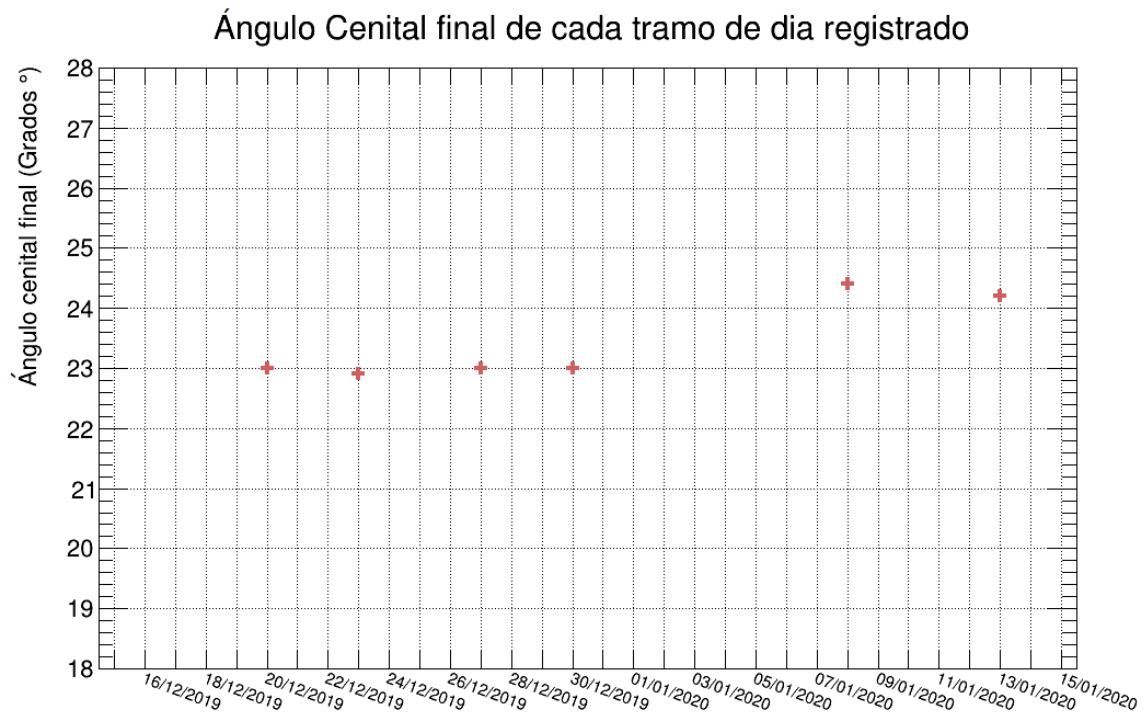


Figura 5.2: Ángulos finales cenitales registrados en los tramos de días.

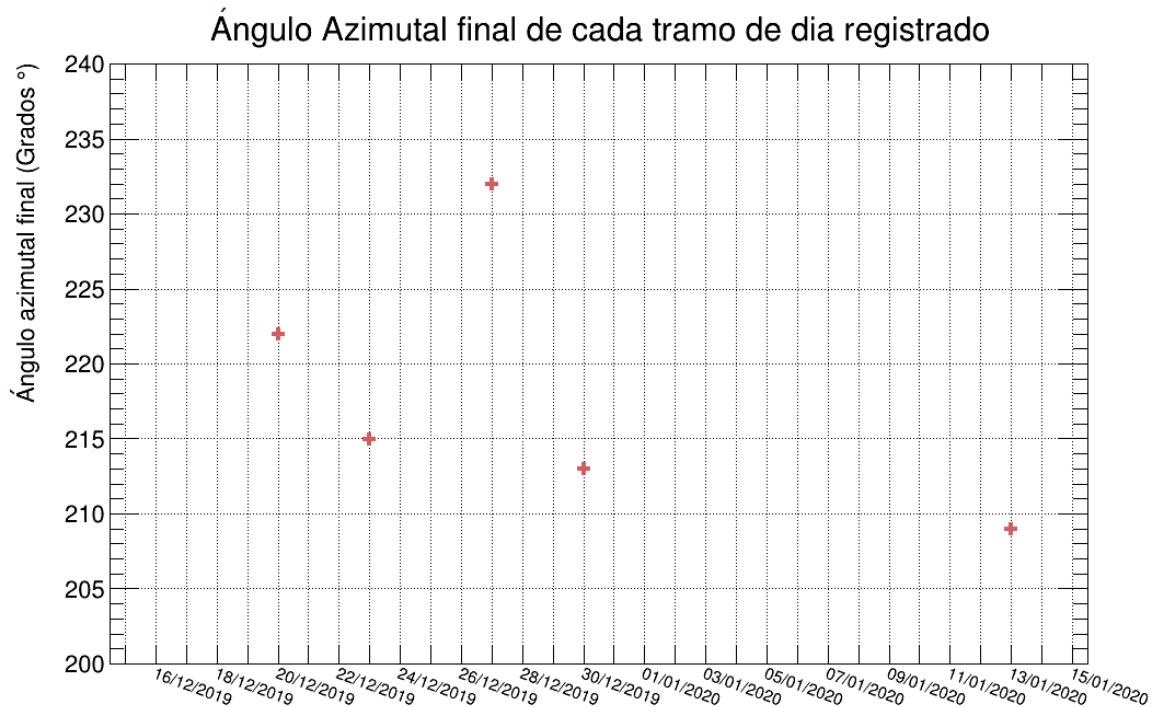


Figura 5.3: Ángulos finales azimutales registrados en los tramos de días.

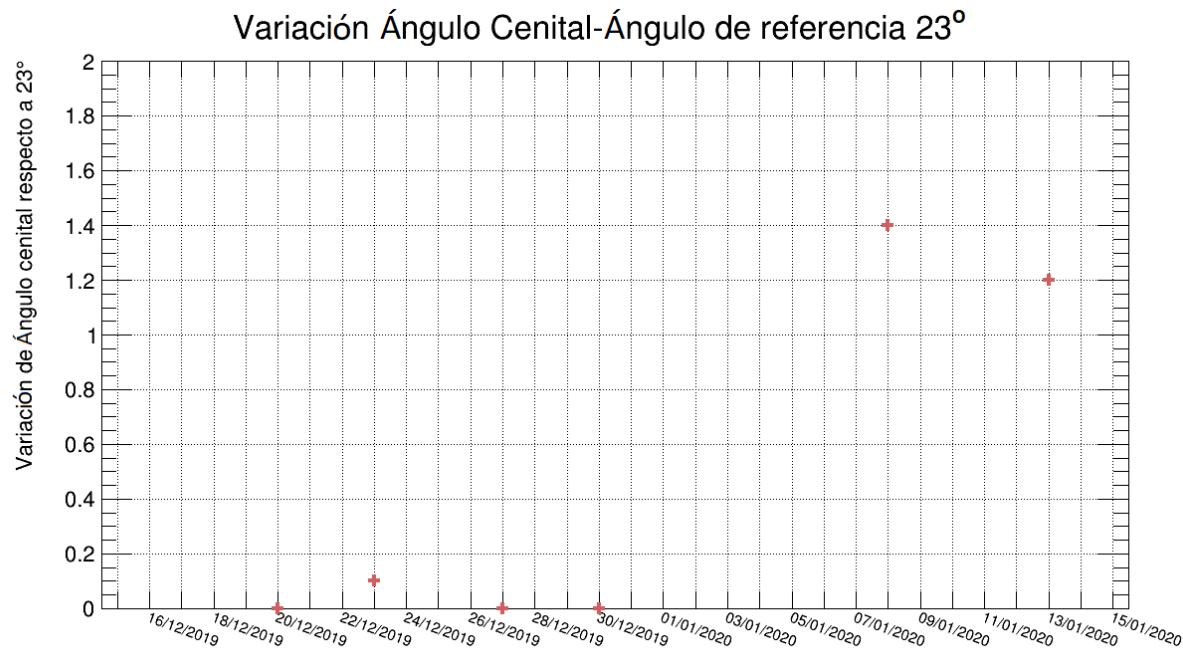


Figura 5.4: Variación del angulo cenital para los diferentes tramos de días, tomando como referencia 23°.

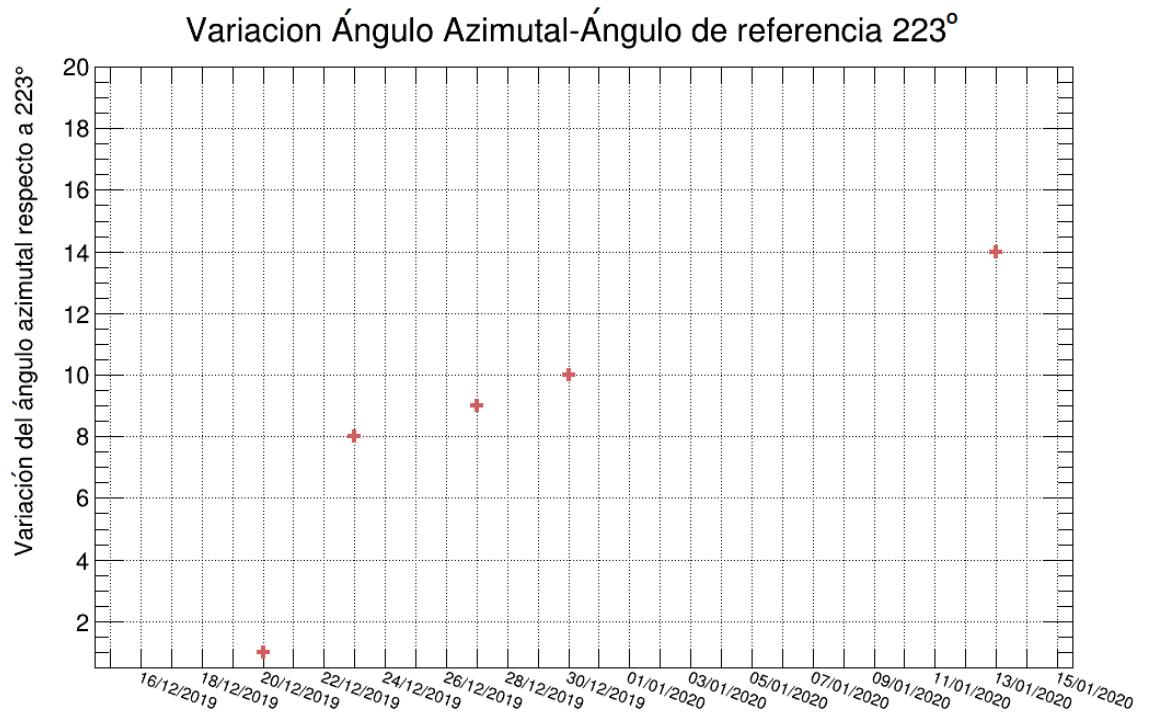


Figura 5.5: Variación del angulo azimutal para los diferentes tramos de días, tomando como referencia 223°.

Por otra parte se sabe que el detector está expuesto a los diferentes cambios climáticos. Para analizar dicho cambio climático se obtuvo información de diferentes estaciones ubicadas cerca al punto de análisis, por ejemplo diferentes datos hidroclimáticos, como el caso de la temperatura, que se ingresó vía internet a la página principal del "Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales" (IDEAM) [41], donde se procedió a buscar en ésta, la pestaña **CONSULTA-DESCARGA DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS**, ahí se debe aceptar los términos y condiciones. Una vez realizado el procedimiento, se despliega una nueva plataforma donde se puede efectuar la consulta, en primer lugar se asignó el periodo de tiempo deseado, en la opción de serie de tiempo y frecuencia se dejó como ESTÁNDAR, además se escogió el parámetro de temperatura, se ubicó el departamento de Nariño y el municipio de Pasto. Es así que se logró descargar dichos datos, para guardar el archivo en formato CSV; con lo que se realizó un código en el programa ROOT para leer dicho archivo y lograr observar el comportamiento de las temperaturas de los días que estuvo expuesto el detector prototipo. Se tuvo en cuenta las estaciones de botana, el encano y obonuco debido a que otras estaciones como antonio nariño y bombona no tenían datos registrados de enero del 2020, además se observa que en la página de IDEAM solo se tiene las horas de 7am, 1pm, 6pm.

En la figura 5.6, se presenta un análisis importante respecto a los datos registrados de la temperatura por las estaciones de botana, el encano y obonuco, para los días que el detector estuvo expuesto en la zona del departamento de nariño, donde se logra observar que la temperatura promedio de los tramos de días es de $10^{\circ}C$ a $14^{\circ}C$ (banda gris presente en la gráfica). Esto con el fin de tener un control garantizado para todo el sistema del detector prototipo en especial para el SiPM, puesto que este no posee un buen funcionamiento al cambio climático.

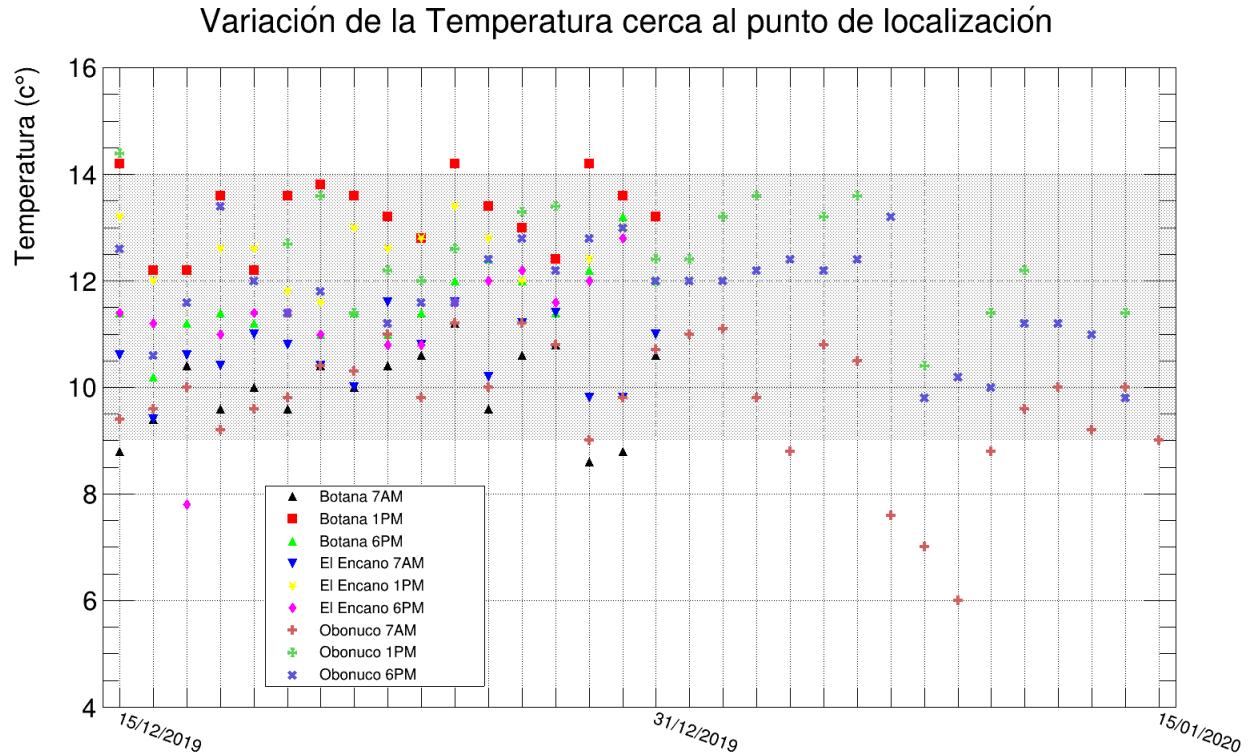


Figura 5.6: Temperaturas registradas en los días señalados por las diferentes estaciones cercanas al punto analizado, Banda gris: Temperatura promedio de los días registrados.

5.2 Resultados Obtenidos

En esta sección se presenta las gráficas de los eventos registrados en la Front-end-board, los datos analizados son los del tramo 8 a 13 de enero del 2020, ya que dichos días cuentan con una configuración aceptable, la cual nos ayuda a verificar el funcionamiento de el detector prototípico. Cabe resaltar que para obtener resultados satisfactorios se analiza previamente el mejor ADC para una buena estadística de datos.

En la figura 5.7, se presenta el número total de eventos para los 32 canales, con los diferentes ADC iniciando desde cero, donde cada color representado en dicha gráfica hace referencia a cada canal. En la figura 5.8 se encuentra presente los eventos para los 32 canales. Se inicia

desde un ADC de 2000 con un filtro superior igual a 4000, donde cada color representado en dicha gráfica hace referencia a cada canal. Se realizó dicho corte desde 2000 debido a que es notorio observar que en la figura 5.7 para ADC menores de 2000 se encuentran presentes señales de ruido.

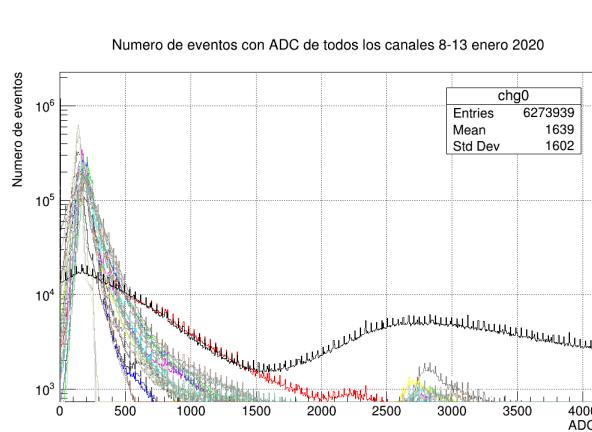


Figura 5.7: Número de eventos con ADC de todos los canales 8-13 de enero 2020, cada color hace referencia a los 32 canales.

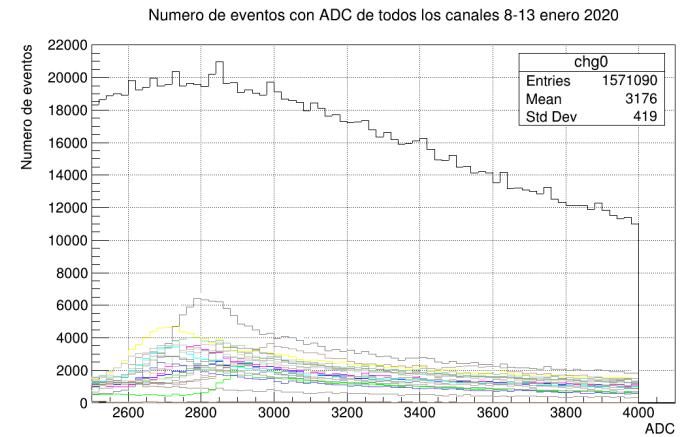


Figura 5.8: Número de eventos con ADC apartir de 2000 y ADC superior a 4000, cada color hace referencia a los 32 canales.

Es así que en la figura 5.9, está presente el canal correspondiente de cada barra en la FEB, con un corte de ADC mayor de 2000 pero menor a 4000. Se aclara que los canales 13 y 14 en la gráfica son representados por los números 0 y 1, además no todos los canales de la FEB son usados es decir que apartir del canal 15 a 20 junto con el canal 12, ninguna barra estuvo conectada a dichos canales, con esto la figura 5.9, nos da una aclaración fundamental que en los canales usados unos tienen mayor número de eventos lo que cabe la posibilidad que dichos canales no funcionaron de la forma adecuada, por otro lado se registra señales de ruido en los canales vacíos.

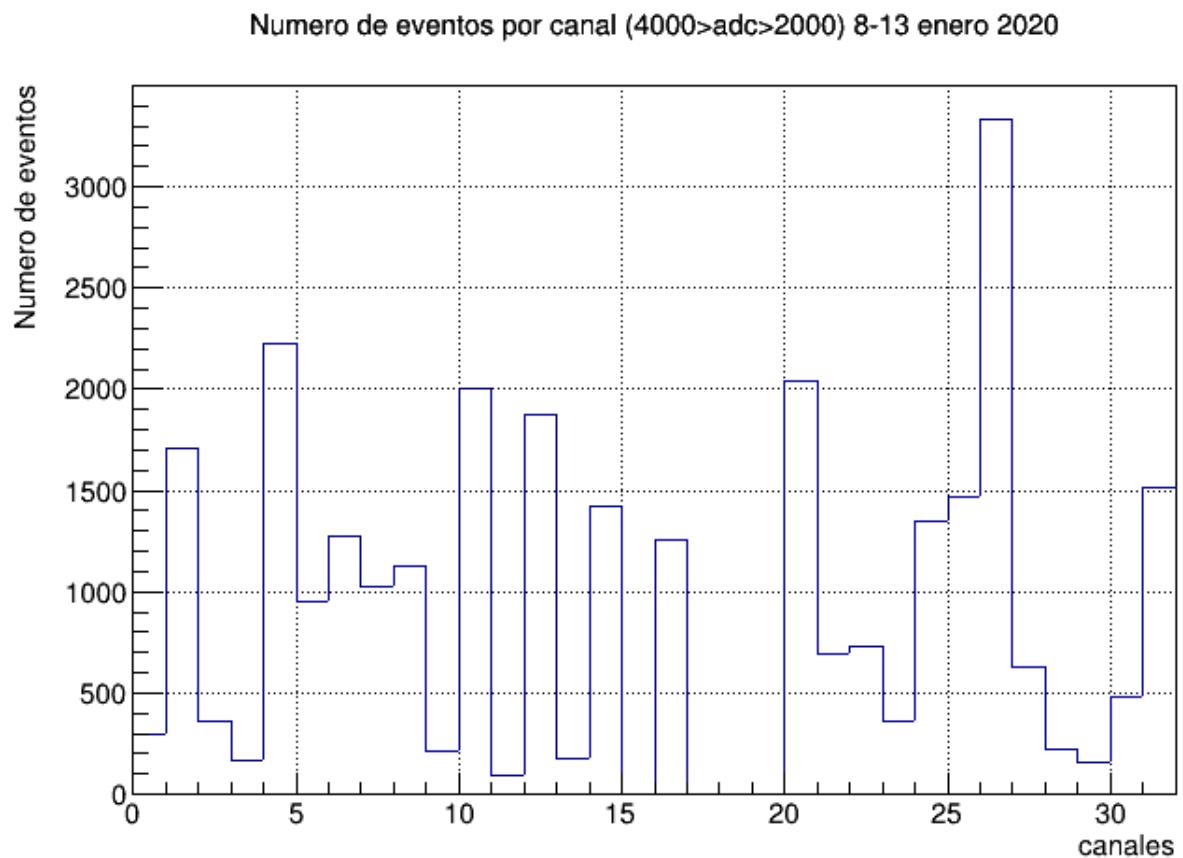


Figura 5.9: Número de eventos registrados en cada canal 8-13 de enero 2020.

Con lo descrito anteriormente en la figura 5.10, se encuentran el número de eventos registrados por la FEB, en el tramo de días de 8 a 13 de enero del 2020. Donde se inicia con un corte de ADC de 2000, manteniendo fijo el filtro superior de 4000, por otro lado para saber exactamente estos números de eventos se realiza un código macro en ROOT, con ello se estudia el archivo con extensión .root que es generado por el software de la front-end-board, el cual contiene todos los eventos registrados de dicho tramo, a estos datos se les realiza 10 particiones para una mejor estadística, a lo que se agrega la condición que un solo evento active las placas tomadas como trigger, la placa vertical superior, como también active la placa horizontal superior, análogamente con las placas inferiores.

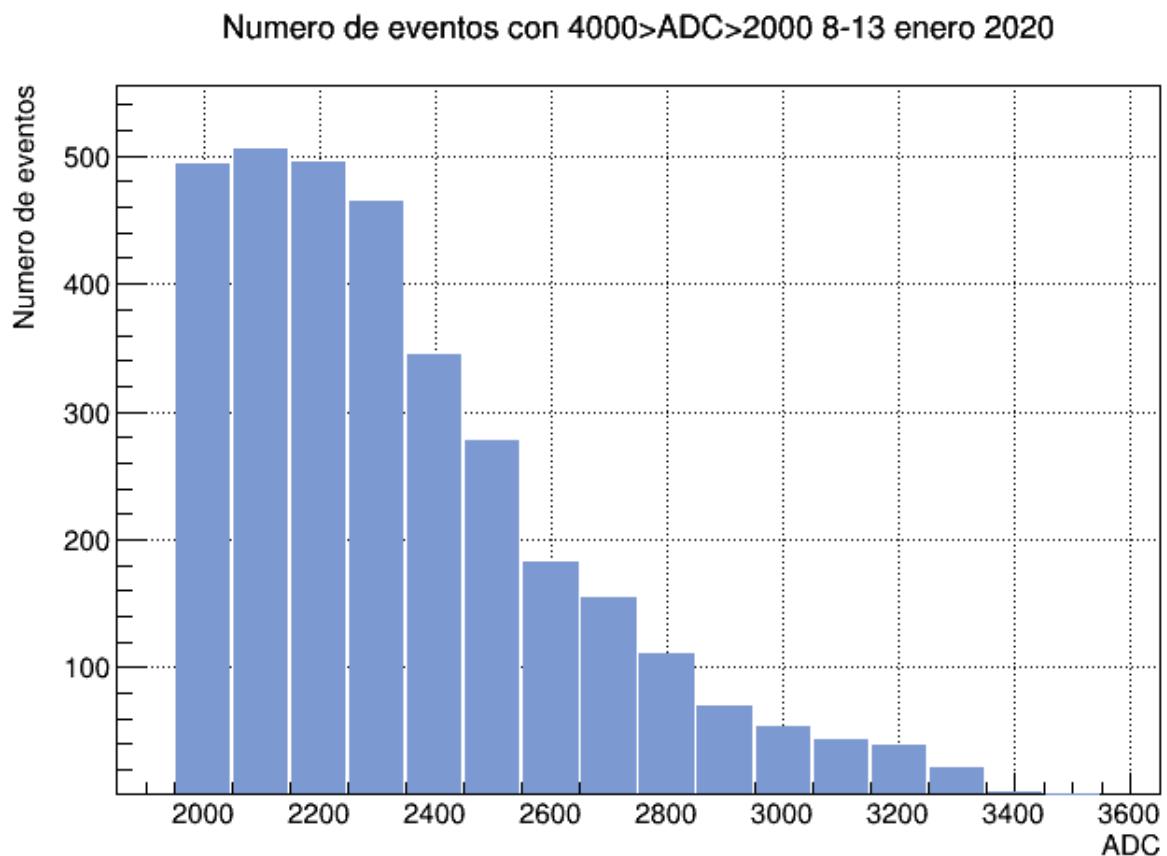


Figura 5.10: Número de eventos con un ADC inicial de 2000, 8-13 de enero 2020.

Apartir del ADC de 2000 y del filtro superior 4000 junto con los datos presentados anteriormente y con ayuda del código macro realizado en el programa ROOT, se obtiene, las gráficas representadas en las siguientes figuras, donde se encuentran los diferentes eventos registrados por la FEB de los días 8 a 13 de enero del 2020 con ADC de 2000 aumentando en 100 y con un filtro superior de 4000 en cada canal, tanto en placas horizontales como verticales generando como resultado gráficas 2D, donde se observa que el canal 27 no contiene gran cantidad de eventos registrados a la hora de realizar los respectivos cortes de ADC, pero los canales restantes presentan una buena estadística de eventos resgitrados por la FEB.

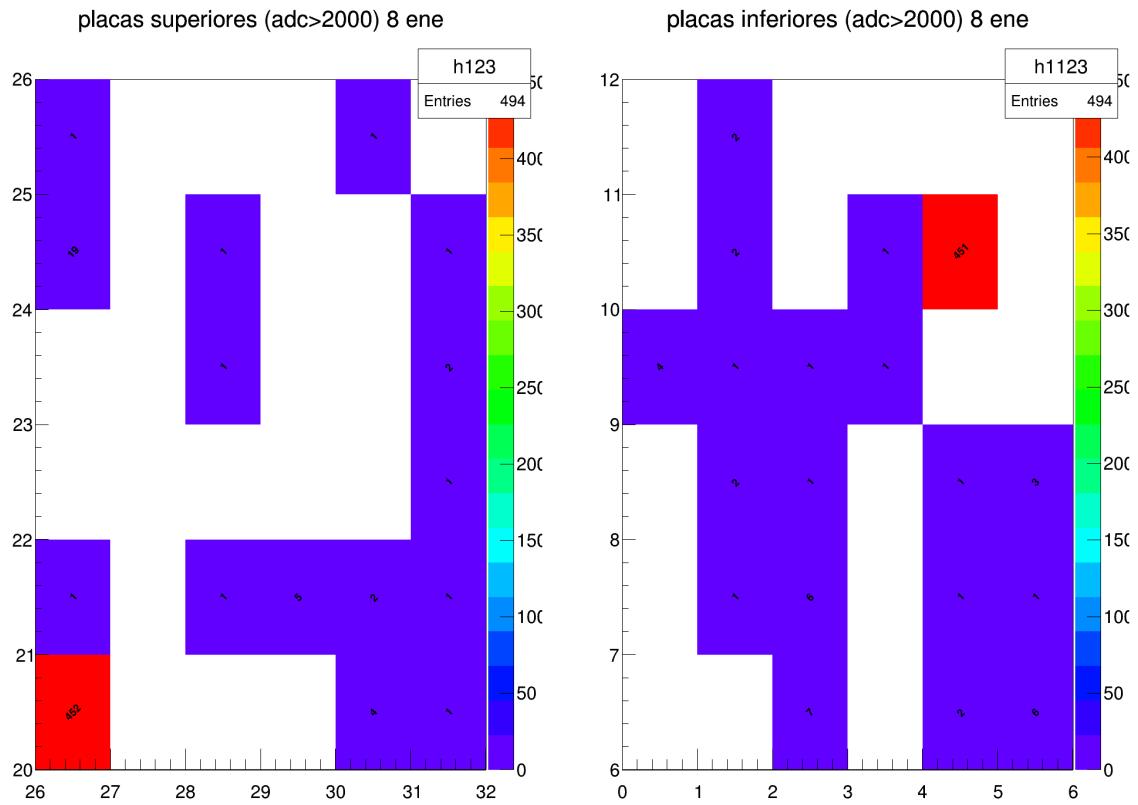


Figura 5.11: ADC mayor a 2000. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

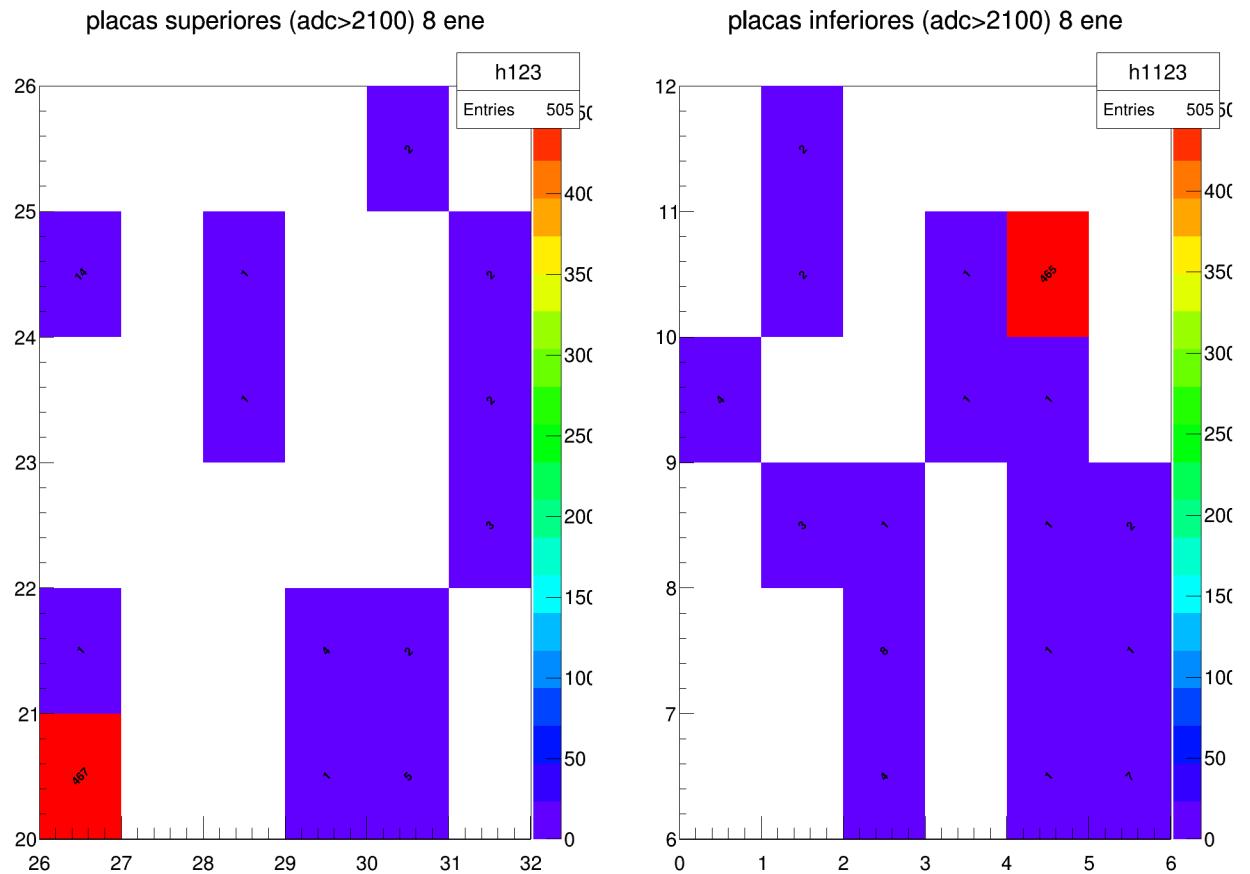


Figura 5.12: ADC mayor a 2100. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

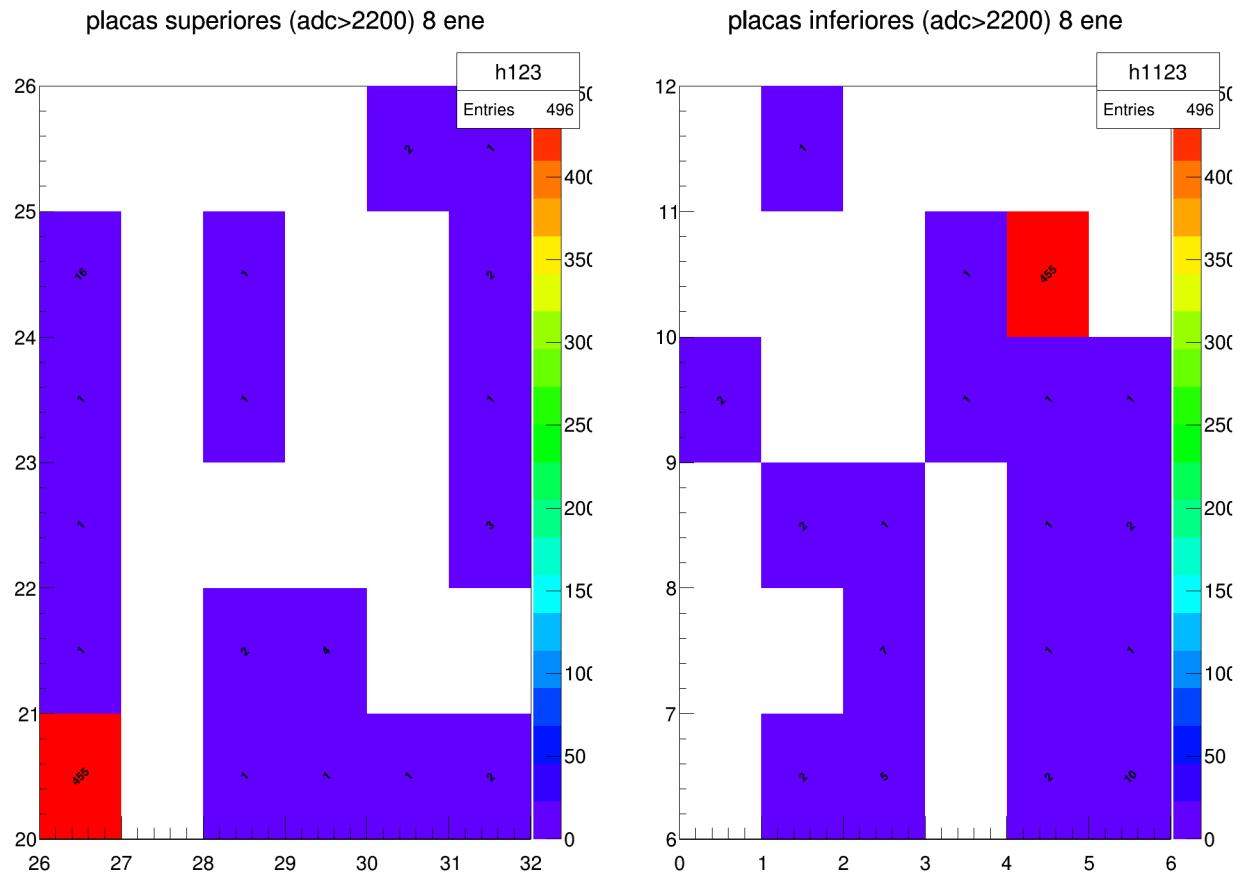


Figura 5.13: ADC mayor a 2200. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

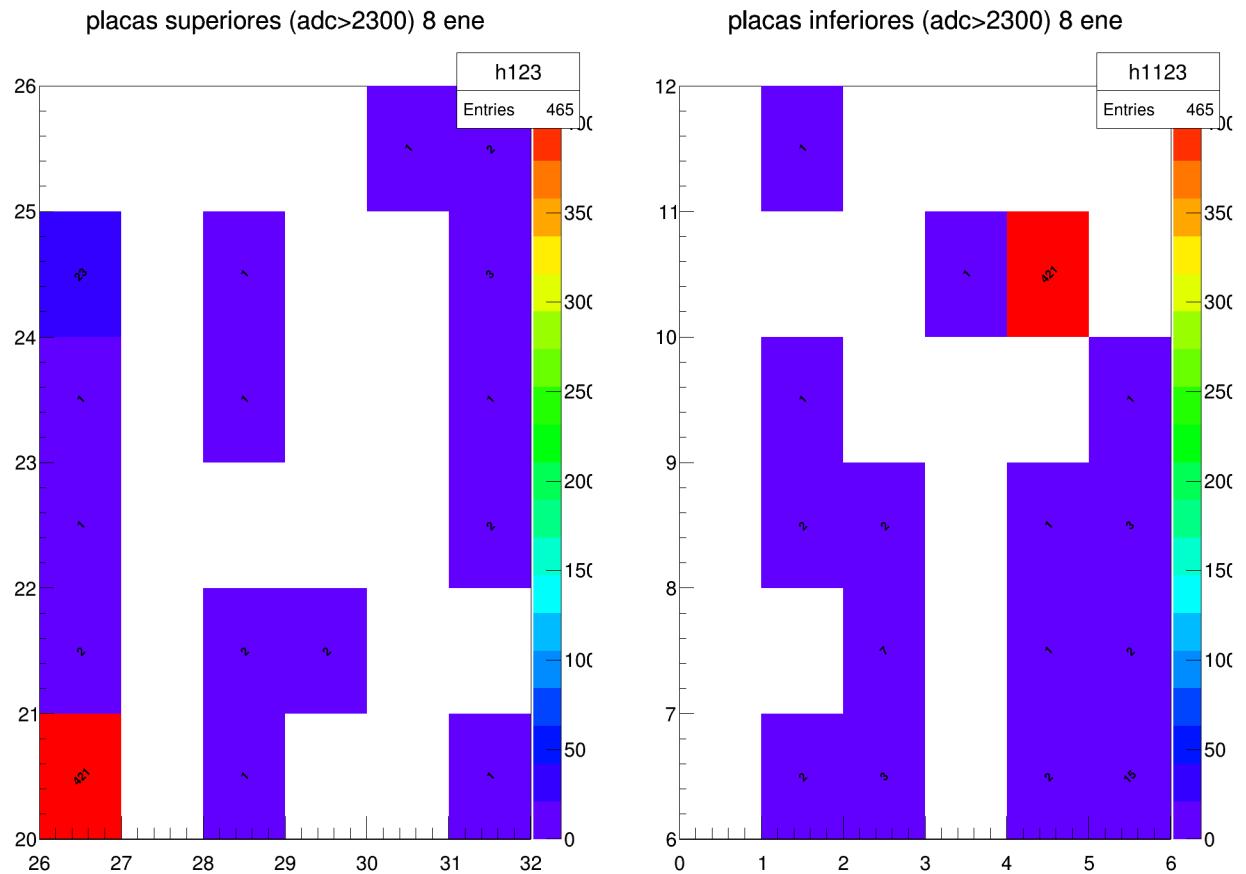


Figura 5.14: ADC mayor a 2300. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

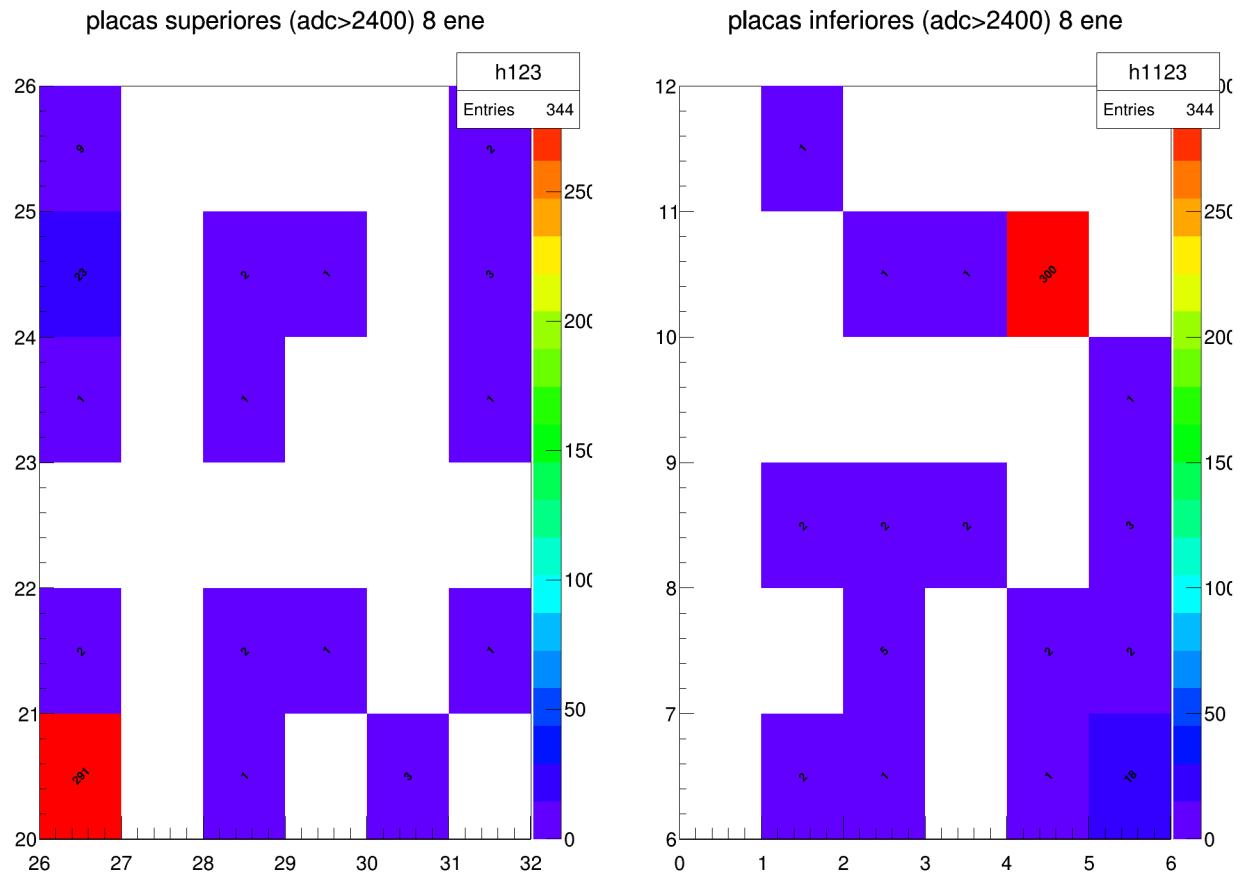


Figura 5.15: ADC mayor a 2400. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

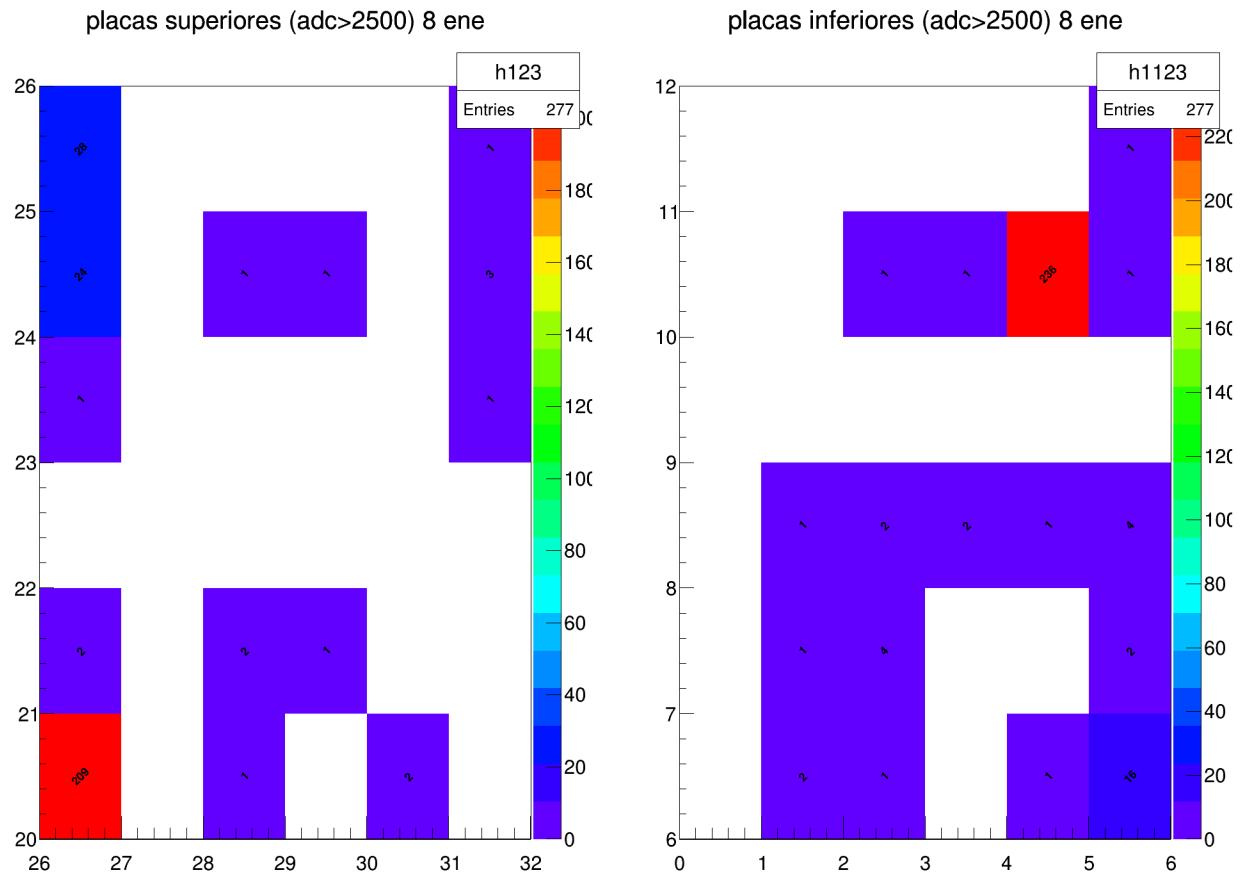


Figura 5.16: ADC mayor a 2500. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

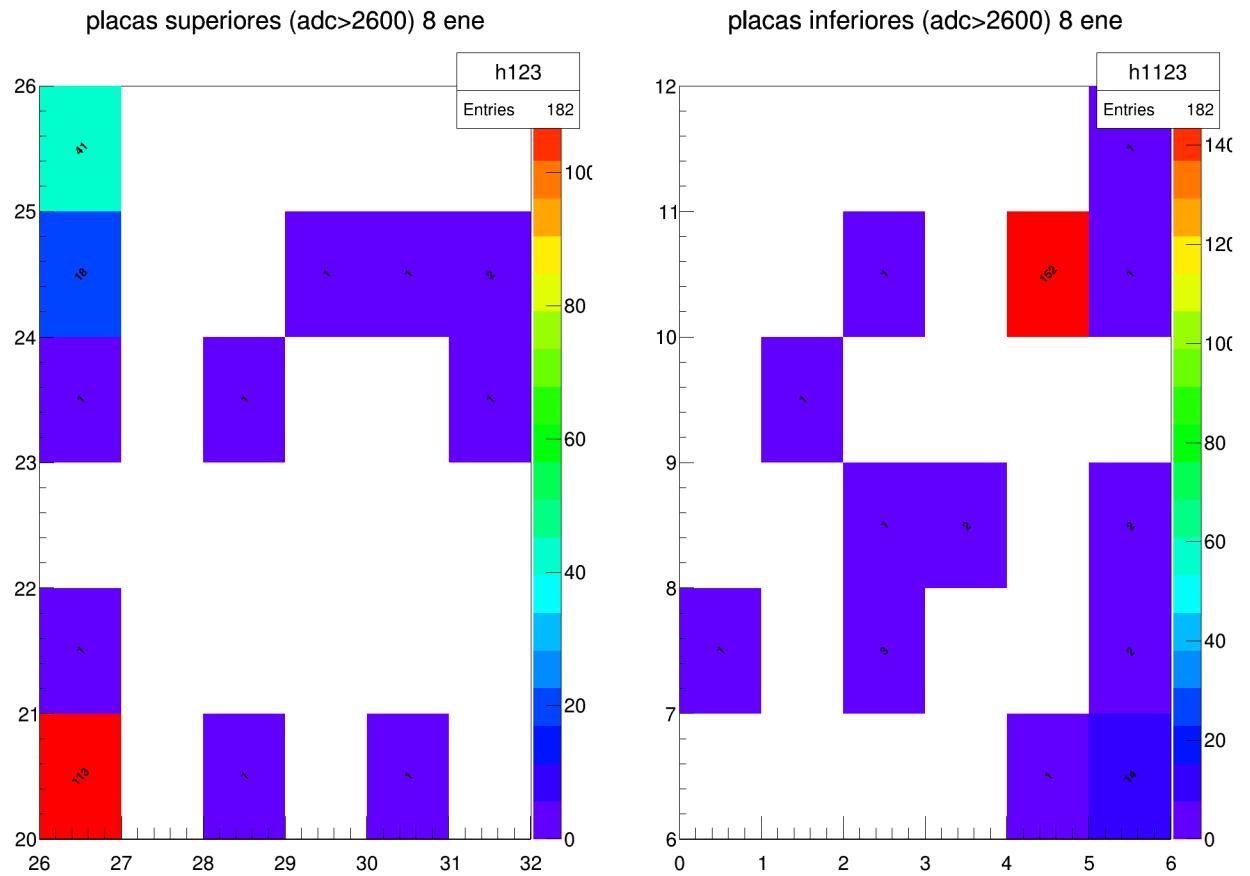


Figura 5.17: ADC mayor a 2600. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

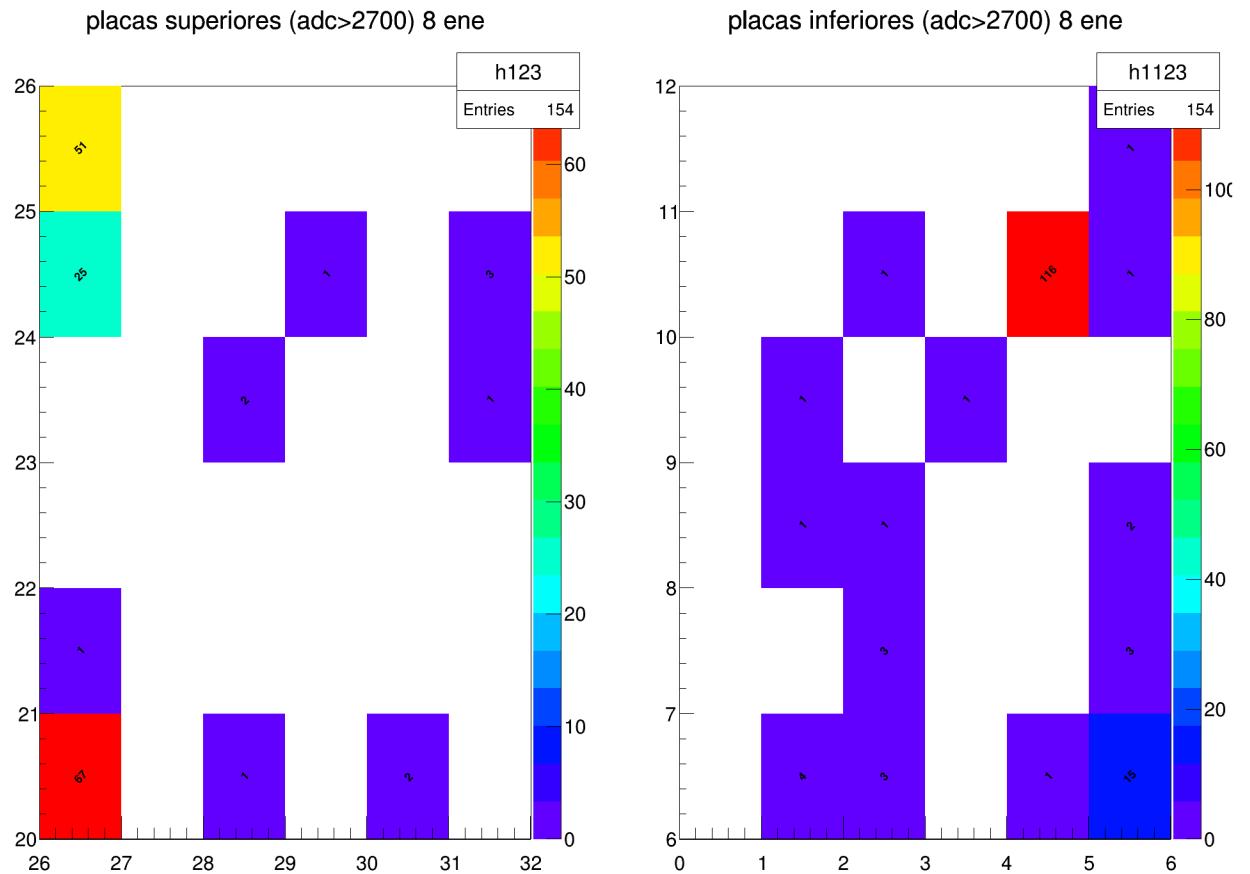


Figura 5.18: ADC mayor a 2700. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

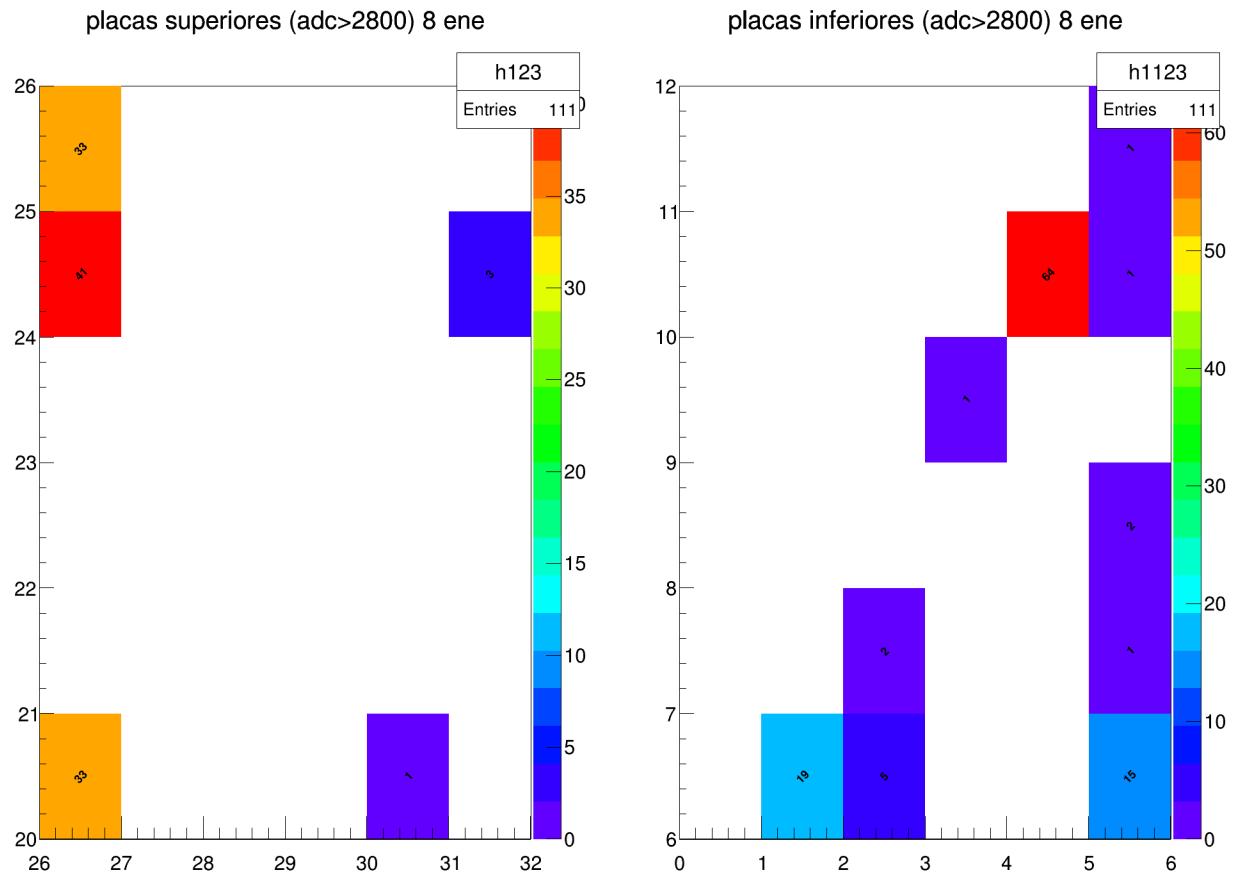


Figura 5.19: ADC mayor a 2800. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

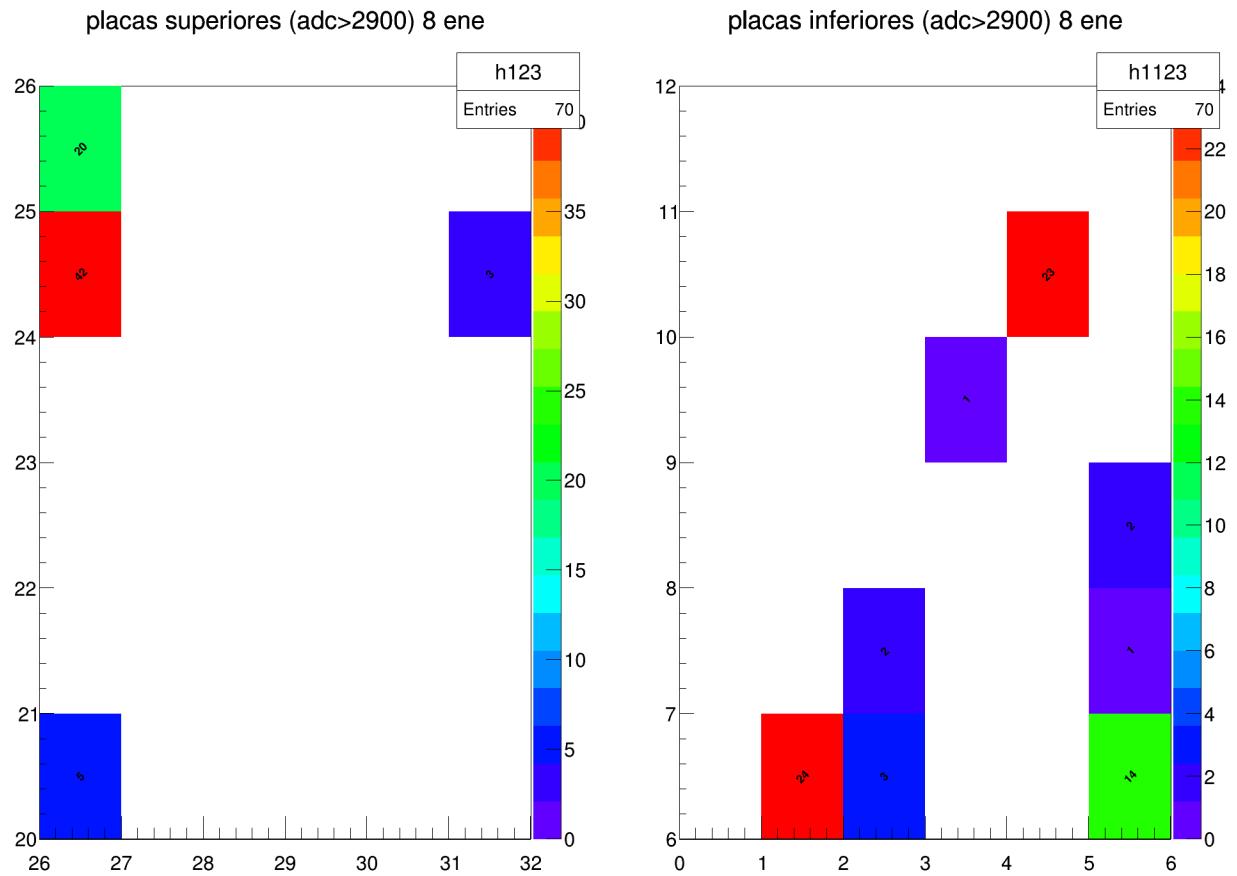


Figura 5.20: ADC mayor a 2900. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

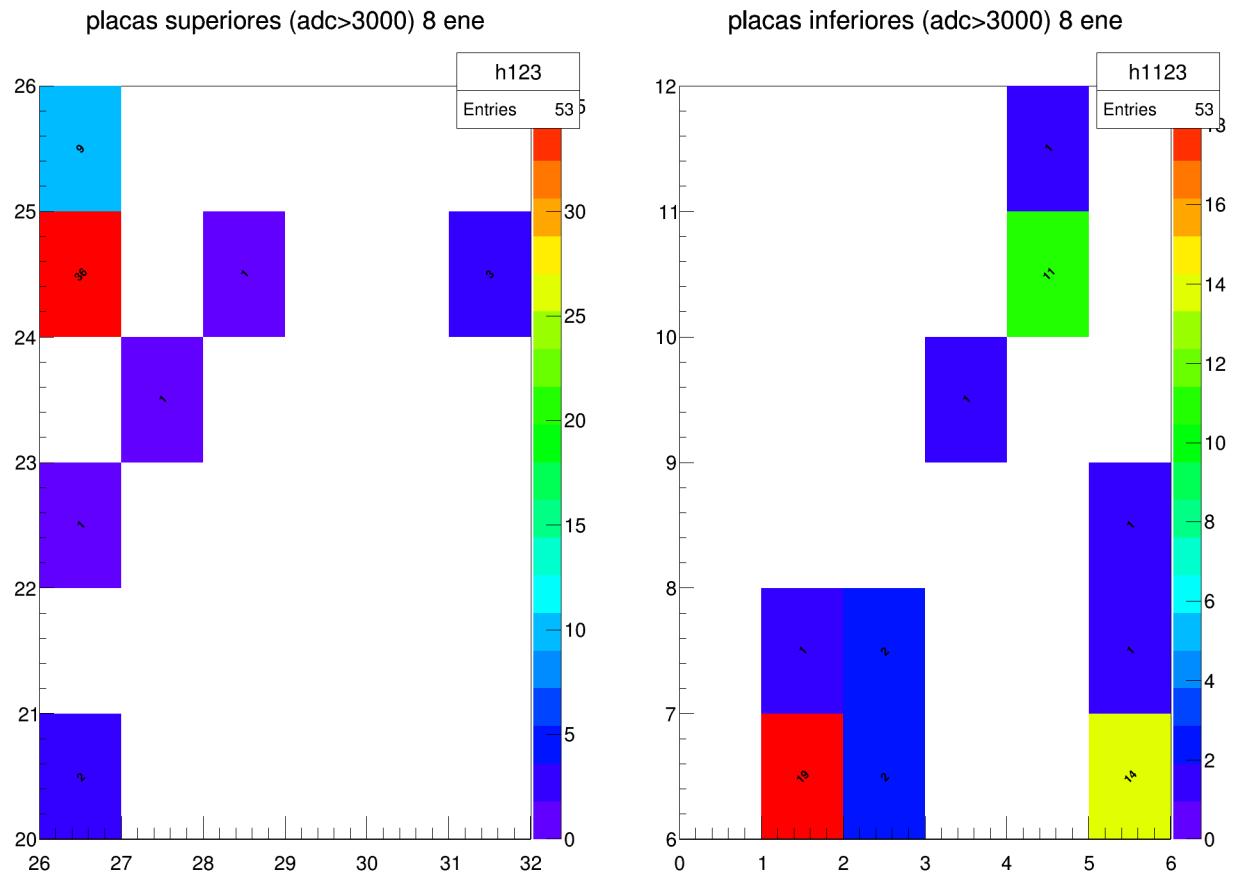


Figura 5.21: ADC mayor a 3000. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

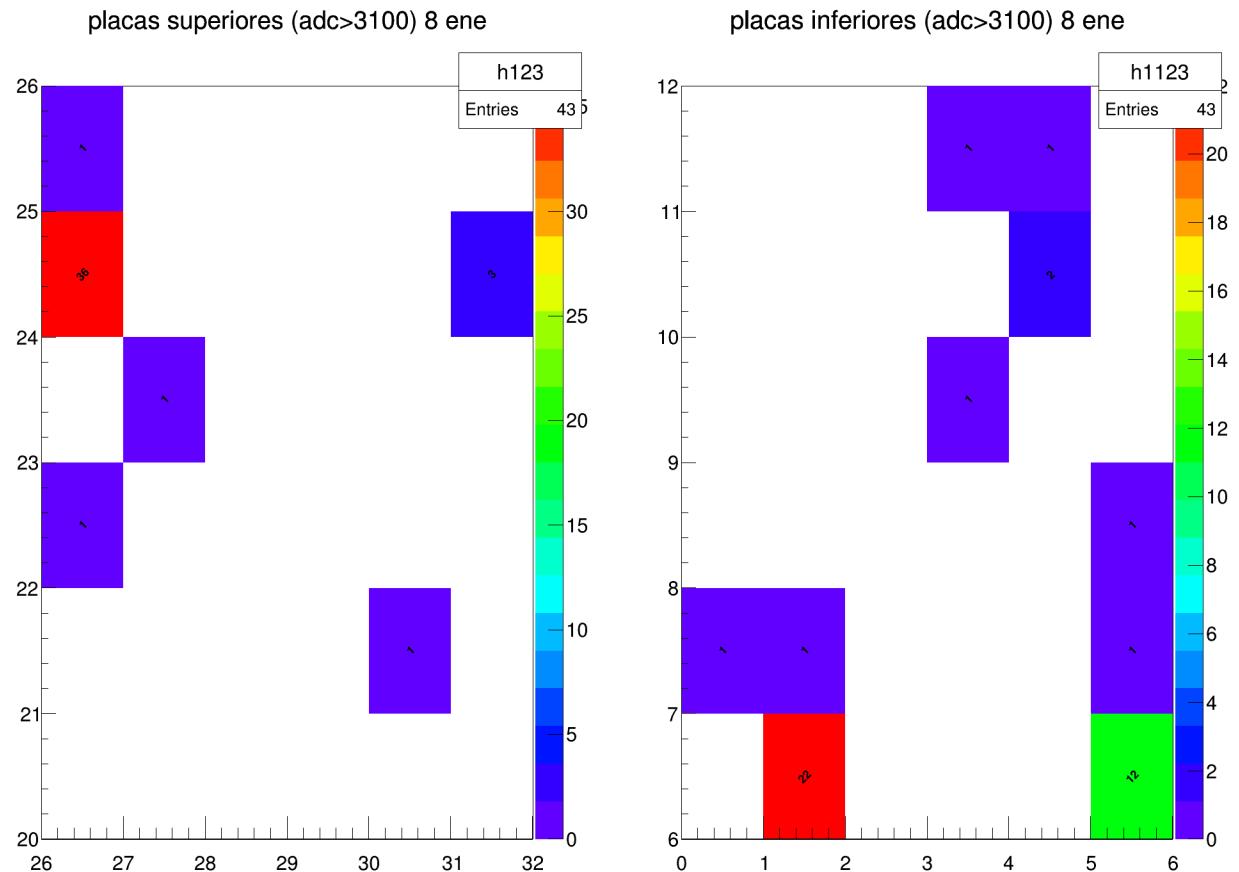


Figura 5.22: ADC mayor a 3100. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

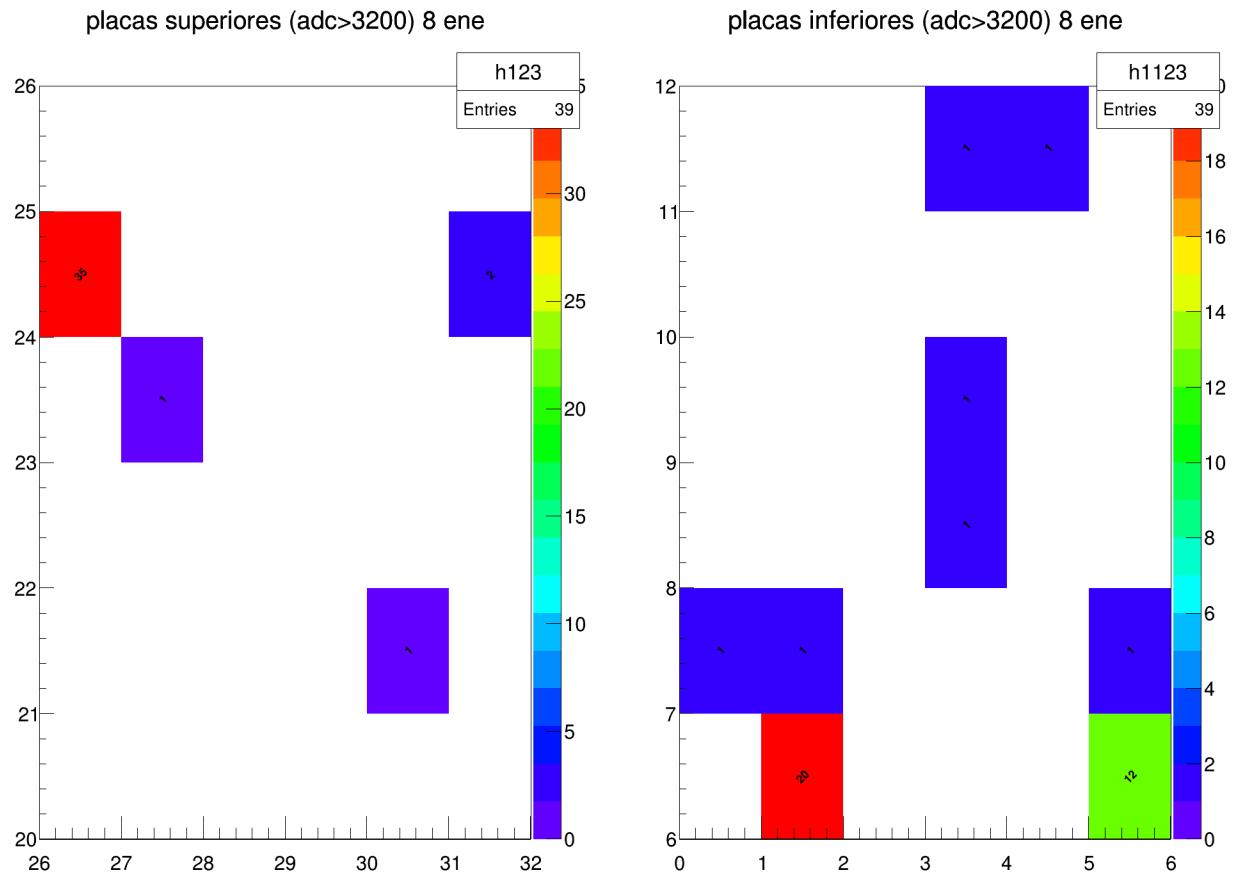


Figura 5.23: ADC mayor a 3200. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

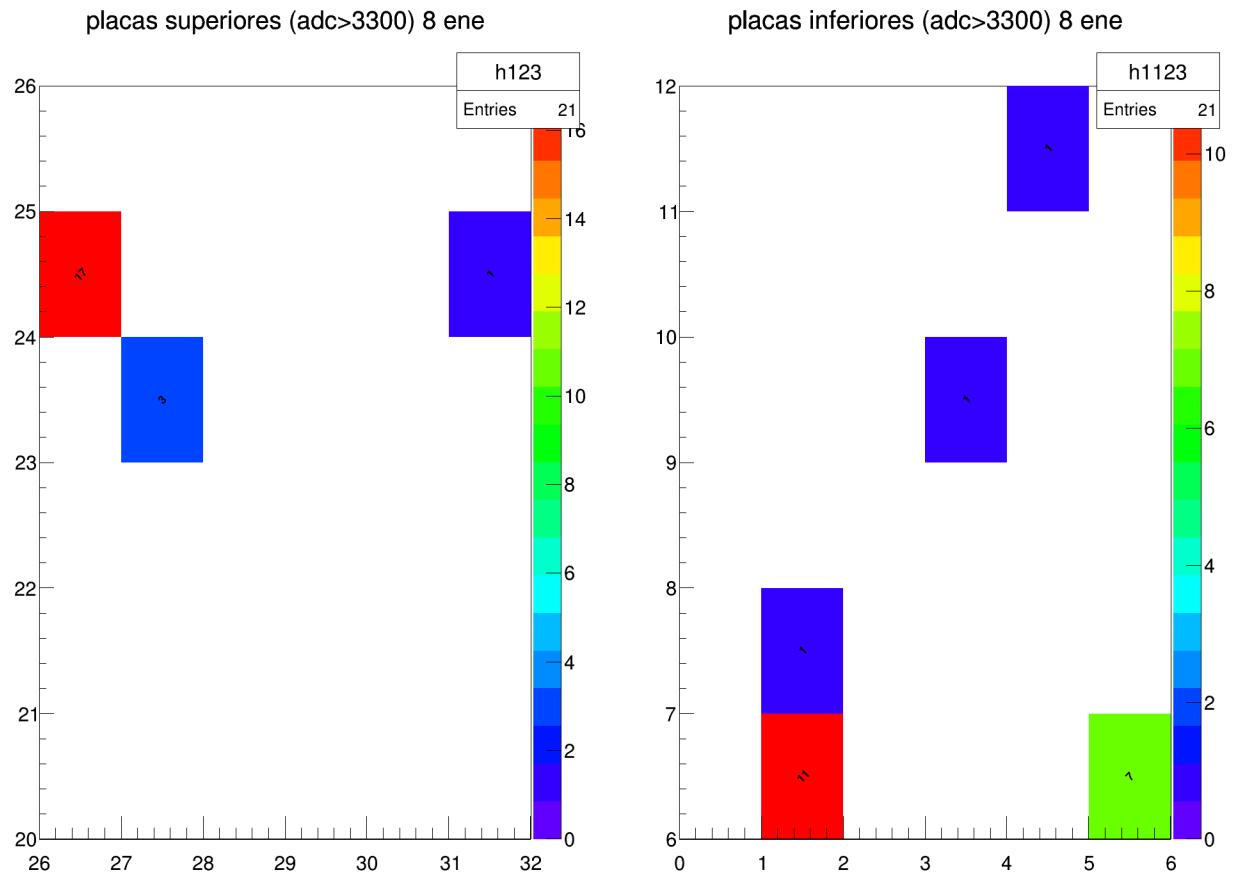


Figura 5.24: ADC mayor a 3300. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

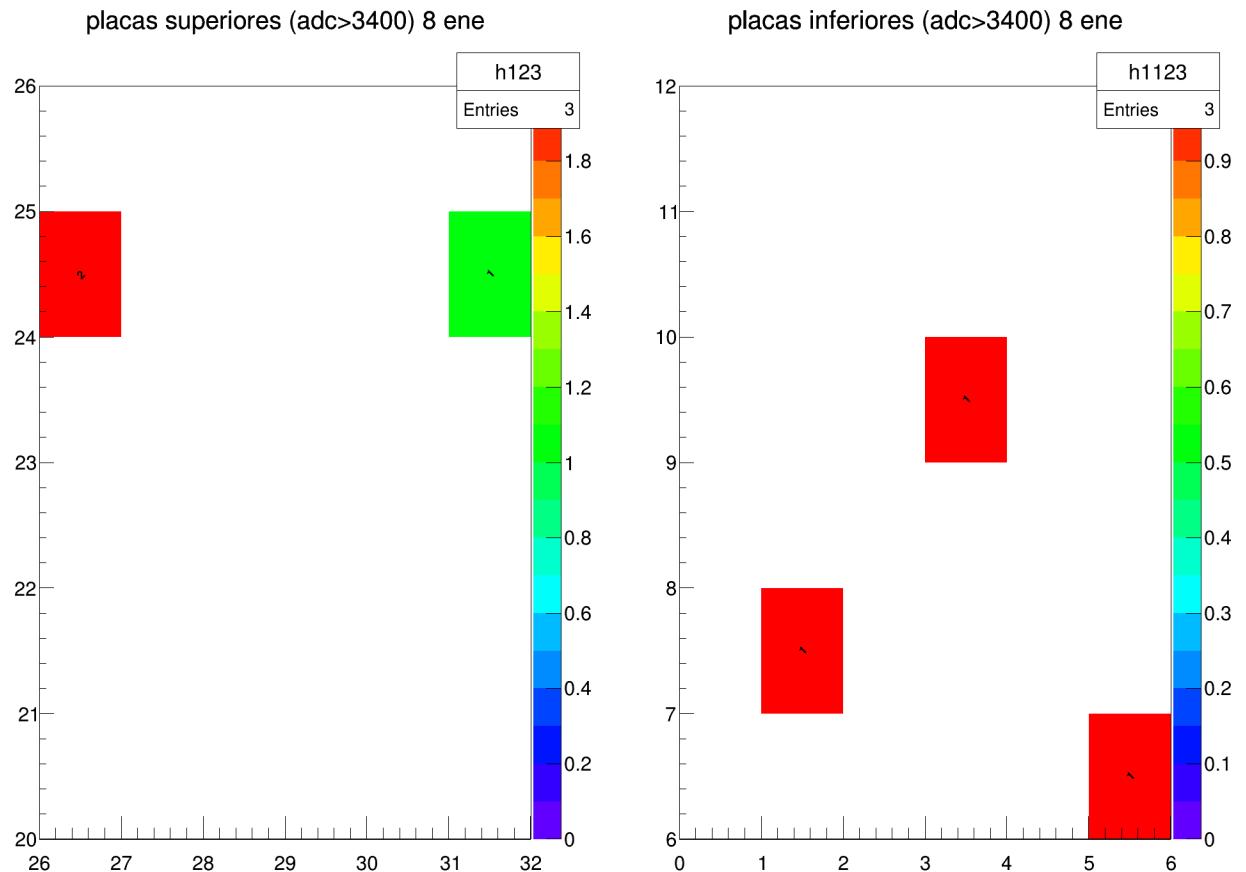


Figura 5.25: ADC mayor a 3400. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

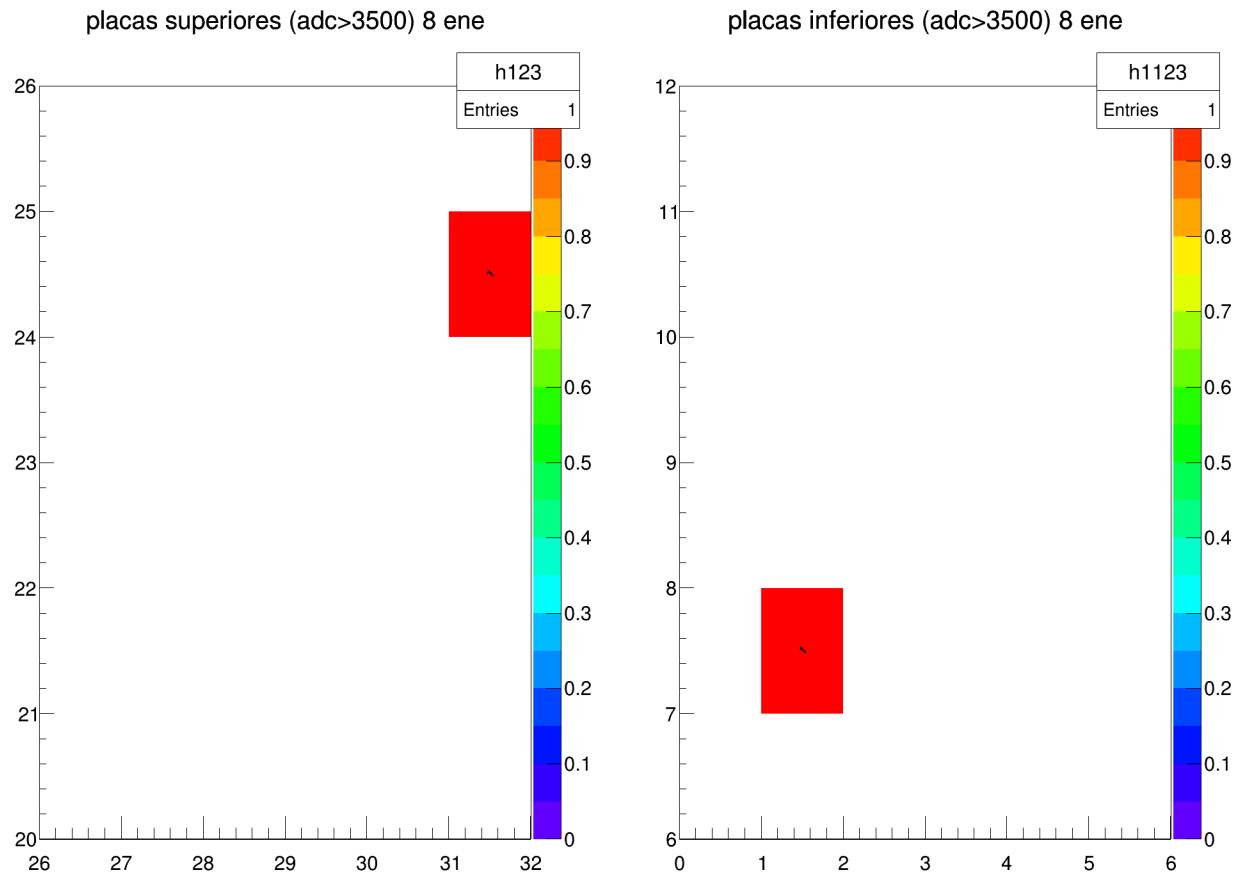


Figura 5.26: ADC mayor a 3500. Izquierdo: Placas superiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal. Derecho: Placas inferiores; eje x placa vertical, eje y placa horizontal.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Gracias a la simulación realizada en CORSIKA, presente en la figura 5.1, se logra apreciar un gran número de eventos, como también un rango de valores para los ángulos cenital y azimutal. Esto siendo un soporte para diferentes estudios de tomografía de muones.

Cabe resaltar que la variación presente en las gráficas de las figuras 5.4, 5.5, es justificada debido a la inestabilidad de la estructura del detector, es recomendable que para estudios futuros se realice un análisis detallado de ésta, así lograr obtener buenos resultados en cuanto a la tomografía de muones.

La gráfica de la figura 5.6, indica que la temperatura promedio es entre $10^{\circ}C$ a $14^{\circ}C$, con ello el SiPM no se ve afectado, es decir en este rango de temperatura el SiPM tiene un excelente funcionamiento.

Con la gráfica representada en las figura 5.7 se logra observar que un buen ADC para los datos sería apartir de 2000, ya que desde esta zona es donde la señal se torna estable reduciendo las posibles señales de ruido como se observa en la gráfica de la figura 5.8, donde se inicia con un ADC mayor a 2000 pero ya se realiza un corte de ADC menores a 4000.

En la gráfica de la figura 5.9, se logra observar una buena actividad de eventos sin una calibración adecuada con lo que se puede analizar que a la hora de realizar la calibración pertinente está dara resultados satisfactorios. Por otro lado se deberia implementar un método para evitar que señales de ruido ingresen por los canales, puesto que es notorio que en el canal 27 se registra un número de eventos muy elevado, esto para trabajos futuros.

En las gráficas 2D presentes en las figuras finales es claro observar que a diferentes ADC mayores a 2000 y menores a 4000 si se presentan eventos en los diferentes canales tanto de placas horizontales como verticales y más aún se lo confirma en la gráfica presente de la figura 5.10, donde esta registrado los número de eventos para los diferentes ADC. Con lo anteriormente descrito se da una afirmacion acertada acerca del uso de los detectores de centellador plástico para tomografía de muones.

Es claro que para obtener un gran número de eventos es necesario un tiempo prolongado de toma de datos y es lo que se quiere realizar a futuro tomando un tiempo de exposición de aproximadamente 3 meses, con un detector de las mismas características, donde desde ya se puede asegurar que a un ADC alto, por ejemplo de 2000, se logra una buena estadística de datos, como también realizar el estudio respectivo para la estructura de dicho detector, la cual debe seguir teniendo las características de girar para la ubicación de los ángulos cenital y azimutal, pero que está tenga una mejora en cuanto a estabilidad.

Finalmente los resultados obtenidos en este trabajo de grado son satisfactorios puesto que se realizó una buena caracterización de dicho detector, abriendo paso a trabajos futuros con detectores de las mismas características.

Apéndice A

Código del programa

```
#define mppcclass2_cxx
#include "mppcclass2.h"
#include <TH2.h>
#include <TStyle.h>
#include <TCanvas.h>
void mppcclass2 :: Loop()
{
    for (auto inicio=0; inicio <7; inicio++)
    {
        int CuentaspixelC[6][6];
        int CuentaspixelA[6][6];
        int asd , asdasd , asdasdasd , chcount , mmma;
        double filtroadc=0+(500*inicio );
        double filtrosuperior=4000;
        double dias=6;
        int vfadc=0+(500*inicio );
        int entradas ;
        for (auto ccc=0;ccc <6;ccc++)
        {
            for (auto cccc=0;cccc <6;cccc++)
            {
                CuentaspixelC[ccc][cccc]=0;
                CuentaspixelA[ccc][cccc]=0;
            }
        }
    }
}
```

```
}

}

TH1D* histo2 [32];

for(int i=0;i<32;i++)

{

histo2 [ i ]=new TH1D( Form( "chg%i" ,i ) ,Form( "chg%i" ,i ) ,2048 ,0 ,4096);

}

TH1D* hh=new TH1D( "#_eventos" ,Form( "Numero_de_eventos_por_canal

(4000>adc>%i)2-8_enero_2020" ,vfadc ) ,32 ,0 ,32);

TH2D*h111=new TH2D( "h1" ,Form( "Placa_A_(4000>adc>%i)" ,vfadc ) ,

6 ,26 ,32 ,6 ,20 ,26);

TH2D *h11 =new TH2D( "h11" ,Form( "Placa_C_(4000>adc>%i)" ,vfadc ) ,

6 ,0 ,6 ,6 ,6 ,12);

if (fChain == 0) return ;

Long64_t nentries } =fChain->GetEntriesFast();

Long64_t nbytes = 0, nb = 0;

for (Long64_t jentry=0; jentry<nentries ;jentry ++)

{

Long64_t ientry = LoadTree(jentry);

if (ientry < 0) break ;

nb = fChain->GetEntry(jentry);

nbytes+= nb;

int count=0;

for(int i=20;i<26;i++)

{

if(chrg[ i]>filtroadc )

{

for(int j=26;j<32;j++)

{
```

```
if(chg[j]>filtroadc && chg[j]<filtrosuperior)
{
    count++;
}
}
}
}
}

int count1=0;
for(int n=0;n<15;n++)
{
    if(n!=0 && n!=1 && chg[n]>filtroadc )
    {
        for(int m=6;m<12;m++)
        {
            if(chg[m]>filtroadc && chg[m]<filtrosuperior )
            {
                if(n<6||n>12){count1++;}
            }
        }
    }
}

if(count>=1 && count1 >=1)
{
    for(int mmm=0;mmm<6;mmm++)
    {

        if(mmm==0||mmm==1){mmma=mmm+13;} else {mmma=mmm;}
        for(int mmmm=0;mmmm<6;mmmm++)
        {
    
```

```
if (chg [mmma]> filtroadc && chg [mmma]< filtrosuperior )
{
asd=mmmm+6;
if (chg [asd]> filtroadc && chg [asd]< filtrosuperior )
{
CuentaspixelC [mmm] [mmmm]++;
}
}
}

for ( int mmmmm=0;mmmm<6;mmmm++)
{
asdasd=mmmm+26;
for ( int mmmmm=0;mmmm<6;mmmm++)
{
asdasdasd=mmmm+20;
if (chg [asdasd]> filtroadc && chg [asdasd]< filtrosuperior )
{
if (chg [asdasdasd]> filtroadc && chg [asdasdasd]< filtrosuperior )
{
CuentaspixelA [mmmm] [mmmmmm]++;
}
}
}
}

for ( int l=0;l<32;l++){
if (chg [l]> filtroadc && chg [l]< filtrosuperior )
{
histo2 [l]-> Fill (chg [l]);
}
```

```
hh->SetBinContent(1+1,histo2[1]->GetEntries());  
    }  
}  
entradashh->GetEntries();  
}  
}  
for(int a=20;a<26;a++){  
for(int s=26;s<32;s++){  
h11->Fill(s,a,CuentaspixelA[s-26][a-20]);  
}  
}  
for(int n=0;n<6;n++){  
for(int m=6;m<12;m++){  
h11->Fill(n,m,CuentaspixelC[n][m-6]);  
}  
}  
TCanvas *c2 = new TCanvas();  
c2->SetGrid();  
hh->GetYaxis()->SetTitle("Numero_de_eventos");  
hh->GetXaxis()->SetTitle("canales");  
hh->SetStats(0);  
hh->Draw();  
TImage *img2 = TImage::Create();  
img2->FromPad(c2);  
img2->WriteImage(Form("Canales\%i.png",vfadc));  
delete hh;  
delete c2;  
delete img2;  
}
```

Bibliografía

- [1] HIROYUKI KM TANAKA, TOSHIYUKI NAKANO, SATORU TAKAHASHI, JYUNYA YOSHIDA, MINORU TAKEO, JUN OIKAWA, TAKAO OHMINATO, YOSUKE AOKI, ETSURO KOYAMA, HIROSHI TSUJI, KIMIO NIWA. *Imágenes de alta resolución en la corteza no homogénea con radiografía muónica de rayos cósmicos: la estructura de densidad debajo del piso del cráter volcánico del monte. Asama, Japón* Geophys. Res.Lett. 36 (2009) 1944.
- [2] NICHOLAS ST. FLEUR. *Un nuevo misterio de la gran pirámide de Guiza: su vacío interno.* The new york times 2017.
- [3] DONALD H PERKINS. *Particle astrophysics.* Number 10. Oxford University Press, 2009.
- [4] J. BLÜMER, R. ENGEL, AND J. R. HÖRANDEL. COSMIC RAYS FROM THE KNEE TO THE HIGHEST ENERGIES. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 63(2):293-338, 2009.
- [5] WILLIAM F HANLON. *The Energy Spectrum of Ultra High Energy Cosmic Rays Measured by the High Resolution Fly's Eye Observatory in Stereoscopic Mode.* Pro-Quest, 2008.
- [6] AUGER, P., MAZE, R., GRIVET-MEYER, T. *Grandes gerbes cosmiques atmosféricas con- tenant des corpuscules ultrapénétrants.* Comptes Rendus, 206, 1721-1723, 1938
- [7] HERNÁN ASOREY. *Los detectores cherenkov del observatorio pierre auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación.* Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 125:131, 2012.
- [8] D. HECK, J. KNAPP, J. CAPDEVIELLE, G. SCHATZ, AND T. THOUW. *A Monte-Carlo code to simulate extensive air showers-report FZKA 6019.* 1998.

- [9] HECK, D., KNAPP, J., CAPDEVIELLE, J.N., SCHATZ, G., AND THOUW, T. *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers* FZKA 6019, (1998).
- [10] C. D. ANDERSON AND S. H. NEDDERMEYER. *Note on the nature of cosmic-ray particles.* Phys. Rev, 51:884, 1937.
- [11] DONALD E GROOM, NIKOLAI V MOKHOV, AND SERGEI I STRIGANOV. MUON STOPPING POWER AND RANGE TABLES 10 MEV-100 TEV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78(2):183?356, 2001.
- [12] UNED *Rayos cósmicos: Las partículas más energéticas de la naturaleza.* Primavera 1994.
- [13] ALEX F ESTUPIÑAN L. MÉTODO DE THINNING Y DETHINNING PARA LLUVIAS DE PRIMARIOS CON ALTA ENERGÍA. *Universidad Industrial de Santander*, 2015.
- [14] A. HAUNGS, *Experimental High-Energy Astroparticle Physics*, Morelia Mxico, Noviembre (2009).
- [15] *The Pierre Auger Collaboration, Physical Review Letters*, 101 061101, (2008).
- [16] A. V. OLINTO, ET AL., *White Paper on Ultra-High Energy Cosmic Rays.*
- [17] IZRAELEVITCH, F. (2013). *Universidad de Buenos Aires.* 2016,02 septiembre.
- [18] *Literature Distribution Center ON Semiconductor.* 19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA.
- [19] L. C AZON ET AL. *A model for the transport of muons in extensive air showers.* Astropart.Phys. 36(2012)211-223.
- [20] *Technical Note: SPM Photon Detection Efficiency (Rev 1.4).* Sensl, December 2007.
- [21] *Noise in Silicon Photomultipliers and Vacuum Tubes: White Paper.* Sensl
- [22] *Technical Note: Dynamic Range (Rev 1.3).* Sensl, January 2008.

- [23] *Technical Note: Introduction to the Silicon Photomultiplier (Rev.1.0)*. Sensl, August 2007
- [24] V.HERRERO-BOSCH, *Análisis y desarrollo de un front-end integrado para aplicaciones de tomografía por emisión de positrones* Tesis, Doctoral, 2008.
- [25] DIETER HECK, G SCHATZ, J KNAPP, T THOUW, AND JN CAPDEVIELLE. CORSIKA: A MONTE CARLO CODE TO SIMULATE EXTENSIVE AIR SHOWERS. Technical report, 1998.
- [26] T. K. GAISSER. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1990.
- [27] CHRISTOPHER L MORRIS, JEFFREY BACON, KONSTANTIN BOROZDIN, JOSEPH FABRITIUS, HARUO MIYADERA, JOHN PERRY, AND TSUKASA SUGITA. *Horizontal cosmic ray muon radiography for imaging nuclear threats*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 330:42-46, 2014.
- [28] HIROYUKI KM TANAKA AND IZUMI YOKOYAMA. *Muon radiography and deformation analysis of the lava dome formed by the 1944 eruption of usu, hokkaido-contact between high-energy physics and volcano physics-*. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 84(4):107-116, 2008
- [29] DIETER HECK, G SCHATZ, J KNAPP, T THOUW, AND JN CAPDEVIELLE. Corsika: A monte carlo code to simulate extensive air showers. Technical report, 1998.
- [30] N LESPARRE, D GIBERT, J MARTEAU, Y DÉCLAIS, D CARBONE, AND E GALICHET. *Geophysical muon imaging: feasibility and limits*. Geophysical Journal International, 183(3):1348-1361, 2010.
- [31] NASTER Global Digital Elevation <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, 2015.
- [32] ARCGIS. <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, 2018.

- [33] G SARACINO, L AMATO, F AMBROSINO, G ANTONUCCI, L BONECHI, L CIMMINO, L CONSIGLIO, E DE LUZIO, G MININ, P NOLI, ET AL. *Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at mt. echia (naples)*. Scientific reports, 7(1):1181, 2017.
- [34] LORENZO BONECHI, RAFFAELLO D'ALESSANDRO, ANDREA GIAMMANCO *Atmospheric muons as an imaging tool*. Reviews in Physics, Elsevier, November 2020.
- [35] EP GEORGE. *Cosmic rays measure overburden of tunnel*. Commonwealth Engineer, 1955:455457, 1955.
- [36] L.W. ALVAREZ, J.A. ANDERSON, F. EL BEDWEI, M. SHARKAWI, AND L. YAZOLINO. *Search for hidden chambers in the pyramids*. Science, 167(3919):832-839, 1970.
- [37] HIROYUKI KM TANAKA AND IZUMI YOKOYAMA. *Muon radiography and deformation analysis of the lava dome formed by the 1944 eruption of usu, hokkaido?contact between high-energy physics and volcano physics-*. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 84(4):107-116, 2008.
- [38] KUNIHIRO MORISHIMA, MITSUAKI KUNO, AKIRA NISHIO, NOBUKO KITAGAWA, YUTA MANABE, MASAKI MOTO, FUMIHIKO TAKASAKI, HIROFUMI FUJII, KOTARO SATOH, HIDEYO KODAMA, ET AL. *Discovery of a big void in khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons*. Nature, 552(7685):386, 2017.
- [39] CAEN SPA. *User Manueal UM5833, A1702/DT5702*. Rev.3-junio 4, 2019.
- [40] TECNOLOGÍA ELJEN 1300 W.Badway, Sweetwater, TX 79556
- [41] IDEAM. *Instituto de Hidrología, Meterología y Estudios Ambientales*. ideam.gov.co.