

**ESTIMACIÓN DE COTAS DE ENERGÍA PARA RAYOS
CÓSMICOS AFECTADOS DURANTE UN DECRECIMIENTO
FORBUSH A PARTIR DE DATOS DEL OBSERVATORIO
LAGO**

Karoll Michely Parada Jaime

**Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Departamento De Física
Pamplona
2021**

**ESTIMACIÓN DE COTAS DE ENERGÍA PARA RAYOS
CÓSMICOS AFECTADOS DURANTE UN DECRECIMIENTO
FORBUSH A PARTIR DE DATOS DEL OBSERVATORIO
LAGO**

Karoll Michely Parada Jaime

Trabajo de grado para optar al título de:
Físico

Director:
Dr. Mauricio Suárez Durán

**Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Departamento De Física
Pamplona
2021**

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por las bendiciones recibidas.

A mi madre Maritza Jaime por ser mi fuerza y mi apoyo incondicional, por estar siempre ahí.

Al Docente Mauricio Suárez Durán por su paciencia y dedicación para con este trabajo.

A mi familia por sus buenos deseos y por hacer que cada día sea mejor.

A mis amigas y compañeros por su acompañamiento en todo este tiempo, en especial a Sandra Mendoza.

Y a todas esas personas que fueron un pilar importante para poder alcanzar esta meta tan anhelada.

MUCHAS GRACIAS!.

Índice general

Índice de figuras	VI
Resumen	VIII
Abstract	IX
1 Introducción	1
2 Decrecimiento Forbush(Fd) y rayos cósmicos	3
2.1 Eyecciones de masa coronal interplanetaria	4
2.2 Rayos cósmicos	6
2.2.1 Espectro de energía	6
2.3 Detección de Decrecimientos Forbush	9
3 Lluvias atmosféricas extendidas y El Observatorio LAGO	11
3.1 Programa de clima espacial del observatorio LAGO	11
3.2 Detectores Cherenkov de agua	13
3.3 Lluvias atmosféricas extendidas	13
3.3.1 Lluvias iniciadas por un fotón o electrón	16
3.3.2 Lluvias iniciadas por un hadrón	17
3.4 Campo geomagnético	18
4 Modelado del flujo de secundarios a nivel del suelo para marzo 2012	21
4.1 Rigidez de Corte y rayos cósmicos primarios	21
4.2 Modelado computacional de EAS	23
4.3 Modelado de un detector Cherenkov de agua	30
4.4 Decrecimiento Forbush de marzo del 2012	32
5 Análisis de datos del observatorio LAGO para el Fd de marzo 2012	34
5.1 Datos del observatorio Lago	34
5.2 Corrección por presión atmosférica	36

5.3	Definición de los rangos del Fd	43
5.4	Modelado del Fd	46
5.5	Modelado de flujos de primarios para la recuperación de los Fd	50
5.6	Modelado del flujo de secundarios para la recuperación de los Fd	51
5.7	Respuesta del WCD durante el Fd	53
6	Discusión de resultados	54
7	Conclusiones	56
	Bibliografía	58

*

Índice de Figuras

2-1	Esquema de la CME registrada en 1860 por G. Temple, durante el eclipse total de Sol del 18 de Julio de este año	5
2-2	Eyección de masa coronal registrada el dos de junio de 1998 a las 13:31 UT por el instrumento LASCO C2 a bordo de la sonda SOHO.	5
2-3	Espectro de energía de Rayos Cósmicos	8
2-4	Estructura de un evento Forbush visto a través de detectores de neutrones	10
3-1	Esquema del programa de clima espacial de la Colaboración LAGO (LAGO-SW)	12
3-2	Esquema de un detector Cherenkov de agua.	14
3-3	Esquema de un detector Cherenkov de agua.	15
3-4	Desarrollo longitudinal y lateral de lluvias iniciadas por un fotón, un protón y un núcleo de hierro de $5 \cdot 10^{14} eV$	18
3-5	Comparación entre el modelo de Tysganenko 2001 y el IGRF. Los ejes representan la distancia desde el centro de la Tierra en unidades de radios terrestres.)	20
4-1	Ilustración de una partícula primaria que interactúa en nuestra atmósfera.	22
4-2	Espectro de energía de secundarios a nivel de San Carlos de Bariloche	26
4-3	Espectro de energía de secundarios a nivel de Roma	26
4-4	Diferencia porcentual entre flujo de secundarios con y sin corrección por campo geomagnético.	28
4-5	Distribución total integrada del número de secundarios por lluvia.	28
4-6	Distribución total integrada del número de secundarios por lluvia.	29
4-7	Histograma de fotoelectrones para San Carlos de Bariloche	31
4-8	Histograma de fotoelectrones para Roma	31
4-9	Forbush Decrease marzo 2012.	33
4-10	Rigidez de corte para marzo 2012.	33
5-1	Histogramas de carga obtenido, a través de la herramienta ARTI, para para el 01 de marzo de 2012 entre las 23:00 y las 00:00 hora local.	35
5-2	Pulso característico registrado por el WCD Nahuelito.	36

5-3	Evolución temporal para el mes de marzo de 2012 del flujo de partículas cargadas y la presión atmosférica	38
5-4	Flujo relativo de eventos tipo muones como función del cambio de la presión atmosférica, respecto del promedio de la presión registrada en la ventana de tiempo.	38
5-5	Eventos tipo muon en función de la presión atmosférica.	39
5-6	Flujo de eventos tipo muon durante el mes de marzo. En azul sin corrección por presión y en rojo corregidos por presión.	39
5-7	Flujo de partículas cargadas de marzo del 2012 para el detector de neutrones en Roma.	40
5-8	Datos de presión del detector de Neutrones en Roma.	41
5-9	Ajuste lineal para la presión y el flujo de partículas (Roma)	41
5-10	Datos corregidos del mes de marzo para el detector de neutrones de Roma.	42
5-11	Datos del detector de neutrones de Roma y los datos corregidos del mes de marzo.	42
5-12	Datos del detector de neutrones de Roma y los datos corregidos para el detector Nahuelito del mes de marzo.	43
5-13	Decrecimiento Forbush para marzo 2012.	44
5-14	Promedio por día de la recuperación para el Fd	45
5-15	Ajuste de la función exponencial para el Decrecimiento Forbush	45
5-16	Residuos del ajuste de la ecuación al conteo de eventos Φ	46
5-17	Respuesta relativa, $\Theta_{\text{Rel}}^{R_m}$, del WCD Nahuelito	49
5-18	Residuos para los ajustes de los polinomios de orden 2.	49
5-19	Numero de primarios que se producen para cada especie atómica para una rigidez de 8 GV.	50
5-20	Variación de primarios que se producen para cada especie atómica.	51
5-21	Numero de secundarios que se producen para una rigidez de 8GV para cada especie atómica.	52
5-22	Variación de secundarios, que se producen para cada especie atómica.	52
5-23	Para el WCD Nahuelito: conteo relativo de eventos tipo muon registrados, y respuesta relativa estimada del detector durante el Fd de marzo de 2012.	53

Resumen

Los fenómenos meteorológicos espaciales tienen importantes impactos en la ciencia y la estructura tecnológica actual. Este trabajo se centra en la interacción entre los eventos solares transitorios y los rayos cósmicos, específicamente en los eventos de decrecimiento de Forbush (Fd). Un Fd consiste en una decrecimiento / afectación en los recuentos de radiación a nivel del suelo durante una eyección de masa coronal interplanetaria que atraviesa el campo geomagnético. A continuación mostramos un método para estimar los rayos cósmicos afectados durante el Fd de marzo de 2012 en términos de la rigidez de corte geomagnética. Para ello, hemos utilizado los datos registrados en San Carlos de Bariloche, Argentina, por uno de los detectores del observatorio LAGO (un observatorio extendido de radiación cósmica sobre América Latina, desde México hasta la Antártida). Este detector Cherenkov de agua Cherenkov funciona como recuento de muones; nos permitió seguir la tasa de muones en el suelo y debido a que estos muones provienen de interacciones hadrónicas, construimos una función de rigidez de corte para estimar qué rayos cósmicos primarios, de acuerdo con su rigidez magnética, fueron desviados, fuera de su pista a la atmósfera. Para verificar este enfoque, validamos esta función a través del toolkit ARTI de LAGO, un marco de técnicas y códigos computacionales (CORSIKA, GEANT4, C ++, Python), es decir, calculamos los secundarios producidos por esta tasa de rayos cósmicos y seguidamente analizamos la señal producida por esos secundarios en el modelo de detector Geant4.

PALABRAS CLAVES: RAYOS CÓSMICOS, CLIMA ESPACIAL, DECRECIMIENTOS FORBUSH, RIGIDEZ DE CORTE MAGNÉTICO.

Abstract

The space weather phenomena have important impacts on science and the current technological structure. This work focuses on the interaction between transient solar events and cosmic rays, specifically the Forbush decrease events (Fd). The Fd consists of a decrease / affect in ground level radiation counts during an interplanetary coronal mass ejection that traverses the geomagnetic field. In this work we a method to estimate the cosmic rays affected during the March 2012 Fd in terms of geomagnetic shear stiffness. To do this, we have used the data recorded in San Carlos de Bariloche, Argentina, by one of the LAGO observatory detectors (an extended observatory of cosmic radiation over Latin America, from Mexico to Antarctica). This Cherenkov water Cherenkov detector works as a muon count, that is, it allowed us to follow the muon rate in the soil and because these muons come from hadronic interactions, we built a shear stiffness function to estimate which cosmic rays primaries, according to their magnetic stiffness, were diverted, out of their track into the atmosphere. To verify this approach, we validate this function through LAGO ARTI toolkit, a framework of techniques and computational codes (CORSIKA, GEANT4, C ++, Python), that is, we calculate the secondaries produced by this cosmic ray rate and then we analyze the signal produced by these secondaries in the Geant4 detector model.

KEYWORDS: COSMIC RAYS, SPACE WEATHER, FORBUSH DECREASES, RIGIDITY CUTOFF.

1 Introducción

Los decrecimientos Forbush (Fd), hacen parte de los fenómenos atribuidos al clima espacial y son importantes para entender cómo se comporta el campo geomagnético ante la llegada de fenómenos solares como son las eyecciones de masa coronal. La importancia de estudiar estos fenómenos radica en los impactos sobre estructura tecnológica actual [1, 2]; por ejemplo las eyecciones de masa coronal, las cuales producen perturbaciones en el medio interplanetario y pueden llegar a interactuar con el campo geomagnético, generando perturbaciones en satélites, controles de naves espaciales, fenómenos como las auroras boreales, perturbaciones en diferentes sistemas de telecomunicaciones, transformadores eléctricos, líneas de alta tensión, gasoductos, etc.

Este trabajo se ha enfocado en el estudio de los decrecimientos Forbush (Fd, por sus siglas en inglés). Históricamente, los Fd son registrados por monitores de neutrones ubicados en la superficie terrestre, y consisten en un decrecimiento abrupto del conteo de estas partículas [3, 4], seguido de una fase de recuperación.

En este contexto, nuevos experimentos, con nuevas tecnologías, surgen como herramientas importantes para estudiar y aportar nueva información al entendimiento de la naturaleza de los Fd, entre estos se destacan los detectores Cherenkov en agua, en particular los resultados obtenidos en esta área por el observatorio LAGO en el detector Nahuelito ubicado en San Carlos de Bariloche Argentina. Con estos datos se realizó una corrección por atmósfera terrestre para obtener un flujo mejorado.

Nos orientamos entonces a plantear una función de rigidez de corte, ajustada a partir de datos registrados por el observatorio LAGO, para los Fd. Con esta función, y en primera aproximación, es posible estimar qué rayos cósmicos han sido afectados, se verificó a partir de los modelos computacionales del observatorio LAGO (ARTI). Con base en el análisis de los datos, es posible, estimar si la producción de partículas cargadas a nivel del suelo producen una señal en el detector que se corresponde con el decrecimiento Forbush detectado.

Este trabajo está organizado en 7 capítulos de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se realiza un estudio amplio de los decrecimientos Forbush y rayos cósmicos. Inferimos en el espectro de energía, la eyección de masa coronal interplanetaria y la detección de los decrecimientos Forbush. En el capítulo 3 se proporciona una breve descripción del programa de clima espacial del observatorio LAGO, los detectores Cherenkov de agua, el campo geomagnético y las lluvias atmosféricas extendidas, en su lugar la lluvias iniciadas por un hadrón y las lluvias iniciados por un fotón o electrón. El Capítulo 4 está orientado a presentar rigidez de corte y rayos cósmicos primarios, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones del modelado de las lluvias atmosféricas extensas y con estos resultados obtenidos se hace el modelado de un detector Cherenkov de agua, se muestran los resultados obtenidos de las partículas secundarias para San Carlos de Bariloche y Roma, por ultimo se realiza la explicación de los decrecimientos Forbush para el mes de marzo del año 2012. En el Capítulo 5 se da una explicación de la corrección por presión atmosférica de los datos del observatorio LAGO, el análisis correspondiente para el ajuste de la rigidez de corte para modelar el F_d y así obtener como resultado final la estimación de los rayos cósmicos afectados durante el decrecimiento Forbush. En el Capítulo 6 se discuten los resultados obtenidos y finalmente, en el Capítulo 7 se muestra las conclusiones de este trabajo.

2 Decrecimiento Forbush(Fd) y rayos cósmicos

Los decrecimientos Forbush (Fd) se conocen como la caída en la tasa de conteo de rayos cósmicos (RC) en períodos de algunas horas, seguidas por una recuperación exponencial del mismo en períodos de una o dos semanas. Generalmente se los observa en asociación con la llegada al entorno terrestre de frentes de choque generados por grandes estructuras transitorias originadas en el Sol [5] y que se propagan por el medio interplanetario con velocidades de entre 500 y 25000 km s⁻¹. Estas estructuras, tienen propiedades específicas que las diferencian del viento solar estacionario, como por ejemplo, un campo magnético medio más alto y una propagación en la dirección radial muy diferente a la del viento solar[6].

Los Fd fueron observados por primera vez en 1937 por S. Forbush usando cámaras de ionización[7], Forbush confirmó que la caída en el recuento fue un evento global y es por ello que se los conoce como eventos Forbush. Forbush encontró una correlación entre el flujo de RC y perturbaciones en el campo Geomagnético, Perturbaciones que son causadas por la interacción de este campo con el paso de una eyecciones de masa coronal interplanetaria (ICME, por sus siglas en inglés). Estos estudios le permitieron a Forbush concluir que: “los cambios globales en la intensidad de rayos cósmicos resultan de la alteración de las trayectorias de las partículas en el campo externo, superpuesto con el de la Tierra durante perturbaciones magnéticas”.

En algunos casos se han observado Fd producidos por ICME pero sin la correspondiente onda de choque interplanetaria usualmente asociada [8]. Aún no se ha podido describir en forma consistente este tipo de situaciones. A pesar de que a la fecha se conocen relativamente bien algunas propiedades básicas de los Fd, hay otras que aún no han sido entendidas en profundidad, como por ejemplo, los tiempos de recuperación luego de la ocurrencia del Fd[9].

2.1. Eyecciones de masa coronal interplanetaria

Las eyecciones de masa coronal (CME, por sus siglas en inglés) son erupciones solares a gran escala durante las cuales se libera masa y energía del sol al medio interplanetario [10], transportando materia con masa entre 10^{11} kg y 10^{13} kg, con campos magnéticos más intensos que los presentes en el viento solar, y velocidades que pueden llegar a los 1000 km/s[11]; Es observado por un coronógrafo, donde se muestra una luz blanca característica que se mueve radicalmente hacia afuera [12]. La CME provoca un viento solar que, debido a fuertes campos magnéticos, impide que algunos rayos cósmicos lleguen a la tierra. Se ven particularmente afectados los rayos cósmicos de menor energía. Típicamente el viento solar tarda uno o dos días en acercarse a la Tierra.

Las CME han sido registradas desde 1860, año en que a través de un eclipse de Sol se observó el desprendimiento de material desde la superficie solar. Estas observaciones fueron registradas por medio de representaciones gráficas, como la mostrada en la Figura 2-1, realizada por G. Tempel en el mismo año. Recientemente, diferentes satélites como el SOHO monitorizan y realizan diferentes mediciones de las estructuras de la CME. En particular el instrumento LASCO 6 de la sonda SOHO, ha medido tamaños para las CME que superan varios radios solares, una vez han sido eyectadas al medio interplanetario. La Figura 2-2 presenta un ejemplo de estas mediciones.

Las CME se forman en el interior del Sol y emergen hasta la superficie como estructuras meta-estables, que pueden llegar a durar días o incluso semanas antes de estallar y eyectar materia en estado plasma al medio interplanetario. Cuando una CME se ha alejado del Sol a una distancia mayor a 50 radios solares se le denomina ICME (por sus siglas en inglés Interplanetary Coronal Mass Ejection). En las ICME se observa un eje central rodeado por un campo magnético tipo helicoidal que atrapa los electrones allí presentes, generando una corriente que viaja a lo largo de estas líneas de campo; estos electrones se conocen como electrones direccionales. Las ICME se caracterizan por viajar más rápido que el viento solar, lo que implica una onda de choque que acumula material interplanetario y crea una estructura conocida como funda turbulenta. Esta funda turbulenta consiste en un incremento de la densidad debido al material que se acreta por el desplazamiento de la ICME [11].

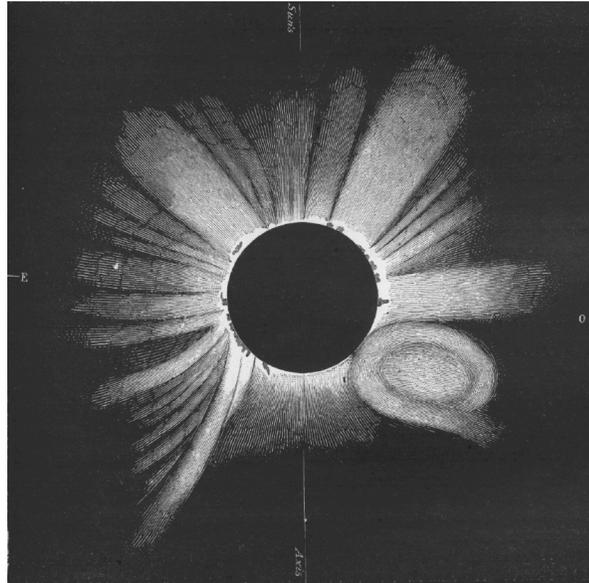


Figura 2-1: CME registrada en 1860 por G. Temple, durante el eclipse total de Sol del 18 de Julio de este año. Tomada de <http://sunearthday.nasa.gov>.

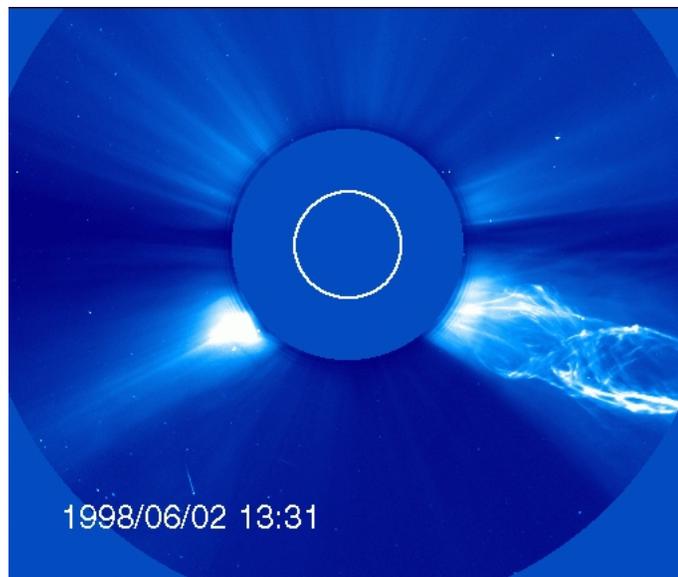


Figura 2-2: Eyección de masa coronal registrada el dos de junio de 1998 a las 13:31 UT por el instrumento LASCO C2 a bordo de la sonda SOHO. La circunferencia, línea continua blanca, corresponde a un radio solar. Figura tomada de la galería de imágenes de la misión SOHO (<http://soho.esac.esa.int/gallery>).

2.2. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos (RC) son partículas cargadas de alta energía ($\sim 10^{17}eV$) que llegan constantemente a la atmósfera de la Tierra desde el espacio exterior[13]. El origen de estos RC que llegan a la Tierra provienen de la Vía Láctea.

La primera detección de RC fue realizada por Victor Francis Hess en 1912, quien realizó una serie de ascensos en globo, llevando consigo tres electroscopios. Hess descubrió que la radiación aumenta rápidamente con la altitud[14]. A partir de estos resultados descartó la hipótesis de la radiación en las rocas, y concluyó que la ionización del aire se debía a una radiación de origen cósmico.

Víctor Hess determinó a partir de sus observaciones que: el origen de las tasas de ionización medidas solo puede explicarse con la existencia de una radiación que proviene desde fuera la Tierra; y que esta radiación se caracteriza por tener alta capacidad de penetración en la materia [11]. Desde las observaciones de Hess, se han realizado aportes importantes a la Física, ampliando la información existente a través de las observaciones de los RC.

El estudio de los RC ha sido de gran importancia y utilidad en la física, puesto que se han estudiado las partículas desde las primeras décadas del siglo XX. Antes de 1950 la radiación cósmica era la única fuente disponible de partículas de alta energía, i.e. $E > 1 \text{ GeV}$. Un ejemplo de esto es el descubrimiento de los piones y muones a finales de la década de 1940. Más tarde en las décadas de 1980 y 1990 el estudio de las interacciones de neutrinos solares y atmosféricos, en escalas de distancia muy grandes, revelaron que el Modelo Estándar es un modelo incompleto con la evidencia de la mezcla de sabores de los neutrinos y, en consecuencia, su masa finita[15, 16].

2.2.1. Espectro de energía

El espectro de energía de rayos cósmicos describe el flujo de partículas, por unidad de tiempo, por unidad de superficie y de ángulo sólido, como función de la energía[13]. Las mediciones precisas del espectro de los rayos cósmicos nos pueden ayudar a entender más acerca de la transición entre fuentes galácticas y extragalácticas y, por lo tanto, acerca de las propiedades de las fuentes de los rayos cósmicos [17]. Hoy en día conocemos que el espectro energético de los RC abarca varios ordenes de magnitud, desde 10^9eV hasta $10^{20}eV$. Este espectro ha

sido medido por diferentes experimentos y se ajusta a una ley de potencias de la forma

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (2-1)$$

donde N representa el flujo de RC, E la energía, y el exponente α se denomina índice espectral.

El espectro de energía de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra puede verse en la Figura **2-3**. El viento solar domina la zona de bajas energías, $E < 10^9 eV$, modulando el flujo de rayos cósmicos. Aquellos primarios con energía mayor a 10^{18} eV son denominados rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECR, por sus siglas en inglés). Diferentes experimentos (realizados por satélites en órbita y globos aerostáticos) muestran que los mínimos y máximos solares producen cambios en el flujo medido de RC. En particular, el experimento CAPRICE realizó mediciones de protones y núcleos de Helio presentes en el flujo de RC en dos épocas solares: 1994, alta actividad solar (CAPRICE94) y 1998, baja actividad solar (CAPRICE98). El resultado de estas mediciones se presenta en la Figura **2-3b**, donde se observa la modificación del flujo de protones y Helios respecto de la época en que se realizó la medición[11].

El estudio de RC se realiza en tres bandas de energía ver Figura **2-3a**, que se encuentran delimitadas por los cambios en el índice espectral:

Baja: RC con energías menores a 10^{15} eV.

Alta: RC con energías entre 10^{15} y 10^{18} eV.

Ultra alta energía: RC con energías superiores a $10^{18} eV$.

Debido a la superposición de los dos tipos de RC, existe la llamada “rodilla” a aproximadamente $10^{15} eV$, el “tobillo” a aproximadamente $10^{18} eV$ y un “Corte” a $10^{19} eV$. Estas regiones del espectro se caracterizan por la diferencia en el valor del índice espectral α .

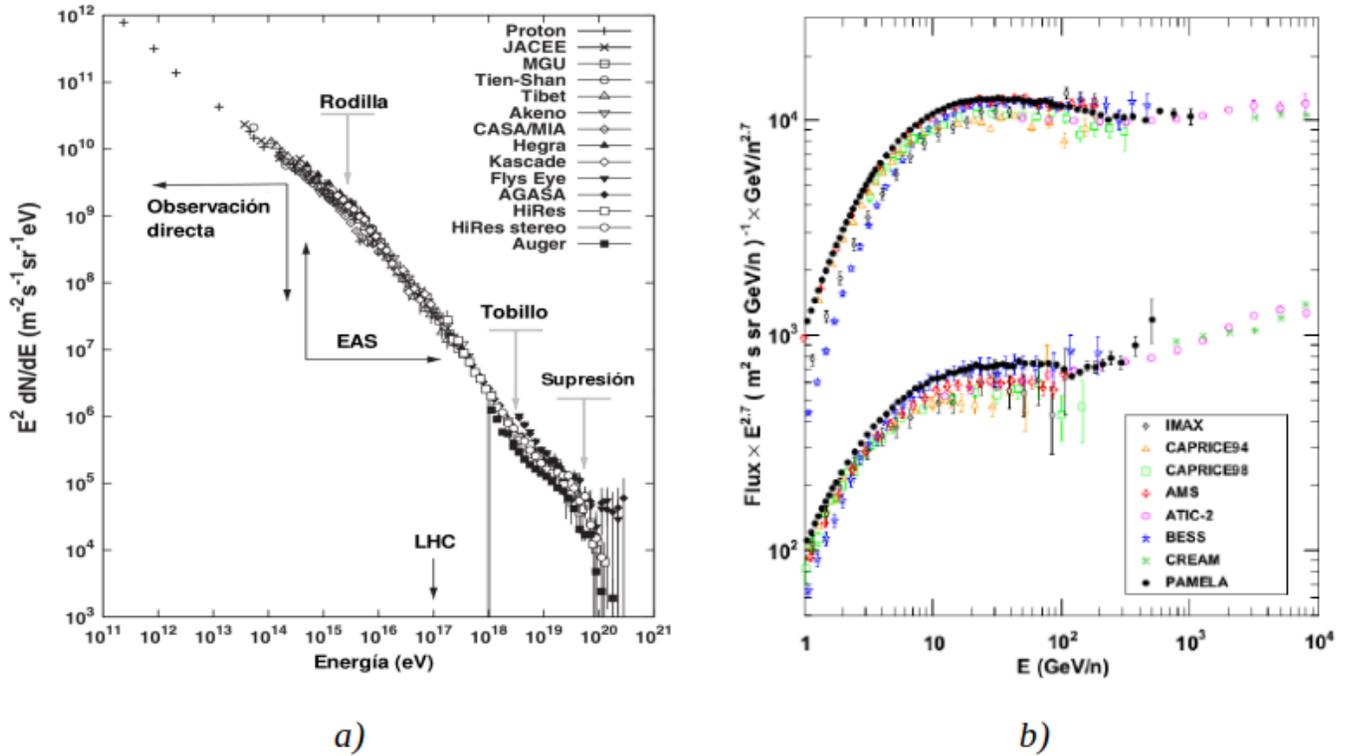


Figura 2-3: a) Para enfatizar los cambios en el valor del índice espectral, el flujo observado (eje vertical) está multiplicado por E^2 . Las tres regiones donde se observa un cambio significativo del valor de α se indican con las flechas grises. Como referencia, se incluye la energía de protones acelerados en el LHC(en inglés, Large Hadron Collider) a 7 TeV ($E_{cm} = 14 \text{ TeV}$) expresados en el sistema del laboratorio, donde uno de los protones está en reposo. En ese caso, se encuentra que $E_{lab} = (E_{cm} - 2m_p^2)/m_p \simeq 10^{17} \text{ eV}$. Figura tomada de [18].b) Mediciones del flujo protones (arriba) y núcleos de Helio (abajo) con energías entre y 10^4 GeV por núcleo. Estos resultados corresponden a mediciones realizadas con Globos aerostáticos: CAPRICE94, IMAX, CAPRICE98, BESS, ATIC-2, CREAM; y tipo espaciales: AMS-01, PAMELA. Figura tomada de [19]

2.3. Detección de Decrecimientos Forbush

Los Fd son estudiado principalmente por los monitores de neutrones y los hodoscopios de muones, que se encuentran en la superficie de la Tierra. Pero estos monitores pueden detectar sólo productos de la interacción del rayos cósmicos galácticos con la atmósfera terrestre. Los detectores de satélite permiten obtener información más precisa sobre las características de Fd [20]. Es posible observar un decrecimiento Forbush con diversos monitores de neutrones alrededor del mundo. También se puede observar la caída en la tasa de electrones y gammas con los detector Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en inglés).

Los Fd se caracterizan en función del perfil de la señal que generan en los detectores y/o monitores de neutrones y pueden llegar a alcanzar decrecimientos del orden del 20 % [21, 22]. Dentro de los perfiles de Fd mejor conocidos se tienen los denominados de dos-pasos [23]. La Figura 2-4 muestra uno de estos Fd, donde el primer paso está asociado a la llegada del frente de choque de la ICME al campo Geomagnético, mientras el segundo paso se corresponde con los RC que están atrapados al interior de la ICME. Es importante resaltar que estos Fd de dos-pasos no aparecen en la mayoría de los Fd que se han registrado, hecho que pone de manifiesto la complejidad de estos fenómenos [23]. En este trabajo nos enfocamos en estos FD de dos pasos.

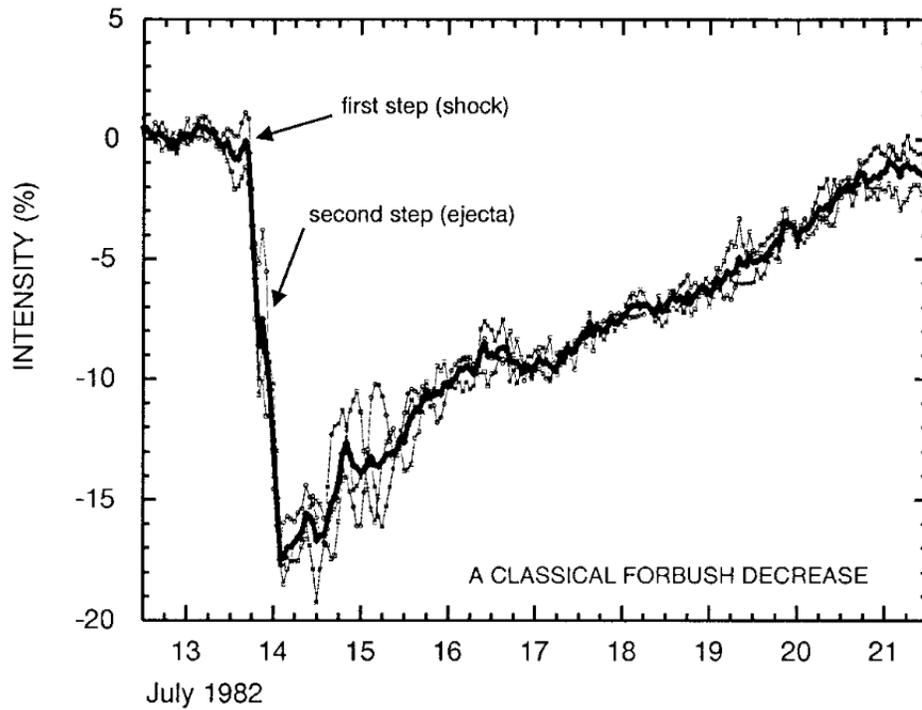


Figura 2-4: Decrecimiento porcentual del conteo de neutrones durante un evento Fd, registrado en Julio de 1982. Este decrecimiento corresponde al conteo de neutrones, para tres estaciones de monitoreo de neutrones: Deep River, Mt. Wellington, y Kerguelen. La línea negra sólida indica el promedio de la tasa de conteos. Se indican las dos estructuras que componen un evento Fd de dos-pasos típico: el primero (first step), corresponde a los RC que son atrapados detrás de la onda de choque (shock); el segundo (second step), corresponde a los RC que son capturados en el interior de la ICME (ejecta). Figura tomada de [5].

3 Lluvias atmosféricas extendidas y El Observatorio LAGO

3.1. Programa de clima espacial del observatorio LAGO

Existe un gran interés por los fenómenos del Clima Espacial, en la propagación de Rayos Cósmicos Galácticos en la Heliosfera ¹. Este interés se debe a la relación entre el transporte de RC y el nivel de radiación en el espacio interplanetario. Se trata de una tarea difícil, debido a una gran cantidad de factores complejos que pueden afectar este transporte, por ejemplo: el Campo Magnético Interplanetario, los Vientos Solares o eventos transitorios del Sol. Parte de esta investigación se lleva a cabo a través del estudio de las modulaciones de los rayos cósmicos.[22]

Los fenómenos del clima espacial pueden afectar significativamente el uso y confiabilidad de diferentes sistemas tecnológicos como: telecomunicaciones, transporte, energía y uso de tecnologías digitales, entre otros.[24].

Las mediciones en tiempo real del Clima espacial se pueden dividir de tres formas: suceden en la atmósfera solar (fulguraciones y eyecciones de masa coronal), en el medio interplanetario (radio eventos, viento solar y centelleo interplanetario) y en la vecindad terrestre (campo geomagnético, condiciones del viento solar in situ, ionósfera y partículas energéticas). Cada medición tiene un índice que mide el nivel de perturbación asociado a eventos solares eruptivos y a su vez, definen una escala para avisos de eventos de CE. Internacionalmente se han definido 3 tipos de avisos: Tormentas Geomagnéticas, Tormentas de Partículas y Radiointerferencias cuyas escalas van de menor, moderada, fuerte, severa a extrema [25, 26]

El observatorio LAGO (por sus siglas en inglés Latin American Giant Observatory) es un proyecto internacional de astrofísica y astropartículas en donde participan 9 países de Iberoamérica ubicados a diferentes altitudes desde México hasta la Antártica entre ellos se

¹Región de la Vía Láctea que se encuentra bajo la influencia del campo magnético del Sol y del viento solar.

encuentra Colombia. La universidad de Pamplona hace parte de la colaboración LAGO a partir del año 2020; este proyecto consiste en operar detectores Cherenkov en agua, de bajo costo en las altas montañas, con geometría cilíndrica, [27], para detectar destellos de rayos gamma y estudiar fenómenos de clima espacial transitorios y de larga duración a través de la modulación solar de rayos cósmicos [28]. Actualmente, el observatorio LAGO es coordinado por la Colaboración LAGO, constituido por más de 100 investigadores pertenecientes a más de 30 instituciones latinas y españolas [29].

La Colaboración LAGO ha diseñado el programa de clima espacial (LAGO-SW, por sus siglas en inglés). LAGO-SW estudia la modulación de RC por fenómenos Heliosféricos usando datos de las variaciones del flujo de partículas generadas en las lluvias atmosféricas extensas (EAS, por sus siglas en inglés) a nivel del suelo. En la actualidad, LAGO-SW apunta a correlacionar la energía que depositan las diferentes componentes de las EAS en sus detectores con fenómenos como los Fd. Esta técnica se denominada por la colaboración como análisis multiespectral [30, 31]. Para el desarrollo de esta técnica es fundamental la comprensión

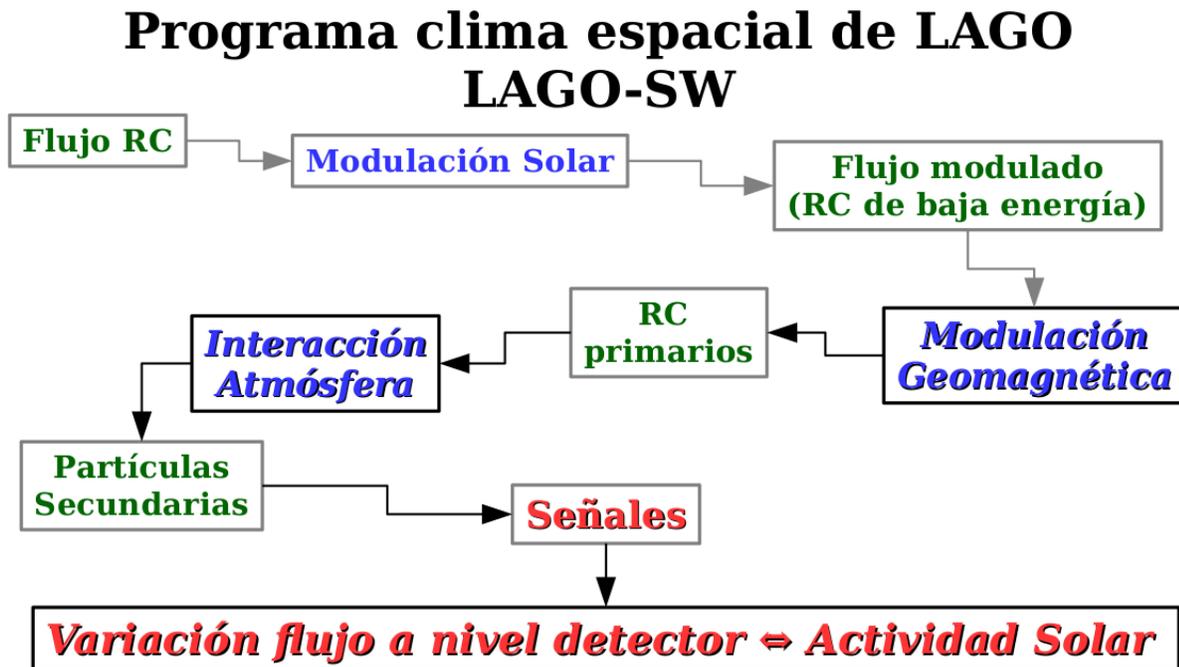


Figura 3-1: Esquema del programa de clima espacial de la Colaboración LAGO (LAGO-SW) para estudiar el clima espacial y la detección de radiación a nivel del suelo. [27].

de cómo cada componente de las EAS aporta a la señal del WCD[27], la Figura 3-1 ilustra el LAGO-SW.

3.2. Detectores Cherenkov de agua

Los detectores Cherenkov de agua (WDC por sus siglas en inglés) son dispositivos que detectan los fotones generados por efecto Cherenkov al paso de partículas cargadas generadas en las EAS. Esta radiación lleva el nombre de su descubridor Pavel Alekseyevich Cherenkov, quien desde 1934 hasta 1938 realizó una serie de experimentos [32], donde observó que, cuando una partícula se mueve a una velocidad mayor que la de la luz en el medio, los átomos detrás de la partícula son polarizados, mientras que delante la polarización aún no ha tenido lugar, debido a que la interacción electromagnética en la materia se propaga a la velocidad de la luz en ese medio. Por lo tanto, se genera un momento dipolar resultante y este cambio rápido del momento dipolar es la causa de la emisión de la radiación Cherenkov[33].

Los WCD se componen de tres elementos: un medio dieléctrico (agua), un detector foto sensible (PMT) y una electrónica de adquisición. La estructura del WCD es de geometría cilíndrica, recubierto internamente por un material difusor llamado Tyvek, que cumple la función de dispersar y reflejar los fotones Cherenkov que se generan en el dieléctrico dentro del detector. También cuenta con un recubrimiento exterior hecho en polietileno de alta densidad, evitando así la filtración de luz, ya que los únicos fotones que se espera detectar son los generados por el efecto Cherenkov dentro del detector [33], En la figura 3-2 se puede ver el esquema del detector. El WCD LAGO que se empleó en este trabajo corresponde al detector Nahuelito instalado en San Carlos de Bariloche, Argentina. Este detector tiene 158 cm de diámetro y 156 cm de alto [6], y se basa en el bajo costo de los instrumentos, su gran capacidad para registrar partículas cargadas, y por el soporte técnico y científico ofrecido por esta colaboración.

3.3. Lluvias atmosféricas extendidas

Los RC están constituidos principalmente de protones y la atmósfera terrestre por nitrógeno y oxígeno. Tarde o temprano el rayo cósmico chocará con alguno de ellos. Puede interactuar tanto con la nube de electrones (que tiene un diámetro de 10^{-10} m para un átomo) y con el núcleo, mucho más pequeño (con un diámetro de 10^{-14} m)[34].

Al llegar estos RC a la atmósfera, interactúan con un átomo de uno de los constituyentes del aire (generalmente Nitrógeno) produciendo una serie de reacciones en las que se crean

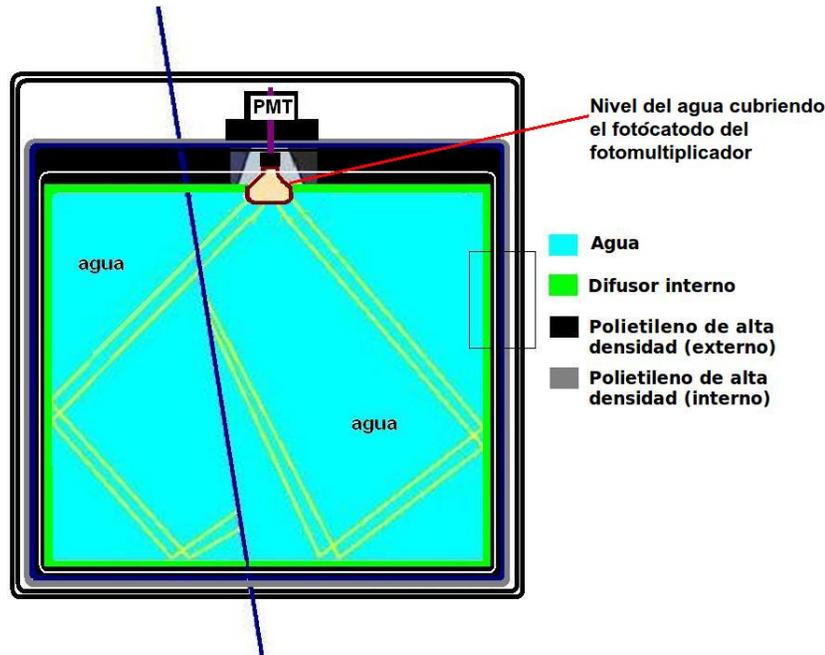


Figura 3-2: Esquema de un detector Cherenkov de agua. El trazo azul representa un secundario que arriba al tanque y los amarillos son el frente de onda de los fotones generados por radiación Cherenkov. Figura extraída de [35].

una gran cantidad de partículas secundarias que viajan hacia la superficie de la Tierra. Este proceso es conocido como lluvia atmosférica extendida (EAS, por sus siglas en inglés).[15]

Debido a las diferencias de tamaños y rangos de interacción, las colisiones más frecuentes son las relacionadas con la nube electrónica. El campo magnético del rayo cósmico arranca electrones ionizando al átomo o la molécula. Puesto que las fuerzas electromagnéticas actúan a grandes distancias, el fenómeno de ionización se da frecuentemente, pero la pérdida de energía que sufre el protón es despreciable en esa interacción particular, así es que no juega un papel importante en la alta atmósfera [6]. Las EAS, es el resultado entre la interacción de los RC que llegan al borde superior de la atmósfera terrestre con las moléculas presentes en ésta. La Figura 3-4 muestra la simulación de la evolución longitudinal y lateral de tres lluvias iniciadas por un fotón, un protón y un núcleo de hierro.

Para caracterizar la cantidad de atmósfera atravesada por una EAS, se define el término “profundidad atmosférica” $X(l)$, a la cantidad de masa de aire por unidad de área que atravesó una partícula a lo largo de la atmósfera desde el infinito hasta la posición l a lo largo de la trayectoria que describe su movimiento:

$$X(l) = \int_l^\infty \rho(l') dl' \quad (3-1)$$

donde para el caso de la atmósfera $\rho(l)$ corresponde a la densidad del aire en la posición l que a su vez depende de la altura h sobre la superficie, y de la dirección en la que viaja la partícula, ver Figura 3-3

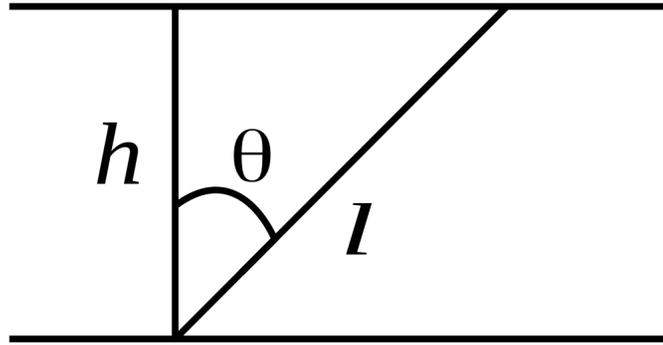


Figura 3-3: Relación entre posición l $X(l)$ y la altura sobre el nivel del mar h , para el caso de una atmósfera plana. Figura extraída de [11].

$$\rho(h) = \rho(h_0) \left(\frac{T(h_0)}{T(h)} \right) \exp \left(- \int_{h_0}^h \frac{M}{R} \frac{g(h)}{T(h)} dh \right) \quad (3-2)$$

siendo $T(h)$ la temperatura a la altura h , R la constante universal de los gases, M la masa molar del aire ($M = 0,02896 \text{ kg mol}^{-1}$), $g(h)$ la aceleración debida a la gravedad a la altura h , y h_0 el nivel de referencia.

La altura h se relaciona con l por medio del ángulo θ de la dirección de la trayectoria respecto a la vertical (despreciando la curvatura de la Tierra), Esta relación se ilustra en la figura 3-3

$$h \simeq l \cos \theta \quad (3-3)$$

En general, la curvatura de la Tierra se torna importante para ángulos cenitales $\theta < 70^\circ$. Por construcción, la profundidad atmosférica medida en la dirección vertical a una altura h snm. puede obtenerse a partir de la presión atmosférica $P(h)$ a esa misma altura:

$$\begin{aligned} X(h) &= \int_h^\infty \rho(l) dl \\ &= \frac{g(h)}{g(h)} \int_h^\infty \rho(l) dl \\ &= \frac{P(h)}{g(h)} \end{aligned} \quad (3-4)$$

En particular, la profundidad atmosférica a nivel del mar es

$$X(h = 0) = \frac{101325 Pa}{9,81 m s^{-2}} = 10332 kg m^{-2} = 1033 g cm^{-2} \quad (3-5)$$

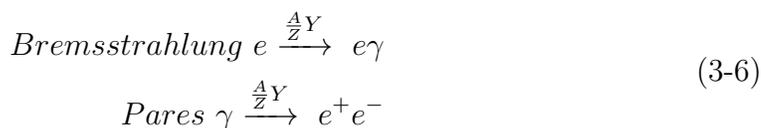
La primera interacción ocurrirá a una profundidad denominada X_0 , y que en general se encuentra en la zona superior de la tropósfera, o en la estratósfera, en algún punto situado entre los 10 y los 40 km de altura para una lluvia vertical, y dependerá de la sección eficaz de interacción entre el primario y el aire.

3.3.1. Lluvias iniciadas por un fotón o electrón

Lluvias iniciadas por un fotón o electrón están formada por electrones, positrones y fotones. Estos últimos producen un par de electrón-positron y representa cerca del 99 % del total de partículas producidas en la lluvia. Lo anterior debido a que en las interacciones hadrónicas la tercera parte de la energía involucrada va a la producción de pares $e^- e^+$, lo que implica que la componente electromagnética contenga del orden del 90 % de la energía total del primario, ver Figura **3-4** de la izquierda.

La evolución de las lluvias iniciadas por una partícula electromagnética está basada en procesos electromagnéticos: interacción Bremsstrahlung y creación de pares. En este sentido,

un núcleo presente en la atmósfera con carga Z y número atómico A ($\frac{A}{Z} Y$), presenta alguna de las siguientes reacciones:



Estos procesos se encuentran acoplados debido a que suceden solo para fotones con energía suficiente para producir pares; que a su vez generan radiación por frenado. La formación de cascadas electromagnéticas es causada principalmente por este acoplamiento.

3.3.2. Lluvias iniciadas por un hadrón

Las primeras interacciones hadrónica, en lo alto de la atmósfera, dan origen a piones cargados y neutros de alta energía que tienen una mayor probabilidad de decaer que de interactuar[36], ver Figura 3-4 de la derecha. Los piones neutros decaen en fotones y electrones a través de las siguientes interacciones:



Por otro lado, los piones cargados decaen principalmente en muones de alta energía que dan origen a la componente muónica de la lluvia:



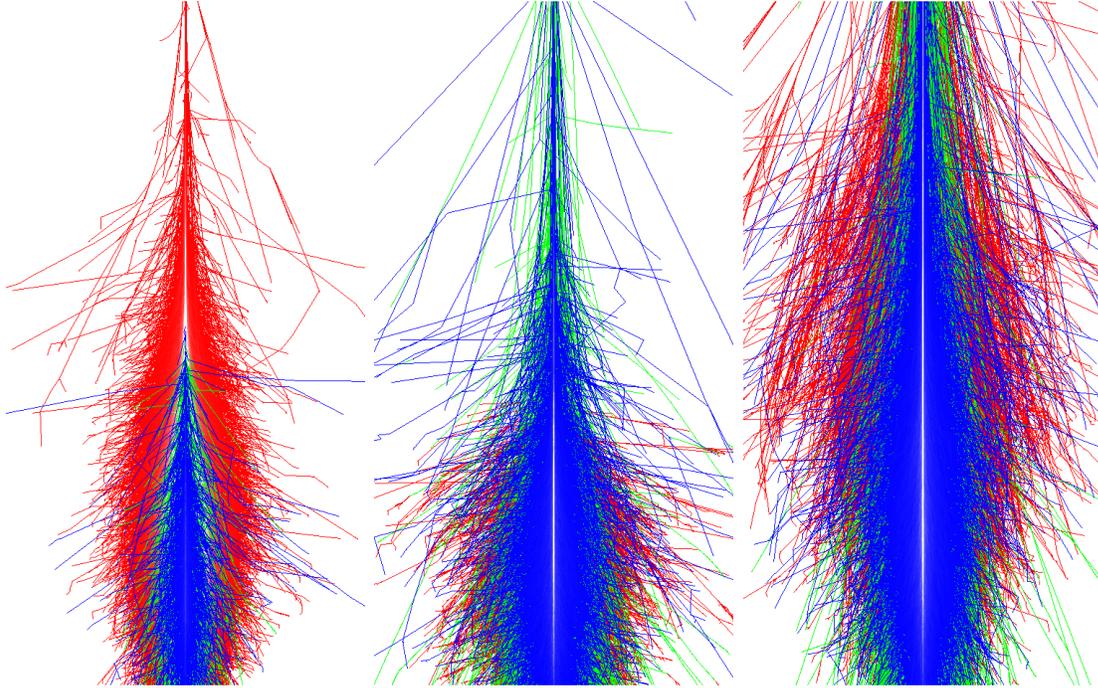


Figura 3-4: Desarrollo longitudinal y lateral de tres lluvias atmosféricas extendidas iniciadas por un fotón (izquierda), un protón (centro) y un hierro (derecha), todos verticales y con $E_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ eV}$. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Mientras que la componente EM domina la lluvia iniciada por un fotón, la componente hadrónica empieza a tomar importancia con el desarrollo de la cascada. Figura tomada de [13].

3.4. Campo geomagnético

Se denomina Campo Geomagnético (en adelante CG) al campo magnético que rodea la Tierra. De acuerdo a los registros históricos, el CG presenta variaciones temporales y espaciales en su intensidad, lo que se traduce en cambios, o fluctuaciones, en el flujo de RC que llegan a la atmósfera de la Tierra. Observaciones recientes muestran que el núcleo terrestre no es el único que aporta a la intensidad que se registra del CG; se ha encontrado que la corteza y la ionosfera terrestres aportan a este campo con un porcentaje cercano al 5% [11].

Índice Dst (Disturbance storm time): Algunas de las modificaciones del CG son causadas por perturbaciones en el plasma del viento solar. Dichos cambios se traducen en alteraciones de las corrientes presentes en la magnetosfera que pueden llegar a alterar el flujo de RC que ingresan al CG, provocando en algunos casos que los RC queden atrapados dentro del CG, lo que se traduce en la aparición de una corriente en el plano azimutal de la magnetosfera. Las corrientes así generadas se denominan corrientes de anillo y presentan una polaridad magnética que contrarresta la intensidad del CG[37]. Este tipo de perturbaciones está caracterizada por el un índice de perturbación magnética, denominado índice Dst (por sus siglas en inglés Disturbance storm time). Este índice representa la perturbación axial del dipolo del CG en el ecuador terrestre sobre la superficie de la Tierra. Cuando el viento solar presiona lo suficiente la magnetosfera se producen reconecciones en las líneas del CG, lo que genera canales de ingreso para nuevas partículas cargadas provenientes del viento solar[11].

Modelo IGRF (International Geomagnetic Reference Field): Sirve para entender y modelar el campo geomagnético. En este modelo no se consideran las corrientes externas a la Tierra, es decir, solo se tiene en cuenta las fuentes internas del campo geomagnético, en cualquier posición geográfica de la Tierra [38]. Este modelo está basado en observaciones de satélites, observatorios de campo geomagnético y otros experimentos que miden el CG a lo largo de diferentes latitudes. Este modelo es revisado y actualizado cada 5 años desde 1955 e incluye las variaciones seculares, el desplazamiento angular del eje geomagnético (respecto del eje de rotación terrestre), y el desplazamiento espacial desde el centro de la Tierra.

Modelo de Tsyganenko 2001: El campo geomagnético externo (distancias mayores a 5 radios terrestres) presenta una fuerte asimetría debido a la interacción con el viento solar. El modelo de Tsyganenko es un modelo de campo magnético semiempírico que describe la interacción del viento solar con el CG. En adelante lo denotamos como TSY01 y emplea datos medidos por diferentes satélites, lo que le permite definir una serie de parámetros que apuntan a mejorar el ajuste respecto al CG real[11].

En este sentido, el modelo TSY01 depende de cinco parámetros:

- Corriente de cola, que se caracteriza en función de los coeficientes medios de retardo G_1 y G_2 .
- Corrientes de anillo, que dependen del índice de perturbación temporal de tormenta (Dst, por sus siglas en inglés).

- Corrientes de Birkeland.
- Campo magnético de la magnetopausa.
- Campo de interconexión del campo magnético interplanetario.

La figura 3-5 presenta la forma del CG modelado a partir del modelo IGRF y el modelo TSY01.

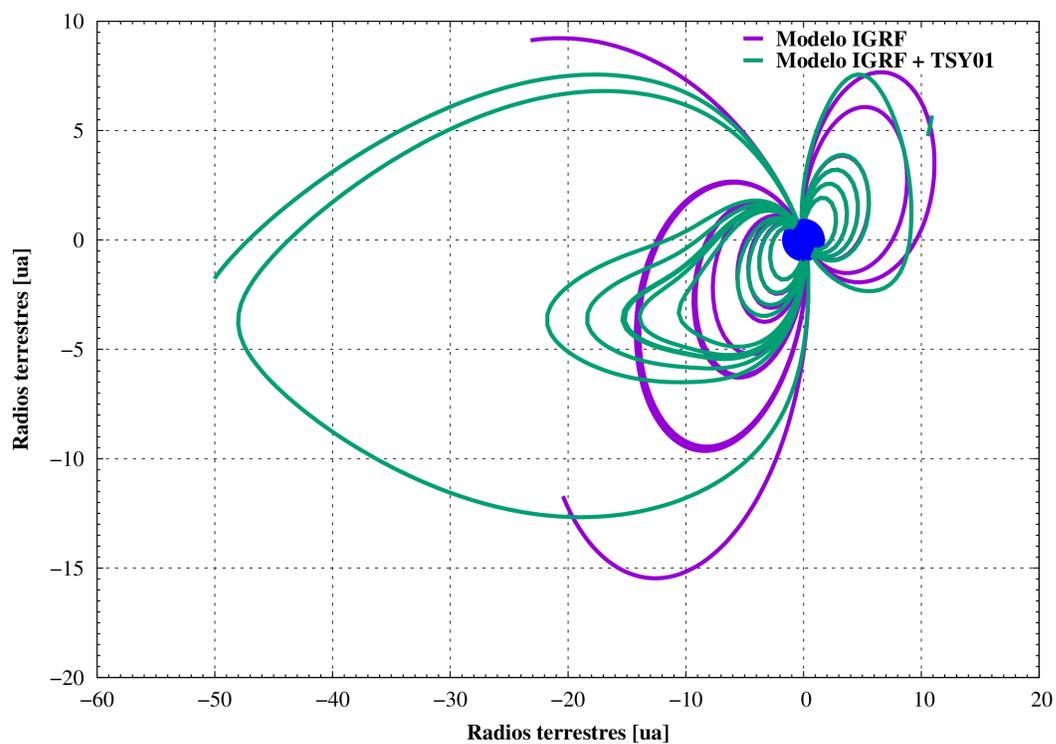


Figura 3-5: Comparación entre el modelo de Tysganenko 2001 y el IGRF. Los ejes representan la distancia desde el centro de la Tierra en unidades de radios terrestres [11].

4 Modelado del flujo de secundarios a nivel del suelo para marzo 2012

4.1. Rigidez de Corte y rayos cósmicos primarios

Después de viajar por el espacio, los RC llegan a la Tierra y penetran en la atmósfera terrestre. Esta radiación cósmica producida lejos de la superficie de la Tierra más allá de su atmósfera se suele llamar RC primarios[39], la composición de estos rayos puede ser determinada a bajas energías con mediciones directas en globos o satélites. Se encuentran como RC primarios principalmente núcleos atómicos que van desde protones hasta núcleos de hierro[15]. Los RC primarios chocarán con los núcleos presentes en la atmósfera. La Figura 4-1 es una ilustración de las consecuencias de esta interacción. La colisión de la partícula primaria (digamos, un protón) con, por ejemplo, un núcleo de nitrógeno, resultará en la producción de nuevas partículas.

Para el estudio de los RC primarios, el “límite” de la atmósfera puede tomarse como la altitud por encima de la cual el espesor de la materia retenida por la atracción terrestre es insignificante en comparación con la longitud de interacción de todas las partículas que componen la radiación cósmica. En la práctica, la interacción de los rayos cósmicos con los átomos atmosféricos puede ignorarse por completo a altitudes superiores a 50 km sobre el nivel del mar. Sin embargo, incluso en estas altitudes, la radiación no puede, en general, llamarse primaria debido a la presencia de partículas secundarias que han aparecido como resultado de la interacción de los rayos cósmicos en las capas subyacentes de la atmósfera.[40].

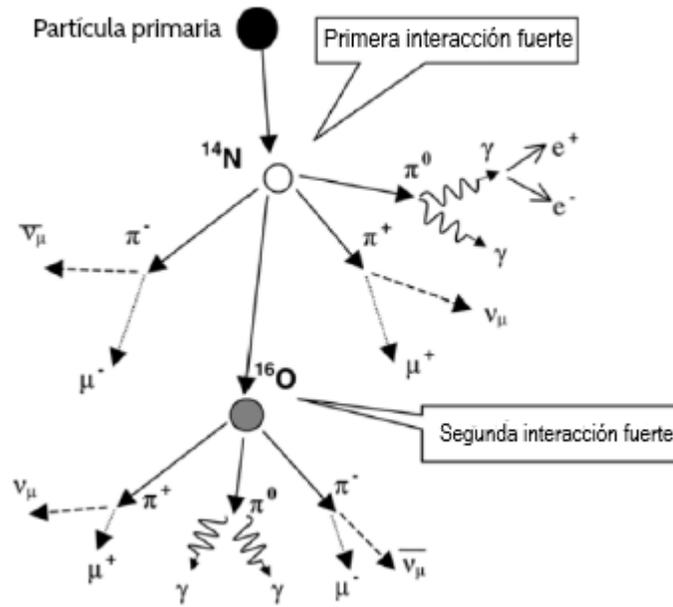


Figura 4-1: Ilustración de una partícula primaria que interactúa en nuestra atmósfera. La primera colisión, en el ejemplo, ocurre con un núcleo de nitrógeno, comenzando con una segunda interacción con el núcleo de oxígeno. Figura tomada de [41].

Ahora, conocer como son las trayectorias que realizarían los RC a través del CG requiere resolver las ecuaciones de movimiento para una partícula con carga Ze , masa en reposo m_0 , que se mueve a través de un campo magnético \mathbf{B} con velocidad \mathbf{v} . Estas ecuaciones corresponden a la fuerza de Lorentz, o ecuación de Newton-Lorentz relativista:

$$\frac{d(m\mathbf{v}^2)}{dt} = \frac{Ze}{c}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \tag{4-1}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, y m es la masa relativista de la partícula. En la ecuación 4-1 hemos asumido el campo eléctrico como despreciable porque las energías de los RC es de varios cientos de MeV, lo que implica que el campo magnético domina sobre el eléctrico [42]. A partir de la ecuación 4-1, y de los resultados de Störmer, se define el término de Rigidez magnética R_m como el cambio de la dirección de la velocidad de una partícula cargada dentro de un campo magnético. Esta definición se deduce de tener una partícula cargada que avanza dentro de un campo \mathbf{B} , es decir

$$\frac{d\mathbf{I}_v}{ds} = \frac{Ze}{c}(\mathbf{I}_v \times \mathbf{B}) \tag{4-2}$$

$$Rm \equiv \frac{pc}{Ze} \quad (4-3)$$

donde el término \mathbf{I}_v es un vector unitario que apunta en la dirección de la velocidad de la partícula (\mathbf{v}/v), y el término ds representa el desplazamiento de la partícula. En este sentido, la Rm tiene unidades de GV, y se interpreta como la resistencia de una partícula cargada a cambiar su dirección de propagación dentro de un campo magnético.[11].

4.2. Modelado computacional de EAS

La simulación de las lluvias se realizó utilizando el código CORSIKA (por sus siglas en inglés COsmic Ray SIMulation for KAscade), version 76400, el cual es un código que usa métodos de tipo Monte Carlo, para modelar las interacciones entre los RC y las moléculas que componen la atmósfera terrestre [43, 44]. En principio, y como se mostrará más adelante, es razonable suponer que el número de partículas secundarias al nivel del detector proviene de una unión entre el flujo de primarios y la producción de secundarios: por un lado, primarios de alta energía producirán un gran número de secundarios al suelo; mientras que por otro, la baja producción a energías menores es compensada por el elevado flujo de primarios.

Para este trabajo se estimó el flujo de secundarios que se producen en una hora y que llegan a la altura de San Carlos de Bariloche (Argentina) y Roma. CORSIKA requiere una serie de parámetros de entrada entre los que se encuentra un modelo atmosférico según la latitud a la cual se quiere realizar la simulación, modelos para interacciones hadrónicas de alta y baja energía, e interacciones electromagnéticas, campo geomagnético correspondiente a la ubicación deseada y cortes de energía de secundarios, los cuales representan el límite inferior donde se dejan de propagar los diferentes tipos de partículas.

Los parámetros que se tienen en cuenta para realizar la simulación son:

- Rango de ángulo cenital, de 0° a 90° .
- Rango de energía de los primarios, desde 5 GeV a $1 \cdot 10^6$ GeV.
- Modelo atmosférico (E2) para San Carlos de Bariloche y Modelo atmosférico (E3) para Roma.

- Altura sobre el nivel del mar, para San Carlos de Bariloche 893 m, y altura sobre el nivel del mar para el detector de neutrones en Roma 60m.
- Campo geomagnético correspondiente a la posición de San Carlos de Bariloche ($41^{\circ}9'0'' S, 71^{\circ}18'0'' W$); componente norte $BN = 19,553.3$ nT y componente vertical $BZ = -17,197.9$ nT, calculados según el modelo IGRF [45]. Campo geomagnético correspondiente a la posición de Roma ($41^{\circ}51'0'' N, 12^{\circ}28'12'' E$); componente norte $BN = 24,461.9$ nT y componente vertical $BZ = 39,250.8$ nT.
- Detector Volumétrico (m^3).
- Tiempo total 3600 segundos.

El flujo de primarios que se origina en CORSIKA a la altura de San Carlos de Bariloche y Roma es de 24 234 013 como se muestra en la tabla 4-1 y eventualmente se genera un flujo de secundarios para San Carlos de Bariloche siendo aproximadamente de 4 233 275 hora por metro cubico y 2 659 260 para Roma.

La Figura 4-2 para San Carlos de Bariloche, presenta el máximo de energía para los e^{\pm} se encuentra en el orden las decenas de MeV con un máximo en $\sim 1,05 \cdot 10^{-2}$ GeV para los e^{-} (línea amarilla) y de $\sim 3,16 \cdot 10^{-2}$ GeV para los e^{+} (línea morada). Para los gamas (línea azul) se observa que su distribución crece muy lentamente con un máximo en $\sim 7,6 \cdot 10^{-3}$ GeV, para los protones (línea naranja) se tiene un máximo de $\sim 0,48$ GeV, para los neutrones (línea verde) $\sim 0,50$ GeV por ultimo para los μ^{\pm} \sim (línea celeste) 3,1 GeV. Es importante resaltar que los neutrones contribuyen a energías de décimas de GeV, más que las componente de muones y con cerca de un orden magnitud por encima que los protones, sin embargo para energías superiores a un GeV, la componente muónica domina por más de dos órdenes de magnitud a la de neutrones. Se observa que para el flujo total las componentes que mas resaltan son los gamas y los muones.

Ahora para la Figura 4-3 para Roma, presenta el máximo de energía para los e^{\pm} se encuentra en el orden de decenas de MeV con un máximo en $\sim 1,10 \cdot 10^{-2}$ GeV para los e^{-} (línea amarilla) y de $\sim 3,14 \cdot 10^{-2}$ GeV para los e^{+} (línea morada). Para los gamas (línea azul) se observa que su distribución crece muy lentamente con un máximo en $\sim 7,7 \cdot 10^{-3}$ GeV, para los protones (línea naranja) se tiene un máximo de $\sim 0,48$ GeV, para los neutrones (línea verde) $\sim 0,44$ GeV, por ultimo para los μ^{\pm} \sim (línea celeste) 3,02 GeV. Se observa que al igual que para el flujo total las componentes que mas resaltan son los gamas y los muones.

Tabla 4-1: Flujo esperado de primarios para cada elemento, caracterizado por el número atómico (Z) y el número másico (A), por metro cubico por hora para todo el rango de energía considerado.

Elemento	Z	A	Flujo
H	1	0	17394324
He	2	4	5889205
C	6	12	247545
O	8	16	244406
B	5	11	77420
Li	3	7	70088
Si	14	28	59939
Mg	12	24	55539
N	7	14	53179
Ne	10	20	43011
Fe	26	56	28017
Be	4	9	26009
S	16	32	7646
Al	13	27	6989
Na	11	23	5980
Ca	20	40	5180
F	9	19	3959
Cr	24	52	2853
Ar	18	40	2508
Ti	22	48	2334
K	19	39	1652
Mn	25	55	1583
P	15	31	1425
V	23	51	1241
Cl	17	35	1229
Sc	21	45	752
Flujo total de primarios			24234013

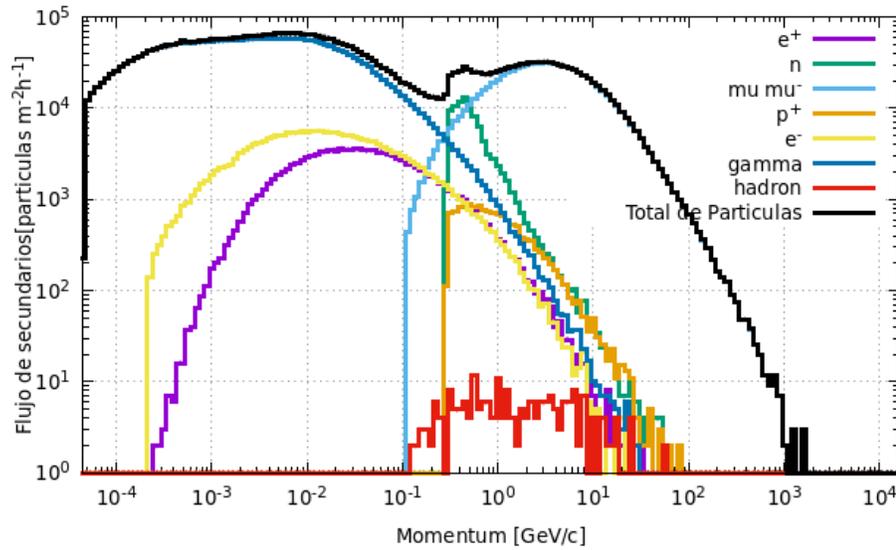


Figura 4-2: Espectro de energía de los secundarios que se producen durante una hora de flujo a nivel del suelo en San Carlos de Bariloche(Argentina). Espectro de todos los secundarios total (línea negra) y las contribuciones de un solo componente (líneas de color).

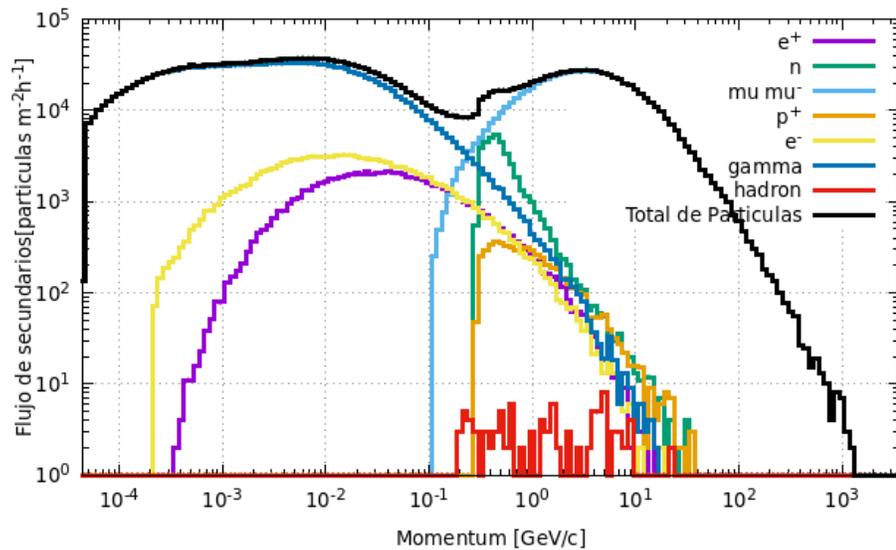


Figura 4-3: Espectro de energía de los secundarios que se producen durante una hora de flujo a nivel del suelo en Roma. Espectro de todos los secundarios total (línea negra) y las contribuciones de un solo componente (líneas de color)

El flujo mostrado en la Figura 4-2 no presenta correcciones por campo geomagnético, por ende a este flujo se le realizan dichas correcciones mediante el código MAGNETOCOSMICS y el método utilizado por [11]. Esta corrección se muestra en la Figura 4-4 donde se presenta el flujo de secundarios que en adelante denotaremos como F_{sec} y los resultados de esta corrección se presentan como $F_{sec-corr}$, donde se presenta la diferencia porcentual ($Dif\%$) entre el F_{sec} y $F_{sec-corr}$, esta dado por la ecuación 4-4

$$Dif\% = \left(\frac{F_{sec} - F_{sec-corr}}{F_{sec}} \right) * 100 \quad (4-4)$$

como función de la energía de los secundarios. En esta Figura se observa como a bajas energías, $< 10^{-1}$ GeV, el Dif% oscila entre un 2.3%, mientras para energías superiores a 10 GeV el flujo de secundarios no presenta cambios. Sin embargo, a energías cercanas al 0,45 GeV esta corrección crece a un valor cercano al 14%.

Los resultados para la corrección de flujo de secundarios para el mes de marzo de 2012 se presenta en la Figura 4-5, donde se observa la diferencia porcentual por hora del flujo ecuación 4-5, donde $F_{sec-hora}$ es el flujo corregido por hora para este mes. Es importante notar como esta diferencia porcentual se corresponde con la evolución temporal del índice Dst, Figura 4-6).

$$Dif_{F_{sec-hora}}\% = \left(\frac{F_{sec} - F_{sec-hora}}{F_{sec}} \right) * 100 \quad (4-5)$$

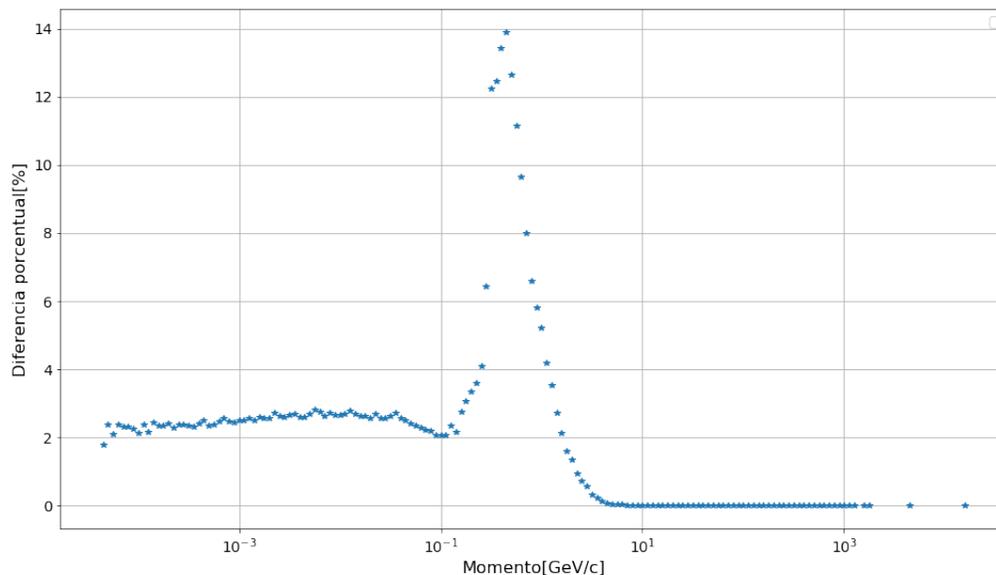


Figura 4-4: Resultado de la diferencia porcentual entre flujo sin corrección (F_{sec}) y con corrección ($F_{sec-corr}$) por campo geomagnético

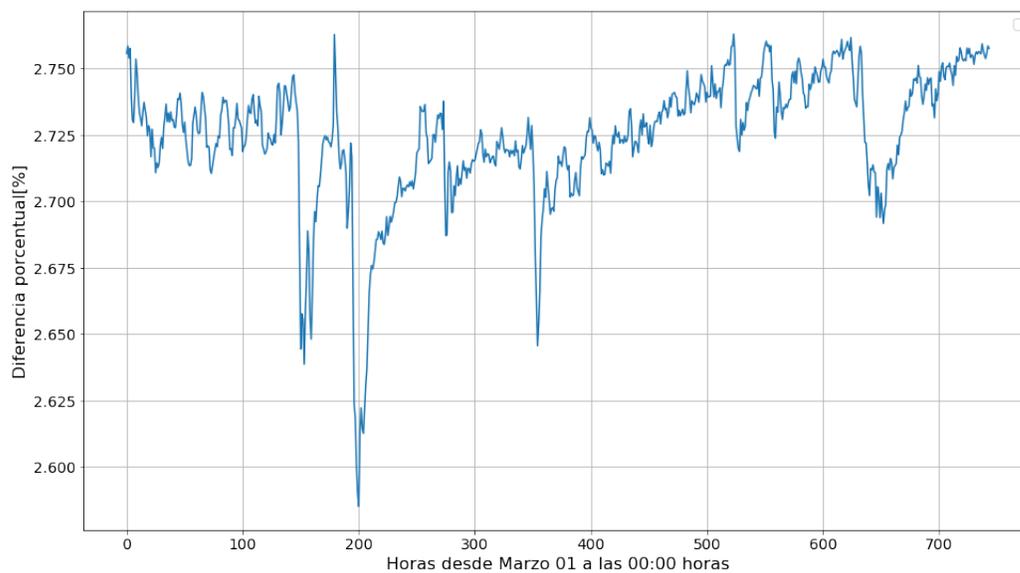


Figura 4-5: Diferencia porcentual entre el flujo de secundarios corregido campo geomagnético y el flujo de secundarios, a nivel del suelo en San Carlos de Bariloche.

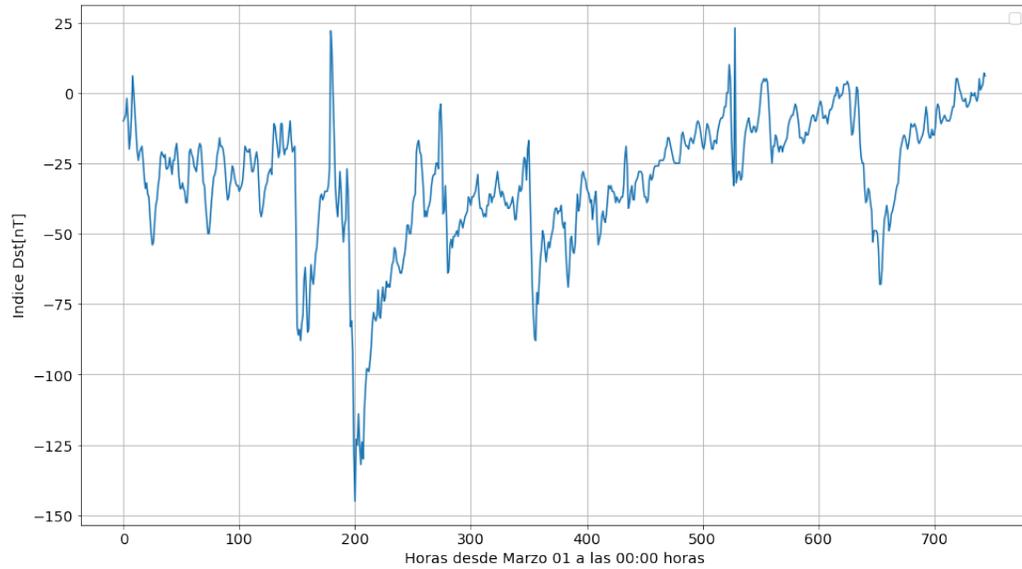


Figura 4-6: Indice Dst registrado para el mes de marzo del 2012 por el World Data Center for Geomagnetism, Kyoto Dst index service. Datos tomados desde <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.

4.3. Modelado de un detector Cherenkov de agua

Ahora implementando un código en Geant4 que permita utilizar como entrada los resultados obtenidos de la estimación de números de secundarios al nivel del suelo producidos por la interacción de los RC que inciden en la atmósfera, y simular la respuesta de un WCD al paso del flujo de partículas.

Se procede a estimar la respuesta del WCD para Nahuelito y para Roma. Se obtiene el número de contribución de cada una de las diferentes partículas de este flujo, cómo se muestra en la Figura 4-7. En el gráfico se usa el mismo código de colores del flujo de secundarios simulado (Figura 4-2). La curva del flujo total (negro) presenta dos picos, uno cercano al eje Y y otro al rededor de ~ 150 fotoelectrones¹. La contribución del primer pico se debe a la componente electromagnética es decir electrones-positrones y gammas. Se aprecia que el segundo pico es debido en su mayoría a las contribución de los muones, ya que en este punto las curvas celeste y negra tienden a ser iguales.

Para Roma se obtiene Figura 4-8. La curva del flujo total (negro) presenta un pico cercano al eje Y y otro al rededor de ~ 155 fotoelectrones. Al igual que la Figura 4-7 la contribución del primer pico se debe a la componente electromagnética y el segundo pico es debido en su mayoría a las contribución de los muones.

¹Flujo de electrones, por efecto fotoeléctrico

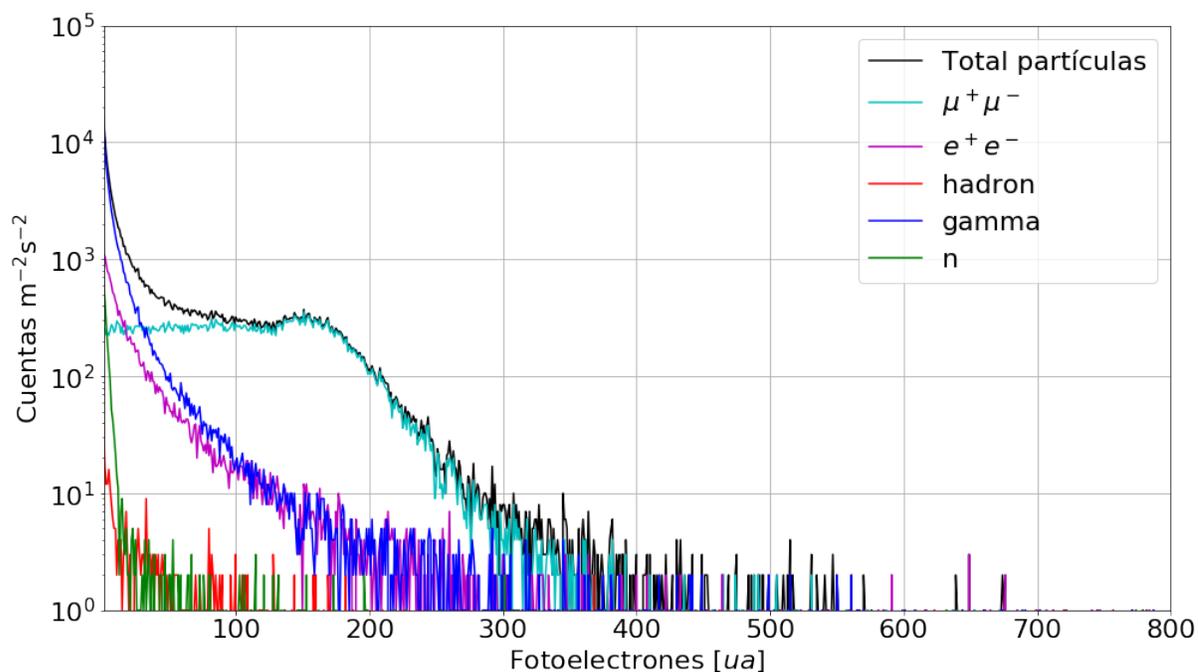


Figura 4-7: El histograma de fotoelectrones de la señal total (línea negra) y las contribuciones de un solo componente (líneas de color) se muestra para San Carlos de Bariloche.

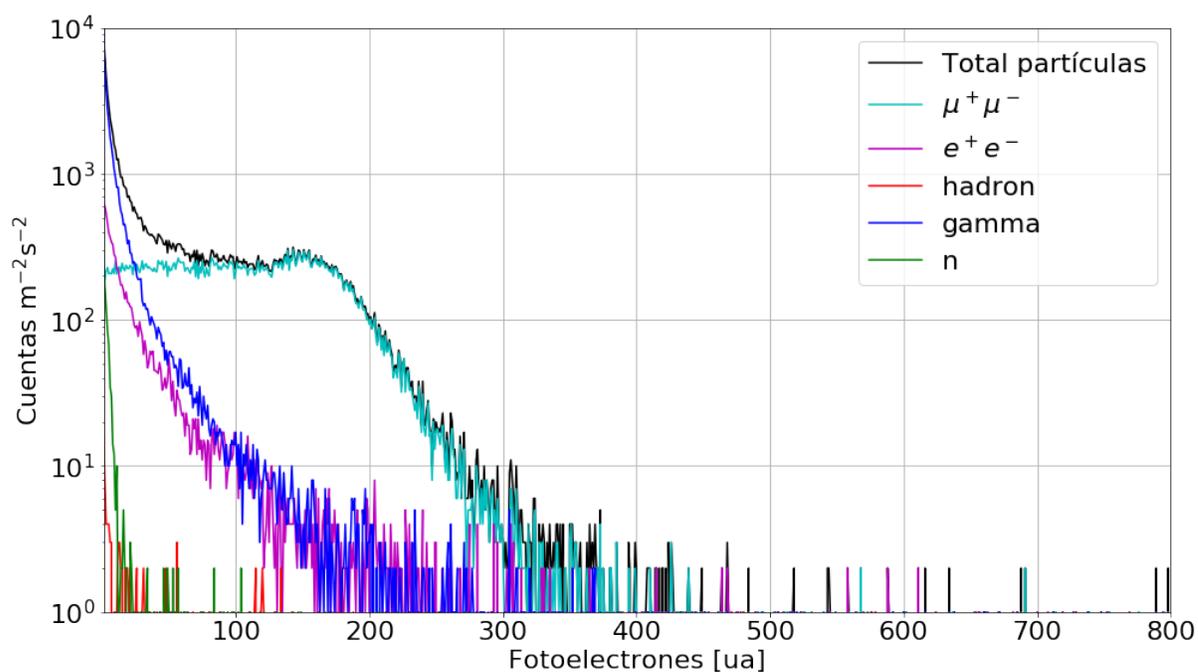


Figura 4-8: El histograma de fotoelectrones de la señal total (línea negra) y las contribuciones de un solo componente (líneas de color) se muestra para Roma.

4.4. Decrecimiento Forbush de marzo del 2012

Con el fin de estudiar la modulación solar de rayos cósmicos utilizaremos las series temporales registradas por el detector Nahuelito del Observatorio LAGO, y se compararán los mismos con los datos registrados en los monitores de neutrones por Roma; esta estación de rayos cósmicos de Roma se incorporó a la red mundial de monitores de neutrones con el objetivo de estudiar las variaciones temporales de los rayos cósmicos primarios (Studio Variazioni Intensità Raggi Cosmici: SVIRCO.) y su modulación en la heliosfera. En mayo de 1997, el monitor de neutrones se encuentra en el Departamento de Física “E. Amaldi” de la Universidad “Roma Tre”. El Observatorio SVIRCO (colaboración INAF / IFSI-UNIRomaTre) ha estado operando continuamente en la ubicación (41,86 ° N, 12,47 ° E, altitud de unos 60 m snm)[46].

Sin embargo, como primera medida sólo quiere compararse la sensibilidad a la modulación, es decir, si es posible observar eventos Forbush. Hay varios monitores de neutrones cuyos datos están disponibles en la red. En este estudio se han utilizado los datos de los monitores de neutrones en Roma [47].

El Forbush que tenemos de referencia, Figura 4-9 que ya se registró en marzo del 2012 en Roma por detector de Neutrones. Dado que en este caso no fue un decrecimiento usual, en el sentido que hubo una superposición de dos eyecciones de masa coronal justo para esta época como se observa en la Figura.

En la Figura 4-10 se observa la rigidez de corte como función del tiempo para el mes de marzo del 2012, estos datos son tomados de la corrección por campo geomagnético realizada por el código MAGNETOCOSMICS. Donde en rojo tenemos la rigidez de corte antes del Fd, y en azul la recuperación del Fd.

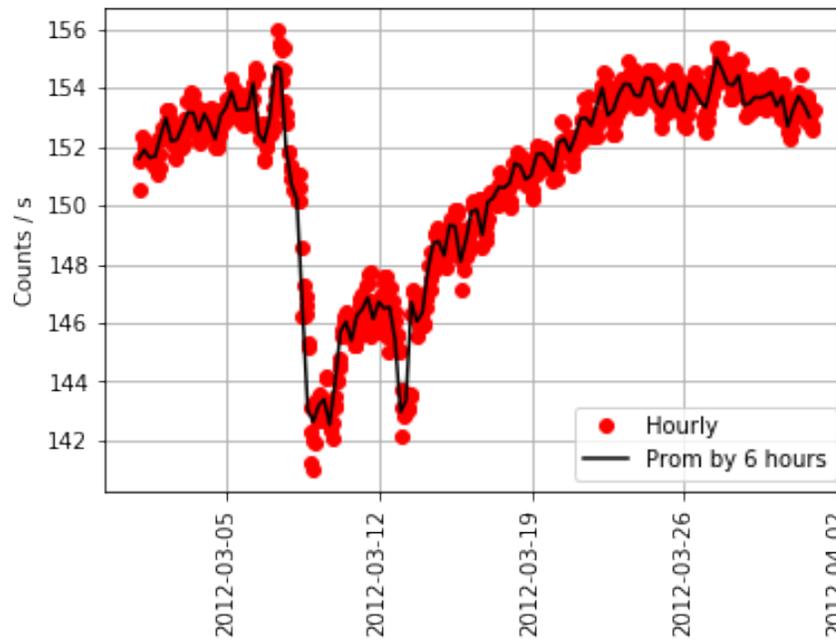


Figura 4-9: Se observan dos decrecimientos en el conteo de neutrones, uno para antes del 12 de marzo y uno posterior a este día. Estos dos decrecimientos están asociados a dos ICME diferentes y por lo tanto constituyen dos Fd.[46].

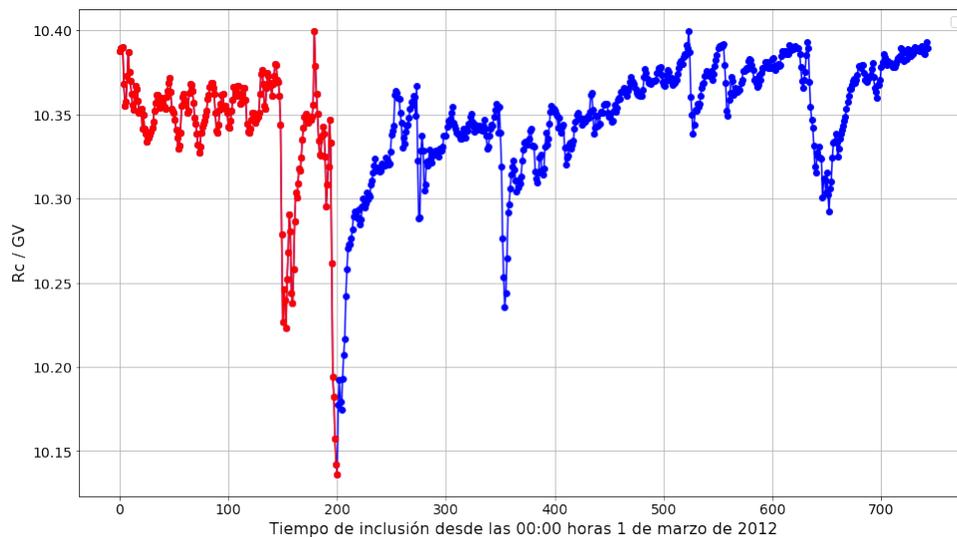


Figura 4-10: Rigidez de corte para marzo 2012.

5 Análisis de datos del observatorio LAGO para el Fd de marzo 2012

5.1. Datos del observatorio Lago

Dado que los WCD del observatorio LAGO son eficientes para el registro y conteo de muones producidos en la EAS [27], el primer análisis de datos realizado en este trabajo se enfocó en identificar las señales producidas por el paso de muones. Para esto, se realizó la integral de todas las señales registradas por el detector durante una hora, y a partir de esta se construyó su respectiva distribución, denominada histograma de carga¹. Ver detalles de estos histogramas en [33].

La Figura 5-1 presenta el histograma de carga obtenido para el 01 de marzo de 2012 entre las 23:00 y las 00:00 hora local. La curva azul en esta figura permite destacar dos picos, o jorobas, donde la primera (< 50 FADC ²) está asociada a la carga depositada por e^\pm y gammas, mientras la segunda corresponde a μ^\pm . La herramienta ARTI permite aplicar un filtro a los datos que facilita la identificación de la joroba del muon. Este filtro consiste en descartar aquellos pulsos cuyo bin 3 registren una señal por debajo del 40 % de la línea base, se aplica para descartar aquellos puntos que decaigan muy rápidamente como los pulsos que viene de ruido, ver Figura 5-2. Los resultados de aplicar este filtro se pueden observar en la Figura 5-1, línea roja, donde se puede ver con mayor claridad la joroba del muon.

Dado que los Fd están relacionados con las interacciones hadronicas, en este trabajo hemos utilizado las señales que registran una carga entre 80 FADC y 220 FADC, tal y como ilustra la línea verde en la Figura 5-1. Estas señales las denominamos eventos tipo muon.

i

¹La construcción de los histogramas de carga se realizó con la herramienta ARTI desarrollada por la Colaboración LAGO.

²Flash Analog to Digital Convertors

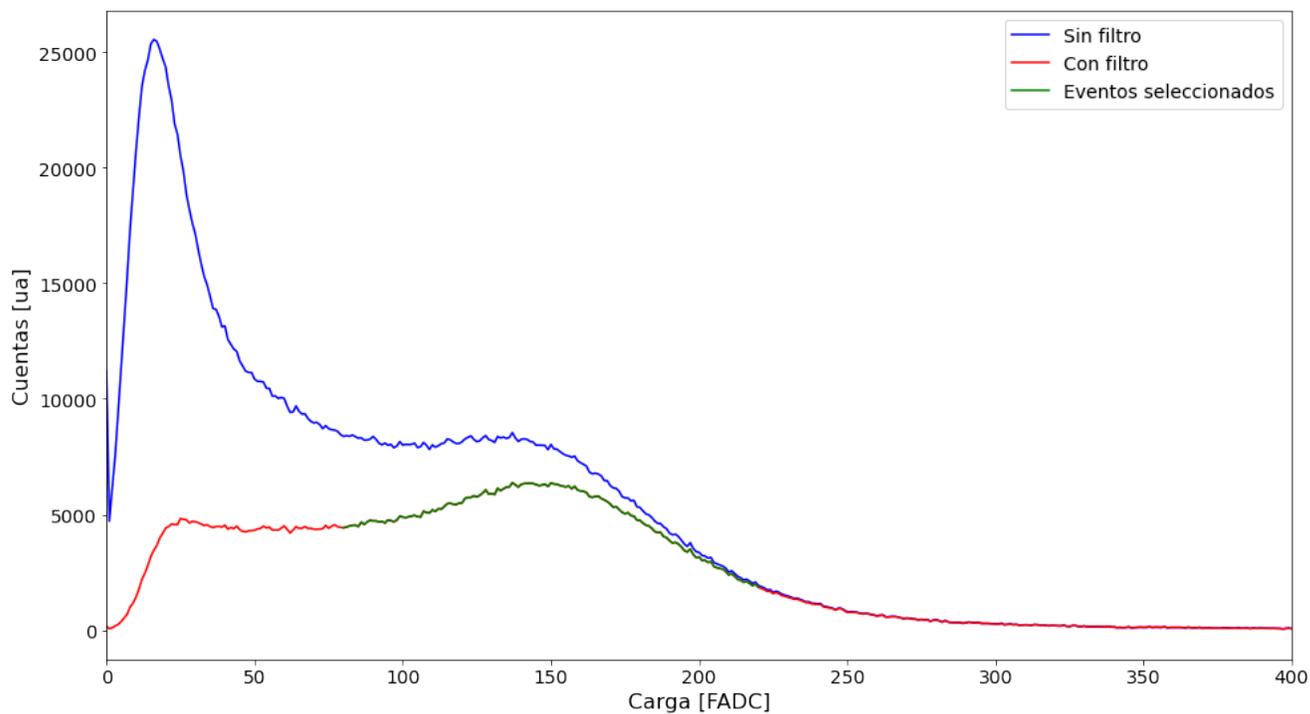


Figura 5-1: Histograma de carga obtenido, a través de la herramienta ARTI, para para el 01 de marzo de 2012 entre las 23:00 y las 00:00 hora local para San Carlos de Bariloche. En azul se presenta el histograma obtenido sin aplicar filtro, y en rojo el obtenido luego de aplicar el filtro de ARTI al bin 3 (ver texto para más detalles). En verde se destacan los eventos seleccionados para este trabajo ($80 \text{ FADC} < \text{carga} < 220 \text{ FADC}$)

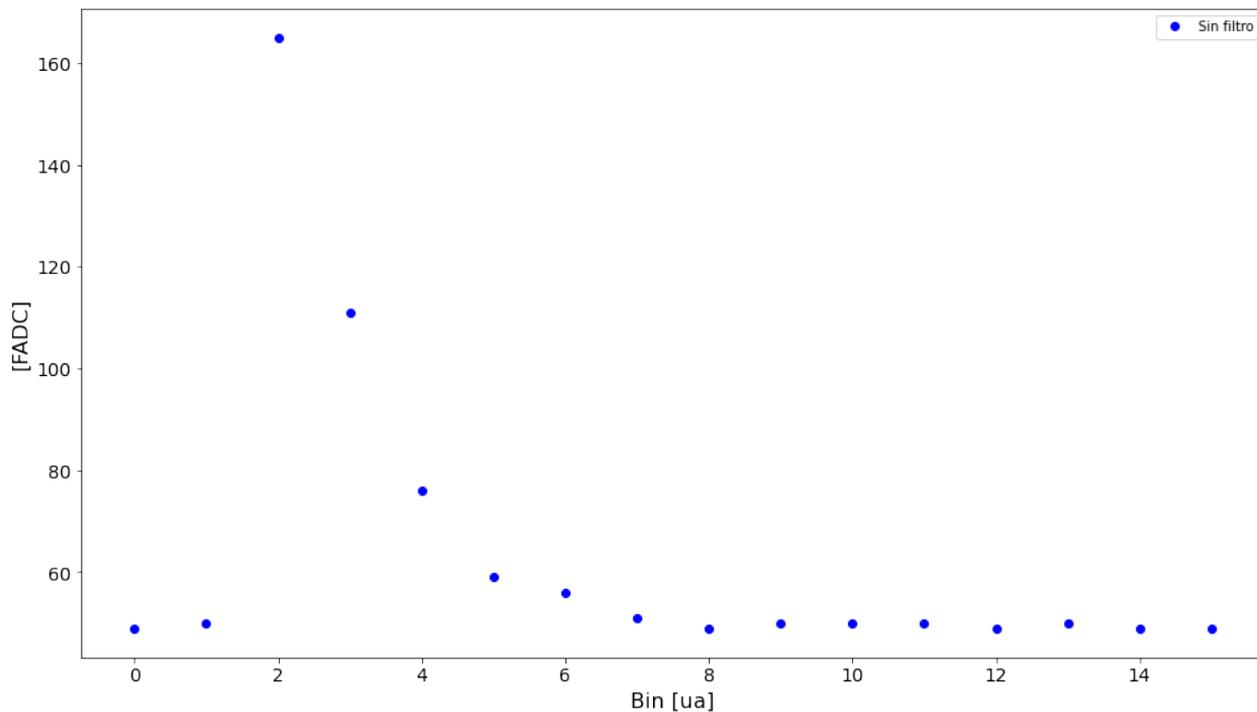


Figura 5-2: Pulso característico registrado por el WCD Nahuelito. El bin 2 está asociado al pico máximo de señal. El filtro aplicado por ARTI consiste en descartar las señales cuyo bin 3 tengan menos de 70 FADC de señal (La línea base corresponde a 50 FADC). En el eje x se presenta el bin en unidades arbitraria(ua)

5.2. Corrección por presión atmosférica

En la Figura 5-3 puede verse la anti-correlación entre la presión atmosférica y el flujo de partículas cargadas para el mes de marzo de 2012; al aumentar el flujo de partículas disminuye el valor de la presión y al disminuir el flujo de partículas aumenta la presión.

Una vez seleccionados los eventos tipo muon, realizamos la respectiva corrección por presión al número de cuentas registradas por el WCD Nahuelito. Para esto, aplicamos el procedimiento expuesto en (<https://doi.org/10.1029/2012JA018026>), esto es:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \beta \Delta P \quad (5-1)$$

donde ΔI es el cambio en el conteo de eventos I respecto del conteo medio I_0 del periodo

de estudio y ΔP es el cambio en la presión P respecto de la presión media P_0 , mientras β se denomina coeficiente barométrico.

Para esto, se usaron los datos de presión registrados por el detector Nahuelito desde el primero de Enero hasta el 30 de Abril del año 2012. La Figura 5-4 presenta el flujo relativo de los eventos tipo muon seleccionados (tomando como referencia el promedio de cuentas durante este intervalo de tiempo) como función del cambio de la presión atmosférica, respecto del promedio de la presión registrada en la ventana de tiempo.

En este sentido, β se interpreta como el porcentaje de cambio en el conteo I por cada hPa, es decir que el cambio relativo en la tasa de conteo $\Delta I/I_0$ es igual a

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \left(\frac{\Delta I}{I_0} \right)_c + \beta \Delta P, \quad (5-2)$$

es decir que

$$\left(\frac{\Delta I}{I_0} \right)_c = \frac{\Delta I}{I_0} - \beta \Delta P, \quad (5-3)$$

donde $\left(\frac{\Delta I}{I_0} \right)_c$ representa el cambio relativo de la tasa de conteo corregida I_c .

Entonces,

$$\left(\frac{\Delta I}{I_0} \right)_c = \frac{I_c - I_0}{I_0}, \quad (5-4)$$

$$I_c = I_0 \left[1 + \left(\frac{\Delta I}{I_0} \right)_c \right], \quad (5-5)$$

con I_c como el conteo corregido.

Para nuestro caso, y a partir del ajuste lineal presentado en la Figura 5-4, de la ecuación 5-3 tenemos que,

$$\beta = 0,37 \quad (5-6)$$

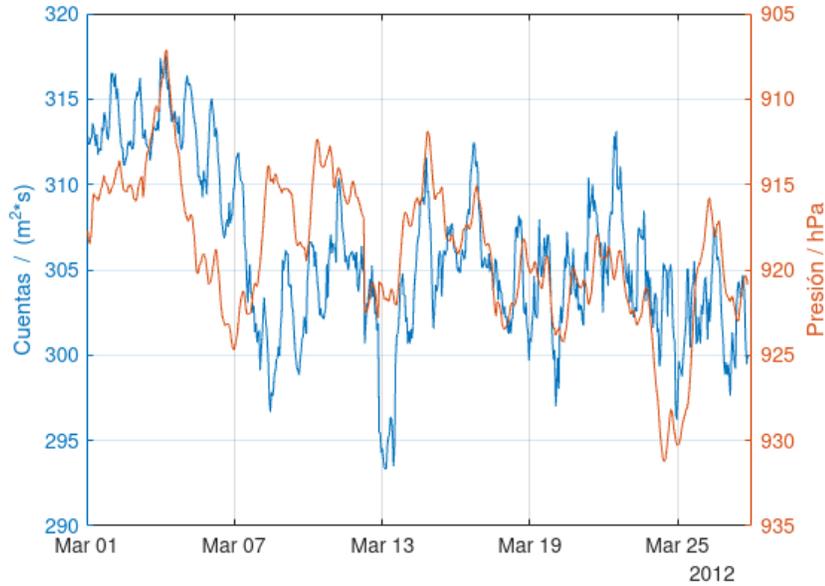


Figura 5-3: Evolución temporal para el mes de marzo de 2012 del flujo de partículas cargadas y la presión atmosférica.

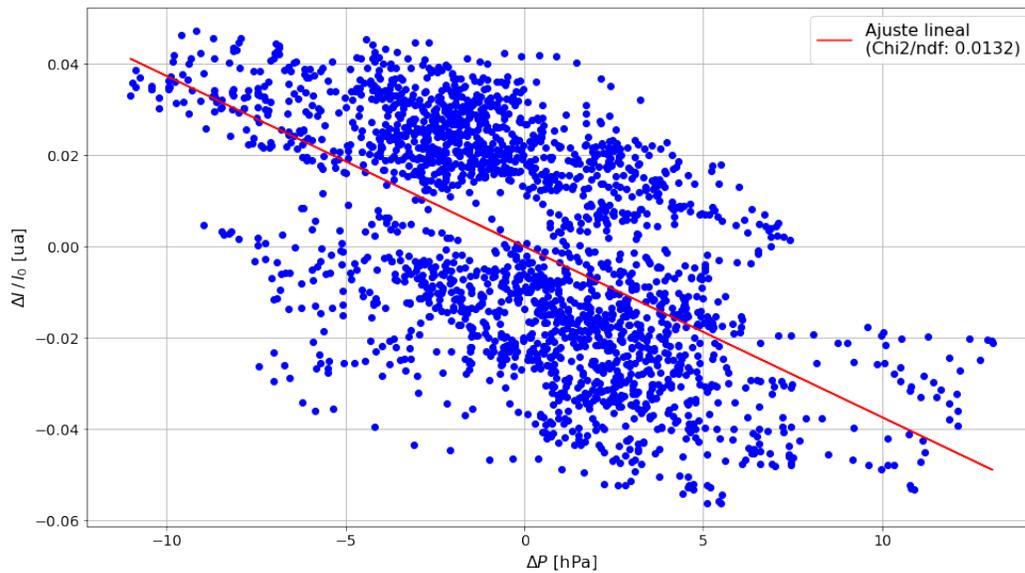


Figura 5-4: Flujo relativo de eventos tipo muones (tomando como referencia el promedio de cuentas durante este intervalo de tiempo, I_0) como función del cambio de la presión atmosférica, respecto del promedio de la presión registrada en la ventana de tiempo. En rojo se presenta el ajuste lineal(ecuación 5-3).

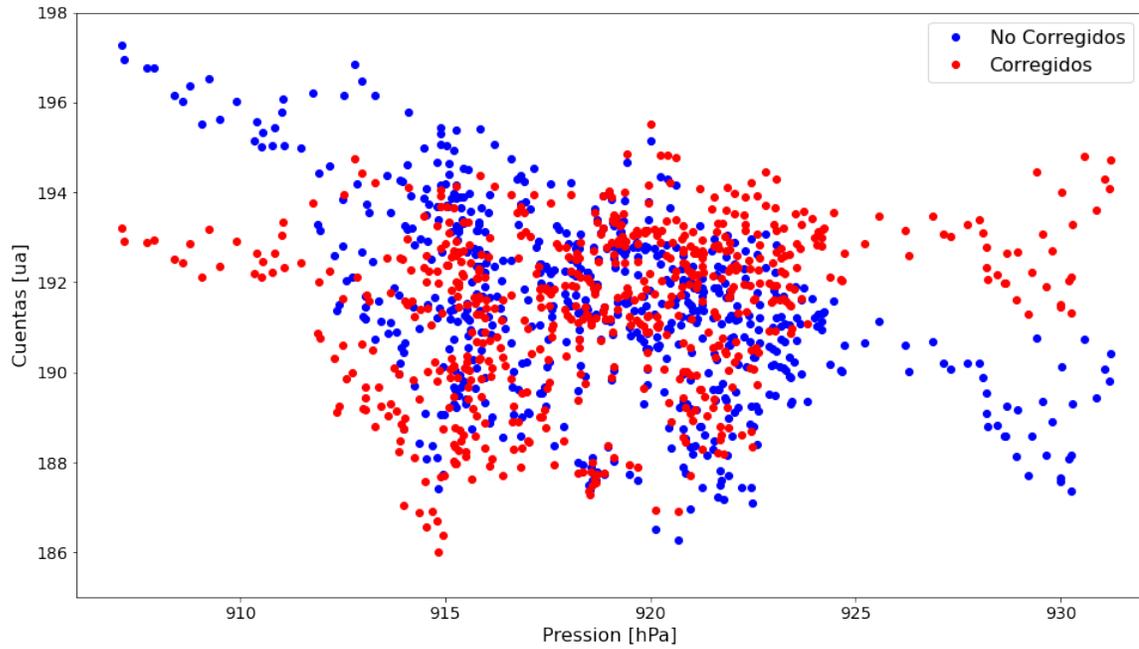


Figura 5-5: Eventos tipo muon en función de la presión atmosférica.

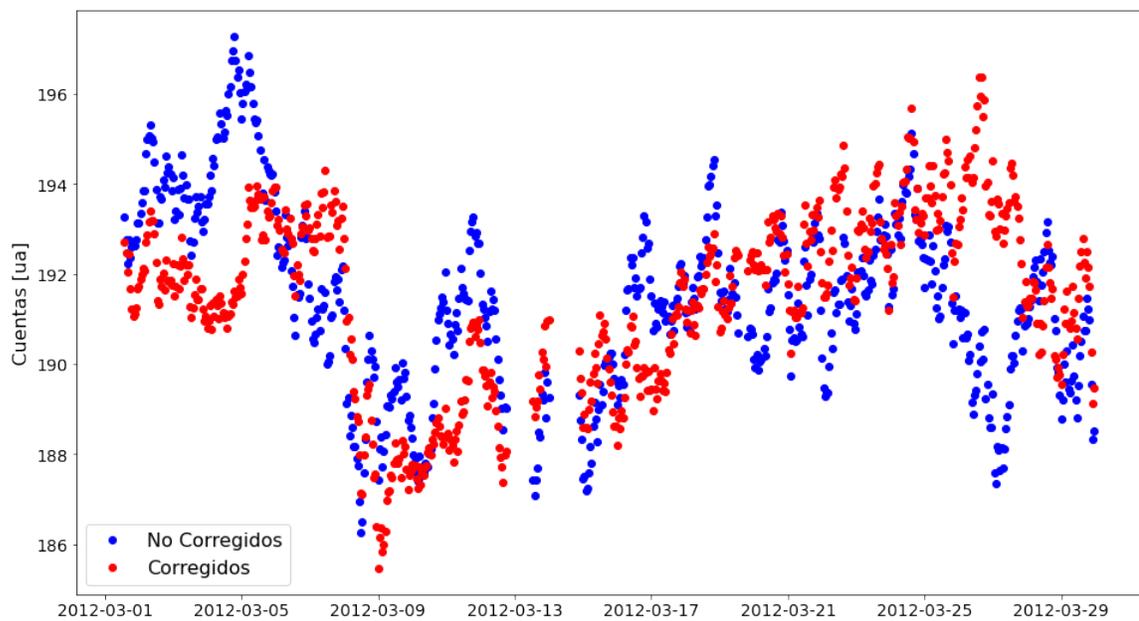


Figura 5-6: Flujo de eventos tipo muon durante el mes de marzo. En azul sin corrección por presión y en rojo corregidos por presión.

Las Figuras 5-5 en termino de variación de presión y 5-6 en función de la variación de días; presentan los resultados de corregir los eventos tipo muon registrados por el WCD Nahuelito durante el mes de marzo de 2012.

Ahora para verificar esta corrección tomamos los datos del detector de Neutrones de Roma y realizamos el mismo proceso, y donde la Figura 5-7 representa el flujo de partículas cargadas y la Figura 5-8 representa los datos de la presión. Se hace esta comparación ya que la corrección por presión es indiferente al tipo de partícula que se registra en el detector.

Calculando ahora el valor de beta para los datos del detector de neutrones de Roma, con el ajuste lineal de la forma $f(x) = a * x$ Figura 5-9.

Ahora de la ecuación 5-5 para estos datos tenemos una corrección del flujo de partículas de la forma Figura 5-10 y comparando estos datos con el flujo de partículas del detector de neutrones de Roma, observamos la similitud en esta Figura 5-11.

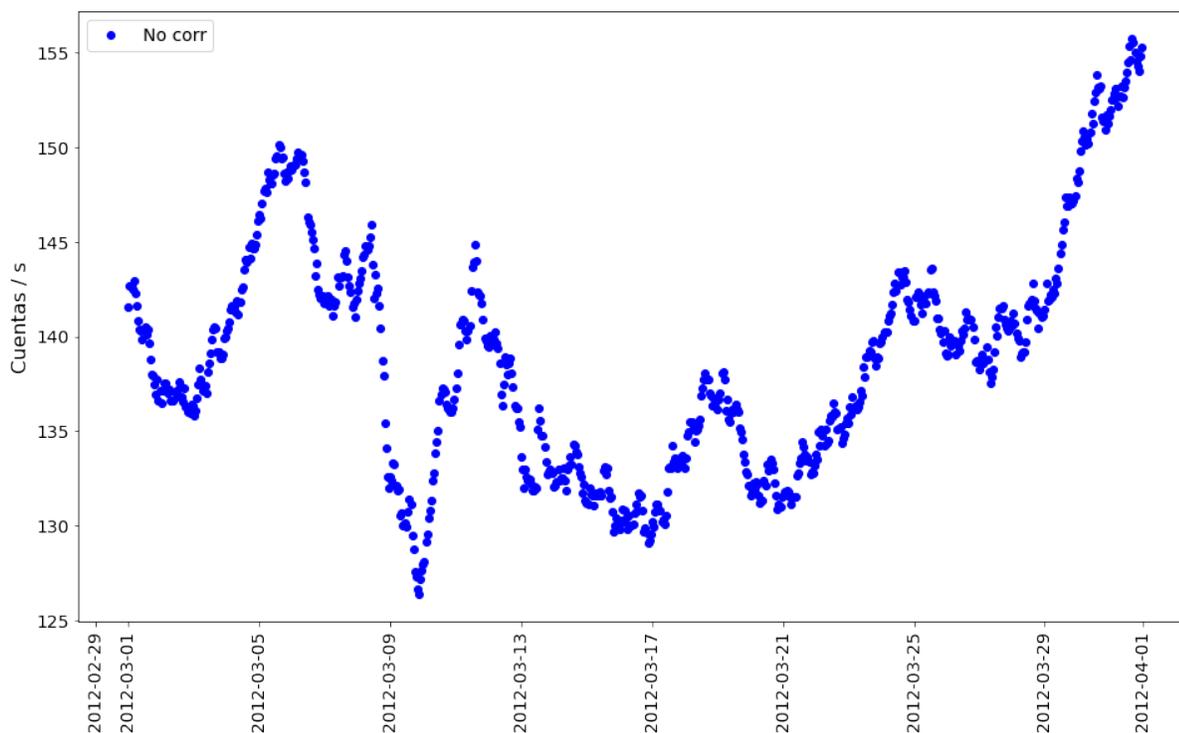


Figura 5-7: Flujo de partículas cargadas de marzo del 2012 para el detector de neutrones en Roma.

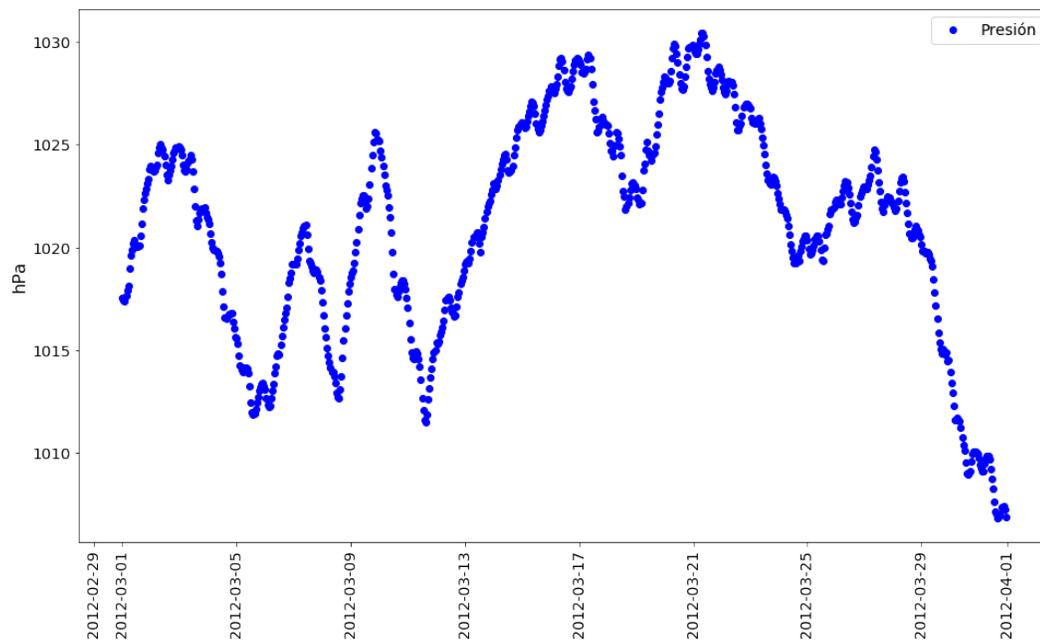


Figura 5-8: Datos de presión registrados por el detector de Neutrones en Roma para marzo del 2012.

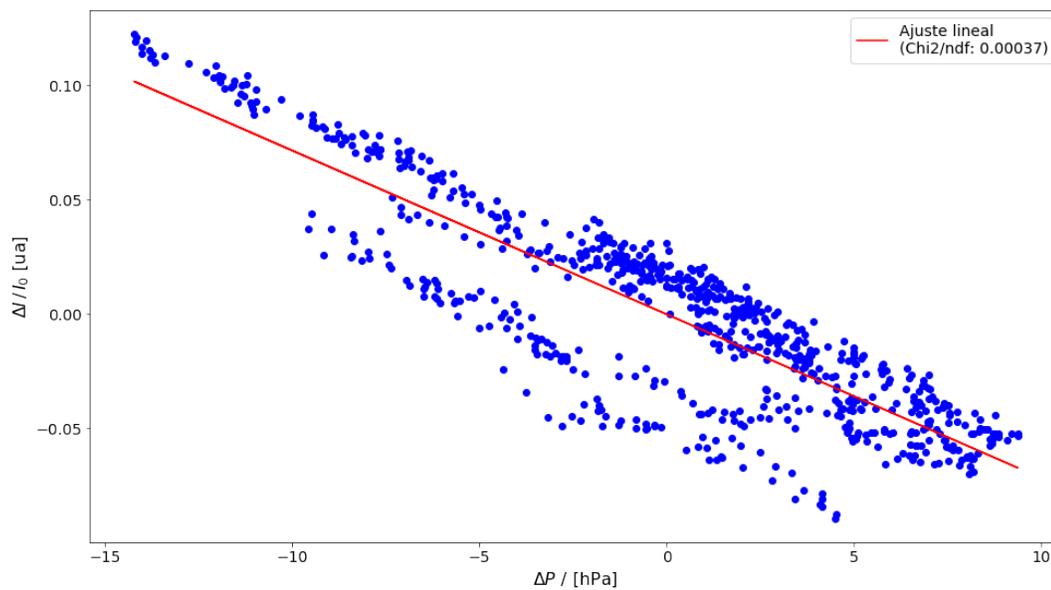


Figura 5-9: Ajuste lineal de la forma $f(x) = a * x$ con un valor de $\beta = 0.716\%/mba$

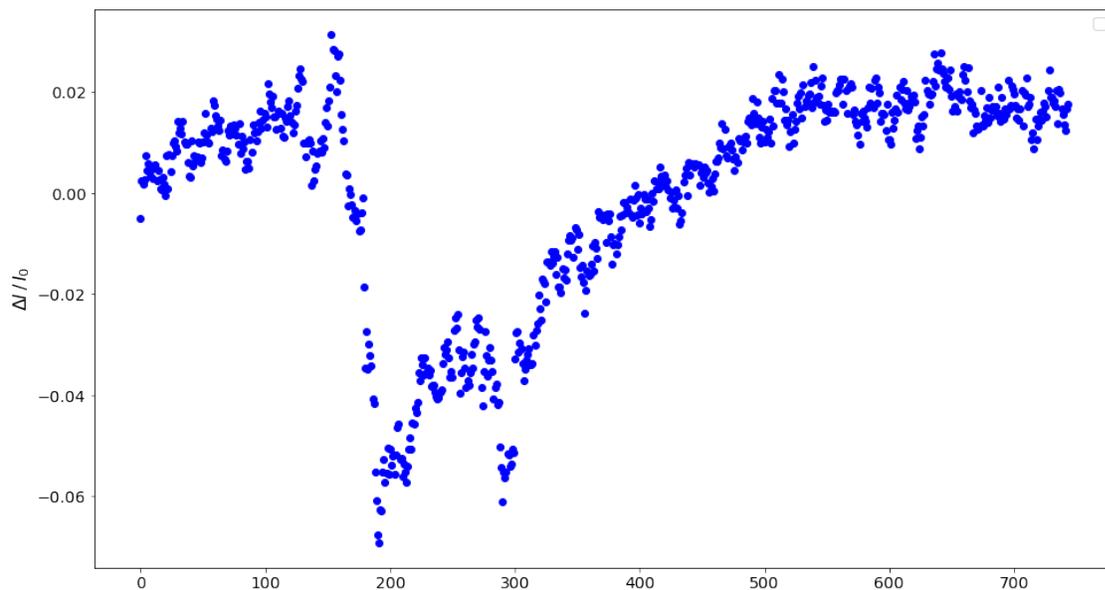


Figura 5-10: Datos corregidos del mes de marzo para el detector de neutrones de Roma.

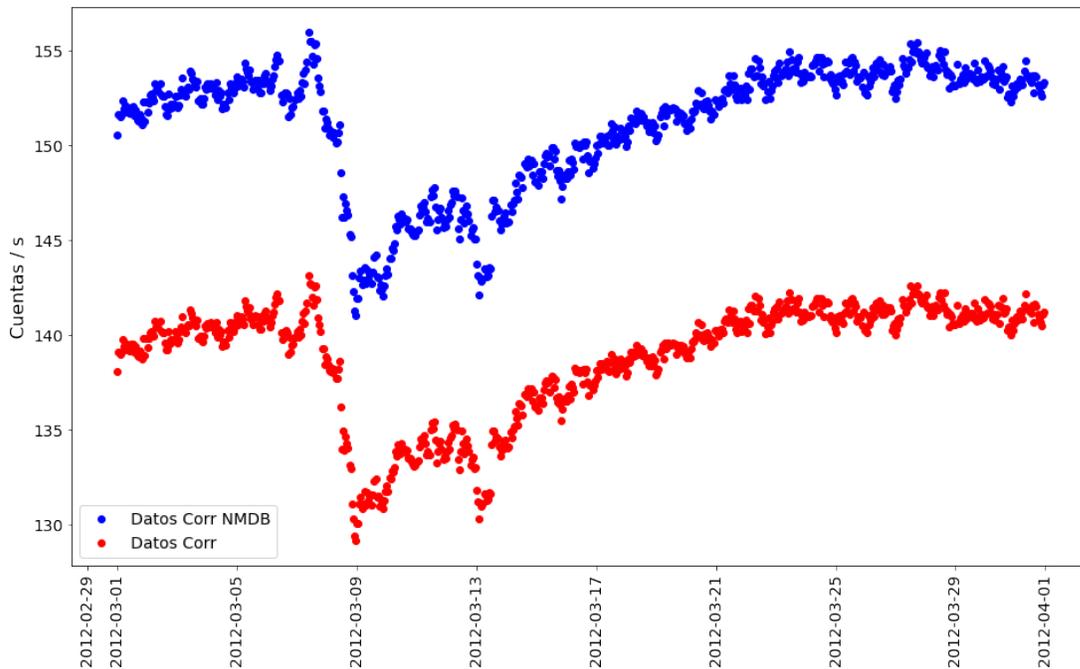


Figura 5-11: Datos del detector de neutrones de Roma y los datos corregidos del mes de marzo.

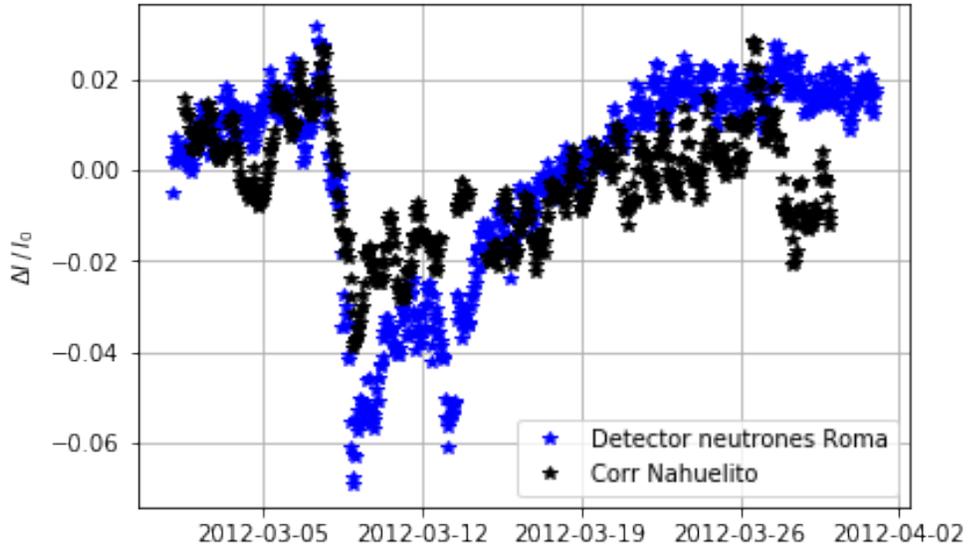


Figura 5-12: Datos del detector de neutrones de Roma y los datos corregidos para el detector Nahuelito del mes de marzo.

En la Figura 5-12 se observa los datos del detector de neutrones de Roma y flujo de partículas corregidas por presión atmosférica para el detector Nahuelito del mes de marzo. Se observa con más claridad el Fd.

5.3. Definición de los rangos del Fd

El primer paso en el análisis del Fd para marzo de 2012 consiste en determinar la ventana de tiempo del Fd. La Figura 5-13 presenta el conteo de eventos tipo muon por hora para el mes de marzo registrados por el WCD Nahuelito. En verde se destaca el intervalo de tiempo previo al Fd, y en rojo el conteo de eventos durante el Fd. Por simplicidad, en este trabajo hemos caracterizado este conteo de eventos como el promedio de esta medición por día, tal y como se ilustra en la Figura 5-14. Por otra parte, para el análisis del Fd la cantidad de interés es el conteo relativo de eventos tipo muon durante el Fd (Φ), el cual definimos como

$$\Phi = \frac{N_{\mu}}{N_{\mu}^{\text{Prom}}} - 1 \quad (5-7)$$

donde N_{μ} representa el conteo de eventos tipo muon durante el Fd (datos en rojo), N_{μ}^{Prom} el conteo promedio de eventos tipo muon antes del Fd (línea verde punteada, Figura 5-13).

En este trabajo hemos caracterizado el Fd registrado por WCD Nahueletio como una función exponencial de la forma:

$$F(t) = b_1 + b_2 \cdot e^{(t-t_0)/\tau}, \quad (5-8)$$

donde t_0 corresponde al momento en que “termina” el Fd (418 horas, ~ 17.4 días, para este caso), b_1 (0.09) y b_2 (-0.08) constantes de proporcionalidad, y τ el tiempo medio de la fase de recuperación. La Figura 5-15 muestra el conteo Φ y el resultado del ajuste de esta última función donde el $t = 0$ son 03-08 21:00:00 y $t = 418$ son 03-27 5:00:00 (En la Figura 5-16 se presentan los respectivos residuos del ajuste).

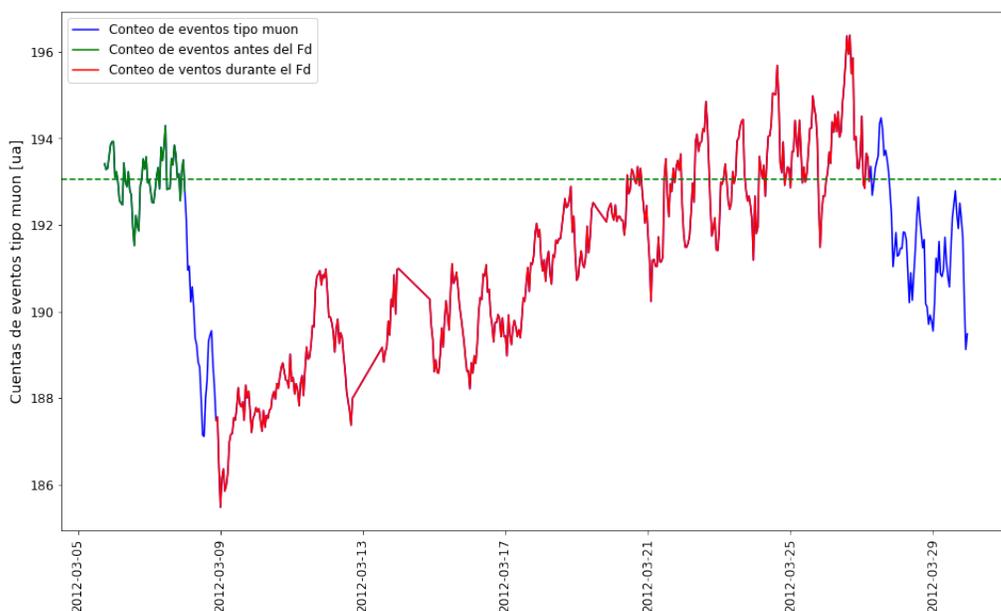


Figura 5-13: En azul conteo de eventos tipo muon durante del mes de marzo de 2012. En verde se resalta el conteo de eventos tipo muon antes del Fd, y en rojo el conteo durante el Fd. La línea verde punteada denota el promedio del conteo de eventos tipo muon antes del Fd.

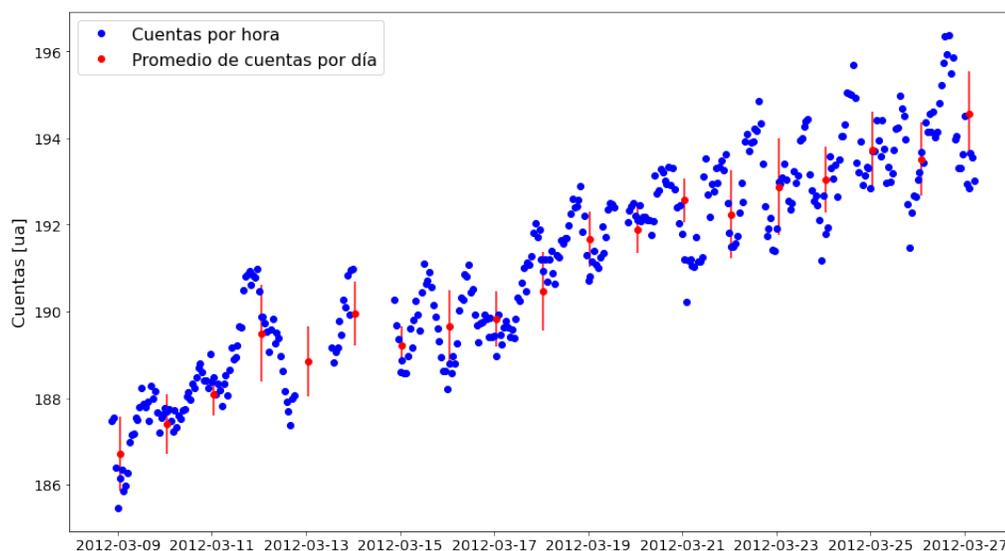


Figura 5-14: Conteo de eventos tipo muon durante el Fd. En rojo el promedio por día. Las barras de error corresponden al RMS de la distribución de eventos por día. (Los puntos azules corresponden a la línea roja de la figura 5-13)

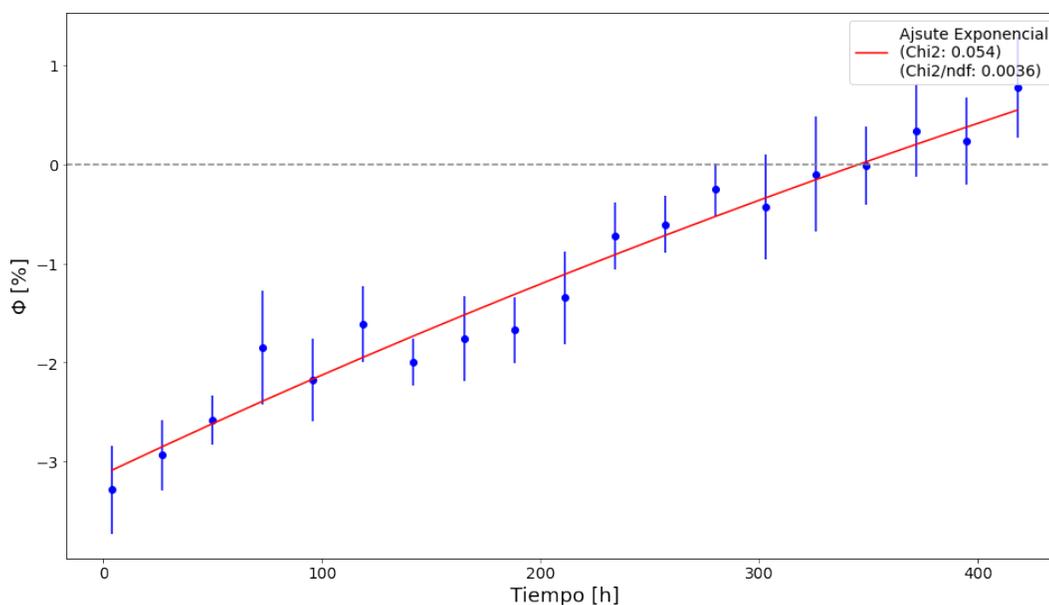


Figura 5-15: Conteo relativo de eventos tipo muon (Φ , ver ecuación 5-7) y ajuste de la función exponencial 5-8. El τ para esta función corresponde a 1178,60 horas (41 días)

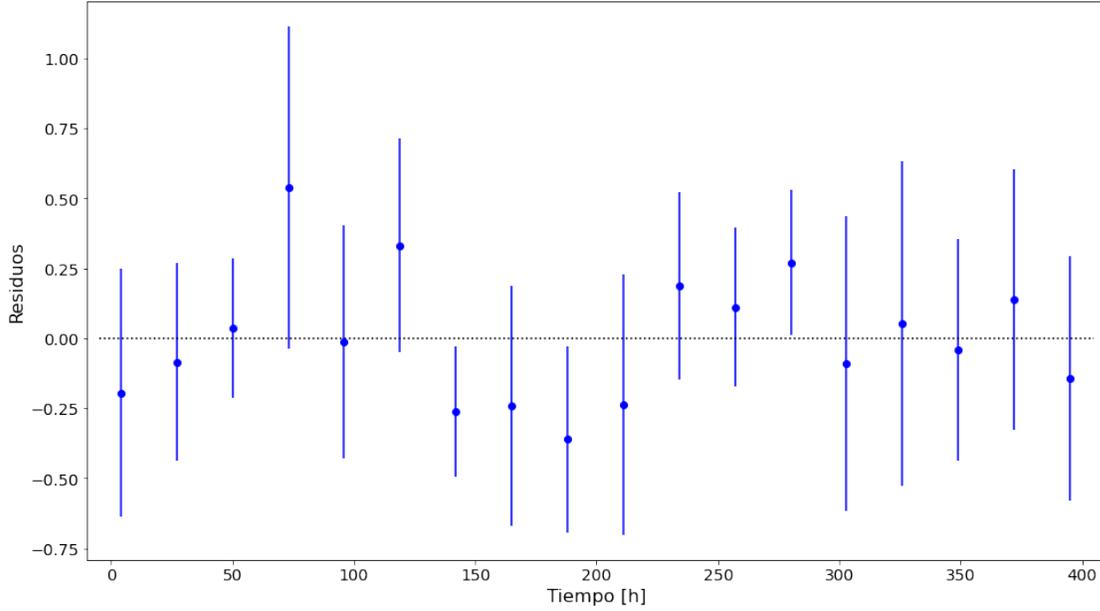


Figura 5-16: Residuos del ajuste de la ecuación 5-8 conteo de eventos Φ .

5.4. Modelado del Fd

A primer orden, el Fd consiste en un corte de primarios que pueden llegar a la atmósfera terrestre. En este trabajo, y como primera aproximación, consideramos que este corte de primarios se puede modelar a partir de una función de rigidez $R_c(t)$ de corte definida como

$$R_c(t) = a_1 + a_2 e^{a_3(t-t_0)}, \quad (5-9)$$

donde t_0 corresponde al momento en que “termina” el Fd (418 horas, para este caso), a_1 representa la rigidez de corte antes/después de la fase de recuperación (8.0 GV, para el caso de San Carlos de Bariloche), a_2 la constante de proporcionalidad para el flujo el mínimo del Fd y $1/a_3$ el tiempo medio de la fase de recuperación. Aquí, consideramos que $1/a_3$ es el mismo τ de la ecuación 5-8.

Esto quiere decir que de la ecuación 5-9 conocemos el conteo de eventos en el $t = 0$, y el conteo antes y después del Fd, es decir que podemos plantear dos ecuaciones:

$$R_c(t = 0) = a_1 + a_2 e^{-a_3 t_0}, \quad (5-10)$$

$$R_c(t = 418) = a_1 + a_2 e^0. \quad (5-11)$$

Resolviendo para a_1 y a_2 , tenemos que

$$8,0 = a_1 + a_2, \quad (5-12)$$

$$a_2 = 8,0 - a_1 \quad (5-13)$$

$$a_1 = \frac{R_c(t = 0) - (8,0)e^{-a_3 t_0}}{1 - e^{-a_3 t_0}} \quad (5-14)$$

Esto nos deja con una sola incógnita a resolver $R_c(t = 0)$. Para esto, recurrimos al modelado computacional de la respuesta del WCD Nahuelito al fondo de radiación que se produce al nivel del suelo en San Carlos de Bariloche, es decir usaremos los resultados encontrados en la sección 4.2 y la sección 4.3.

El procedimiento que aplicamos para resolver $R_c(t = 0)$ es el siguiente, $R_c^i N_{\text{Pri}}^{R_c^i}$

1. Se selecciona un valor de rigidez de corte R_c^i .
2. Se calcula el número de primarios que arriban a la atmósfera terrestre filtrando por R_c^i , ($N_{\text{Pri}}^{R_c^i}$).
3. Se estima el número de secundarios producidos por $N_{\text{Pri}}^{R_c^i}$ al nivel del suelo de San Carlos de Bariloche.
4. Se determina el número de secundarios que producen señal en el detector usando Geant4.

5. Se repite el paso anterior 10 veces, con el objetivo de tener la respuesta promedio del WCD para los secundarios producidos por $N_{\text{Pri}}^{R_c^i}$, es decir $\Theta^{R_c^i}$.
6. Se repiten los pasos 1 a 5 para otros valores rigidez de corte R_c , y se construye la respuesta del WCD, $\Theta^{R_c^i}$ como función de R_c .

El anterior procedimiento se aplicó para cinco valores de R_c (8,5 GV, 9,5 GV, 10,5 GV, 11,5 GV, y 12,5 GV). Es importante notar que aunque las unidades para la cantidad R_c son las mismas que para la rigidez de corte magnético, la primera no guarda una relación con el campo magnético terrestre, como si lo hace la segunda. Los resultados de este procedimiento se presentan en la Figura 5-17, donde el eje vertical representa la respuesta relativa del WCD, $\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$:

$$\Theta_{\text{Rel}}^{R_c} = \frac{\Theta^{R_c^i}}{\Theta^{R_c^{8,5}}} - 1, \quad (5-15)$$

donde $\Theta^{R_c^{8,5}}$ se corresponde con la rigidez de corte magnético para San Carlos de Bariloche (8,0 GV). Para describir la relación entre $\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$ y R_c , se ajustaron dos polinomios, uno de orden 2 (P2) y otro de orden 3 (P3), tal y como se presenta en la Figura 5-17; los respectivos residuos se presentan en la Figura 5-18. Como se observa, el polinomio de orden 3 describe mejor el comportamiento de $\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$, sin embargo se ha optado por usar el promedio de los dos polinomios como función que describe este último término,

$$\Theta_{\text{Rel}}^{R_c} = \frac{P2^{R_c^i} + P3^{R_c^i}}{2}, \quad (5-16)$$

Entonces, a partir de la evaluación de la función $\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$, encontramos que $R_c(t = 0) = 13,04$ GV, y con esto resolvemos las ecuaciones 5-14 y 5-13.

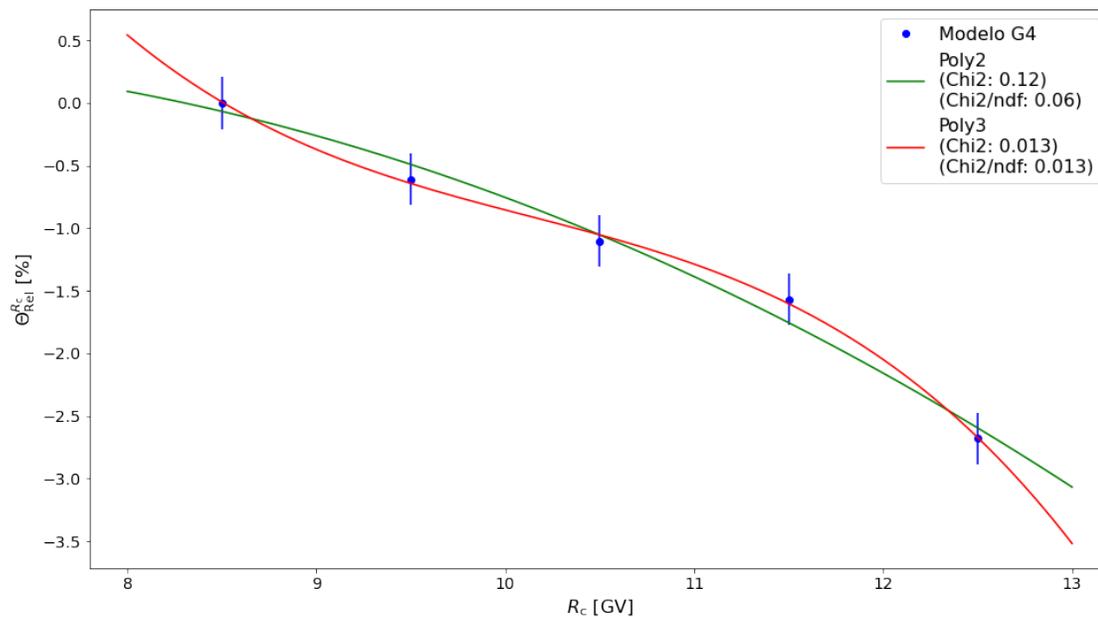


Figura 5-17: Respuesta relativa, $\Theta_{\text{Rel}}^{R_m}$, del WCD Nahuelito (ecuación 5-15) como función de la rigidez de corte (R_c , ecuación 5-9). Aquí se han usado un polinomio de orden 2 (línea verde), y uno de orden 3 (línea roja) para modelar $\Theta_{\text{Rel}}^{R_m}$.

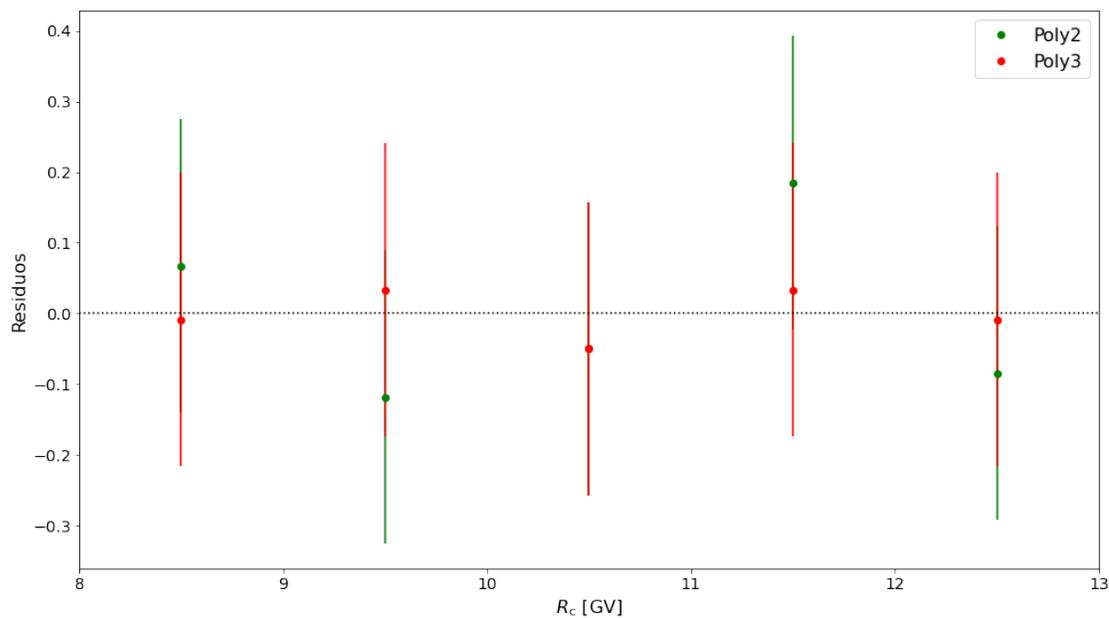


Figura 5-18: Residuos para los ajustes de los polinomios de orden 2 (verde) y orden 3 (rojo).

5.5. Modelado de flujos de primarios para la recuperación de los Fd

En la Figura 5-19 se encuentran los primarios con R_c de 8 GV que dejaron señal en el detector para el flujo de secundarios, los átomos de Hidrógenos y los Helios son los que mas producen primarios, el Cloro es el que menos secundarios produce.

En la Figura 5-20 encontramos la variación relativa para cada uno de los primarios usando la ecuación 5-17, para el mínimo del Fd que estamos estimando el cual es una rigidez de corte de 13 GV observamos como es la variación de los primarios y que en promedio esta en el orden del 10 %, los que mas se ven afectados para esta rigidez son el Cromo, Silicio, Aluminio y Magnesio.

$$\Phi_{\text{pri}}^{R_c} = \frac{\Phi_{\text{pri}}^{10,13}}{\Phi_{\text{pri}}^8} - 1, \quad (5-17)$$

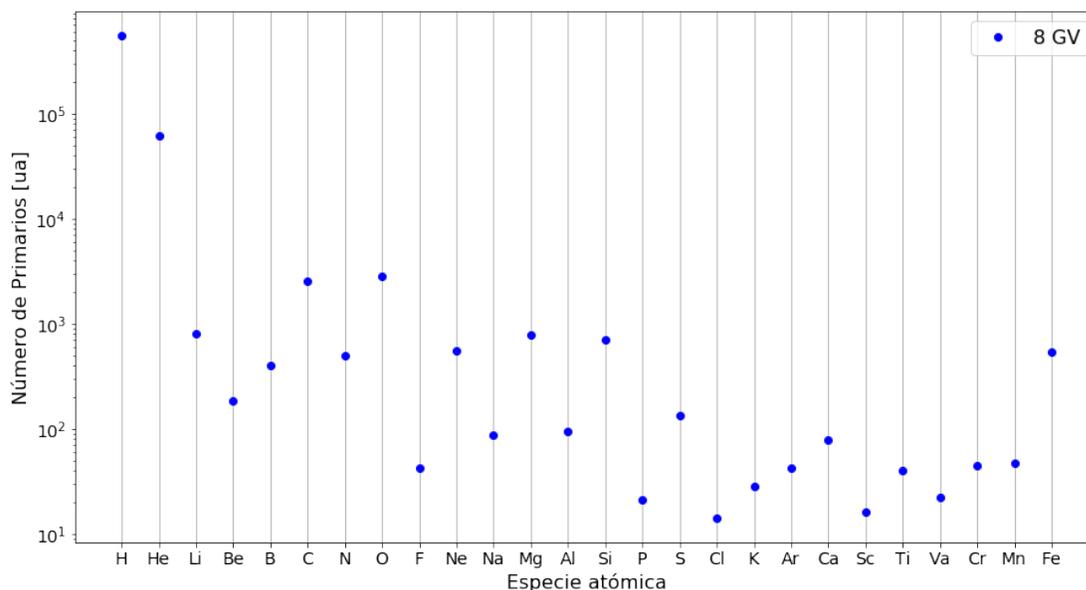


Figura 5-19: Numero de primarios que se producen para cada especie atómica para una rigidez de 8 GV.

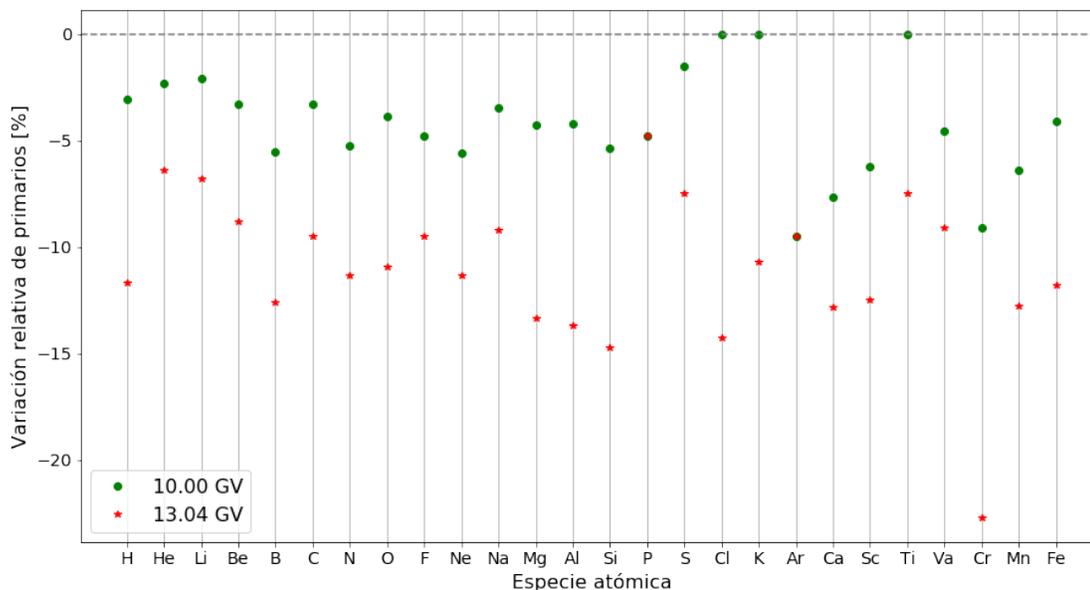


Figura 5-20: Variación de primarios usando la ecuación 5-17, que se producen para cada especie atómica.

5.6. Modelado del flujo de secundarios para la recuperación de los Fd

Para cada uno de estos primarios con R_c de 8 GV, 10 GV y 13 GV producen secundarios a nivel del suelo en la señal del detector. En la Figura 5-21 se observa por cada primario cuantos secundarios se produjeron para una R_c de 8 GV, los Hidrógenos y los Helios son los que mas producen secundarios a nivel del suelo, el Cloro es el que menos secundarios produce.

En la Figura 5-22 encontramos la variación relativa para cada uno de los secundarios usando la ecuación 5-18, para el Hidrógeno se observa mayor variabilidad tanto para la rigidez de 10Gv como para la 13 GV y para el Cloro tiene mayor variabilidad en 13GV pero no para 10 GV.

$$\Phi_{\text{sec}}^{R_c} = \frac{\Phi_{\text{sec}}^{10,13}}{\Phi_{\text{sec}}^8} - 1, \quad (5-18)$$

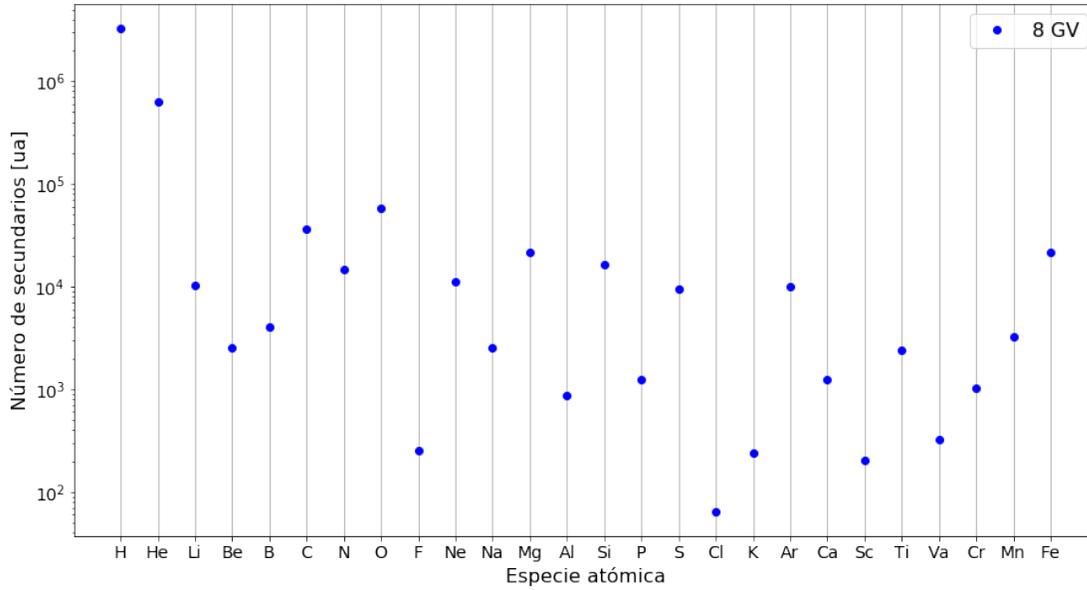


Figura 5-21: Numero de secundarios que se producen para cada especie atómica.

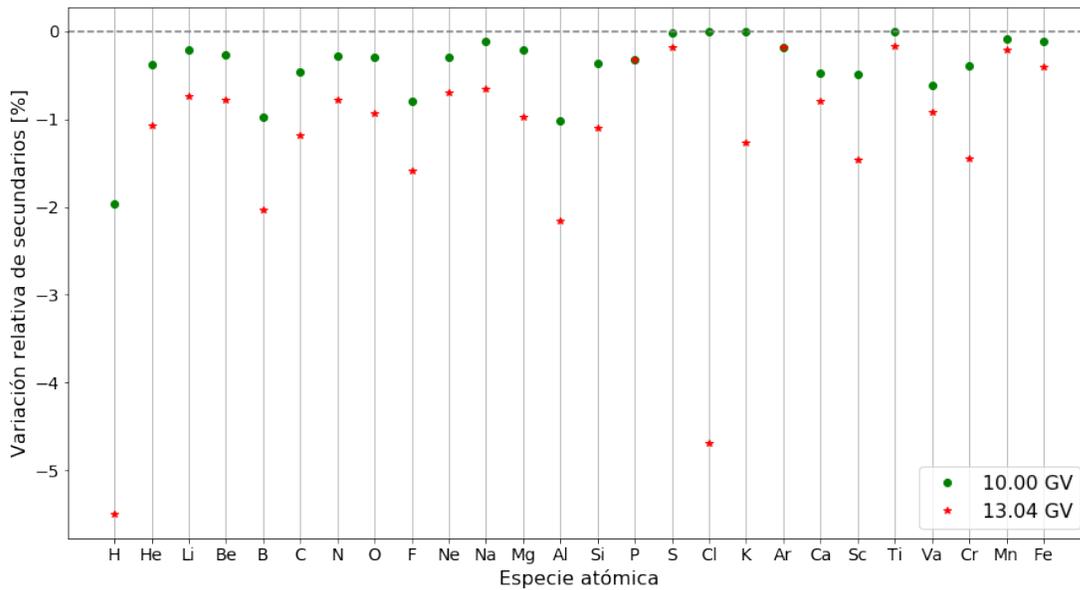


Figura 5-22: Variación de secundarios usando la ecuación 5-18, que se producen para cada especie atómica.

5.7. Respuesta del WCD durante el Fd

Usando la función 5-19, calculamos la evolución de la rigidez de corte R_c , y a partir de ésta estimamos la respuesta del WCD $\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$, durante el Fd. Los resultados se presentan en la Figura 5-23, donde se observa que la respuesta modelada del detector sigue el comportamiento medido del Fd.

$$R_c(t) = -3,83 + 11,83e^{-0,0008(t-418)}, \quad (5-19)$$

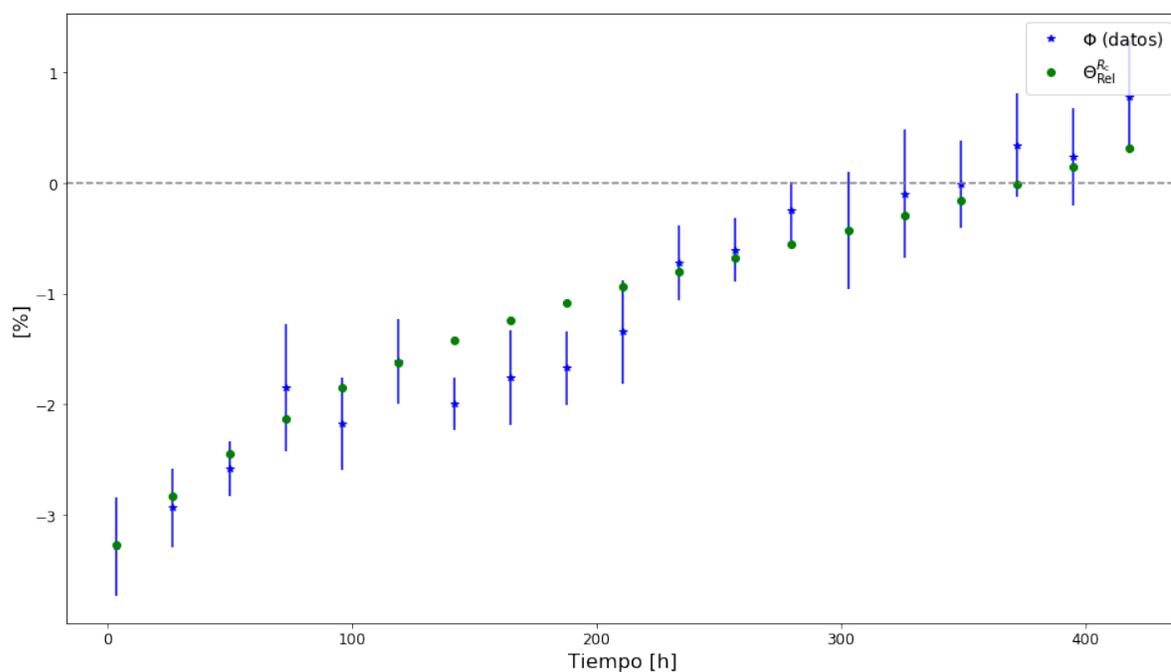


Figura 5-23: Para el WCD Nahuelito: conteo relativo de eventos tipo muon (Φ , puntos azules) registrados, y respuesta relativa estimada del detector ($\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$) durante el Fd de marzo de 2012.

6 Discusión de resultados

Los cálculos realizados a lo largo del presente trabajo se enfocaron en modular los rayos cósmicos que fueron afectados durante el decrecimiento Forbush de marzo del 2012, teniendo como referencia los datos del Observatorio LAGO y del detector de neutrones de Roma.

Primeramente, se calculo el flujo de rayos cósmicos que llegan a la altura de 893 m en San Carlos de Bariloche(Argentina) y Roma con una altura de 60 m, teniendo como resultado el espectro de secundarios para una hora del mes de marzo de 2012 como se muestra en la Figura 4-2, luego realizando una corrección geomagnética a los primarios que generaron este flujo, donde se determinó la diferencia porcentual entre el flujo total corregido y sin corregir Figura 4-4, en esta Figura se observa que la corrección por CG oscila alrededor de un 2.3 %. Sin embargo, a energías cercanas al 0,45 GeV esta corrección crece a un valor cercano al 14 %. Se calcula el término $Dif\%_{F_{sec-hora}}$ definido a partir de la ecuación 4-5 y representa la diferencia porcentual entre el flujo de RC secundarios calculado sin tener en cuenta las correcciones por CG y éste mismo flujo con correcciones por las condiciones del CG para el mes de marzo Figura 4-5, es importante notar que la $Dif\%_{F_{sec-hora}}$ presenta un comportamiento muy similar a la evolución del índice Dst registrado para este mismo mes Figura 4-6. Ahora con el espectro de secundarios se genero el número de fotoelectrones debido al flujo completo y por tipo de partícula Figura 4-7, donde se aprecia que para el segundo pico del histograma se debe a la contribución de los muones, mientras que la primera se debe a la componente electromagnética del flujo.

En segunda instancia, con los datos del detector Nahuelito, se procede a realizar una corrección por presión atmosférica para mejorar el flujo de partículas detectadas, tomando los datos del mes de enero hasta el mes de abril partiendo de la ecuación 5-1, graficando el flujo de partículas cargadas como función de la presión, donde se realiza un ajuste de la función lineal Figura 5-4, teniendo como resultado de la corrección Figura 5-5. Para comprobar la veracidad de este método se realiza el mismo procedimiento para los datos del detector de Roma; donde se observa en la Figura 5-12 la forma del detector de Roma y los datos corregidos del detector Nahuelito. En Figura 5-15 se presenta, la diferencia relativa para la

recuperación del Fd, la cual nos dice que la caída fue de 3,06 %, se observa el promedio por día y ajustando una función exponencial de la forma ecuación (5-8), donde nos interesa el termino de a_3 , que es el valor que se utiliza para la rigidez de corte de la ecuación 5-9, donde se presentan los residuos de este ajuste en la Figura **5-16**; Modelando en G4 la ecuación 5-14 para los valores de 8,5 GV, 9,5 GV, 10,5 GV, 11,5 GV, y 12,5 GV teniendo como respuesta relativa Figura **5-17**, ajustando dos polinomios de orden 2 y orden 3 para modelar $\Theta_{\text{Rel}}^{R_c}$, encontramos que $R_c(t = 0) = 13,04 \text{ GV}$. Luego con estos datos se procede a estimar la señal que se produciría en un WCD del observatorio LAGO. El resultado de esta estimación, se presenta en la Figura **5-23** para el flujo de muones donde se observa que a partir de la ecuación 5-9 se puede calcular la variación del flujo de primarios **5-20** que fueron afectados durante el Fd que es de aproximadamente un 10 % y la variación de secundarios detectados a nivel del suelo **5-22**.

7 Conclusiones

Los resultados obtenidos en el capítulo 4, de los secundarios producidos en una hora en el suelo de San Carlos de Bariloche que se presentan en la Figura 4-2, donde se puede ver como cada secundario como los electrones, muones, fotones, neutrones, contribuye al flujo total. En los resultados de la Figura 4-7, se presentó el histograma de fotoelectrones para el flujo total de partículas y por tipo de partículas, donde se ve cómo contribuye cada una de las componentes del flujo a la curva total en especial el flujo de muones para el segundo pico; curva que se asemeja a las señales características de un detector de este tipo que da la señal en términos de carga ADC.

En este trabajo hemos analizado y corregido por presión atmosférica los datos del detector Nahuelito para el mes de marzo del año 2012. Analizamos los datos del flujo de partículas cargadas y la presión medidos en esta fecha, cuando se observaron variaciones significativas de estos datos. De este análisis obtenemos un coeficiente barométrico igual a 0.3734 %/mba Figura 5-4, donde se observa la corrección Figura 5-5.

Como mejor ajuste de la evolución temporal de los datos corregidos, se observó la función exponencial en la Figura 5-15 y con esta función se propuso una rigidez de corte como función del tiempo, de la forma (Ecuación 5-9), la cual nos permitió entender el Fd a través del modelado computacional, y con esta función pudimos estimar que primarios son los que se ven afectados y en que proporción, para la rigidez de corte de 13 GV observamos como es la variación de los primarios y que en promedio esta en el orden del 10 %, para producir un 3 % en flujo que se detecta a nivel del suelo, Figura 5-20. En la Figura 5-22 observamos como el Fd afecta la variación de secundarios que se producen por especie atómica de primarios.

En la realización de esta investigación pude apropiarme de conocimientos como la interacción de los rayos cósmicos con el clima espacial y sus fenómenos principalmente los Fd; como modular las EAS a través de los códigos de (CORSIKA Y GEAN-4) para obtener así el modulado computacional de los primarios afectados durante un Fd.

Finalmente, se estima la respuesta de WDC para el mes de marzo del 2012. El resultado de esta estimación, se presenta en la Figura **5-23** para el flujo total de muones donde se observa que a partir de la ecuación 5-9, y entender qué rayos cósmicos han sido afectados durante el Fd.

De acuerdo a la investigación realizada, se concluye que estos datos, combinados con los modelos computacionales (CORSIKA Y Geant4), pueden ser usados para estimar qué tipo de rayos cósmicos son afectados durante el paso de la ICME por la Tierra.

Los resultados, códigos y procedimientos desarrollados en este trabajo complementan la cadena de simulaciones de la Colaboración LAGO y sirven como punto de partida para el estudio de estos fenómenos de los decrecimientos Forbush.

Los resultados obtenidos fueron presentados en los siguientes eventos académicos:

- VI Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación RedColsi Nodo Norte de Santander 2020. Fecha: 7 de octubre de 2020
- 5th ComHEP: Colombian Meeting on High Energy Physics. Fecha: 4 de diciembre de 2020
- 3er Encuentro Institucional de Semilleros de Investigación Universidad de Pamplona. Fecha: 2 de diciembre de 2021

Bibliografía

- [1] Mishev, A. L., Usoskin, I. G. Assessment of the radiation environment at commercial jet-flight altitudes during gle 72 on 10 september 2017 using neutron monitor data. *Space Weather*, 16(12), 1921–1929,. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018SW001946>., 2008.
- [2] Committee on the Peaceful Uses of Outer Space Scientific and Technical Subcommittee. *Long-term sustainability of outer space activities ISBN-13: 978-0521457149 ISBN-10: 0521457149*. Working report of expert group C: Space Weather,, 2014.
- [3] Forbush, S. E. World-wide cosmic ray variations, 1937-1952. *Journal of Geophysical Research*, 59(4), 2525–542. <http://dx.doi.org/10.1029/JZ059i004p00525>, 1954.
- [4] Usoskin, I. G., Braun, I., Gladysheva, O. G., Hörandel, J. R., Jämsén, T., Koval-tsov, G. A., et al. Forbush Decreases of Cosmic Rays: Energy Dependence of The Recovery Phase. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A7). <http://doi.wiley.com/10.1029/2007JA012955>.
- [5] Cane, Hilary V. . Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases. *Space Science Reviews*, 93(1-2):55–77, 2000.
- [6] Asorey Hernán. *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación*. Tesis, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, 2012.
- [7] Forbush, S. E. . On the effects in the cosmic-ray intensity observed during recent magnetic storm. *Physical Review*, 51:1108–1109.
- [8] Wibberenz, G., Le Roux, J., Potgieter, M., Bieber, J. Transient effects and disturbed conditions. *Space science reviews*, 83 (1), 309–348,. <http://www.springerlink.com/index/r2r512j776k15440.pdf>, 1998.

- [9] Jamsén, T., Usoskin, I., Raiha, T., Sarkamo, J., Kovaltsov, G. Case study of Forbush decreases: Energy dependence of the recovery. *Advances in Space Research*, 40 (3), 342-347,. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273117707001123>., 2007.
- [10] A. Belov · A. Abunin · M. Abunina · E. Eroshenko · V. Oleneva · V. Yanke · A. Papaioannou · H. Mavromichalaki · N. Gopalswamy · S. Yashiro. Coronal mass ejections and non-recurrent forbush decreases. 2014.
- [11] M. Suárez-Durán. Modulación de rayos cósmicos a nivel del suelo por cambios en el campo geomagnético, para la colaboración lago. Master thesis, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [12] Hudson, H. S., Bougeret, J., Burkepile, J. Coronal Mass Ejections: Overview of Observations. *Space Science Reviews* 123, 13-30. <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-006-9009-x>, 2006.
- [13] Cecilia Gisele Jarne. Estudios de composición primaria en base a distribuciones temporales en el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger. *Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata*, 2015.
- [14] Masías M. Jimmy J. *Transporte de rayos cósmicos en la heliosfera y en el entorno terrestre*. Tesis, Universidad de Buenos Aires, 2017.
- [15] Manuel González. CARACTERIZACIÓN DE UN DETECTOR DE CENTELLEO PARA DETERMINACIÓN DE COMPOSICIÓN DE RAYOS CÓSMICOS PRIMARIOS EN EL OBSERVATORIO PIERRE AUGER. *Bariloche*, 2012.
- [16] P. A. Zyla et al. Review of Particle Physics. *PTEP*, 2020(8):083C01, 2020.
- [17] ICECUBE. Cosmic-ray Energy Spectrum. <https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/analyses/cosmic-ray-energy-spectrum>, 2013.
- [18] A. Letessier-Selvon and T. Stanev. Ultrahigh energy cosmic rays. *Rev. Mod. Phys.*, 83:907-942, Sep 2011.
- [19] Boezio, M., Mocchiutti, E. Chemical composition of galactic cosmic rays with space experiments. *stroparticle Physics*, 39 40 (0), 95 – 108,. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650512001119>., 2012.
- [20] Lagoida, I. A. ; Voronov, S. A. ; Mikhailov, V. V. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 798, Issue 1, article id. 012038 . 10.1088/1742-6596/798/1/012038, 2017.

-
- [21] I. G. Usoskin, I. Braun, O. G. Gladysheva, J. R. Hörandel, T. Jämsén, G. A. Kovaltsov, and S. A. Starodubtsev. Forbush Decreases of Cosmic Rays: Energy Dependence of The Recovery Phase. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A7), jul 2008.
- [22] Hernan Asorey, Luis A. Núñez, and Mauricio Suárez-Durán. Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain. *Space Weather*, 16(5):461–475, 2018.
- [23] A. S. Petukhova, I. S. Petukhov, and S. I. Petukhov. Theory of the formation of forbush decrease in a magnetic cloud: Dependence of forbush decrease characteristics on magnetic cloud parameters. *The Astrophysical Journal*, 880(1):17, jul 2019.
- [24] A. Gonzalez-Esparza, Jorge Vega, J. Velázquez, C. Pacheco, and L. Rodríguez. Clima espacial y su efecto en la red eléctrica nacional. 07 2017.
- [25] NOAA Space Weather Scales. <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/>.
- [26] National Weather Service/Space Weather Prediction Center:. <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/>.
- [27] M. Suárez-Durán. *VARIACIONES DEL FLUJO DE RADIACIÓN CÓSMICA EN ESCENARIOS GEOFÍSICOS Y DE CLIMA ESPACIAL*. Bucaramanga, Colombia, 2019.
- [28] Observatorio LAGO: . El Gigante Latinoamericano usando las Redes Avanzada. <http://www.bella-programme.eu/index.php/es/smart-search/336-lago-observatory-the-latin-american-giant-using-advanced-networks>, 2020.
- [29] Asorey, H., Dasso, S., . the LAGO Collaboration. LAGO: the latin american giant observatory. En: The 34th International Cosmic Ray Conference,. PoS(ICRC2015), 2015.
- [30] H. Asorey and S. Dasso and L. A. Núñez and Y. Pérez and C. Sarmiento-Cano and M. Suárez-Durán . for the LAGO Collaboration. The LAGO space weather program: Directional geomagnetic effects, background fluence calculations and multispectral data analysis. En: The 34th International Cosmic Ray Conference, tomo. PoS(ICRC2015), 2015.
- [31] Y. Perez. *Aplicaciones en Meteorología Espacial de los Datos del Proyecto LAGO*. Mérida, Venezuela, 2015.

- [32] V., J. J. Cerenkov Radiation and its applications. Great Britain: Pergamon Press,. <https://archive.org/details/cerenkovradiatio030980mbp/>, 1958.
- [33] Andrei Enrique Jaimes Motta. *Estimación De La Respuesta De Un Detector Cherenkov De Agua Al Fondo De Rayos Cósmicos En Bucaramanga (956 M S.N.M)*. Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2018.
- [34] Randy M. Russell. Rayos Cósmicos. https://www.windows2universe.org/physical_science/physics/atom_particle/cosmic_rays.html&lang=sp, 2008.
- [35] M. Suárez-Durán. *Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar*. Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2011.
- [36] K Nakamura, K. Hagiwara, K. Hikasa, H. Murayama, and Particle Data Group 2010. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 37(7A):075021, July 2010.
- [37] Physics of Space Plasmas: An Introduction. Westview Press,. <http://goo.gl/4DGNVE>, 2003.
- [38] of Geomagnetism, I. A., Aeronomy, W. G. V.-M. P. m., Finlay, S., C. C. and Maus, Beggan, C. D., Bondar, T. N., Chambodut, A.,. Bondar, T. N., Chambodut, A., et al. International geomagnetic reference field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183 (3), 1216–1230,. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x>, 2010.
- [39] Grupen C. (2020) Primary Cosmic Rays. In: Astroparticle Physics. Undergraduate Texts in Physics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27339-2_6.
- [40] V.L. GINZBURG and S.I. SYROVATSKII. The Origin of Cosmic Rays. CHAPTER I - PRIMARY COSMIC RAYS ON THE EARTH, 5–52.1964. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-013526-7.50008-6>.
- [41] Viera de Souza Henrique. Estudo da atividade solar com detectores de partículas situados em solo terrestre. Master's thesis, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- [42] Öztürk, M. K. trajectories of charged particles trapped in earth's magnetic field. *American Journal of Physics*, 80 (5), 420–428,. <http://scitation.aip.org/content/aapt/journal/ajp/80/5/10.1119/1.3684537>, 2012.

-
- [43] Heck, D. *report fzka 6019, forschungszentrum karlsruhe*. et al. Corsika: A monte carlo code to simulate extensive air shower. Capdevielle, J., Schatz, G., Thouw, T., 1998.
- [44] Heck, D. Pierog, T. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide. 7 a ed. Karlsruhe, Germany,. [http://www-ik.fzk.de/corsika/.](http://www-ik.fzk.de/corsika/), 2013.
- [45] of Geomagnetism, I. A. Aeronomy, W. G. V.-M. International geomagnetic reference field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183 (3), 1216–1230,. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365246X.2010.04804.x.>, 2010.
- [46] NMDB: the Neutron Monitor Database. Real-Time Database for high-resolution Neutron Monitor measurements. <https://www.nmdb.eu/?q=node%2F19>, 2021.
- [47] Steigies, C. T. NMDB Event Search Tool (NEST),. <http://www.nmdb.eu/nest/search.php>, 2008.