

Influencia del Ciclo Solar #25 sobre la detección de muones en el Gimnasio Campestre durante los años 2022-2024

**Sebastián Grueso Pinzón, Tobías Mateus Naranjo,
Juan Esteban Jiménez Martín**

Resumen

El presente estudio examina la relación entre la evolución del Ciclo Solar 25 y la detección de muones en la superficie terrestre, utilizando el detector de muones Cosmic Watch en el Observatorio Astronómico del Gimnasio Campestre. A lo largo del período 2022-2024, se llevaron a cabo mediciones semanales con el objetivo de analizar las variaciones en el flujo y la energía de los muones en función de la actividad solar. Los resultados obtenidos evidencian una tendencia decreciente tanto en la cantidad como en la energía promedio de los muones detectados, lo que sugiere un efecto modulador del viento solar y de las eyecciones de masa coronal sobre la radiación cósmica incidente en la atmósfera terrestre. Adicionalmente, se realizaron mediciones en condiciones especiales, incluyendo una sesión en la mina de sal de Zipaquirá y otra durante un eclipse solar. Los hallazgos de esta investigación respaldan la hipótesis de que el incremento en la actividad solar disminuye la incidencia de rayos cósmicos de alta energía, afectando la producción y detección de muones en la superficie terrestre.

Palabras clave:

Muones, rayos cósmicos, Ciclo Solar 25, eyecciones de masa coronal (EMC), Cosmic Watch Detector,

Introducción

El colegio Gimnasio Campestre tiene un observatorio y una línea de investigación activa en evolución del ciclo solar. Esta se centra en el estudio diario de la actividad solar y el avance del ciclo solar por medio de la observación de manchas solares, protuberancias y destellos solares. Además, en el colegio se han realizado tres monografías sobre partículas elementales entre ellas la construcción de una cámara de niebla para la observación de rayos cósmicos y la construcción y puesta en marcha de un detector de muones llamado Cosmic Watch Detector para la detección cuantitativa de estas mismas partículas. Conociendo la utilidad de este detector, se propuso conectar estas dos líneas de investigación para reconocer la relación que hay entre el ciclo solar y el flujo de muones observados en la superficie de la Tierra. En este orden de ideas, este trabajo busca identificar una posible correlación entre el avance del Ciclo Solar y el flujo de muones detectados en el Gimnasio Campestre.

Pregunta Problema: ¿Cuál es la correlación que hay entre el avance del Ciclo Solar número 25 y el flujo de muones detectados en el Gimnasio Campestre?

Objetivo General: Identificar cual es el cambio que se observa en algunas propiedades de los muones como el flujo y el cambio en la energía de estas partículas a lo largo de la fase inicial del Ciclo Solar No 25 (años 2022-2024) utilizando el Cosmic Watch Detector.

Objetivos específicos

Identificar el efecto que hay en el número de muones detectados semanales en periodos de media hora a medida que se incrementa la actividad del ciclo solar en el periodo de 2022-2024.

Analizar la variación en la distribución de la energía de los muones observados cada semana conforme incrementa la actividad solar

Reconocer el efecto que causan en el flujo de muones fenómenos como: un eclipse solar y grandes cantidades de masa al hacer la detección en una mina subterránea

1. Marco teórico

Para poder tener una base teórica al fenómeno de la detección de muones y el efecto que tiene la actividad solar en ella, se va a dar una contextualización de los conceptos teóricos necesarios en el marco de la investigación. En esta se va a hablar en el orden mencionado de la Teoría del Modelo Estándar de la materia, las partículas elementales, los rayos cósmicos y su decaimiento, los tipos de detectores de partículas elementales en especial el Cosmic Watch Detector que es el dispositivo que usaremos, y del ciclo solar número 25. Habiendo leído esto en orden, se debería ser capaz de entender qué es un muon, de dónde proviene un muon, cómo interactúa con la atmósfera, cómo es detectado y finalmente qué es el ciclo solar, siendo estas las preguntas clave para comprender el análisis presentado.

1.1 Teoría del Modelo Estándar de la Materia.

El Modelo Estándar describe las interacciones de las partículas elementales que constituyen la materia ordinaria del universo actualmente (millones de años luego del Big Bang). Las fuerzas fundamentales son aquellas fuerzas del Universo que no se pueden entender en relación de otras más básicas. Las fuerzas fundamentales conocidas hasta ahora son: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. (Cobián, 2018).

1.1.1 Interacción gravitatoria

La interacción gravitatoria es una fuerza atractiva que actúa entre cuerpos que tengan masa y a cualquier distancia. Es dominante a grandes escalas, pero la más débil a nivel atómico. Según la teoría de la relatividad general, la gravedad "se describe como una curvatura del espacio-tiempo por la presencia de grandes masas". Aunque el Modelo Estándar propone al gravitón como partícula mediadora, su existencia no ha sido confirmada experimentalmente. Debido a su predominio solo a distancias macroscópicas, "se puede simultáneamente utilizar el modelo tradicional para la gravedad y el modelo estándar para las otras tres interacciones sin que ambas teorías entren en conflicto" (Cobián, 2018).

1.1.2 Interacción electromagnética

La interacción electromagnética ocurre entre partículas con carga eléctrica y combina la fuerza electrostática con los campos magnéticos. Aunque su alcance es infinito, su intensidad se reduce a grandes distancias debido a la cancelación de cargas opuestas. Desde el siglo XIX, se comprendió que electricidad y magnetismo son aspectos de una misma fuerza, unidos en las ecuaciones de Maxwell en 1864. Más tarde, Einstein teorizó que "la luz se transmite también en forma de cuantos, que ahora llamamos fotones" al

explicar el efecto fotoeléctrico (Cobián, 2018). Entre 1927 y 1940, Dirac integró la mecánica cuántica con la teoría relativista del electromagnetismo, consolidando su descripción teórica.

1.1.3 Interacción nuclear fuerte

La interacción fuerte mantiene unidos a los quarks para formar hadrones, los cuales poseen una carga conocida como "carga de color". Actúa únicamente a nivel del núcleo atómico y, aunque su alcance es corto, "su fuerza es muchísimo más intensa que la de cualquiera de las otras tres interacciones" (Cobián, 2018). Según el Modelo Estándar, los gluones son las partículas mediadoras de esta interacción. Además, esta fuerza es responsable de la cohesión entre protones y neutrones dentro del núcleo, superando la repulsión electromagnética entre protones.

1.1.4 Interacción nuclear débil

La interacción débil afecta a partículas con una propiedad llamada sabor, permitiendo transformaciones entre quarks y leptones y siendo responsable de fenómenos como la desintegración beta. Está mediada por los bosones $(W^{+}), (W^{-})$ y (Z^0) , "partículas de masa relativamente alta" según el modelo estándar. Aunque es más débil que las interacciones electromagnética y fuerte, desempeña un papel crucial en procesos subatómicos. Glashow, Weinberg y Salam desarrollaron una teoría que unifica la interacción débil con el electromagnetismo, conocida como fuerza electrodébil (Cobián, 2018).

1.2 Partículas elementales

Una partícula elemental es el constituyente básico de la materia, incapaz de subdividirse. Se caracteriza por su masa, carga eléctrica, espín y paridad, aunque la mayoría son inestables. Según el modelo estándar, se dividen en dos grandes grupos: fermiones, los constituyentes de la materia, y bosones, responsables de las interacciones fundamentales.

1.2.1 Fermión

Los fermiones, llamados así en honor a Fermi, son partículas de espín semi-entero que siguen la estadística de Fermi-Dirac y obedecen el principio de exclusión de Pauli. Se clasifican en quarks y leptones:

- Quarks: Tienen propiedades como masa, espín (1/2), carga eléctrica fraccionaria, "sabor" y "color". Existen seis tipos: arriba, abajo, encanto, extraño, cima y fondo. Los quarks no se encuentran aislados, sino formando partículas compuestas llamadas hadrones.
- Leptones: Tienen espín (1/2) y masas inferiores a las de los mesones. Incluyen el electrón, el muon, el tauón y sus neutrinos correspondientes. Un leptón típico, el electrón, "posee la mínima carga eléctrica negativa detectada" y experimenta interacciones electromagnéticas, débiles y gravitatorias, pero no fuertes. (Cobián, 2018).

1.2.2 Bosón

Los bosones, nombrados en honor a Bose, tienen espín entero o nulo y obedecen la estadística de Bose-Einstein. Son responsables de las fuerzas fundamentales mediante los bosones de gauge:

- Fotón: Portador de la interacción electromagnética, "viaja a la velocidad de la luz y tiene masa nula". (Cobián, 2018).
- Gluon: Transmisor de la interacción fuerte, carece de masa y carga eléctrica, pero posee carga de color.
- Bosones (W) y (Z): Portadores de la interacción débil. El bosón (W) interviene en procesos como la desintegración beta, mientras que el (Z) es neutro y afecta el "sabor" de quarks y leptones.
- Bosón de Higgs: Otorga masa a otras partículas al interactuar con ellas, carece de espín y es muy inestable.

1.2.3 Partículas compuestas

Los hadrones son partículas compuestas por quarks y gluones confinados por la interacción fuerte. Se clasifican en:

- Bariones: Constituidos por tres quarks, como los protones y neutrones.
- Mesones: Formados por un par quark-antiquark, se comportan como bosones.

1.2.4 Partículas Alfa

En general, las partículas elementales y compuestas reflejan la estructura fundamental del universo, mediada por las cuatro interacciones descritas previamente. Además de las partículas ya descritas, es necesario definir las partículas alfa y la radiación de estas, que serán necesitadas para entender la formación de muones por medio de la descomposición de rayos cósmicos. Las partículas alfa son definidas como “núcleos de helio ionizados, es decir, están formadas por dos protones y dos neutrones. Por lo tanto, tienen carga eléctrica positiva +2.” por Lidia Escanciano Fernández en su artículo “Detección de alfas para medidas de radio pureza con detectores de Micro megas”. (2022). Asimismo, la radiación de estas partículas es descrita como “La radiación alfa consiste en partículas monoenergéticas, con carga eléctrica positiva y se identificaron como núcleos de helio. La energía de estas partículas se refiere a energía cinética y estas partículas son emitidas con gran velocidad.” (Aguilera et al., 2005).

1.3 Muones

Como dice Gorringer y Hertzog en su artículo “Precisión muon physics” el muon no es un componente fundamental de la materia ordinaria (2015). Su masa es significativamente mayor que la del electrón, pero mucho menor que la del protón. Esto equivale a aproximadamente 206,77 (46) veces la masa de un electrón. Participa en interacciones mediante su carga eléctrica, momento magnético, y las corrientes débiles cargadas y neutras, pero no a través de la interacción fuerte. Los muones positivos pueden formar átomos similares al hidrógeno al combinarse con electrones, mientras que los negativos lo hacen con núcleos atómicos. Aunque son partículas inestables, su tiempo de vida es lo suficientemente largo para estudiar con precisión sus propiedades y lo suficientemente corto para analizar detalladamente sus desintegraciones. Por una peculiaridad de la naturaleza, la no conservación de la paridad permite que los muones se produzcan completamente polarizados. Además, sus desintegraciones son auto analizables, lo que facilita estudios de gran exactitud sobre sus características.

1.4 Rayos cósmicos

En relación con el concepto que se venía trabajando, los muones se producen en los rayos cósmicos.

Estos son partículas de muy alta energía que viajan a una velocidad cercana a la de la luz. La mayoría de los rayos cósmicos son núcleos atómicos despojados de sus átomos, de manera que se componen en un 90% de protones, 9% de partículas alfa, siendo el resto partículas más pesadas. (Gaisser K. T., 1990, p.1).

Los rayos cósmicos primarios son partículas cargadas que provienen del espacio exterior, mientras que los rayos cósmicos secundarios son el resultado de la interacción de las partículas primarias con la atmósfera.

De acuerdo con los autores González y Ortiz de la Universidad Nacional Autónoma de México, los rayos cósmicos se catalogan en función de su energía: ultra alta energía ($\geq 10^{18}$ eV), alta energía ($\geq 10^{10}$ eV) y baja energía ($< 10^9$ eV). Con base en estudios recientes, se sabe que los rayos cósmicos de ultra alta energía provienen de fuera de la Vía Láctea y son acelerados dentro del núcleo de una clase de galaxias

denominadas de núcleos activos. Por otra parte, los rayos cósmicos de alta energía se producen dentro de la Vía Láctea, en eventos catastróficos llamados supernovas, en los que las estrellas masivas (más de cinco veces la masa del Sol) explotan y producen una onda de choque que se propaga a altas velocidades. Por último, los rayos cósmicos de baja energía se producen por los diferentes fenómenos que ocurren en la atmósfera del Sol, como el viento solar, las fulguraciones y las eyecciones de masa coronal, sin embargo, estos fenómenos son circunstanciales. (González & Ortiz, 2020)

1.4.1 Descubrimiento de los rayos cósmicos

La historia de los rayos cósmicos comenzó tras el descubrimiento de la radiactividad en 1896, cuando se observó la ionización del aire, inicialmente atribuida a elementos radiactivos terrestres. Según Terry Devitt (Universidad de Wisconsin-Madison), esta idea fue refutada en 1912 por el físico austriaco Victor Hess, quien, utilizando electrómetros en un globo de hidrógeno, descubrió que la ionización aumentaba con la altitud. A más de 5,000 metros, observó que era cuatro veces mayor que al nivel del suelo, confirmando el origen extraterrestre de estas partículas.

Este hallazgo, que le valió a Hess el Premio Nobel en 1936, inauguró la física de rayos cósmicos y planteó preguntas sobre su composición y origen. Hoy se sabe que la mayoría son protones, aunque también contienen helio y otros elementos en menor proporción. En la década de 1930, estas partículas se volvieron esenciales para estudiar partículas subatómicas, pues al chocar con la atmósfera producen lluvias de partículas secundarias.

Antes de los aceleradores de partículas, los rayos cósmicos permitieron identificar positrones, muones, piones y otras partículas, ampliando el conocimiento subatómico y consolidando su papel como herramienta clave en la física de partículas. (Devitt, 2024)

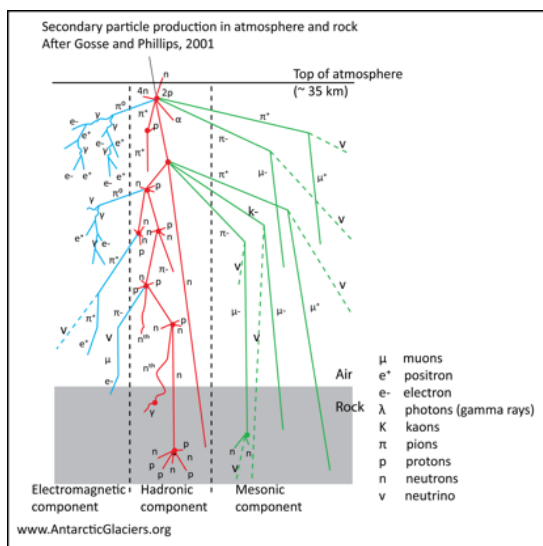


Figura 1 El grafico representa el decaimiento de los rayos cósmicos desde su interacción con la atmósfera hasta niveles subterráneos. Se divide el decaimiento en tres componentes: electromagnético, hadrónico y mesónico. El muon se encuentra principalmente dentro del componente mesónico y en menores proporciones en el componente electromagnético, ambos derivados del componente hadrónico.

1.4.2 Decaimiento de los rayos cósmicos

- Mesón: Los mesones son partículas de masa intermedia que se componen de un par quark-antiquark.
- Pion: El pión, siendo el más mesón, más ligero se puede utilizar para predecir el alcance máximo de la interacción fuerte.
- Hadrón: Las partículas que son influenciadas por la interacción fuerte se denominan hadrones. Esta clasificación general incluye los mesones y los bariones.
- Kaón: Los kaones cargados son mesones que tienen una composición de quarks up-antistrange en el kaón positivo, y antiup-strange en el kaón negativo
- Barión: Los bariones son partículas masivas del modelo estándar, que se componen de tres quarks. Esta clase de partículas incluye el protón y el neutrón (B. Davies, 2023).

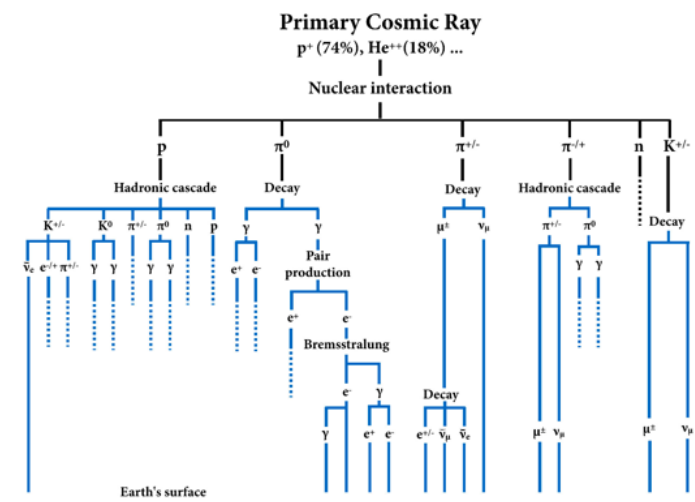


Figura 2. Rayos cósmicos primarios. El gráfico representa el decaimiento de los rayos cósmicos desde su interacción con la atmósfera hasta la superficie terrestre. Se divide en el decaimiento desde diferentes partículas, protón, pion neutro, pion positivo, pion negativo, neutrón y kaón positivo, respectivamente. Los muones decaen de los piones positivos y negativos y de los kaones. (Gaelan, 2014).

Específicamente, el muón nace en el decaimiento de los rayos cósmicos como se describe a continuación:

Como se puede observar en la figura 1, cuando los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera de la tierra a aproximadamente 35 kilómetros sobre la superficie del mar, estos decaen en diferentes tipos de partículas que se pueden clasificar en tres grupos: electromagnéticos, hadrones, y mesones.

El componente hadrónico se produce cuando el átomo se rompe y genera hadrones o núcleos de elementos más ligeros. Mientras cuentan con energía suficiente, éstos continúan colisionando con los núcleos atmosféricos y provocando que la componente hadrónica se propague de forma longitudinal con la dirección del rayo cósmico primario (Grieder, 2001). Por otra parte, el componente mesonico está formado

por muones y neutrinos resultantes del decaimiento de piones y kaones cargados del componente hadrónico y de otros procesos menos dominantes. Por último, del decaimiento de piones neutros (y en menor cantidad, de muones y otras partículas) se forma el componente electromagnético, integrado por rayos gama de alta energía y electrones. (González & Ortiz, 2020). De acuerdo con S. N. Gaelan, entre el 80-90% de los muones decaen de los piones, los restantes decaen de los kaones. Un muón de rayos cósmicos con una energía superior a 2,4 GeV será lo suficientemente relativista como para que su longitud de decaimiento llegue a ser superior a 15 km, es decir, alcance a llegar a la superficie terrestre. Es decir, los muones que estén dentro de este rango de energía serán registrados por el detector CosmicWatch. Además, un muón típico perderá aproximadamente 2 GeV de energía debido a la ionización a medida que atraviesa la atmósfera en su camino hacia la Tierra. (S. N. Gaelan, 2014).

1.4.3 Efecto de la presión y la temperatura sobre el decaimiento de los rayos cósmicos

Los efectos barométricos y de temperatura, que afectan la generación de muones, deben tenerse en cuenta para comprender cómo afecta el ciclo solar a la detección de muones en la Tierra. La información presentada a continuación viene de un artículo nombrado “Analysis of Cosmic Rays Atmospheric Effects and Their Relationships to Cutoff Rigidity and Zenith Angle Using Global Muon Detector Network Data” (Mendonça et al, 2019) donde se explica ambos efectos a detalle.

Dado que los cambios en la presión atmosférica modifican la masa de atmósfera que atraviesan los rayos cósmicos, el efecto barométrico se define por una anti-correlación entre la intensidad de los rayos cósmicos y la presión atmosférica. La detección de muones a nivel del suelo aumenta cuando la presión atmosférica es más baja, como ocurre durante los ciclones tropicales, porque se produce una menor absorción secundaria de partículas de rayos cósmicos (Mendonça et al, 2019). Una mayor presión aumenta la posibilidad de absorción de partículas antes de que lleguen al suelo, lo que se explica por mecanismos de pérdida de energía que dependen de la profundidad atmosférica. Además, los cambios de presión tienen un efecto directo en los procesos atmosféricos de creación y desintegración de muones.

Por otro lado, el impacto de la temperatura afecta a la generación de muones a través de la desintegración de piones y kaones dependiente de la temperatura. El aumento de la producción de muones es el resultado de una menor absorción de piones y kaones a temperaturas del aire más elevadas (Mendonça et al, 2019). Sin embargo, la expansión del aire en verano alarga la ruta del muón, provocando que más muones de baja energía decaigan antes de que puedan ser detectados. Por otro lado, durante los meses de invierno pueden llegar a la Tierra más muones de baja energía, ya que los muones se producen a menor altura. Para los detectores a nivel del suelo, esto conduce a una fluctuación estacional en la intensidad de los muones que está en anti-fase con la temperatura de la superficie. Para los muones de alta energía, el efecto de la temperatura está en fase con su efecto ya que, en verano, más muones alcanzan el suelo, mientras que, en invierno, menos de ellos son detectados.

1.5 Tipos de detectores de partículas elementales

Los autores Hermann Kolanoski y Norbert Wermes (2020) explican en su libro titulado “Particle detectors, fundamentals and applications” lo que se describe a continuación. Los detectores de partículas elementales

son dispositivos diseñados para observar y medir las propiedades de partículas subatómicas, como electrones, protones, neutrones y neutrinos. Estos detectores convierten las interacciones entre las partículas y la materia en señales observables, permitiendo el análisis de eventos físicos fundamentales. Existen diferentes tipos de detectores tales como:

Detectores no eléctricos:

Estos detectores permiten visualizar trayectorias de partículas a través de fenómenos macroscópicos sin el uso directo de señales electrónicas. Esta cámara consiste en un contenedor lleno de vapor de alcohol isopropílico super saturado. Cuando una partícula cargada atraviesa el vapor, ioniza las moléculas, y estas actúan como núcleos de condensación, formando trazas visibles de gotas. Una cámara de niebla (Wilson Cloud Chamber) se construyó en el Gimnasio Campestre, sin embargo, la visualización de los rayos cósmicos tiene diversas variables y no siempre es fácil verlos.

Detectores llenos de gas (Gas-filled detectors):

Basados en la ionización del gas por partículas incidentes, estos detectores generan señales eléctricas a partir del movimiento de electrones e iones en campos eléctricos. Por ejemplo, contador Geiger-Müller: Utiliza un tubo lleno de gas (por ejemplo, argón) y detecta partículas ionizantes mediante pulsos eléctricos generados por avalanchas electrónicas cuando una partícula atraviesa el gas.

Detectores semiconductores:

Utilizan materiales semiconductores, como el silicio, para detectar partículas a través de la generación de pares electrón-hueco inducidos por la interacción de las partículas con el material. Entre estos se encuentra el detector de silicio de píxeles: compuesto por una matriz de diminutas celdas semiconductoras, se emplea en experimentos como los realizados en el LHC (Large Hadron Collider) para reconstruir trayectorias con alta precisión espacial.

Fotodetectores

Estos dispositivos detectan partículas a través de la observación de la luz emitida durante ciertas interacciones, como la radiación Cherenkov o la luz de centelleo. Por ejemplo, el fotomultiplicador (PMT): Detecta y amplifica luz muy tenue, como la generada por radiación Cherenkov, mediante un efecto fotoeléctrico inicial y una cascada de multiplicación de electrones.

Detectores centelladores:

Estos detectores convierten la energía depositada por partículas incidentes en fotones de luz visible o ultravioleta, que luego son detectados mediante dispositivos como fotomultiplicadores o fotodiodos. Por ejemplo, plásticos centelladores: Hechos de polímeros orgánicos (como poliestireno) dopados con compuestos fluorescentes, emiten luz cuando una partícula cargada atraviesa el material. Se utilizan ampliamente en experimentos de física nuclear y de altas energías para medir la energía y el tiempo de llegada de partículas.

Otros tipos de detectores

Incluyen dispositivos basados en principios específicos y especializados para detectar partículas con características particulares. Un ejemplo de esto es el detector de neutrinos (Super-Kamiokande): Utiliza un tanque gigante lleno de agua ultrapura y detecta neutrinos a través de la luz Cherenkov producida cuando partículas cargadas más rápidas que la velocidad de la luz en el agua son generadas por interacciones neutrino-núcleo.

(Kolanoski & Wermes, 2020, pp. 10-12, 157-161, 171-173, 255-259, 407-413, 501-503)

1.6 Cosmic Watch Detector

Según Spencer N. Axani, el creador del Cosmic Watch Detector, los objetivos de los detectores de partículas son localizar partículas en el espacio y el tiempo, identificarlas y cuantificar su energía y momento. En su artículo “The Physics Behind the CosmicWatch Desktop Muon Detectors” explica que el detector de muones de mesa CosmicWatch recoge datos exhaustivos y está pensado para la detección de uso general. Utiliza un fotomultiplicador de silicio (SiPM) y un centellador de plástico de 5x5x1 cm³. Las partículas cargadas que lo atraviesan liberan fotones que hacen que las microcélulas del SiPM produzcan una corriente detectable. Un Arduino Nano y una placa de circuito impreso personalizada procesan esta corriente y registran la temperatura, el recuento de fotones y la hora del evento. Los datos del detector pueden enviarse directamente a un ordenador o almacenarse en una tarjeta microSD. La tasa de recuento, el tiempo de funcionamiento y otras estadísticas se muestran en un panel OLED integrado, y se pueden realizar pruebas de coincidencia conectando varios detectores. El dispositivo pesa 178 g con su carcasa de aluminio, consume 0,27 W y puede recargarse por USB. Dispone de interfaces USB, BNC y de tarjeta microSD, así como de puertos para probar señales.

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) están compuestos por numerosas microcélulas, cada una de ellas formada por una unión semiconductor P-N. Según Axani, este es el tipo de fotomultiplicador que se usa en el detector de escritorio. Cuando un fotón incide en la región de agotamiento de esta unión, genera un par electrón-hueco. Cuando un fotón incide en la región de agotamiento de esta unión, genera un par electrón-hueco. Bajo una tensión de polarización aplicada, un electrón puede desencadenar una cascada (descarga Geiger) que amplifica la señal hasta millones de electrones. Una resistencia de apagado detiene la cascada, actuando como un interruptor activado por fotones. La corriente total generada es proporcional al número de microcélulas activadas por fotones y, por tanto, al flujo de fotones.

Los SiPM utilizados en el detector de muones de escritorio Semiconductor MicroFC 60035 Serie C son especialmente sensibles a longitudes de onda azul-púrpura de 450 nm. Con una ganancia de aproximadamente 5×10^4 , funcionan con una tensión de polarización ligeramente superior a la tensión de ruptura ($\sim 24,2$ - $24,7$ V) y una sobretensión de 5,0 V. Sin embargo, las fluctuaciones térmicas pueden crear pares electrón-hueco sensibles a la temperatura, lo que puede dar lugar a señales erróneas.

En el diseño del detector de muones de escritorio CosmicWatch se utilizó una base de poliestireno, que en esencia no es más que un plástico transparente barato, como es descrito en el artículo por Spencer. Esta base se mezcló con un dopante primario del 1% en peso de POP (2,5-difeniloxazol) y un dopante secundario del 0,03% de POPOP (1,4-bis[2-(5-feniloxazolil)] benceno). Este centellador de plástico tiene una emisión máxima de aproximadamente 420 nm (luz púrpura intensa), y no emite luz por debajo de 400 nm.

Axani especifica que para el centellador de plástico se necesitan tres piezas:

- La sustancia fluorescente que se suspende de una base transparente (espectro visible). Puede ser un líquido claro, como el aceite mineral, o cualquier tipo de material, como el poliestireno.
- El principal agente fluorescente, estimulado por la transferencia de energía de la partícula cargada. La luz ultravioleta se libera cuando el material fluorescente principal se desexcita. En la base, la luz ultravioleta sólo puede llegar hasta cierto punto (orden de mm) antes de ser absorbida.
- Un material fluorescente secundario que transforma la radiación ultravioleta en luz visible al absorberla.

Cuando la luz visible generada por el centellador rebota en sus paredes internas, parte de ella es absorbida, y otra parte llega al sensor de fotones. En un ejemplo de conversión UV, encontrado en el artículo de Spencer, una luz de flash UV hace que el centellador emita una luz azul/púrpura intensa. Un centellador de poliestireno, con un índice de refracción de 1,581 y una densidad similar a la del agua, se acopla a un SiPM mediante gel óptico, eliminando el espacio de aire para reducir la reflexión de fotones. Se usa papel de aluminio para reflejar los fotones y se asegura el conjunto con cinta aislante negra para hacerlo estanco a la luz.

1.7 Ciclo Solar

Nuestro sol es una enorme bola de gas caliente cargada eléctricamente. Este gas cargado se mueve y crea un fuerte campo magnético. El campo magnético del Sol pasa por un ciclo llamado ciclo solar. Aproximadamente cada 11 años, el campo magnético del Sol se invierte por completo. Esto significa que los polos norte y sur del sol cambian de posición. Después de eso, tardan unos 11 años en volver a su estado original. Los ciclos solares afectan la actividad en la superficie del Sol, como las manchas solares causadas por campos magnéticos. A medida que cambia el campo magnético, también cambia la cantidad de actividad en la superficie del Sol. Esto soportado por Samuel Tomas en su artículo “Predicción del ciclo solar 25 mediante modelos ARIMA y redes neuronales LSTM” donde dice “El ciclo solar, caracterizado por la variación en el número de manchas solares, es un fenómeno que ha sido objeto de estudio durante siglos debido a su influencia en nuestro planeta.”.

Como se puede deducir de la cita de Saavedra y Espinosa (2023), una forma de seguir el ciclo solar es contar el número de manchas solares. El inicio del ciclo solar es el mínimo solar, o cuando hay menos manchas solares en el sol. A medida que la actividad solar aumenta con el tiempo, también aumenta el número de manchas solares. La mitad del ciclo solar es el llamado máximo solar, cuando el número de manchas solares es mayor. Cuando termina el ciclo, vuelve al mínimo solar y comienza un nuevo ciclo. La predicción de la cantidad, y aparición de estas manchas solares es el motivo de investigación de los aurores, predicción que nos ayuda a entender las fechas del comienzo y fin del ciclo además de su máximo solar. El Ciclo 25 empezó en enero de 2020 y es de esperarse que alcance el máximo en el 2025. Eso puede ser evidenciado en su artículo cuando dicen “Se llevó a cabo un estudio para predecir el número de manchas solares en el Ciclo Solar 25 utilizando dos modelos... según el modelo LSTM, se prevé que el número máximo de manchas solares en el Ciclo Solar 25 ocurra en marzo de 2025, alcanzando un valor máximo de 182 manchas solares. En contraste, el modelo ARIMA predice que el máximo se alcanzará en diciembre de 2024, con un valor máximo de 99 manchas solares”.

Marco metodológico

Esta investigación es de carácter experimental y su principal objetivo es ver cómo cambia el flujo y la energía de los muones detectados con el Cosmic Watch Detector a medida que avanza el Ciclo Solar No 25. Para ello se planeó hacer las observaciones en el Observatorio Astronómico del Gimnasio Campestre, una vez a la semana entre las 9:00 a.m. y 10:00 a.m. El tiempo de la observación se determinó en 30 minutos, debido a la gran cantidad de información que se recoge en los detectores. El sitio debe ser el mismo debido a la sensibilidad del dispositivo. Para garantizar la calidad de los datos corregidos el detector debe ser calibrado y se utilizarán dos detectores Cosmic Watch en modo de coincidencia, es decir que el muon detectado debe ser registrado por los dos dispositivos.

Calibración: para asegurar la precisión de estas mediciones, se llevó el detector al Laboratorio de Altas Energías de la Universidad de los Andes. Con ayuda del personal del laboratorio, se verificó la calibración de los dos dispositivos utilizando un osciloscopio según lo especificado por la página del Cosmic Watch Detector



Figura 3. Imagen del detector Cosmic Watch. <http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/about>

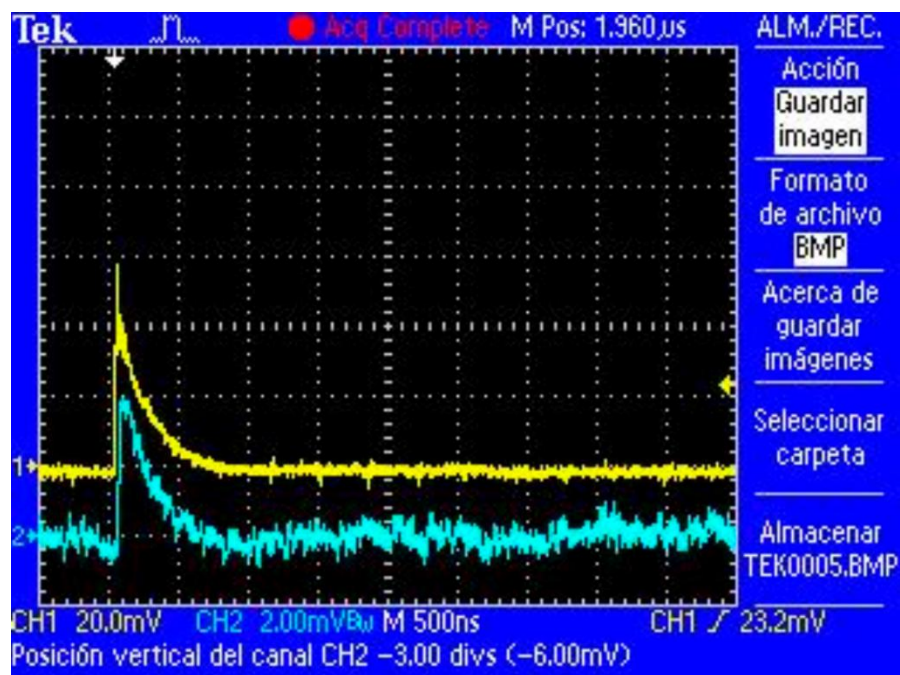


Figura 4. Voltaje emitido por el detector posterior a su calibración. En la imagen se puede observar de manera clara el voltaje emitido por el detector, semejante a la curva deseada.

Antes de comenzar la toma de datos, es necesario destapar los detectores para verificar que el centellador (el componente encargado de detectar las partículas) esté adecuadamente sellado con cinta aislante. Este aislamiento es vital para garantizar que los detectores registren únicamente muones y no otras partículas o radiación ambiental que puedan interferir en las mediciones.

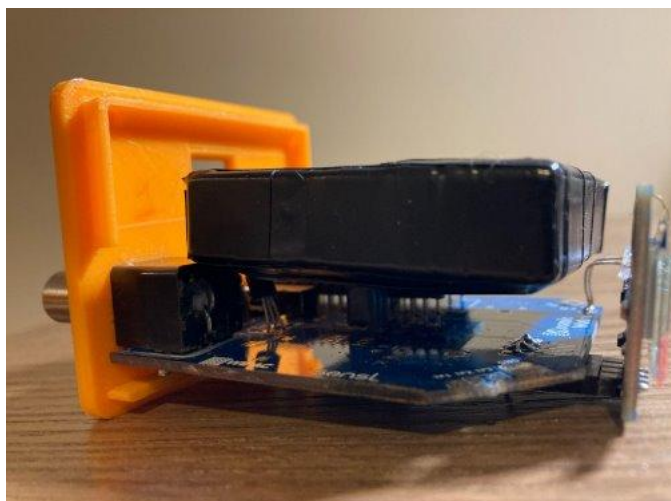


Figura 5. *Interior del detector*

Una vez revisados y asegurados los detectores, se procede a colocarlos uno sobre el otro. Esta organización permite que ambos trabajen en modo de coincidencia.

El método de coincidencia se basa en registrar eventos únicamente cuando ambos detectores detectan simultáneamente una señal dentro de un intervalo de tiempo muy corto. Esto elimina señales espurias o aleatorias que puedan detectarse de forma independiente en cada detector, asegurando que los eventos registrados correspondan a partículas que atraviesan ambos dispositivos. En esta configuración, el detector inferior opera como esclavo del superior, es decir, solo responde y envía información al maestro cuando este detecta una señal coincidente.



Figura 6. *Configuración y disposición de los detectores en modo coincidencia previos a su uso*

Para registrar los datos, el detector maestro se conecta al puerto USB de un ordenador, y se ejecuta el programa `import_data.py` en un entorno de Python 2.7. El programa solicita al usuario que indique la ruta y el nombre del archivo donde se almacenarán los datos, comenzando entonces a registrar en tiempo real los eventos detectados.

Los datos recopilados incluyen las siguientes variables:

- **Ardn_time [ms]:** Tiempo total transcurrido según el reloj del Arduino, medido en milisegundos. Su exactitud es de aproximadamente ± 1 minuto por día, con una precisión al milisegundo más cercano.
- **ADC [0-1023]:** Valor del conversor analógico-digital (ADC) asociado al evento, con una resolución de 10 bits. Los valores reportados oscilan entre 0 y 1023, referenciados entre tierra y 3.3 V. Si todos los eventos registrados llegasen a presentar un valor ADC de 1023 significa que se están filtrando fotones. De ser el caso, se debe aislar nuevamente el centellador y repetir la medición.
- **SiPM [mV]:** Pico de voltaje del SiPM (fotomultiplicador de silicio), calculado a partir del valor ADC. Representa un estimado proporcional al número de fotones detectados por el SiPM. La conversión específica está detallada en el documento de calibración. Esta medida da la energía del fotón.
- **Tiempo muerto [ms]:** Tiempo total durante el cual el detector no estuvo operativo. Este debe ser descontado del tiempo transcurrido para obtener mediciones precisas de la tasa de eventos.
- **Temp [°C]:** Temperatura del detector, medida en grados Celsius mediante el sensor interno TMP36.

Este procedimiento permite una recopilación estructurada y confiable de los datos relevantes para el análisis de las partículas detectadas.

Una vez finalizada la recolección de datos mediante el programa `import_data.py`, se selecciona la cantidad de eventos que hayan sido registrados en un tiempo de 30 minutos. Se procede a trasladar la sección de la tabla que contenga los 30 minutos exactos de medición generada por el programa `import_data.py` al software Excel para su procesamiento y análisis detallado.

A continuación, se calcula el promedio de la energía asociada a los eventos detectados en cada fecha a partir de los datos de la columna SiPM

Posteriormente, se grafican los valores obtenidos para visualizar la distribución de la energía de los eventos registrados. En esta gráfica de frecuencias, el eje **x** corresponde a los rangos de energía del SiPM clasificados en intervalos de 10 mV, mientras que el eje **y** representa la cantidad de eventos detectados dentro de cada rango. Esta gráfica permite identificar cómo se distribuyen los datos en función de la energía registrada, facilitando el análisis de patrones o picos significativos en la detección de muones. Es de esta grafica de la cual se va a intentar comparar los distintos años y el paso del ciclo solar, y como ha afectado la energía de las partículas detectadas, en busca de una conclusión hacia la posible relación entre la detección de muones y el ciclo solar.

Además, se añade el número de cantidad total de muones registrados en dicha sesión a un grafica en la que el eje **x** corresponde a la fecha de la sesión y el eje **y** corresponde a la cantidad de eventos registrados en la sesión. De esta grafica es fundamental analizar la tendencia para compararla con el progreso del ciclo solar 25.

3. Resultados y Análisis de los Datos

3.1 RESULTADOS

Luego de realizar las mediciones a lo largo de los años 2022, 2023, 2024 se obtuvo una serie de resultados que se presentan a continuación. En primer lugar, se hicieron 51 observaciones que generaron igual número de tablas. Cada tabla se compone de 8 columnas las cuales incluyen: Fecha, Hora del computador, Evento, Tiempo de Arduino (ms), Valor ADC (0-1023), SiMP (mV), Deadtime (ms), Temp (c). Para la realización de la investigación se utilizaron solo dos categorías, la columna del número de eventos y la de energía de cada evento (SiMP [mV]). Por un lado, se consideró el total de eventos que se recopilaban en el rango de tiempo de 30 minutos. Por otro lado, se obtiene el promedio de energía en milivoltios (mV). No obstante, columnas como la del Valor ADC (0-1023) se debe tener muy presente ya que al presentar un valor igual a 1023 en esta columna significa que el detector está saturado y se están filtrando otro tipo de partículas como fotones que se interpretan como muones, invalidando la observación. A continuación, presenta una parte de una las tablas de medición y obtención de datos a modo de ejemplo. (Figura 7)

FECHA	HORA COMPUTADOR	EVENTO	TIEMPO DE ARDUINO [ms]	VALOR ADC [0-1023]	SiMP [mV]	DEADTIME [ms]	TEMP [c]
29/05/2024	09:40:02.540000	262	577768	143	25,74	420221	16.17
29/05/2024	09:40:04.852000	263	580081	391	82,35	422103	16.06
29/05/2024	09:40:06.206000	264	581434	159	27,66	422352	16.49
29/05/2024	09:40:07.445000	265	582673	92	21,32	423571	16.60
29/05/2024	09:40:10.712000	266	585939	199	33,86	426607	16.17
29/05/2024	09:40:12.234000	267	587460	271	46,93	428103	15.96
29/05/2024	09:40:14.862000	268	590087	169	29,05	430467	15.96
29/05/2024	09:40:16.844000	269	592069	415	95	432200	15.96
29/05/2024	09:40:18.141000	270	593365	220	37,58	433207	15.74
29/05/2024	09:40:20.755000	271	595979	60	17,43	434225	16.28
29/05/2024	09:40:23.830000	272	599052	355	68,3	437083	15.42
29/05/2024	09:40:30.928000	273	606149	359	69,86	439458	16.28
29/05/2024	09:40:32.690000	274	607910	239	41,02	441098	16.28
29/05/2024	09:40:36.131000	275	611349	409	91,12	442899	16.49
29/05/2024	09:40:38.941000	276	614158	368	72,93	445576	15.96
29/05/2024	09:40:39.408000	277	614626	99	21,91	445978	16.39
29/05/2024	09:40:42.946000	278	618162	352	66,89	448567	16.06
29/05/2024	09:40:43.381000	279	618597	248	42,69	448876	16.17
29/05/2024	09:40:44.629000	280	619845	396	85,28	449466	16.28
29/05/2024	09:40:47.200000	281	622415	304	53,73	452129	16.28
29/05/2024	09:40:50.701000	282	625916	62	17,75	455215	16.49
29/05/2024	09:40:51.669000	283	626884	304	53,73	455666	15.74
29/05/2024	09:40:56.129000	284	631341	600	203,87	458600	15.53
29/05/2024	09:40:59.192000	285	634403	579	187,32	461713	15.74
29/05/2024	09:41:01.168000	286	636380	88	20,96	463296	16.60
29/05/2024	09:41:03.865000	287	639075	41	13,92	465984	15.74
29/05/2024	09:41:05.073000	288	640282	259	44,69	466980	15.74
29/05/2024	09:41:07.412000	289	642621	291	50,97	469120	15.74

Figura 7 la tabla es un ejemplo de una de las tablas obtenidas de una sesión de observación, adaptada en el software Excel. Se muestran las 8 columnas, de las cuales se utilizan la columna bajo SiMP [mV] y evento..

Así mismo, teniendo en cuenta la serie de tablas que se obtuvieron a lo largo de los últimos tres años, se elaboraron dos gráficas, una del total de eventos por sesión (usando el conteo de eventos en cada tabla) y otra del promedio de energía por cada medición (la columna de SiMP). Estas dos tablas presentan una línea de tendencia que permite identificar el comportamiento que sigue cada medición en comparación con el avance del Ciclo Solar #25. A continuación se presentan la gráfica del total de eventos por medición y la gráfica del promedio de energía por medición, respectivamente. Es importante decir que no se hizo correcciones al número de eventos por presión atmosférica ni por temperatura ya que no se alcanzaron a conseguir a tiempo la base de datos de estas variables para Bogotá.

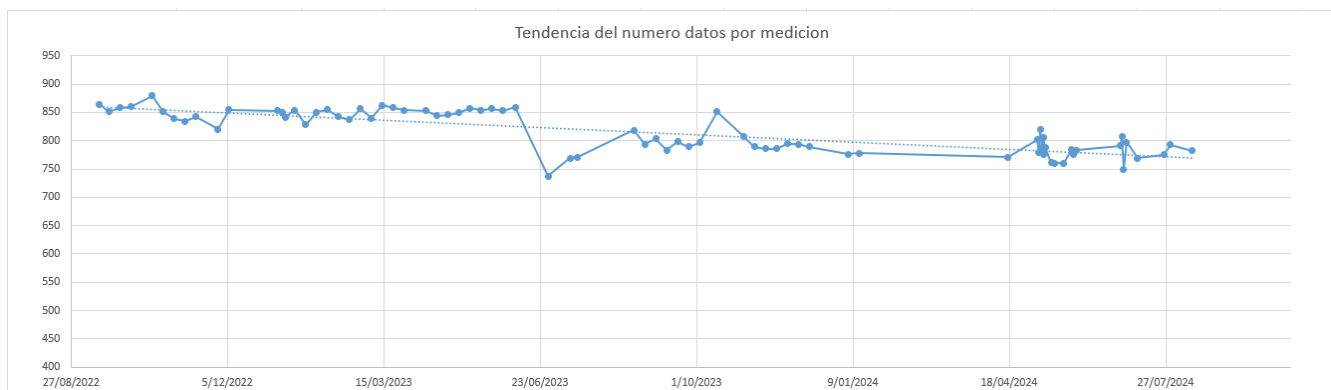


Figura 8. Tendencia de numero de eventos por sesión de recopilación de datos. La gráfica representa en orden cronológico la cantidad de eventos obtenidos por cada medición a lo largo de toda la investigación.

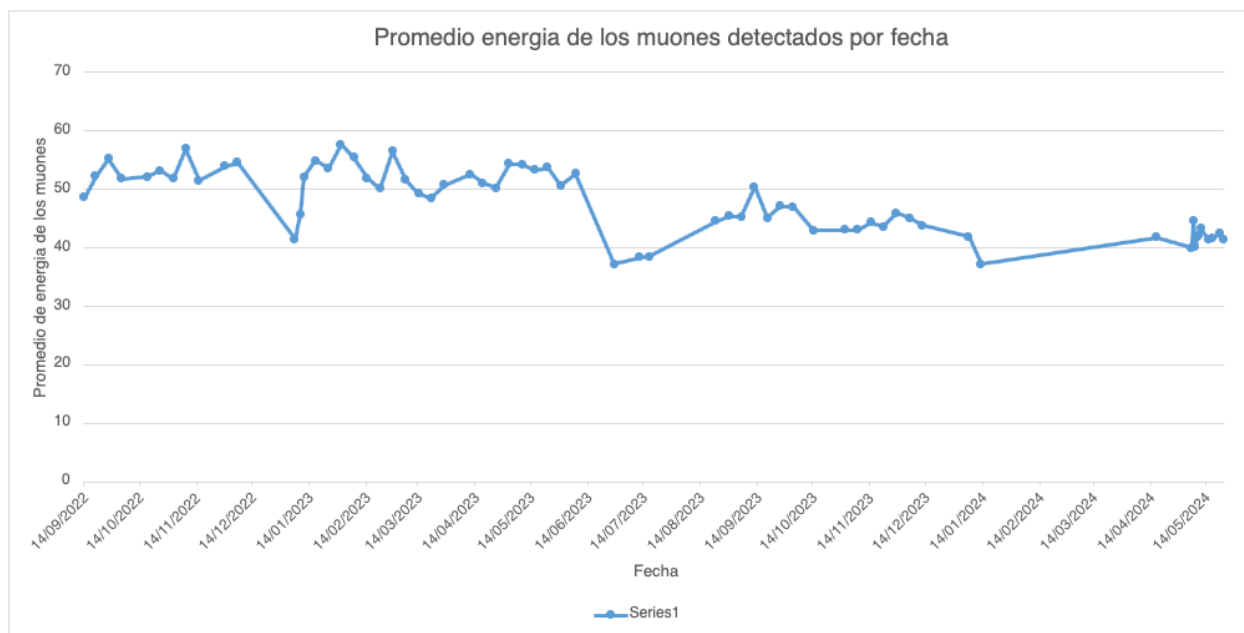


Figura 9. *Tendencia de promedio de energía de muones por sesión de recopilación de datos: la gráfica representa en orden cronológico el promedio de la energía de los eventos obtenidos por cada medición a lo largo de toda la investigación.*

Finalmente, con el seguimiento por parte de la Universidad de los Andes, específicamente el Laboratorio de Altas Energías, se recomendó que era importante realizar un análisis de la distribución de energía en el que se muestre la frecuencia de muones en ciertos rangos de energía y así poder determinar cambios en la distribución de la energía de estas partículas en comparación con el avance del Ciclo Solar #25. Por esta razón, se realizó gráfica de la distribución de energía por cada medición de datos y luego se recopilaron en graficas que demuestran una tendencia de manera trimestral para identificar posibles cambios con el avance del ciclo solar. A continuación, se presentará un ejemplo de cada tabla respectivamente:

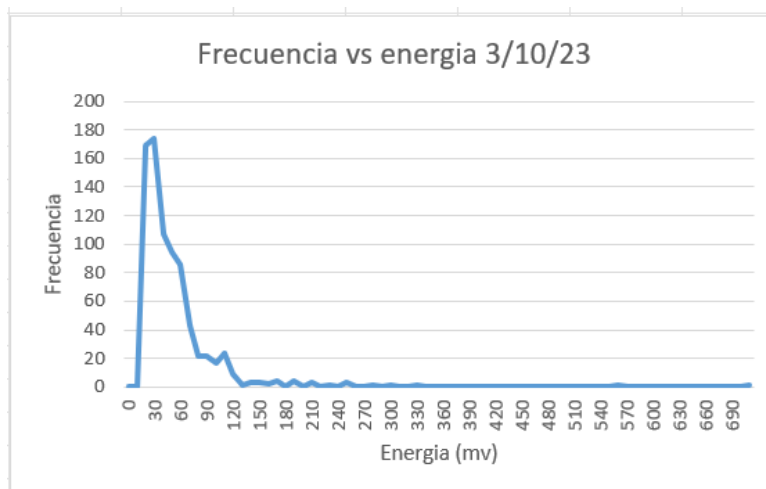


Figura 10. *Ejemplo de las frecuencias de las energías de los muones hecha el 3 de octubre de 2023. En la figura se muestra las frecuencias de la energía de los muones registrados en una sesión de 30 minutos del 3 de octubre de 2023. Los intervalos son de 10 mV.*

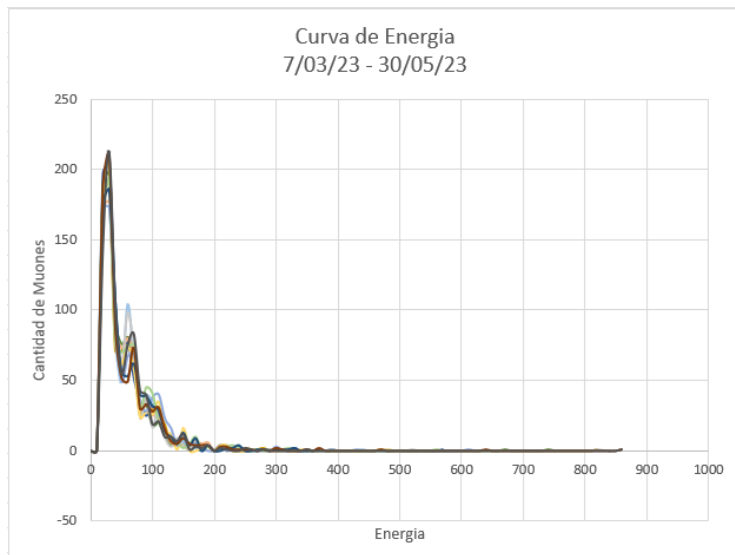


Figura 11. *Curvas de frecuencias de energía de los muones, mediciones hechas entre 7/03/23 y 30/05/23*

3.2 ANALISIS DE DATOS

Gráficas con promedio de datos y energía

En la figura 8, se puede evidenciar una pendiente negativa de -0.13019712 . Por consecuencia, esta tendencia negativa tiene una relación con el incremento de la actividad solar debido a que durante el periodo estudiado corresponde a la primera mitad del Ciclo Solar 25, donde hay un incremento de la actividad solar y, por lo tanto, mayor presencia de eyecciones de masa coronal (EMC) emitidas por el sol. Durante los períodos de alta actividad solar, el aumento del viento solar y las EMC crean una barrera que reduce el ingreso de rayos cósmicos galácticos a la atmósfera. Como consecuencia, la producción de muones disminuye. Este fenómeno se intensifica a medida que el ciclo avanza hacia su máximo, previsto para 2024-2025, cuando la heliosfera es más activa y bloquea un mayor número de partículas cósmicas.

Por otro lado, en la figura 9, vemos de la tendencia en la energía promedio de los muones, también se evidencia una tendencia negativa en la recopilación de los datos con un valor de tendencia de -0.022286 . Aunque la disminución no sea tan significativa como en la gráfica de cantidad de muones por medición, el hecho de que haya una disminución ya evidencia un comportamiento en la partícula del muon y su detección a medida que el ciclo solar avanza. La relación entre el Ciclo Solar 25 y la disminución en la energía de los muones se debe a la interacción entre la actividad solar y la radiación cósmica que llega a la Tierra. Esta pendiente es muy baja debido a que con el incremento de la actividad solar disminuyen la cantidad de muones de alta energía, sin embargo, estas son las que tienen menor frecuencia y afectan en menor cantidad el promedio de las energías de los muones detectados.

3.2.1 Detecciones anómalas

Es importante tener en cuenta, que el 28 de junio del 2023 se presentó un dato en ambas graficas (energía y datos) que se encuentra por fuera de la tendencia observada en las Figuras 8 y 9. Esta toma de datos evidencia tanto una cantidad de datos inesperadamente baja, con un promedio de energía bajo fuera de la tendencia observada en estas figuras. Tras buscar en la base de datos spaceweatherlive.com, se identificaron muchos destellos ocurridos en los días anteriores al 28 de junio que influyeron en la disminución de eventos medidos en esa fecha. En el segundo trimestre del año 2023, se identificó un rápido incremento en la cantidad de manchas solares y un aumento en la frecuencia de llamaradas solares clase M y X. En junio de 2023 (específicamente una semana antes de la toma de datos en análisis), una llamarada X6.3 provocó una tormenta geomagnética severa (G4), afectando las redes eléctricas en algunas regiones y produciendo auroras visibles en latitudes más bajas. Con los días previos al 28 de junio del 2023, el flujo de muones siguió disminuyendo, a medida que la gran actividad solar bloqueaba la entrada los rayos cósmicos a la tierra. La interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre también generó fluctuaciones en la ionosfera, afectando la precisión de sistemas GPS y la propagación de señales de radio.

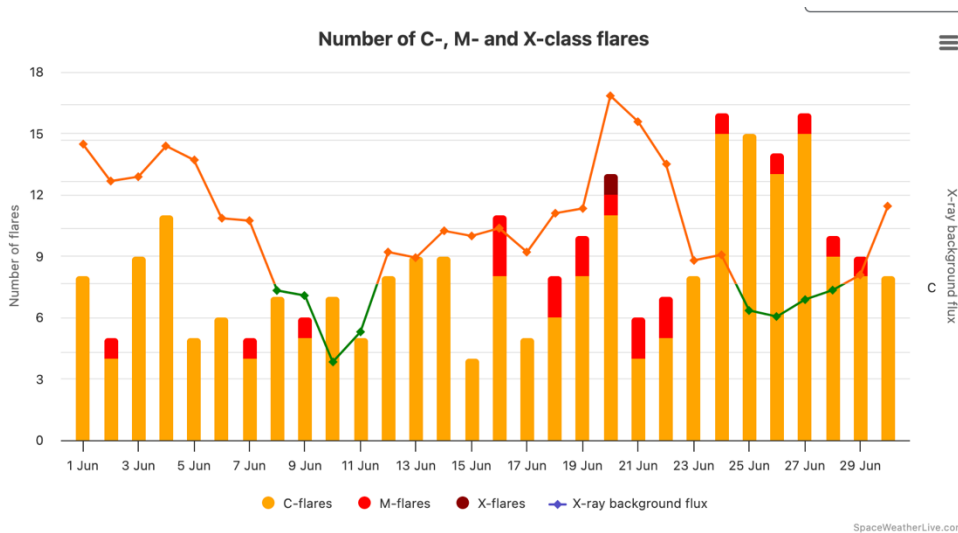


FIGURA 12. Cantidad de destellos tipo C (naranja), tipo M (rojo) y tipo X (cereza) generados por el Sol durante junio de 2023. La cantidad de muones detectados en el Gimnasio Campestre disminuyó por la gran actividad solar observada días antes del 28 de junio de 2023.(Spaceweatherlive, 2023).

En la figura 12 se evidencia que en los días previos al 28 de junio de 2023 se presenció actividad solar muy intensa y poco común, teniendo como consecuencia los resultados inesperados en la sesión de recolección de datos.

3.2.2 Toma de datos dentro de la Mina de sal de Zipaquirá, 18 de diciembre de 2023

El 18 de diciembre de 2023 se realizó una sesión de recopilación de datos en el punto más bajo de las minas de sal del municipio de Zipaquirá, Cundinamarca, a 180 metros bajo tierra. Siguiendo los procedimientos establecidos, se obtuvieron los siguientes datos en 30 minutos de sesión: un total de 497 eventos con un promedio de energía de 24,55 mV.

A continuación, se compara los datos obtenidos en las minas de sal con el promedio general de la investigación y con el promedio del año 2023:

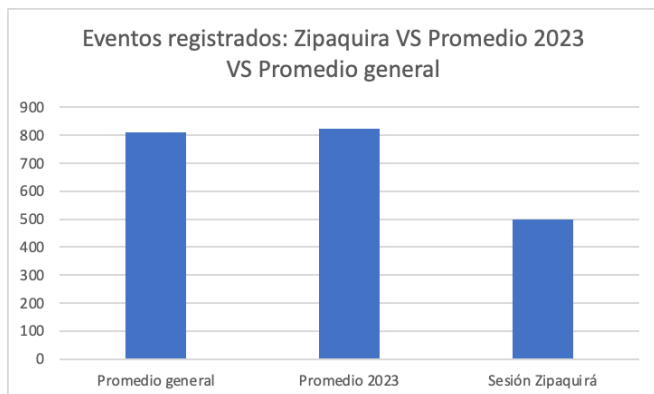


Figura 13. *Eventos registrados: Mina de sal de Zipaquirá VS Promedio 2023 VS Promedio General*

La grafica evidencia una clara diferencia entre el número de eventos registrados en las minas de sal de Zipaquirá en comparación con el promedio general (2022 a 2024, es decir toda la investigación) y el promedio del año 2023.

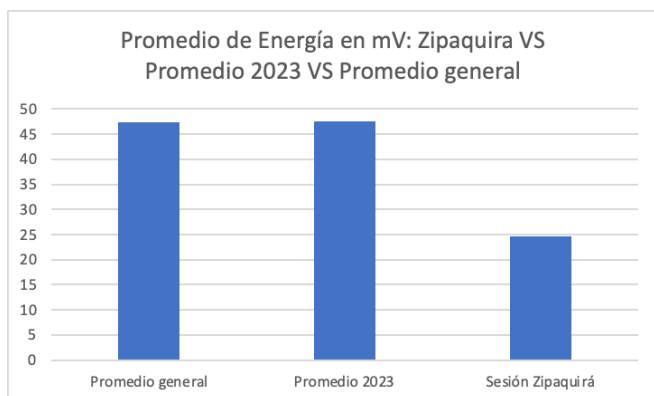


Figura 14. *Promedio de energía de los eventos registrados: Zipaquirá VS Promedio 2023 VS Promedio General (2022 a 2024). La grafica evidencia una clara diferencia entre el promedio de energía de los eventos registrados en las minas de sal de Zipaquirá en comparación con el promedio general (años 2022 a 2024) y el promedio del año 2023.*

Teniendo en cuenta la significativa disminución en el registro de ambas variables en la sesión de recopilación de datos en las minas de sal de Zipaquirá, se puede interpretar con confianza que la presencia de materia tiene un efecto esencial sobre el comportamiento de los muones. Por un lado, se puede ver que la cantidad de eventos registrados en 30 minutos corresponde a alrededor del 61% del promedio general. Esta diferencia significativa se evidencia en la figura 13. Esto se debe a que la presencia de materia imposibilita el paso de muones de menor energía, reduciendo la cantidad total de muones. Por otro lado, en la figura 14 también se evidencia una disminución muy significativa en el promedio de la energía registrada, donde el promedio de la sesión de Zipaquirá corresponde a el 53% del promedio de energía del año 2023. La causa de esto es

que los muones al atravesar una gran cantidad de materia pierden energía, de manera que la energía de los muones de alta energía se ve reducida, bajando el promedio de la sesión.

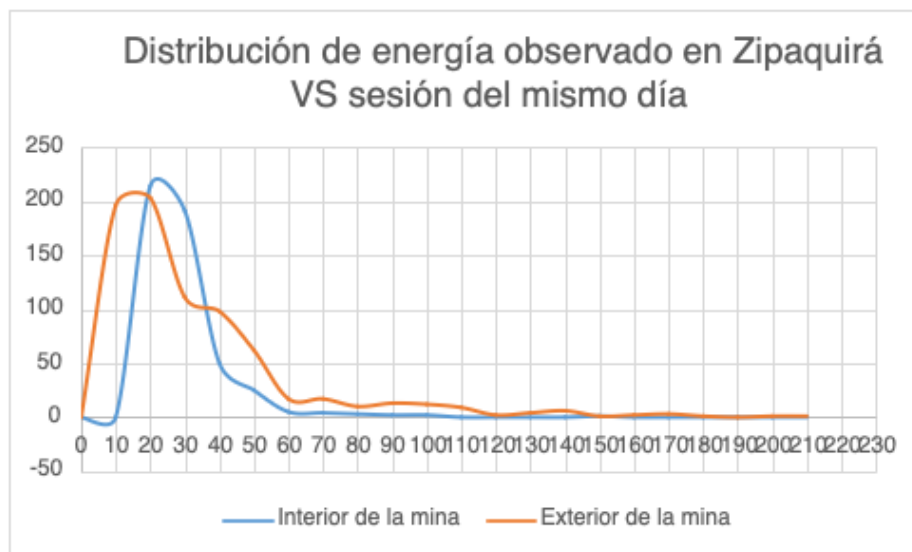


Figura 15. Distribución de energía observado en Zipaquirá vs la distribución de energía del mismo día en condiciones normales. En la figura se muestra las frecuencias de la energía de los muones registrados en una sesión de 30 minutos el 18 de diciembre de 2023 en las minas de sal de Zipaquirá (azul) en comparación con otra sesión de la misma duración al exterior de la mina en condiciones normales (naranja). Los intervalos son de 10 mV.

De la figura 15 se pueden extraer varias conclusiones. Por un lado, en el rango de energía de 100 a 110 mV en adelante no hay ningún muon registrado a excepción del rango de 140 a 150 mV donde hay solo uno registrado. En comparación con la sesión en condiciones normales, se encuentran eventos registrados en todos los rangos desde 10 a 180 mV. Esto quiere decir que los muones de alta energía pierden energía al atravesar grandes cantidades de materia hasta encontrarse en rangos de energía mucho menores. En segundo lugar, a comparación con la sesión bajo condiciones normales, al interior de la mina no se registró ni un evento dentro del rango de energía de 0 a 10 mV. Esto quiere decir que los muones de baja energía no alcanzan a atravesar la materia y consecuentemente no llegan a ser detectados por el detector. Finalmente, se observa desplazamiento de la gráfica de la sesión en condiciones normales hacia la derecha y un incremento significativo en los eventos registrados de baja energía. Específicamente, encontrándose 214 en el rango de 10 a 20 mV en comparación a 203. Teniendo en cuenta que la cantidad de eventos registrados es mucho menor al promedio, el hecho de que haya más muones en este rango de energía en comparación a la sesión en condiciones normales refleja cómo la energía de los muones se vio disminuida hasta concentrarse en ese intervalo.

3.2.3 Análisis de la distribución de energía: años 2022-2023-2024

Finalmente, luego de concluir la toma de datos, con la colaboración del laboratorio de altas energías en la Universidad de los Andes se determinó la importancia de elaborar una serie de curvas de energía trimestralmente que representaran la frecuencia de los muones de cada año para observar cambios. Por cuestión de espacio no se muestran

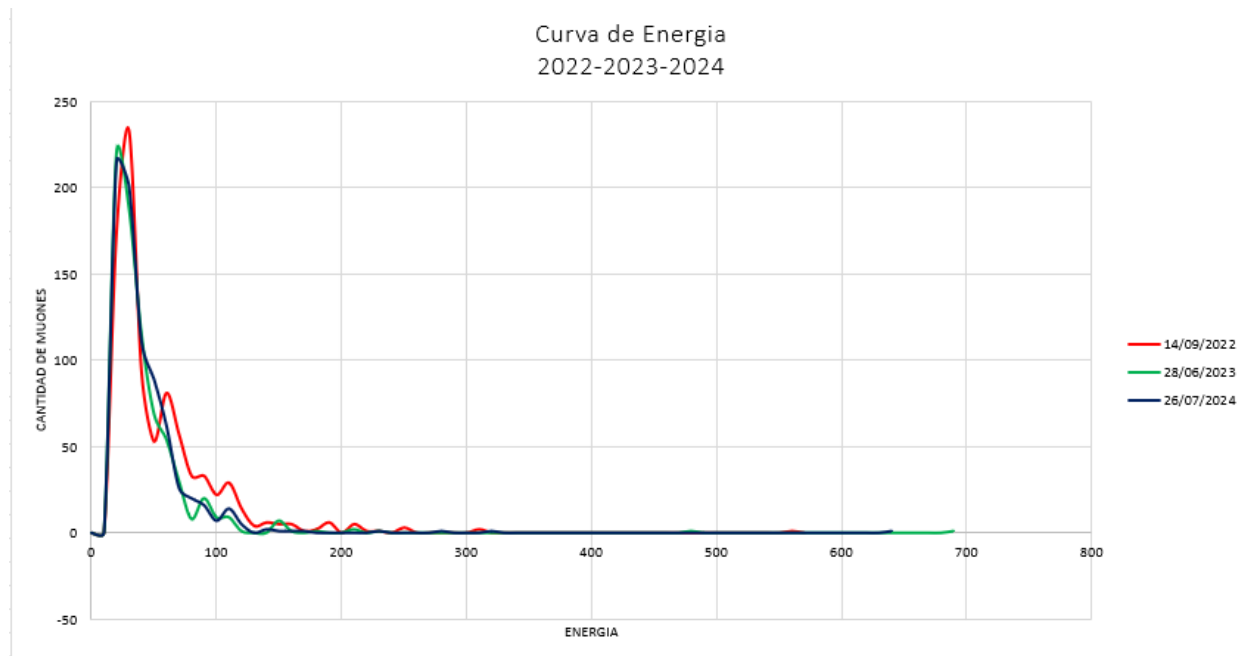


Figura 16. Distribución de energía de tres tomas de datos observadas a lo largo del Ciclo Solar #25 durante los años 2022, 2023 y 2024 respectivamente. En la figura se muestra las frecuencias de la energía de los muones registrados en una serie de 3 sesiones de 30 minutos a lo largo de los años 2022, 2023 y 2024. En gráfico cada medición corresponde a un año, el 2022 representa la primera medida de este año con línea roja, el 2023 a la mitad de este año con línea verde y el 2024 corresponde a la última medida de este año con línea azul. Los intervalos son de 100 mV.

A lo largo de las mediciones se ha presenciado que los muones de baja energía siempre presentan una alta frecuencia en el rango de energía entre 0 a 100 (mV). Además, se evidencio un patrón en el que alrededor de 200-250 muones era la máxima cantidad que se encontraban en este rango de frecuencias.

En la figura 16 se elabora una comparación entre los años 2022, 2023 y 2024 donde a lo largo del tiempo se puede ver que la cantidad de picos de muones de alta energía ha disminuido de manera significativa. En la primera medición del 2022 se presentaron una serie de 7 picos, en la medición del 2023 se presentaron una serie de 4 picos y en 2024 se presentaron una serie de dos picos. Los picos hacen referencia a que hay presencia de muones de mediana energía.

Se evidencia una mayor concentración de muones de baja energía a medida que avanza el ciclo solar. Esto se debe a que, aunque se disminuya la cantidad de eventos registrados, la disminución en la energía de los rayos cósmicos debido a la masa coronal eyectada por el sol reduce la cantidad de muones de alta energía, reduciendo su energía y siendo ahora registrados con menores energías. Por lo tanto, a lo largo de las mediciones de muones en el gimnasio campestre, a medida que el ciclo solar avanza, se ha evidenciado como los muones de alta energía han disminuido, siendo su frecuencia cada vez es menor. Esto se ve directamente ligado con el avanza del ciclo solar y los efectos que tiene a medida que avanza y afecta la interacción de los rayos cósmicos con la tierra y su atmosfera.

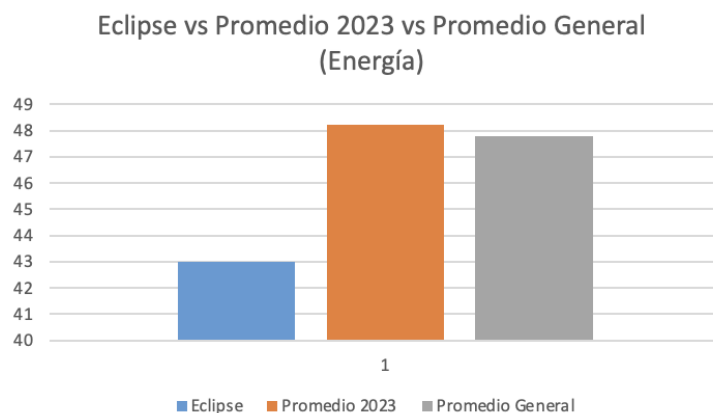
3.2.2 Sesión de recopilación de datos, Eclipse Solar, 14 de octubre de 2023

El 14 de octubre de 2023 se realizó una toma de datos antes y durante el eclipse solar ocurrido aquel día. Siguiendo los procedimientos explicados previamente, se consiguieron los siguientes datos en 30 minutos durante el eclipse: un total de 851 eventos con un promedio de energía de 42,98 mV. Y se consiguieron los siguientes datos antes del eclipse: un total de 797 eventos con un promedio de energía de 47,34 mV.

A continuación, se compara los datos medidos antes y durante el eclipse con el promedio general de la investigación y con el promedio del año 2023:

Figura 17

Eventos registrados: Eclipse VS Promedio 2023 VS Promedio General



Nota: La grafica muestra una pequeña variación en el promedio de la energía en el eclipse, pero no es suficiente como para poder probar una correlación.

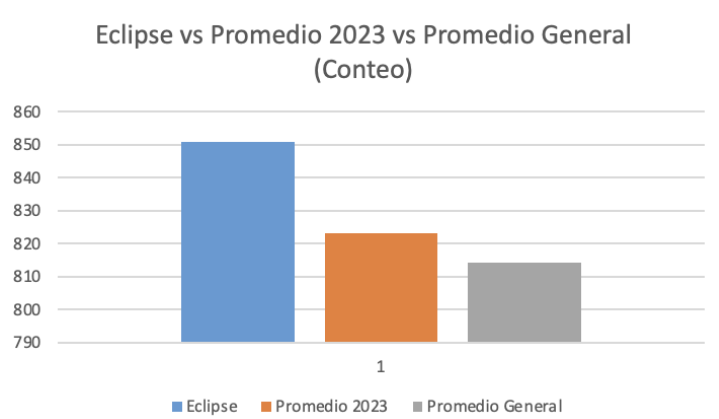


Figura 18. Eventos registrados: Eclipse vs Promedio 2023 vs Promedio General. La grafica evidencia una pequeña diferencia entre el número de eventos registrados en el eclipse, pero nada conclusivo.

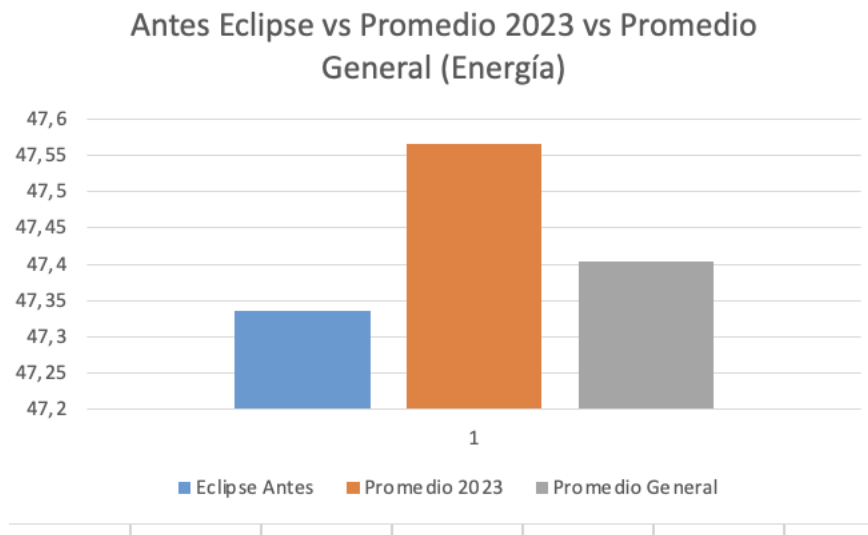


Figura 19. Eventos registrados: Eclipse VS Promedio 2023 VS Promedio General. La grafica evidencia una diferencia insignificante entre el número de eventos registrados antes del eclipse en comparación con el promedio general y el promedio del año 2023.

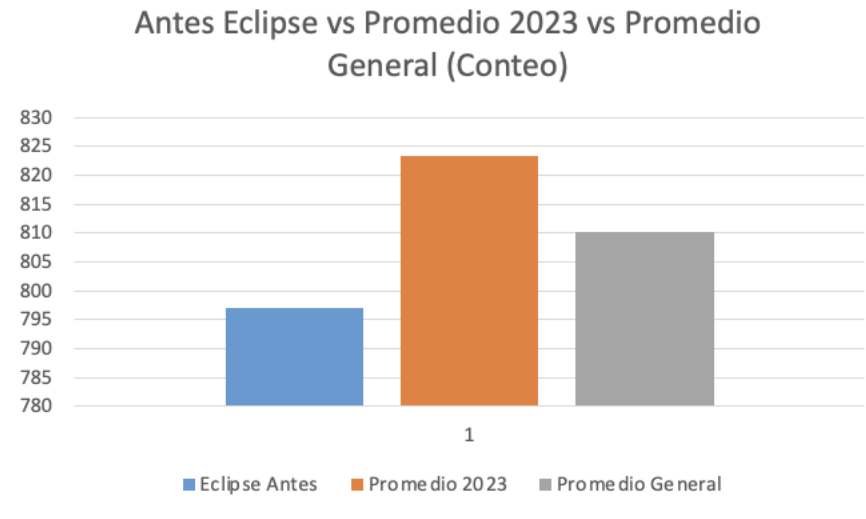


Figura 20. *Eventos registrados: Antes del Eclipse VS Promedio 2023 VS Promedio General. La grafica evidencia una pequeña diferencia entre el número de eventos registrados antes del eclipse, pero nada conclusivo.*

Analizando los datos conseguidos en el eclipse es evidente que no hay cambios significativos ni antes ni después, sobre lo que se puede decir que el eclipse no tiene repercusión en la detección de muones en el Gimnasio Campestre y prueba fuertemente que los rayos cósmicos impactan isotrópicamente la tierra haciendo que este bloqueo de la luna al sol sea insignificante en la cantidad de datos. Siguiendo esta línea de pensamiento, haciendo la comparación entre los eventos antes y durante el eclipse se puede ver que incluso cuando la luna y el sol están alineados se evidencia un mayor conteo de muones sugiriendo que al tomar sus respectivas posiciones cubren menos área alrededor de la tierra permitiendo mayor número de muones de llegar a la tierra, diferente a los eventos anteriores donde estaban desalineados y cubrían mayores porciones de área haciendo que el conteo fuera menor. Sin embargo, la comparación presentada no nos brinda ninguna información relevante en cuanto al ciclo solar o como este pueda afectar la detección de muones haciendo el descubrimiento pasar a un segundo plano en el marco de la investigación.

4. Conclusiones

A partir del análisis detallado de los datos recopilados durante los años 2022 a 2024, se pueden extraer las siguientes conclusiones que validan la hipótesis de que el avance del Ciclo Solar 25 guarda una correlación negativa tanto con el flujo de muones como con su energía:

Se identificaron anomalías, como la toma de datos del 28/06/2023, en la que tanto el flujo como la energía mostraron valores significativamente bajos; estos eventos se relacionan con episodios intensos de actividad solar (por ejemplo, una llamarada X6.3) que reafirman el efecto amortiguador del viento solar.

Asimismo, la sesión de datos realizada en las minas de sal de Zipaquirá (a 180 m bajo tierra) evidenció una disminución muy significativa, obteniendo 39% menos eventos registrados, y una reducción del 57% en el

promedio de energía, ambos en comparación al promedio del 2023, lo que resalta el efecto del viento y las eyecciones de masa solares (incremento de la actividad solar) en la detección de muones.

En conjunto, estos hallazgos respaldan la hipótesis de que el avance del Ciclo Solar 25 genera un efecto modulador negativo sobre el flujo y la energía de los muones detectados en la superficie, debido al incremento del viento solar y las eyecciones de masa coronal que actúan como un filtro para los rayos cósmicos que decaen en muones.

Relación del eclipse solar con el flujo de muones en la tierra:

Haciendo la comparación entre la toma de datos hecha durante el eclipse solar y una toma de datos natural otro día de ese mismo año, se puede concluir que el eclipse no tiene efectos significativos en el flujo de muones detectado en la tierra. Esto prueba que los muones provenientes de rayos cósmicos impactan isotrópicamente la tierra.

Adicionalmente, haciendo una comparación entre las horas previas al eclipse y durante el eclipse se puede sugerir mas no probar certeramente, que, al estar alineados el sol y la luna, cubren menos área alrededor de la tierra y permiten que entren más rayos cósmicos resultando en el decaimiento y detección de un mayor número de muones.

Tendencia negativa en el flujo de muones:

La gráfica que muestra el número total de eventos detectados en intervalos de 30 minutos presenta una pendiente negativa (-0.13019712).

Esto indica que, a medida que la actividad solar incrementa (con mayor emisión de eyecciones de masa coronal y viento solar), la presencia de materia reduce la energía de los rayos cósmicos que impactan la tierra,

En consecuencia, la cantidad de muones detectados disminuye progresivamente ya que los muones de muy baja energía no alcanzan a llegar a la superficie terrestre, reduciendo así la cantidad registrada. Es importante recordar que es necesario hacer la corrección por temperatura y presión atmosférica.

Reducción en la energía promedio de los muones:

La gráfica del promedio de energía (medido en mV) de los muones también muestra una tendencia descendente (pendiente de -0.022286).

Las eyecciones de masa coronal provocan que los rayos cósmicos deban atravesar esa materia antes de llegar a la tierra, lo que provoca una disminución en la energía de estos, por ende, en la energía con la que se generan los muones. Se generan menos muones de alta energía, al haberse ellos convertido en muones de menores rangos de energía.

Este comportamiento se observa de forma menos pronunciada que en la cantidad de muones, pero es consistente con la modulación de la radiación cósmica por la actividad solar.

LISTA DE REFERENCIAS

Aguilera. (2005, June 27). *IV ESCUELA MEXICANA DE FÍSICA NUCLEAR*. Retrieved December 6, 2024, from

- <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c29a0a9c965d6fd919db7ee95dccbe754799f3d9#page=339>
- Axani, S. N. (2019). *The physics behind the CosmicWatch desktop Muon detectors*. arXiv.org.
<https://arxiv.org/abs/1908.00146>
- Cirigliano, V., Ecker, G., & Neufeld, H. (2002). Radiative τ decay and the magnetic moment of the muon. *Journal of High Energy Physics*, 2002(08), 006–008. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2002/08/002>
- Cobián, J. (2018, July). EL MODELO ESTANDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS. *Sociedad Nuclear Española*. https://www.sne.es/wp-content/uploads/2020/03/NT_0118_Fisica_de_particulas.pdf
- Davies, B. (2023). Cosmic rays. *Royal Holloway University of London*, 2–4.
<https://www.antarcticglaciers.org/wp-content/plugins/antarcticglaciers-pdf/download.php?p=7145>
- Devitt, T. (n.d.). *What are cosmic rays? Why do they matter?* Retrieved March 19, 2025, from <https://news.wisc.edu/what-are-cosmic-rays-why-do-the-matter/>
- Escancio Fernández, L. (2022). *Detección de alfas para medidas de radiopureza con detectores de micromegas*. Retrieved November 18, 2024, from <https://core.ac.uk/download/pdf/563914107.pdf>
- S. N. Gaelan, (2014). “*The Physics Behind the CosmicWatch Desktop Muon Detectors*”, *Massachusetts Institute of Technology*
- Gonzáles Méndez, L. J., & Ortiz Fragoso, E. (2020). Los rayos cósmicos: una extraordinaria aventura espacial. *Ciencia*, 71(3), 1–6.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/71_3/PDF/11_71_3_1219_RayosCosmicos-L.pdf
- Gorringe, & Hertzog. (2015, July 17). *Precision Muon Physics*. Retrieved October 5, 2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0146641015000435>

Graisser, T. K. (1990). *Cosmic Rays and Particle Physics*. Retrieved August 24, 2024, from

https://www.google.com.co/books/edition/Cosmic_Rays_and_Particle_Physics/qJ7Z6oIMqeUC?hl=en&gbpv=1&dq=cosmic+rays&printsec=frontcover

Kolanoski, H., & Wermes, N. (2020). Particle detectors: fundamentals and applications. *Oxford University Press*.

https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780191899232_A40056332/preview-9780191899232_A40056332.pdf

Mendonça, R. R. S., Wang, C., Braga, C. R., Echer, E., Lago, A. D., Costa, J. E. R., Munakata, K., Li, H., Liu, Z., Raulin, J., Kuwabara, T., Kozai, M., Kato, C., Rockenbach, M., Schuch, N. J., Jassar, H. K. A., Sharma, M. M., Tokumaru, M., Duldig, M. L., . . . Sabbah, I. (2019). Analysis of cosmic rays' atmospheric effects and their relationships to cutoff rigidity and zenith angle using global MUON Detector network data. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 124(12), 9791–9813.

<https://doi.org/10.1029/2019ja026651>

Rossi, B. & Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology. (1969). Cosmic Rays.

McGraw-Hill, Inc., 27–35. <https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/muons/rossi-cosmic-rays-1964.pdf>

Saavedra, T., & Espinoza, I. (2023). *Predicción del ciclo solar 25 mediante modelos ARIMA y redes neuronales LSTM*. <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/3314>

Spaceweatherlive. (2023). Las 50 principales erupciones solares.

<https://www.spaceweatherlive.com/es/archivo.html>