

Detección y análisis de lluvias aéreas extensas

Jorge Perea¹, María Ramos²

¹Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

²Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

19 de mayo de 2021

Índice

1. Introducción	2
2. Metodología	3
2.1. Figuras	5
3. El experimento y los resultados	12
4. Conclusiones y Recomendaciones	13
5. Referencias	15

Resumen

En el reporte se plantea estudiar dos aspectos de las lluvias aéreas extensas (EAS) registradas a una altitud de 990 msnm: los eventos de EAS (con sus registros de datos) y su dirección. Para tal fin, se utilizó un equipo de tres paneles centelladores, los cuales formaban un área total de detección de 1875 cm^2 , y a su vez estaban conectados a fotomultiplicadores de silicio, con un sistema de adquisición de datos. Se determinó un total de 1369 eventos de EAS observados, más específicamente, en la ciudad de Bucaramanga, Colombia, entre el 9 y el 10 de abril, en un lapso de 3 horas y media.

Con un análisis a profundidad de los tiempos absolutos de detección de eventos de EAS, dados por los instantes de tiempo en que se activaron un par de triggers del arreglo experimental, pudo determinarse la dirección de la lluvia área extensa detectada a través de una representación geométrica planar de la misma, es decir que el frente de la lluvia se consideró como un plano cuyo vector normal formaba un ángulo θ con respecto al plano que contenía los tres paneles centelladores, dicho ángulo se consideró como la variable que especificaba la dirección de la lluvia área extensa.

1. Introducción

Para 1909, el científico alemán Theodor Wulf había diseñado y construido un electroscoio para detectar partículas de rayos gamma. Gracias a su invento, había podido detectar radiación natural en el suelo, radiación que predecía disminuiría al alejarse lo suficiente de sus fuentes. Sin embargo, cuando midió la tasa de ionización en la torre Eiffel, aproximadamente a 300 metros de altura, su disminución no concordaba con su estimación. En su momento, las publicaciones de sus resultados no fueron aceptadas.

Poco más tarde, el físico austríaco Victor Hess, desarrollando mejor instrumentación, que resistiera los cambios de temperatura y presión, tomó medidas de radiación desde un globo aerostático, en una serie de viajes desde 1911 a 1913. Efectivamente, la radiación disminuía al aumentar la altura, pero tras varias millas, la radiación detectada no solo aumentaba sino que era mucho mayor a la que se podía encontrar en la superficie terrestre. Además, observó la misma radiación en un día de eclipse solar. Esto sugería una fuente distinta al sol. Los hallazgos de Victor Hess fueron confirmados por Robert Millikan, quien nombró a esta radiación como “rayos cósmicos” (o CR, Cosmic Rays).

El estudio de los rayos cósmicos pronto llevó a una era fructífera para la física. Gracias a ellos, Carl Anderson descubrió la primera antipartícula, el positrón, convirtiéndose en ganador del Nobel junto a Victor Hess en 1936. Otras partículas, tanto elementales como no elementales, fueron descubiertas en experimentos con rayos cósmicos, como los muones, piones y kaones. Es decir, los CR son más que radiación electromagnética, también tienen componentes hadrónicos, partículas muónicas, y neutrinos.

El campo se amplió al descubrir que algunas de esas partículas detectadas realmente se originan por procesos de interacción y decaimientos de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre, formando las lluvias aéreas extensas. Estas cascadas de partículas podían estudiarse al determinar eventos simultáneos en detectores ubicados en posiciones distintas, como notaron Pierre Auger y Bruno Rossi en estudios independientes.

Entre las partículas de las lluvias aéreas extensas destacan los muones: leptones como el electrón, pero de mayor masa y por tanto, inestables. Se originan principalmente por los decaimientos de piones de las cascadas atmosféricas y, al llegar al nivel del mar, tienen un flujo de 1 muon por cm^2 por segundo. Por ello, es factible su estudio a bajas alturas, utilizando diferentes equipo de detección según sea el caso, como los paneles centelladores o los detectores de Cherenkov.

Los experimentos con muones atmosféricos son útiles tanto para estudiar sus propiedades como para investigar las lluvias aéreas extensas. Si bien estas observaciones no son recientes, continuar con la detección de muones y en diferentes ubicaciones mantiene datos actualizados de las lluvias aéreas extensas; se comprueba la simultaneidad; se confirman las estimaciones; permite entender las posibles variaciones de flujo y además puede mostrar los tiempos de las señales medidas por cada detector con una mayor precisión.

En este marco, se plantea un estudio de muones producidos en lluvias aéreas extensas (EAS) a través de un equipo formado por tres paneles centelladores ubicados en la Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga, Colombia, a 990 msnm.

2. Metodología

Como se ha mencionado anteriormente, una de las formas de detección de muones para el estudio de lluvias aéreas extensas es el uso de centelladores. Los materiales centelladores tienen la propiedad de luminiscencia cuando reciben radiación ionizante. A través de fotomultiplicadores se puede recibir la luz, y reemitir en señales eléctricas. Considerando que los muones son partículas cargadas eléctricamente, y por tanto son capaces de ionización, los paneles centelladores en equipo con fotomultiplicadores han sido una de las opciones más comunes para su detección. Así, el experimento utilizado para este análisis de lluvias aéreas extensas consistió en tres paneles centelladores de un área de 25 cm x 25 cm, es decir 625cm^2 cada uno, para formar un área de detección total de 1875cm^2 y cuya configuración formaba un triángulo equilátero de lados de 32cm . A su vez, cada placa tenía adjuntada un fotomultiplicador de silicio (o SiPM). Como la señal eléctrica generada debía ser procesada, se utilizó un sistema de adquisición de datos con: una tarjeta de polarización para variar el voltaje de los SiPM; una tarjeta de digitalización de la señal proveniente de los SiPM; un GPS para añadir estampas temporales a las señales consideradas como eventos, y por último, un computador embebido para controlar todo el sistema de adquisición (ver Figura 5). Este equipo fue ubicado en la Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga, Colombia, y el acceso al laboratorio se hizo de manera remota.

Previamente a tomar los datos de las lluvias aéreas extensas es necesario ajustar las configuraciones del equipo para su correcta detección, esto implica la calibración de los SiPM. Para ello, se debe establecer un voltaje de polarización o umbral en los fotomultiplicadores de tal manera que el número de eventos detectados por unidad de tiempo coincida con un valor estimado. Dicho valor es el flujo esperado de muones incidente sobre el área total ocupada por los 3 paneles centelladores a la altura de 990 msnm (correspondiente a la ciudad de Bucaramanga), entendiéndose que existe un cambio en el flujo dado un área de detección y una altura distinta del valor tabulado de $1\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Considerando los datos experimentales del reporte No.094 del NCRP[1] (ver Figura 1), el cual muestra las diferencias de flujo respecto a la altura, se estimaron los muones esperados usando un ajuste exponencial para las altitudes menores a 5000 m.s.n.m. Esta aproximación ya ha sido considerada anteriormente para alturas pequeñas en experimentos de QuarkNet, el programa de desarrollo científico para física de partículas destinado a profesores de Estados Unidos. Así, se obtuvo un flujo de $1,4\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ muones, y dada el área total de detección, se determinó $43\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ como el flujo total estimado para el experimento. Con el acceso remoto al laboratorio, se tomaron datos con todos los canales de adquisición del equipo bajo el mismo voltaje de polarización en un rango de 50 mV a 300 mV, con un paso de 25 mV. Luego, los datos fueron analizados para hallar el umbral de calibración, considerando el número de eventos por segundo obtenido para cada serie

de mediciones. Utilizando un ajuste exponencial para la variación de eventos detectados respecto a voltaje, se encontró una coincidencia aproximada de eventos detectados ($43,15 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con eventos estimados en el voltaje de 71 mV. (ver Figura 4).

De esta forma, se definió el umbral óptimo en 71 mV para los tres canales de adquisición; una coincidencia de registro de señal de al menos dos detectores para detectar un evento (de acuerdo a investigaciones previas que datan desde los experimentos de Pierre Auger); una Gate Window de $w = 100$ y un TMC delay de $d = 100$, ajustes ideales para la declaración de eventos del trigger en el caso de lluvias aéreas extensas. Con el equipo configurado adecuadamente para el experimento se procedió a tomar tres series de datos en los siguientes intervalos de tiempo (hora UTC, formato: hh:mm:ss.ms y dd/mm/aaaa):

- (1) desde las 23:11:58.000 del 09/04/2021 hasta las 00:11:35.015 del 10/04/2021;
- (2) desde las 00:45:49.013 del 10/04/2021 hasta las 02:14:42.008 del 10/04/2021 y
- (3) desde las 04:07:33.013 del 10/04/2021 hasta las 05:07:00.012 del 10/04/2021.

Finalizada esta toma de datos, se dio por terminada la fase experimental y se procedió al análisis, el cual fue realizado a través de Jupyter Notebooks. El código se desarrolló en celdas de Python 2.7.16, utilizando módulos y bibliotecas especializadas para el manejo de datos. Estas herramientas también fueron usadas para el análisis previo, correspondiente a la estimación de muones y determinación de voltaje de calibración.

Los datos fueron reorganizados e interpretados mediante las funciones de numpy y pandas, siguiendo la estructura de data estipulada por el manual del sistema de adquisición de datos: un evento puede contener varias líneas y a su vez, cada una de las líneas está formada por 16 “palabras” (entiéndase como conjuntos de letras y números) separadas por espacio (ver Figura 6).

El estudio del flujo de las lluvias aéreas extensas se dividió en dos secciones para cada lote de datos. Primeramente, calculando el número de eventos de lluvias aéreas extensas detectadas para hallar su tasa por hora y por minuto, donde el número de eventos viene dado al considerar los instantes de tiempo en los cuales se registraron detecciones. Segundo, determinando la cantidad de registros promedios por lluvia, incluyendo sus errores, considerando que los registros se obtienen por filtrar la cantidad de detecciones por evento, es decir, la cantidad de datos recolectados en el mismo instante de tiempo con precisión de milisegundos.

Por otro lado sabiendo la fecha y el tiempo de la detección, al convertir las palabras 1 a 10 a sistema decimal de forma adecuada, se pudo determinar los tiempos absolutos de eventos, utilizando la ecuación:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{clk}} &= \text{Word1} - \text{Word10} \\ \Delta T_{\text{sec}} &= \Delta T_{\text{clk}} \frac{1}{f_{\text{clk}}} \\ T_{\text{abs}} &= \text{Time}_{\text{sec}} + \frac{\text{Word16}_{\text{sec}}}{1000} + \text{Round}\left(\frac{\text{Word1} - \text{Word10}}{f_{\text{clk}}}\right) \end{aligned}$$

donde:

f_{clk} : frecuencia del reloj (25MHz para este sistema de DAQ),

ΔT_{clk} : el tiempo de cada trigger,

ΔT_{sec} : conversión de ΔT_{clk} a segundos,

T_{abs} : el tiempo absoluto del trigger.

Estos datos son de utilidad para graficar y analizar las señales en flanco de subida- es decir señales de activación del sistema de trigger- y en flanco de bajada que registraron los fotomultiplicadores adjuntados a las placas centelladores(ver figura 8).Para determinar la dirección de los eventos EAS registrada durante el experimento se planteó una representación geométrica planar de la misma, es decir que el frente de la lluvia se consideró como un plano cuyo vector normal formaba un ángulo θ con respecto al plano que contenía los tres paneles centelladores, dicho ángulo se consideró como la variable que especificaba la dirección de la lluvia área extensa. Dado lo anterior fue posible considerar tres escenarios posibles en los que los eventos EAS registrados podrían incidir sobre el arreglo de detectores (ver figura 9, 10 y 11).

Entrando en los detalles de las figuras 9,10 y 11 se tiene que A y B son cualquier par de detectores, t_A el instante de tiempo en el que hay trigger en el detector A, t_B el instante de tiempo en el que hay trigger en el detector B, $|t_A - t_B|$ la separación temporal entre dichos instantes de tiempo. c es la velocidad de la luz en metros/segundos. El ángulo θ constituye una medida de la dirección en la que puede incidir el plano de la lluvia aerea. De acuerdo a lo ilustrado en los tres escenarios se tiene que:

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \iff 0 \leq \cos(\theta) \leq 1 \text{ y que } \cos(\theta) = \frac{c|t_A - t_B|}{0,32m}$$

$$\text{Por lo que } 0 \leq |t_A - t_B| \leq \frac{0,32m}{c} * 10^9 \implies 0ns \leq |t_A - t_B| \leq 1,07ns$$

Lo anterior implica que $|t_A - t_B| = 0 \text{ ns}$ significa que la lluvia incide horizontalmente al arreglo de detectores, y por el contrario si $|t_A - t_B| = 1,07 \text{ ns}$ significa que la lluvia incide verticalmente en el arreglo de detectores. El anterior análisis permitió seleccionar de toda la data adquirida aquellos eventos EAS cuyo rango máximo temporal de separación fuera de 1.07 ns. Dado lo anterior entonces se procedió a extraer de toda la data los registros temporales de cualquier par de triggers cuyo delay temporal de activación fuera menor o igual a 1.07 ns (ver figura 12).

2.1. Figuras

TABLE 2.1—The composition of cosmic rays ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) near solar maximum at 54° North geomagnetic latitude in terms of flux density versus atmospheric depth

Atm. depth (g/cm^2)	Altitude* (km)	Muons	Electrons	Protons	Charged pions	Neutrons
20	26.7	2.11×10^{-2}	4.33	7.12×10^{-1}	1.74×10^{-3}	8.02
50	20.8	6.64×10^{-2}	5.07	6.30×10^{-1}	4.78×10^{-3}	1.09×10
100	16.3	1.01×10^{-1}	3.94	4.56×10^{-1}	6.88×10^{-3}	1.06×10
150	13.7	1.13×10^{-1}	2.74	3.21×10^{-1}	6.92×10^{-3}	7.91
200	11.9	1.11×10^{-1}	1.82	2.21×10^{-1}	5.93×10^{-3}	5.86
250	10.5	1.03×10^{-1}	1.19	1.49×10^{-1}	4.70×10^{-3}	4.19
300	9.31	9.34×10^{-2}	7.71×10^{-1}	1.00×10^{-1}	3.60×10^{-3}	2.94
350	8.26	8.33×10^{-2}	4.00×10^{-1}	6.67×10^{-2}	2.68×10^{-3}	2.04
400	7.33	7.16×10^{-2}	3.19×10^{-1}	4.40×10^{-2}	1.89×10^{-3}	1.38
450	6.50	6.31×10^{-2}	2.08×10^{-1}	2.90×10^{-2}	1.34×10^{-3}	9.33×10^{-1}
500	5.73	5.56×10^{-2}	1.36×10^{-1}	1.90×10^{-2}	9.46×10^{-4}	6.27×10^{-1}
550	5.02	4.92×10^{-2}	9.04×10^{-2}	1.24×10^{-2}	6.57×10^{-4}	4.18×10^{-1}
600	4.35	4.31×10^{-2}	5.89×10^{-2}	8.10×10^{-3}	4.46×10^{-4}	2.75×10^{-1}
650	3.75	3.84×10^{-2}	4.00×10^{-2}	6.23×10^{-3}	3.04×10^{-4}	1.81×10^{-1}
700	3.17	3.44×10^{-2}	2.77×10^{-2}	3.35×10^{-3}	2.05×10^{-4}	1.19×10^{-1}
750	2.62	3.10×10^{-2}	1.95×10^{-2}	2.13×10^{-3}	1.38×10^{-4}	7.72×10^{-2}
800	2.10	2.81×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.36×10^{-3}	9.22×10^{-5}	5.02×10^{-2}
850	1.62	2.56×10^{-2}	1.05×10^{-2}	8.67×10^{-4}	6.14×10^{-5}	3.25×10^{-2}
900	1.15	2.34×10^{-2}	8.07×10^{-3}	5.55×10^{-4}	4.07×10^{-5}	2.10×10^{-2}
950	0.71	2.15×10^{-2}	6.36×10^{-3}	3.56×10^{-4}	2.69×10^{-5}	1.35×10^{-2}
1033	0.00	1.90×10^{-2}	4.55×10^{-3}	1.71×10^{-4}	1.34×10^{-5}	6.46×10^{-3}

* Mean altitude of given pressure level according to U.S. Standard Atmosphere.

Figura 1: Composición de los rayos cósmicos, entiéndase, sus partículas, en términos de su flujo. En el estudio original, el enfoque se dirigió a las condiciones atmosféricas, sin embargo, lo que se extrajo para la investigación fueron los datos de altitud pues era la información necesaria para estimar el flujo de muones. Tampoco se consideraron las otras partículas por ser irrelevantes para el proyecto.

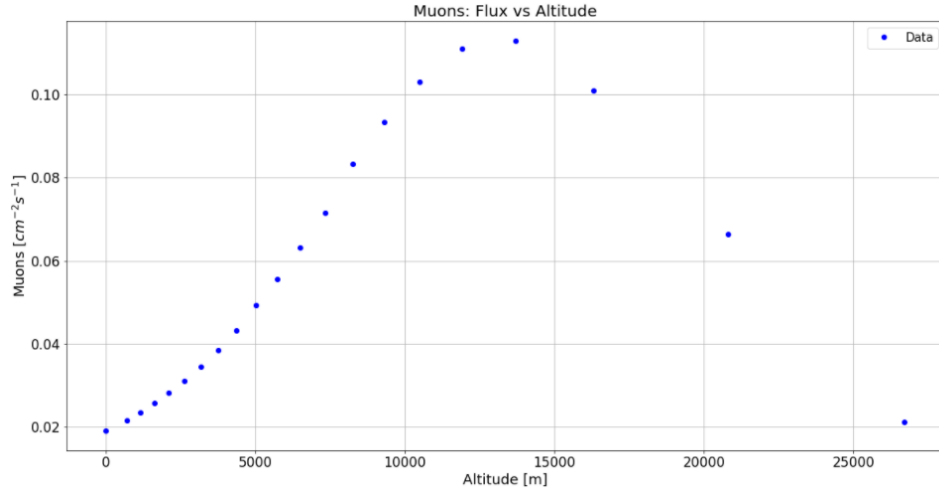


Figura 2: Gráfico con datos experimentales de la relación entre la altitud y el flujo de muones.

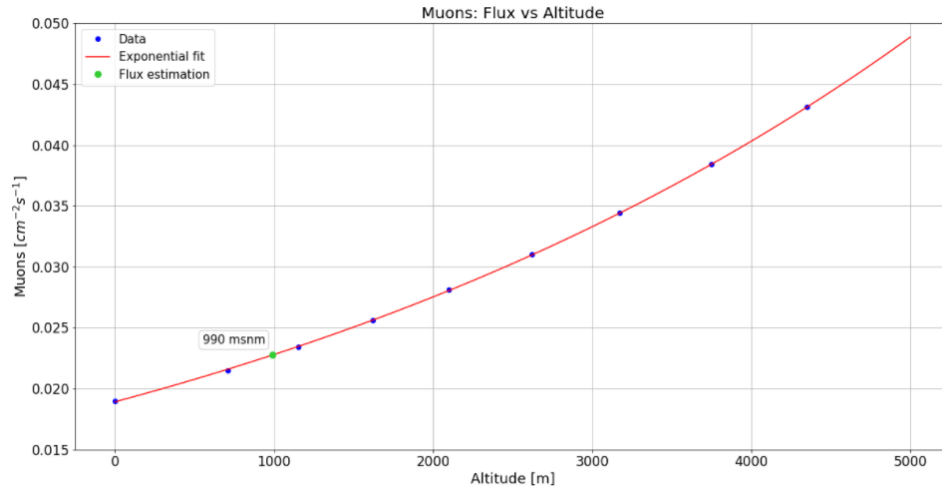


Figura 3: Estimación de flujo de muones a 990msnm.

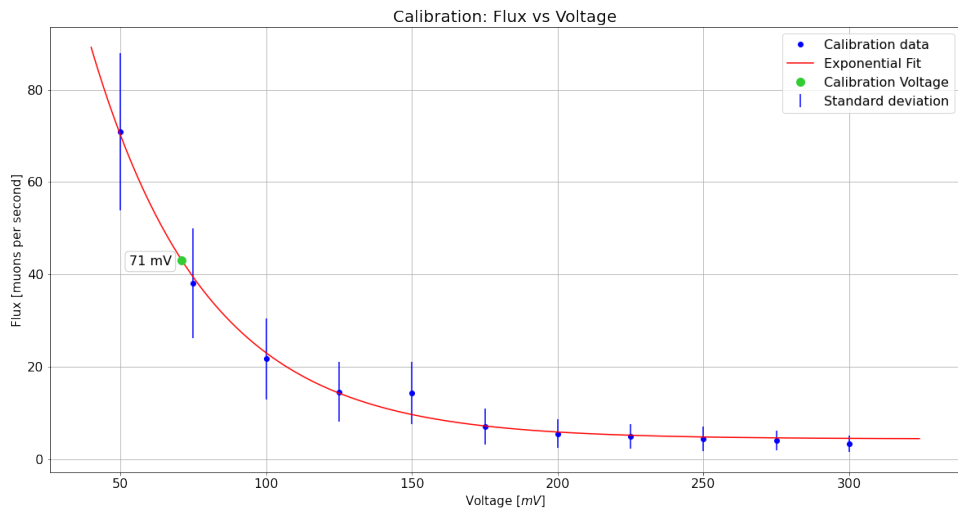


Figura 4: Cada punto azul corresponde al flujo promedio obtenido durante 5 minutos de adquisición, al establecer un valor de voltaje de polarización específico y tiene una desviación estandar asociada. El punto verde es el valor de voltaje de polarización coincidente con el estimado (umbral óptimo), y fue hallado a través de un ajuste exponencial hecho sobre los puntos azules.

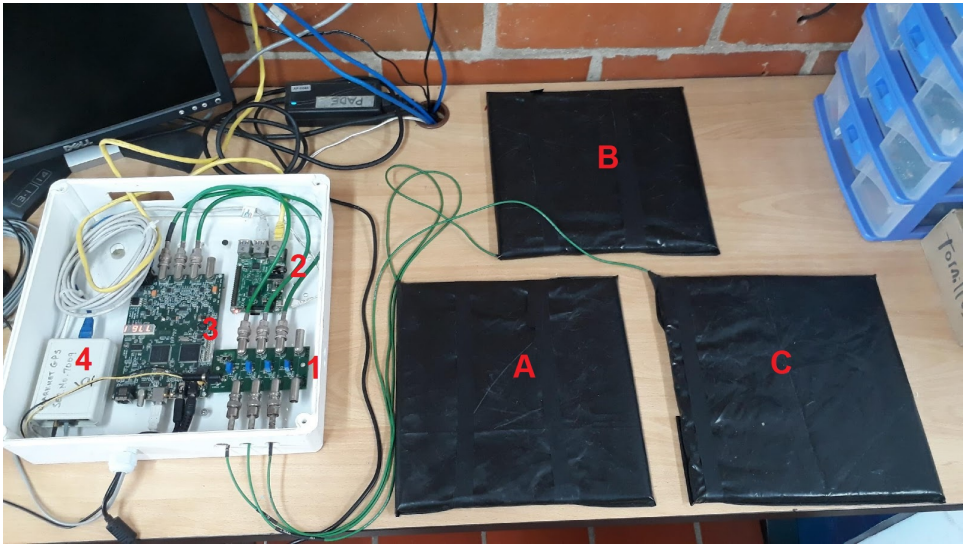


Figura 5: Equipo de detección: A,B y C forman un triángulo equilátero de lado 32 cm, donde los vértices son los centros de las placas centelladoras. 1 es la trajaeta de polarización de los tres fotomultiplicadores adjuntos en cada placa centelladora. 2 es un computador embebido que permite controlar al arreglo experimental. 3 es una tarjeta de digitalización. 4 es un GPS.

Data de detectores															
Word 1	Word 2	Word 3	Word 4	Word 5	Word 6	Word 7	Word 8	Word 9	Word 10	Word 11	Word 12	Word 13	Word 14	Word 15	Word 16
Trigger Count	RE Detector 0	FE Detector 0	RE Detector 1	FE Detector 1	RE Detector 2	FE Detector 2	RE Detector 3	FE Detector 3	CPLD Count	Tiempo (UTC)	Fecha (UTC)	Estatus del GPS	Número de GPS	Estatus del sistema DAQ	Tiempo de retardo
Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	Hexadecimal	HHMMSS.mmm	ddmmyy	A/V (válido/inválido)	Decimal	Hexadecimal	milisegundos

Figura 6: Estructura de los datos del sistema de adquisición de acuerdo a lo expuesto en su correspondiente manual de usuario.

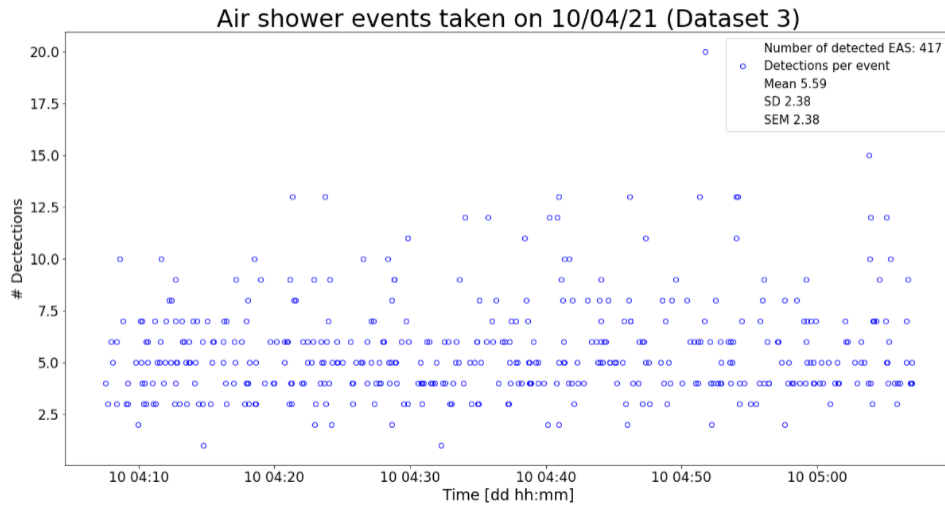


Figura 7: Gráfico de registros asociados a las lluvias aéreas extensas tomadas en el tercer lote de datos el día 10/04/2021

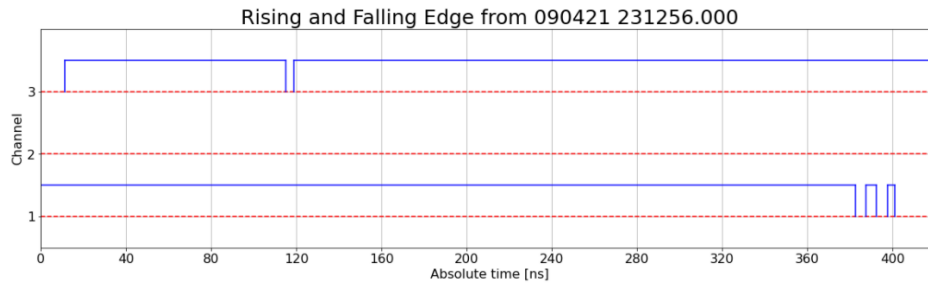


Figura 8: El sistema de trigger del arreglo de detectores adquiría data cuando se activaban los triggers de al menos dos fotomultiplicadores con un delay temporal menor o igual a 2400 ns.

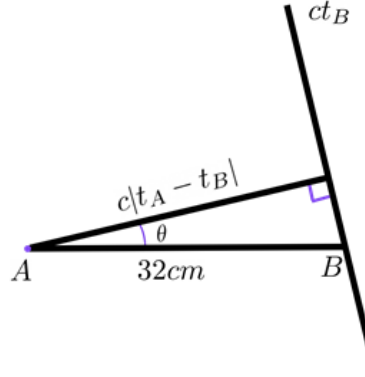


Figura 9: Representación geométrica planar del frente de la lluvia aérea extensa. Un ángulo igual o muy cercano a 0 significa que el delay con el cual se activaron los triggers de cualquier par de fotomultiplicadores es amplio.

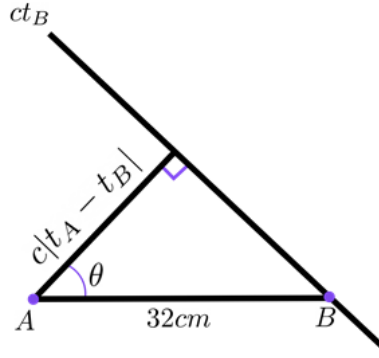


Figura 10: Representación geométrica planar del frente de la lluvia aérea extensa. Un ángulo mayor a 0 y menor a $\frac{\pi}{2}$ significa que el delay con el cual se activaron los triggers de cualquier par de fotomultiplicadores es moderadamente amplio.

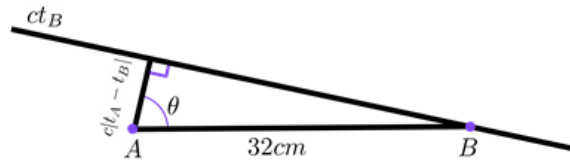


Figura 11: Representación geométrica planar del frente de la lluvia aérea extensa. Un ángulo igual o muy cercano a $\frac{\pi}{2}$ significa que el delay con el cual se activaron los triggers de cualquier par de fotomultiplicadores es pequeño.

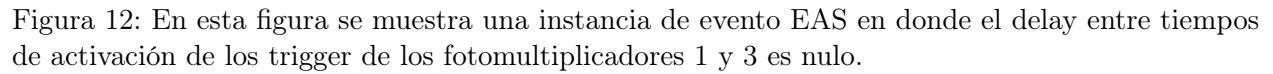


Figura 13: Esta figura muestra tres listas -una por cada lote de data adquirida- constituidas por tuplas de tres componentes: el primer y el segundo indican cuál par de triggers se activaron, el tercer indica el delay temporal entre la activación de dichos triggers.

3. El experimento y los resultados

Las primeras tres figuras (1, 2, 3) demuestran que el flujo de muones depende de la altitud. Esto se debe a la composición de rayos cósmicos. En principio, cuando los rayos cósmicos alcanzan la Tierra, están formados en un 99 % por protones y partículas alfa, por lo cual se espera que a grandes alturas el flujo de muones sea escaso (como se muestra en la Figura 2 para alturas mayores a 16300m). Sin embargo, a medida que se producen mayor cantidad de interacciones entre los rayos cósmicos y las partículas atmosféricas, entonces aumenta el flujo de muones. Sin embargo, a alturas más bajas, el número de partículas por lluvias aéreas extensas y radiación cósmica se reduce, por lo cual a menos de 10500m también se muestra un descenso en la detección de muones. Considerando altitudes menores a 5000 m es posible hacer un análisis de ajuste exponencial a datos de variación de flujo. De esta forma, se determinó un flujo ligeramente mayor al flujo esperado a nivel de mar, de 1.4 muones/s a 990 msnm (véase la Figura 3), donde se ubicó el experimento. Al adaptar el flujo al área de 1875cm^2 , el flujo estimado aumentó a 43muones/s pues el flujo depende del área de detección. Por esta estimación, se permitió establecer un voltaje de 71mV para la calibración en umbral óptimo. También se halló que el flujo de muones detectados se reduce al aumentar el umbral de discriminación de una forma exponencial (Figura 4), siguiendo esta ecuación:

$$\text{Flujo} = (233,06e^{0,0017*\text{Voltaje}} + 0,880) \text{ muones/s}$$

Para los conjuntos de datos estudiados se encontró: Primer lote de datos:

- Eventos de EAS: 389
- Eventos por minuto: 6.48/min
- Registros por evento: 5.63/evento.
- Desviación estándar de los registros: 2.4/evento.
- Error estándar de los registros: 0.12/evento.

Segundo lote de datos:

- Eventos de EAS: 563
- Eventos por minuto: 6.25/min
- Registros por evento: 5.63/evento.
- Desviación estándar de los registros: 2.4/evento.
- Error estándar de los registros: 0.12/evento.

Tercer lote de datos:

- Eventos de EAS: 417 (nótese una muestra en la Figura 7)

- Eventos por minuto: 6.95/min
- Registros por evento: 5.59/evento
- Desviación estándar de los registros: 2.38/evento
- Error estándar de los registros: 0.12/evento

En total se registraron 7736 datos de detecciones durante el tiempo de tres horas y media. Al considerar que los eventos de lluvias son simultáneos, al agrupar estos datos de acuerdo a las coincidencias de tiempo (con precisión de milisegundos) se obtuvo una detección de 1369 lluvias, por lo cual hubo un promedio de 6,56 eventos de EAS por minuto. A su vez, se determinó en promedio una tasa de 5,64 registros para cada evento de EAS, es decir, se observaron alrededor de 5,64 detecciones en cada segundo que una EAS fue detectada. La gráfica ejemplo, para el tercer lote (Figura 7) demuestra que, si bien el número de lluvias en un lote de datos no es particularmente alto, la cantidad de registros de detección sí es alta, notándose cantidades aproximadas de 5.64 por evento de EAS.

El estudio sobre la dirección de los eventos EAS realizado permite concluir que de todos los eventos EAS detectados en el experimento, solo 73 eventos EAS eran compatibles con la representación geométrica planar de las EAS porque solo 73 eventos fueron generados por la activación de los triggers de dos fotomultiplicadores con un delay temporal menor o igual a 1.07 ns. Todos estos 73 eventos EAS incidieron horizontalmente sobre el arreglo de detectores porque el ángulo formado entre el vector normal del plano que representa el frente de la lluvia y el plano que contiene los tres detectores es de $\frac{\pi}{2}$ radianes o equivalentemente el delay temporal en la activación de los triggers de cualquier par de fotomultiplicadores fue nulo (ver figura 13).

4. Conclusiones y Recomendaciones

En primera instancia, referente a la estimación del flujo de muones, si bien los datos experimentales pertenecen a otras investigaciones, se deben notar algunas observaciones del análisis:

- La altitud afecta al flujo de muones. Para alturas de 10500 m, el flujo de muones por segundo comienza a descender, y para alturas superiores a 16300 m también se mide un menor flujo. Esto sugiere que los rayos cósmicos no contienen muones, sino que la interacción de los CRs a mayor penetración atmosférica comienza a crear muones.
- Es posible hacer un ajuste exponencial para alturas menores a 5000 m cuyos valor de flujo encontrado sea respaldado con el flujo calculado por interpolación.
- A 990 msnm se puede estimar un flujo de 1,4 muones por minuto, y para un área de 1875cm^2 , un flujo de 43 muones por segundo.

En el análisis de calibración, el flujo detectado decrece con el aumento del voltaje de discriminación. Para $71mV$ se encontró un flujo coincidente con el estimado, por lo cual este es el umbral óptimo para detectar lluvias.

En el estudio de lluvias áreas extensas, se encontró un gran registro de detecciones correspondientes a 7736 datos durante el tiempo de detección total de tres horas y media. Al agrupar estos datos de acuerdo a los instantes de tiempo (con precisión de milisegundos) se obtuvo una detección de 1369 lluvias, correspondientes a una tasa de 6,56 eventos de EAS por minuto, con registro promedio de 5,64 detecciones por evento de EAS.

Finalmente, el estudio sobre la dirección de las lluvias permite concluir que 73 eventos de EAS fueron compatibles con la representación geométrica planar de las EAS. Esto se debe a que solo 73 eventos fueron generados por la activación de los triggers de dos SiPM con un delay temporal menor o igual a 1,07 ns. Todos estos 73 eventos EAS incidieron horizontalmente sobre el arreglo de detectores porque el ángulo formado entre el vector normal del plano que representa el frente de la lluvia y el plano que contiene los tres detectores es de $\frac{\pi}{2}$ radianes o equivalentemente el delay temporal en la activación de los triggers de cualquier par de SiPM fue nulo.

Respecto a los límites del estudio:

- Los datos experimentales para la variación de flujo de muones respecto a la altura provienen de una fuente norteamericana, sería interesante un estudio al respecto en Colombia.
- Todos los detectores se ubican en la misma locación.

Recomendaciones:

- Estimar la dirección de las lluvias aéreas extensas mediante otros métodos y comparar la diferencia de sus resultados.
- Realizar estudios con mayor tiempo de recolección de datos.
- Proponer experimentos para hallar la incertidumbre del detector.
- Plantear un experimento con detectores en diferentes ubicaciones, a mayor distancia entre sí.

En últimos comentarios, si bien este proyecto forma parte de una larga lista de estudios con lluvias aéreas extensas y muones atmosféricos, sin duda los experimentos de detección de rayos cósmicos y sus cascadas no pierden vigencia.

Hoy en día, se sabe que los rayos cósmicos primarios se componen en un 99 % de protones y partículas alfa las cuales dan paso al resto de las partículas durante la formación de los rayos cósmicos secundarios y las lluvias aéreas extensas. Sus rangos de energía, desde 10^7 eV y hasta incluso 10^{20} eV, los hace una fuente perfecta para experimentos de física, pues pueden superar en un gran margen la energía de los aceleradores de partículas, como el LHC.

Así, desde el punto de vista de energía, los rayos cósmicos son de interés para la física de altas energías; también, el estudio de variación en el flujo al cambiar las condiciones atmosféricas y terrestres mantiene la necesidad de continuar estas detecciones para diferentes ubicaciones; por

su composición, se tiene una gran variedad de partículas de interés, por ejemplo los muones o los neutrinos, de importancia en física de partículas; y por su posible origen, la astrofísica y la cosmología también encuentra un lugar en el estudio de rayos cósmicos.

La configuración experimental para detección de rayos cósmicos y de lluvias aéreas extensas depende de las características que se quieran evaluar y parametrizar, abriendo un abanico de posibilidades para la ciencia y tecnología.

No es de extrañar entonces la importancia de centros de investigación con métodos de detección tan distintos y complejos como nombres: el Observatorio Pierre Auger con detectores de fluorescencia y de Cherenkov; el Observatorio de Neutrinos IceCube que también utiliza la luz Cherenkov o El Espectrómetro Magnético Alpha, para la estación espacial. Y sin embargo, sin esas potencialidades, con un equipo de tres paneles centelladores de tan solo 25 cm x 25 cm cada uno, también se pudo detectar, en un instante de tiempo, muones atmosféricos, provenientes de rayos cósmicos.

5. Referencias

Para el presente proyecto se usó las siguientes referencias: [2, 3, 4, 5, 6].

Referencias

- [1] Exposure of the population in the united states and canada from natural background radiation.
- [2] P. Sommers. Extensive air showers and measurement techniques. 2004.
- [3] R. Batista et al. Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies. 2019.
- [4] M. Spurio. *Particles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach (Astronomy and Astrophysics Library)*. Springer, 2014.
- [5] P. K. F. Grieder. *Extensive Air Showers*. Springer, 2010.
- [6] J. Paschke Jeff Rylander, T. Jordan and Hans-Gerd Berns. *QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector User's Manual Series "6000" DAQ, Version 1.1, 1-53*. January 2010.