

**INSTALACIÓN DE UN DETECTOR CHERENKOV
DE AGUA PARA LA DETECCIÓN DE TRAZAS
DE RAYOS CÓSMICOS A 956 METROS SOBRE EL
NIVEL DEL MAR**

MAURICIO SUÁREZ DURÁN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2011**

**INSTALACIÓN DE UN DETECTOR CHERENKOV
DE AGUA PARA LA DETECCIÓN DE TRAZAS
DE RAYOS CÓSMICOS A 956 METROS SOBRE EL
NIVEL DEL MAR**

**Trabajo de Grado como requisito para optar al título
de Físico:
MAURICIO SUÁREZ DURÁN**

**Director:
Ph.D LUIS A. NUÑEZ**

**Codirector:
Ph.D MISAEL ROSALES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2011**

*Estos años de estudio, resumidos en el presente trabajo,
están completamente dedicados, a lo más valioso que tengo en
la vida...*

MI FAMILIA.

Agradecimientos

A DIOS por Bendecirme con una familia tan espectacular.

Gracias papás por su apoyo incondicional y a mis hermanas por su comprensión.

Gracias a los mejores amigos que DIOS me ha regalado, Víctor, Chucho y el Pakar, gracias por sus palabras, por siempre creer en mí y sobre principalmente por estar ahí cuando el ánimo decae.

Gracias a Marilyn por su apoyo y amor.

Gracias a mis compañeros de carrera, especialmente al Toshiba, al Chamín y la Chuy, gracias por su apoyo e incondicionalidad.

Al grupo Halley, especialmente a Jimmy Mantilla y Miguelangel Sandoval, por mantener viva la astronomía en la UIS, pese a las dificultades.

Gracias mis compañeros del Halley, especialmente a Vladimir Peña, por apoyarme y creer en mí.

A Rolando y Christian por alimentar día a día las ganas de triunfar y hacer que las cosas valgan la pena.

A mis profesores, especialmente al profesor Arturo Plata, gracias.

Profesor Misael Rosales, Gracias por enseñarme a Hacer Bien las cosas, y por todo el apoyo que me brindo durante la realización de éste trabajo, Gracias.

Profesor Luis Nuñez, GRACIAS, MUCHAS GRACIAS por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, Gracias por enseñarme que todo es posible, y que lo único que falta es café para no dormir. GRACIAS por creer en mí y principalmente, GRACIAS por enseñarme que la física, más que una profesión o un trabajo, es pasión y ganas y de Hacer las cosas y Hacerlas Bien.

DIOS, Gracias por la oportunidad de vivir esté pregrado.

Gracias...

M_S_D...

Índice general

1. Introducción	13
2. Rayos Cósmicos	15
2.1. Espectro de rayos cósmicos	16
2.2. Fuentes de rayos cósmicos	16
2.2.1. Solar	16
2.2.2. Extrasolares	18
2.3. Cascadas aéreas extensas	20
2.3.1. Decaimiento de hadrones	20
2.3.2. Producción de pares electrón-positrón	21
2.3.3. Atmósfera terrestre	22
2.3.4. Estructura general de EAS	23
2.4. Flujo de muones a nivel del mar	25
3. Proyecto LAGO	28
4. Detector Cherenkov de agua	31
4.1. Radiación Cherenkov	31
4.2. Tanque detector	32
4.2.1. Difusor Interno	33
4.2.2. Aislante Fotónico	33
4.2.3. Agua	33
4.3. Electrónica	35
4.3.1. Fotomultiplicador	36
4.3.2. Estación local de adquisición	38
5. Instalación	42
5.1. Purificación de Agua	42
5.2. Construcción del tanque	43
5.3. Electrónica	46
6. Calibración	47
6.1. Región estable de trabajo para el PMT	47
6.2. Equivalente Muon Vertical	48
7. Resultados	53
7.1. Saturación en histogramas de carga y pico	53
7.2. Flujo de muones a 956 msnm	54
7.3. Actividad solar	55

Índice general

7.4. Correlación entre eventos sísmicos y flujo de Muones verticales	56
8. Conclusiones	60
A. Características PMT	62
B. Estimación de calidad de agua y Tyvek	63
Bibliografía	69

Índice de figuras

2.1. Espectro de energía para flujo de rayos cósmicos	17
2.2. Modulación de RC	18
2.3. Emisiones solares	19
2.4. Desarrollo de una cascada hadrónica	22
2.5. Desarrollo de una cascada electromagnética	23
2.6. Esquema del modelo estándar de atmósfera.	24
2.7. Perfil de densidad y presión para la atmósfera terrestre.	24
2.8. Profundidad atmosférica en función de la altitud	25
2.9. Estructura general de una EAS	26
2.10. Intensidad vertical diferencial de partículas en función de la profundidad atmosférica.	26
2.11. Flujo de muones a nivel del mar	27
3.1. Area de detección en función de la altitud.	29
3.2. Flujo base de partículas en función de la altura sobre el nivel mar	30
4.1. Radiación Cherenkov	33
4.2. Número de fotones Cherenkov en diferentes medios	34
4.3. Difusor interno	35
4.4. Aislante fotónico	35
4.5. Esquema de un detector Cherenkov de agua.	36
4.6. Esquema del funcionamiento de un PMT.	37
4.7. Dimensiones e imagen del PMT 9353KB	37
4.8. Dimensiones y foto del PMT 9353KB	38
4.9. Pulso característico entregado por el PMT 9353KB.	38
4.10. Estación local de adquisición.	39
4.11. Histograma tipo pico.	40
4.12. Histograma tipo carga	40
4.13. Esquema de funcionamiento de un WCD.	41
5.1. Contenedores de agua en purificación.	42
5.2. Proceso de purificación de agua	43
5.3. Absorbancia para el agua usada en Guane-1.	43
5.4. Trazas principales en Guane-1.	44
5.5. Tanque Detector	45
5.6. Tapa Tanque detector.	45
5.7. Laboratorio.	46
6.1. Región estable del PMT.	48

Índice de figuras

6.2. Pulso de amplitud simulado	50
6.3. Simulación de muones verticales	52
6.4. Simulación de muones laterales	52
7.1. Región de saturación	54
7.2. Flujo de muones verticales	55
7.3. Flujo de muones laterales	56
7.4. Actividad solar	56
7.5. Flujo de eventos al medio día	57
7.6. Flujo de eventos a media noche	57
7.7. Fallas Boconó y Santa Marta	58
7.8. Suma acumulada de MV y eventos sísmicos (magnitud mayor a 4.0) . .	59
7.9. Suma acumulada de MV y eventos sísmicos (magnitud mayor a 3.0) . .	59
B.1. Regiones características en histogramas tipo carga	64
B.2. Ajuste por regiones para histograma tipo carga	65
B.3. Histograma simulado, Ag 20 y Rf 0.94l	67
B.4. Histograma simulado, Ag 22 y Rf 0.94	68

RESUMEN

TÍTULO

INSTALACIÓN DE UN DETECTOR CHERENKOV DE AGUA PARA LA DETECCIÓN DE TRAZAS DE RAYOS CÓSMICOS A 956 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR ¹.

AUTOR

SUÁREZ DURÁN, Mauricio²

PALABRAS CLAVE

Rayos cósmicos, Radiación Cherenkov.

DESCRIPCIÓN

El presente trabajo contiene los aspectos teóricos y técnicos necesarios para la instalación de un detector Cherenkov de agua (Guane-1) en la Universidad Industrial de Santander (UIS), detector que le permite a la UIS ser parte activa de la colaboración LAGO y ser pionera en el estudio de rayos cósmicos empleando este tipo de detectores. Inicialmente, se describe que son los rayos cósmicos, su física y la importancia que tienen en el campo de la física de altas energías y la astrofísica de partículas. A su mismo se mencionan los detectores actuales más influyentes en éste campo, destacándose la influencia del observatorio Pierre Auger. Posteriormente se presentan las características principales de las cascadas atmosféricas extensas y su estructura y flujo de partículas como función de la altura sobre el nivel del mar. Posteriormente se detalla la física y características principales de un detector Cherenkov de agua, resaltando como aspecto importante la calidad de agua en términos de la absorción. Luego se describe el procedimiento de instalación y calibración, empleando para esto último el software LAGOSim, suministrado por la colaboración LAGO.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos con Guane-1, destacándose la medición del flujo de muones verticales, $0.0031 \text{ muones} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ a 956 msnm, y el aspecto negativo de emplear geometría cilíndricas en este tipo de detectores.

¹Trabajo de Grado.

²Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis A. Nuñez. (Director), Misael Rosales (Codirector).

SUMMARY

TITLE

INSTALLATION OF A WATER CHERENKOV DETECTOR FOR TRACE DETECTION OF COSMIC RAYS AT 956 METERS ABOVE SEA LEVEL³.

AUTHOR

SUÁREZ DURÁN, Mauricio⁴

KEY WORDS

Cosmic ray, Cherenkov radiation.

ABSTRACT

This thesis have the necessary theoretic and technical aspects about the installation for a water Cherenkov detector (Guane-1) in the Universidad Industrial de Santander, this detector allows to the UIS be active part of the LAGO collaboration.

Initially, it describes what are cosmic rays, their physical and their importance in the field of high energy physics and particle astrophysics. The most influential present detectors in this field are mentioned, highlighting the influence of Pierre Auger observatory. Then I present the main characteristics of the extensive atmospheric shower, their structure and particle flux a function of height above sea level. Subsequently, I detail the physics and main characteristics of a water Cherenkov detector, emphasizing an important aspect of water quality, in terms of absorption. Then I describe the installation procedure and calibration, for the latter, I use LAGOSim software, provided by the collaboration LAGO.

Finally, I present the results obtained with Guane-1, highlighting the flow measurement of vertical muons, it's $0.0031 \text{ muones} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ at 956 masl, and the downside of using cylindrical geometry in this type of detectors.

³Undergraduate work.

⁴Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis A. Nuñez. (Director), Misael Rosales (Codirector).

CAPÍTULO 1

Introducción

Los rayos cósmicos (RC) son partículas como hadrones, núcleos atómicos, fotones, con energías que pueden superar los $10^{19}eV$ ¹, que se generan fuera de la atmósfera terrestre. Se detectaron por primera vez en 1912 por el físico austriaco Victor F. Hess, quién les denominó inicialmente radiación cósmica, y confirmados por Köhlerster en 1913. Fue Robert Andrew Millikan, en 1925, quién les acuñó el término de rayos cósmicos².

Desde entonces el estudio de estas partículas se ha convertido en tema principal de investigación, no sólo porque permiten dar pistas sobre la naturaleza de fenómenos astrofísicos de alta energía, como lo son explosiones supernovas, interacción de estrellas de neutrones, núcleos activos de galaxias, etc., sino porque además facilita la comprensión de procesos físicos de alta energía como interacciones y decaimientos de partículas elementales. Un ejemplo importante del estudio de los RC son las investigaciones hechas por Pierre Auger en 1938, que llevaron a introducir el término de *Cascadas Aéreas Extensas* (EAS, por sus siglas en inglés) para describir el resultado de la interacción de una partícula cargada con la atmósfera terrestre. Esta interacción genera una cascada, o chubasco, de nuevas partículas que puede llegar a extenderse hasta 36 km^2 a una altura cercana al nivel del mar. Dentro del estudio de los RC, se ha encontrado una clase de explosión de energía en forma de rayos gamma, la cual se ha denominado explosiones de rayos gamma, o GRB³. Estas explosiones son eventos que emiten enormes cantidades de energía (superior a $10^{20}eV$) en intervalos de tiempo que pueden durar hasta 2 s. Con el objetivo de aprender más sobre los GRB y la Física que hay detrás de ellos, se han construido grandes observatorios, tanto espaciales, como por ejemplo el telescopio Swift⁴), como terrestres.

Dentro de los observatorios terrestres, se destaca el Observatorio Pierre Auger^[1], instalado en la ciudad de Malarge, Argentina⁵, por ser el de mayor extensión. Este observatorio cuenta con 1600 detectores, distribuidos en un área de 3000km^2 , dedicados a la detección de RC y GRB. Existen otros observatorios terrestres a nivel mundial, completamente dedicados al estudio de RC, entre ellos está AGASA⁶, en Japón, y HAWC⁷,

¹ $1eV=6,2415 * 10^{-18}$ Julios.

²<http://chronicle.uchicago.edu/070104/millikan.shtml>.

³Gamma Ray Bursts.

⁴<http://heasarc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>.

⁵<http://www.auger.org.ar/>.

⁶<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>.

⁷<http://hawc.umd.edu/>.

en México.

En Latinoamérica, y a partir de la experiencia de Argentina, ha surgido un gran interés por el estudio de RC, usando observatorios con detectores Cherenkov de Agua. Estos observatorios se caracterizan por su bajo costo de implementación y alta calidad científica. De este interés surge la colaboración LAGO⁸, Large Aperture GRB Observatory[2], integrada por representantes de Argentina, México, Venezuela, Bolivia, Perú, Guatemala, Ecuador, y a partir de la ejecución del presente trabajo, Colombia. El objetivo de LAGO es la detección de GRB, además de impulsar el estudio de física de altas energías empleando detectores Cherenkov de agua, que son diseñados e implementados por cada uno de sus equipos de trabajo. LAGO facilita el respaldo técnico que es requerido para este tipo de observatorios, además de permitir el acceso directo a los datos que cada uno produce.

Colombia ha ingresado en esta colaboración por medio del grupo de trabajo GT3 del Centro Virtual de Altos Estudios en Altas Energías, CeVALE2⁹, instalando un detector Cherenkov de Agua en el campus de la Universidad Industrial de Santander¹⁰ con asesoría de la Universidad de los Andes de Venezuela y el Observatorio Pierre Auger de Argentina. Este trabajo presenta los conceptos físicos fundamentales (capítulos 2, 3, 4 y 5) que se requieren para el proceso de implementar un detector Cherenkov de Agua, capaz de registrar las trazas de partículas provenientes de RC, así como también, la calibración y caracterización de los datos producidos por éste (capítulos 6 y 7).

⁸<http://particulas.cnea.gov.ar/experiments/lago/>.

⁹<http://cevale2.uis.edu.co/>.

¹⁰Terraza del grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales, Ed. Ciencias Humanas.

CAPÍTULO 2

Rayos Cósmicos

Los Rayos Cósmicos (RC) son partículas que se generan en diversos procesos astrofísicos tales como explosiones supernova, pulsares, fulguraciones solares, entre otros. Estas partículas pueden ser hadrones, leptones o rayos gamma. Las primeras detecciones de RC fueron producto del estudio de radiación residual en gases aislados. En principio, este gas bajo condiciones de aislamiento, debe ser totalmente no conductor; sin embargo diferentes experimentos (entre ellos con rayos X) mostraban la presencia de cierta ionización remanente, para lo cual, algunas teorías sugerían que esto se debía a la interacción con las paredes del recipiente o a ionización espontánea producida por el movimiento térmico de las moléculas[3].

En 1912 Victor Hess, realizando viajes en globo, utilizó un electroscopio para medir el grado de ionización en función de la altura sobre el nivel del mar, encontrando una relación directa entre estos parámetros. Este importante descubrimiento fue el primer argumento físico bajo el cual se sustentó la teoría que la ionización residual de gases aislados es producto de radiación proveniente de fuera de la Tierra¹, es decir, de origen cósmico².

En los años de 1930 y 1940, las cámaras de niebla permitieron estudiar algunas de las partículas que componen los RC, establecer sus trayectorias y contribuir al estudio de las partículas elementales, por ejemplo, al descubrir la existencia de partículas como el mesón μ (Neddemeyer y Anderson) en 1934, y el mesón π [4] en 1945.

En la actualidad, el estudio de rayos cósmicos da pistas de cómo los procesos astrofísicos llegan a generar este tipo de partículas, con un espectro de energía que va desde los eV hasta superar los EeV³. Este espectro energético se produce por diversos mecanismos físicos, destacándose la radiación Bremsstrahlung, radiación sincrotrón y el efecto Compton inverso, para radiaciones de baja energía (menores a 10^{15} eV). Sin embargo, estos mecanismos no son suficientes para explicar la producción de partículas con energías superiores a 10^{18} eV, razón por la cual los RC despiertan gran pasión e intriga por comprender su naturaleza y la física que envuelven, por eso la importancia de detectarlos y estudiarlos.

¹Artículo publicado por Victor F. Hess en Proceedings of the Viennese Academy of Sciences, 1913.

²Nombre sugerido por Millikan posteriormente en 1925.

³exa, 10^{18} .

2.1. Espectro de rayos cósmicos

2.1. Espectro de rayos cósmicos

El origen de los RC es atribuido a diversos procesos físicos en el universo. La mayoría de estos procesos se caracterizan por las enormes cantidades de energía con la que lanzan al espacio distintos tipos de partículas, tales como hadrones, núcleos atómicos, fotones, neutrinos, leptones, rayos gamma, etc.

El flujo de RC que llega a la Tierra, se caracteriza por seguir una ley de potencias de la forma

$$\left(\frac{dN}{dE}\right) \simeq E^{-\alpha}, \quad (2.1)$$

donde N representa el flujo de RC y E la energía de las partículas[5]. El exponente α no es un parámetro constante, presentando tres cambios, dos de los cuales reciben el nombre de “rodillas” y el tercero “tobillo”. La primera rodilla se presenta en 10^{15} eV para un cambio de α de -2.7 a -3.1 . La segunda rodilla se ubica en 10^{17} eV, con un cambio de α de -3.1 a -3.3 . La producción de partículas con estas energías no es muy clara aún, sin embargo, se le atribuye principalmente a procesos de tipo galáctico como núcleos activos de galaxia. Para energías superiores a 10^{18} eV, α pasa a ser nuevamente -2.7 , siendo este punto el denominado “tobillo”, punto de gran importancia para el estudio de Física de altas energías porque no son claros los procesos de producción de partículas, capaces de generar tales energías. La figura 2.1 muestra el flujo de RC, destacándose estos cambios de pendiente.

2.2. Fuentes de rayos cósmicos

Las diversas fuentes de RC se clasifican en dos grandes grupos, solar para aquéllas que provienen de nuestra estrella, el Sol, y extrasolares para los que se producen fuera de éste.

2.2.1. Solar

El Sol, por ser la estrella más cercana a nuestro planeta, es la principal fuente de radiación a la que se expone la Tierra. Los mecanismos que permiten estudiar la producción de RC solares son las eyecciones de masa coronal (CME, por sus siglas en inglés) y las ráfagas solares, que emiten radiación en un amplio rango del espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos X, expulsando partículas con energías que pueden llegar al orden de MeV[7]. Estas partículas, son eyectadas al espacio, conformando el viento solar, que modula el flujo de RC que llegan a la Tierra. Esta modulación

2.2. Fuentes de rayos cósmicos

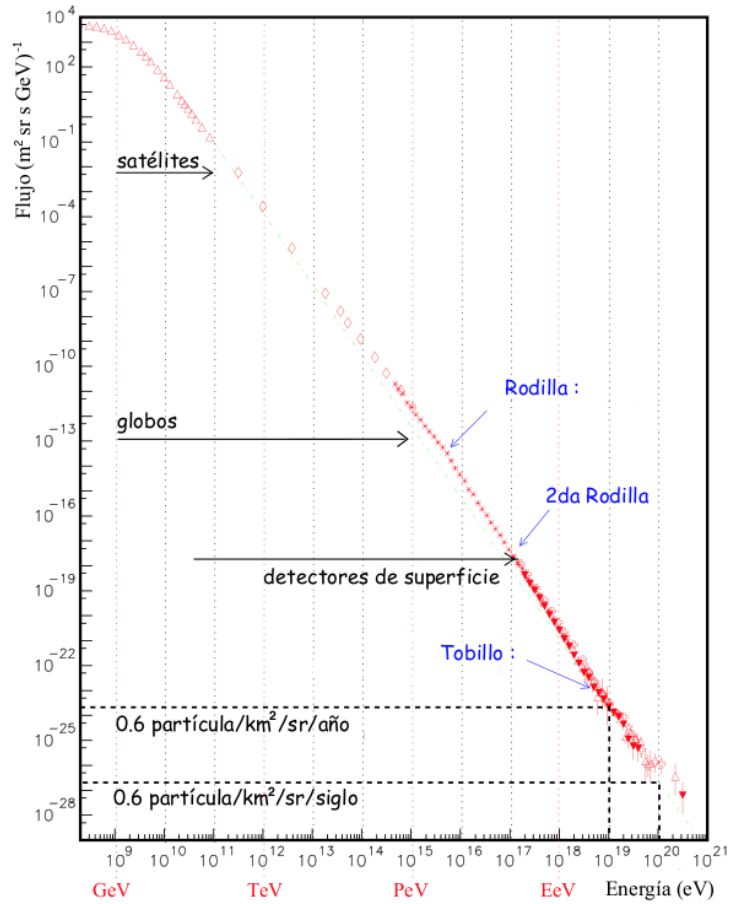


Figura 2.1: *Flujo de RC en función de su espectro energético. Satélites, globos y detectores de superficie, marcan las energías para las cuales estos instrumentos son eficientes en la detección directa de RC*[6].

es afectada por el ciclo solar de 11 años, disminuyendo el flujo de partículas cuando se encuentra en el máximo y aumentando cuando esta en el mínimo[8] (ver figura 2.2). El primero de los mecanismos de producción de partículas, CME, se caracteriza por ser eventos en los cuales el Sol llega a emitir entre 5×10^{12} kg y 5×10^{13} kg de material⁴ con velocidades en un rango de 400kms^{-1} a 1000kms^{-1} (ver figura 2.3a). Los eventos CME aparecen, en promedio, de 3.5 por día cuando el Sol está en su ciclo activo de manchas solares (11 años) y de 1 cada cinco días durante el período de mínimo solar[7].

A diferencia de los CME, los eventos de ráfaga solar pueden liberar energías entre 10^{17} J y 10^{25} J, en intervalos de tiempo de milisegundos a más de una hora (ver figura 2.3b). La radiación liberada en estos eventos va desde longitudes de onda del orden de km (ondas de radio no térmicas debidas a radiación sincrotrón) hasta longitudes de onda corta, correspondiente a rayos X y rayos gamma de alta energía (energías de MeV,

⁴Protones, Helio, electrones, Oxígeno, entre otros.

2.2. Fuentes de rayos cósmicos

por medio de reacciones de espaleación⁵)[7].

A medida que las partículas cargadas se acercan a la Tierra, éstas interactúan con el campo magnético terrestre y forman lo que se conoce como cinturones de Van Allen, zonas de radiación que se ubican entre 650 km y 650000 km sobre la superficie terrestre[9]. Estos cinturones se caracterizan por tener zonas intensas de protones, con energías entre los 10 y los 50 MeV. Por otra parte, partículas con energías del orden de los keV producen las conocidas auroras boreales. Por encima de una altura de 250 km, en el Atlántico Sur, cerca de la costa de Brasil, existe una región de campo magnético terrestre anómala.

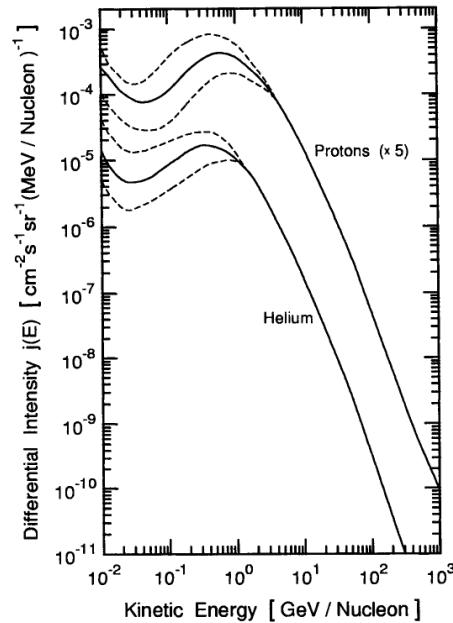


Figura 2.2: Espectro para la intensidad diferencial (*Differential Intensity*) de la energía cinética (*Kinetic Energy*) para RC, protones y núcleos de Helio. La línea sólida muestra el promedio del flujo espectral. Los efectos de modulación solar se ilustran con la línea discontinua, la superior muestra el cambio durante los mínimos solares y la inferior durante los máximos solares. La curva para el espectro de protones está multiplicada por un factor 5, con el objetivo de evitar superposición con la línea espectral de Helio[8].

2.2.2. Extrasolares

Las fuentes de RC extrasolares son aquéllas que se ubican fuera de nuestro sistema solar y en la actualidad se han convertido en las fuentes más probables para la producción de RC de alta energía ($E > 10^6 \text{eV}$)[6].

⁵Fragmentación de núcleos atómicos en núcleos más livianos.

2.2. Fuentes de rayos cósmicos

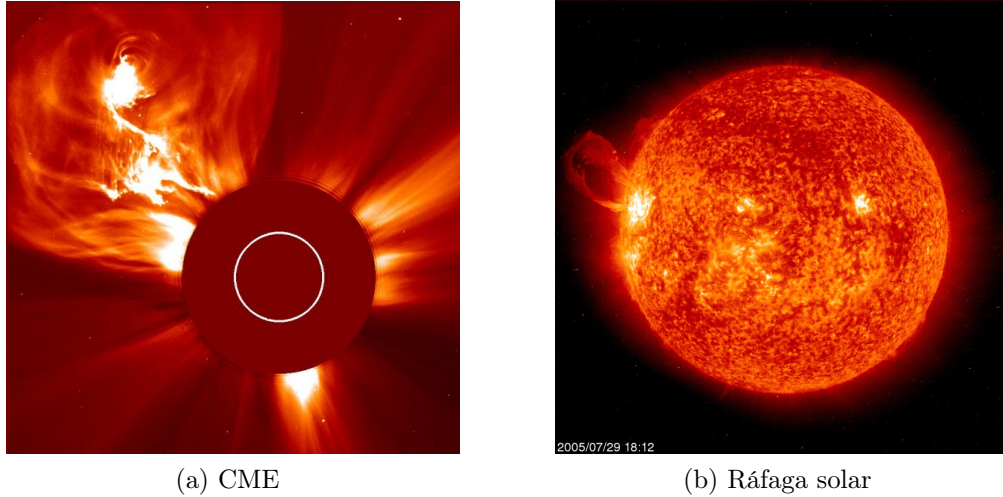


Figura 2.3: (a) Eyección de masa coronal registrada por el instrumento *LASCO C2* del telescopio *SOHO* el 04 de Junio de 2002. El círculo blanco indica el tamaño del Sol. (b) Ráfaga solar observada el 25 de Julio de 2005 por el telescopio *SOHO*. Imágenes tomadas de la galería de imágenes del telescopio *SOHO*, <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/sunparts.html>

Supernovas

Las supernovas son explosiones cataclísmicas de estrellas al final de su existencia. Estas explosiones implican el colapso de los núcleos, que a su vez resultan en la detonación de estrellas masivas, de las que gran parte de su material es eyectado al espacio, llegando a liberar energías del orden de 10^{44} J. Este material expulsado pasa a ser parte del medio interestelar y se denomina remanente de supernova. El paso de partículas cargadas, con velocidades relativistas, por este remanente genera radiación sincrotrón de altas frecuencias, que pone en evidencia a las supernovas como fuentes de RC.

Núcleos activos de galaxia

Los núcleos activos de galaxias (AGN por sus siglas en inglés) son galaxias que se caracterizan por tener núcleos muy luminosos, del orden de 10^{37} W, y por presentar emisiones no térmicas de energía, con un excesivo flujo en rayos X, comparado con galaxias normales. Presentan un disco de acreción en el cual las partículas cargadas caen a tan alta velocidad que generan emisiones de radiación en forma de jet.

Quasars

Los quasars (nombre que viene del inglés Quasi Stellar Objects) son objetos extra galácticos con un tamaño angular muy pequeño, que se ubican a millones de años luz

2.3. Cascadas aéreas extensas

respecto de la Tierra. Fueron descubiertos en los años 60 por su fuerte emisión en ondas de radio que les hacían parecer como estrellas, de ahí deriva su nombre. Debido a la enorme distancia a la que se encuentran y la fuerte emisión que se les detecta, los hace objetos altamente energéticos, llegando a alcanzar luminosidades entre los 10^{39} y 10^{41} W.

2.3. Cascadas aéreas extensas

Las cascadas aéreas extensas (EAS, por sus siglas en inglés) son el resultado de la interacción de un RC (en adelante, partícula primaria) con las moléculas presentes en la atmósfera terrestre, tales como N_2 , O_2 y CO_2 ; esta interacción genera una serie de nuevas partículas de menor energía (denominadas partículas secundarias) que se propagan hacia la superficie terrestre. Durante el avance de las partículas secundarias se generan nuevas interacciones, causando una reacción en cadena que produce nuevas partículas. La abundancia relativa del tipo de partícula (hadrones y pares electrón-positrón, principalmente) en función de la altura sobre el nivel del mar depende de dos factores principales, el tiempo de vida media de cada partícula⁶ y la densidad de material presente en la atmósfera. El primer factor corresponde al decaimiento de partículas y la producción de pares electrón-positrón, mientras que el segundo, se describe a partir del modelo estándar de atmósfera.

2.3.1. Decaimiento de hadrones

Partículas fundamentales cuya principal característica es la interacción por medio de canal fuerte y el corto tiempo de vida media, entre 10^{-23} s y 10^{-22} s. A este grupo de partículas pertenecen los núcleos atómicos, los kaones k , los π mesones, los hiperones, las resonancias bariónicas, entre otras. La interacción entre un hadrón y un núcleo atómico genera k mesones, los cuales decaen en π mesones (π^+ , π^- , π^0), cuyo tiempo de vida media en reposo es del orden de $2.60 \cdot 10^{-8}$ s[10]. Los piones cargados (π^+ , π^-) decaen en muones cargados (μ^+ , μ^- , respectivamente), y neutrinos ν_μ y $\bar{\nu}_\mu$,

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

A diferencia de los piones cargados, los piones neutros (π^0) decaen en dos rayos γ , que a su vez decaen en un par $e^- e^+$.

Los muones se caracterizan por un tiempo de vida media de $2.20 \cdot 10^{-6}$ s[10], deca- yendo posteriormente en electrones y positrones,

⁶tiempo medio para que decaiga en otra partícula.

2.3. Cascadas aéreas extensas

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e,$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e.$$

Estos decaimientos suceden a medida que las partículas avanzan en la atmósfera hacia la superficie de la Tierra, generando una relación entre la altura sobre el nivel del mar y el tipo y número de partícula. La figura 2.4 ilustra los anteriores procesos de decaimiento y cómo éstos generan EAS con componentes electromagnética, hadrónica, muonica y neutrino.

2.3.2. Producción de pares electrón-positrón

Los fotones o rayos gamma producen pares de electrones-positrones (e^\pm) al interactuar con una carga eléctrica. En el caso de una partícula primaria, interactúa con los iones presentes en la atmósfera terrestre. La creación de pares se da sólo si la energía del fotón es mayor a $2m_e c^2$, que corresponde a la energía en reposo para un par e^\pm . Si la energía del rayo γ es mayor a esta cantidad, entonces los pares $e^- e^+$ producirán nuevamente rayos γ . Este proceso se repite hasta que el γ tenga una energía menor a la energía en reposo del par e^\pm (figura 2.5).

2.3. Cascadas aéreas extensas

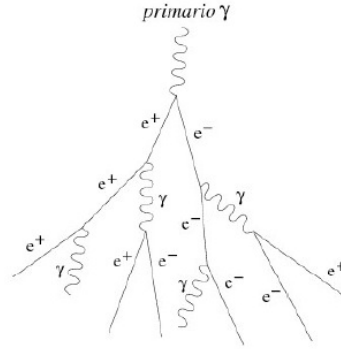


Figura 2.5: Producción de un EAS a partir de decaimientos de pares e^\pm , generados por la interacción de un γ (partícula primaria) con iones presentes en la atmósfera terrestre. En este tipo de cascada sólo se distingue la componente electromagnética[12].

donde $\rho(h_1)$ representa la densidad de atmósfera a una altura h_1 [13], con unidades correspondientes a g/cm^2 ⁷. Este mismo modelo muestra una mayor densidad para alturas menores a 20 km[14] (ver figura 2.7), que corresponde a la Tropósfera, indicando una alta probabilidad de interacción de las partículas primarias y secundarias en esta zona, además de una relación directa entre X y la presión. El modelo estándar permite describir los cambios de X con la altura dividiendo la Troposfera en tres capas, obteniendo una dependencia de $\ln(X)$ con la altitud de la forma

$$5,26 \ln[(44,34 - h)/11,86] \quad \text{para } h < 11\text{km}, \quad (2.3)$$

$$(45,5 - h)/6,34 \quad \text{para } h > 11\text{km y } h < 25\text{km}, \quad (2.4)$$

$$13,78 - 1,67[68,47 - 1,2 \times (48,63 - h)]^{1/2} \quad \text{para } h > 25\text{km}. \quad (2.5)$$

Este modelo permite encontrar el valor de profundidad atmosférica para diferentes alturas. Para el caso de Bucaramanga corresponde a 1000 (g/cm^2), aproximadamente (ver figura 2.8).

2.3.4. Estructura general de EAS

Los factores descritos en las secciones anteriores, traen como consecuencia la existencia de una estructura general de EAS como función de la altura sobre el nivel del mar a la que se observe. Así por ejemplo, la generación de partículas secundarias debido

⁷En este caso las unidades en que se mide la distancia no corresponden a una distancia geométrica convencional. Estas unidades hacen referencia a la densidad de material que deben atravesar los RC[3].

2.3. Cascadas aéreas extensas

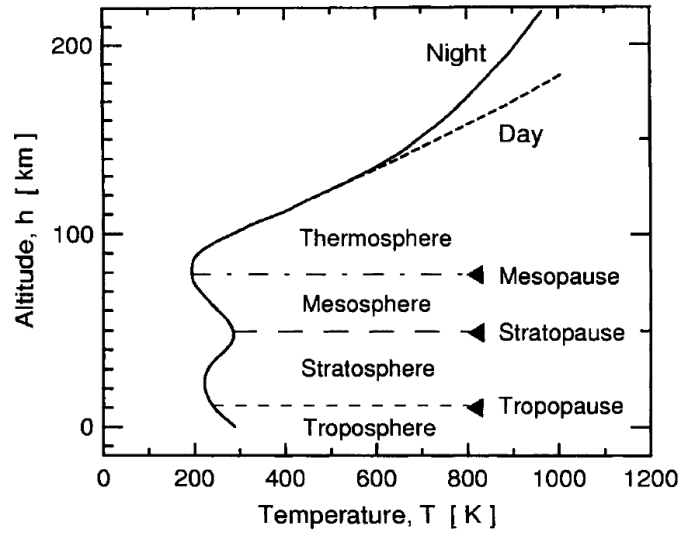


Figura 2.6: Perfil de temperaturas para el modelo estándar de atmósfera. En el eje vertical se muestra la altitud en kilómetros en función de la temperatura. Las líneas punteadas representan las regiones entre cada capa, llamadas Mesopausa (Mesopause), Estratopausa (Stratopause), Tropopausa (Tropopause), respectivamente[8].

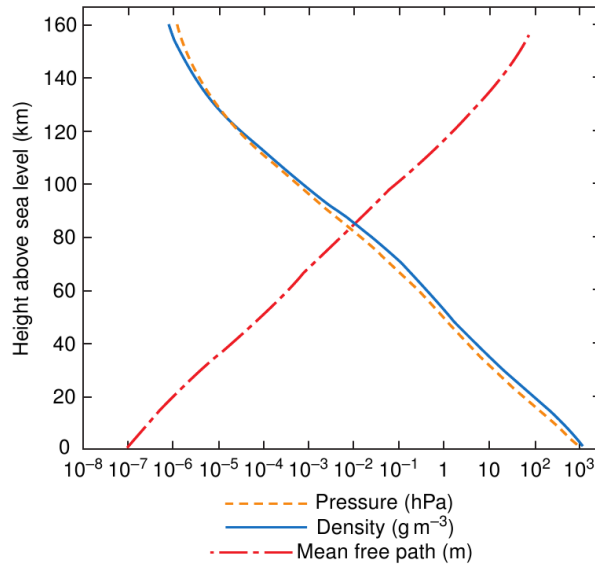


Figura 2.7: Perfil para presión (Pressure), densidad (Density) y camino libre medio (Mean free path) en el modelo estándar de atmósfera. El camino libre medio corresponde a la distancia que pueden desplazarse las moléculas, debido al flujo de aire, sin que interactúen entre ellas[14].

al paso por la atmósfera terrestre, o por la profundidad atmosférica (X) que atraviesan, causa tres componentes principales en las EAS, Muónica, Hadrónica y Electromagnética (ver figura 2.9). La altura sobre el nivel del mar, caracterizada por X , arroja una intensidad vertical diferencial de partículas, manifestando un máximo para cada una de

2.4. Flujo de muones a nivel del mar

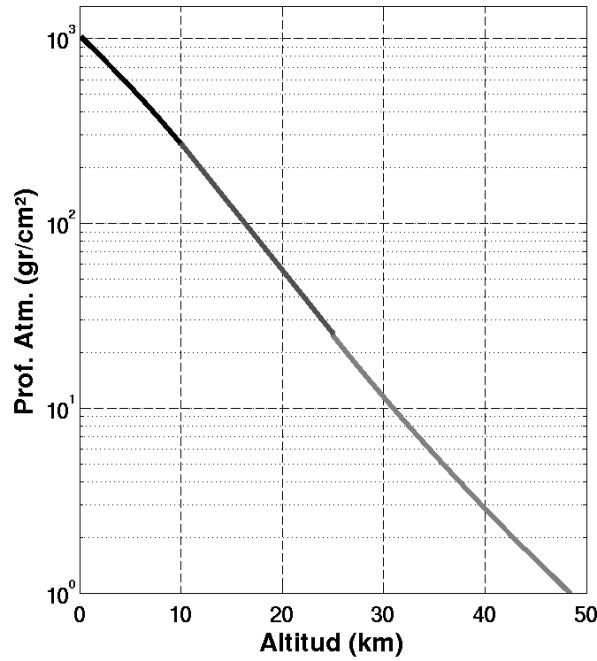


Figura 2.8: *Profundidad atmosférica en función de la altitud. La línea negra corresponde a la relación 2.3, la gris oscura a 2.4 y la gris clara a 2.5[14].*

éstas. Así por ejemplo, al nivel del mar, la intensidad vertical de muones es mayor comparada con el de hadrones, electrones y positrones. Esta dependencia entre intensidad vertical diferencial de partículas con X se muestra en la figura 2.10.

2.4. Flujo de muones a nivel del mar

En alturas cercanas al nivel del mar, el flujo de muones es mayor comparado con otras partículas (figura 2.10), convirtiéndose en las partículas claves para calibrar y detectar el flujo de RC a 956 msnm. La figura 2.11 muestra la intensidad de muones a nivel del mar, resaltando la intensidad para muones con 1 GeV de energía, que serán usados para la calibración del detector (ver sección 6.2).

2.4. Flujo de muones a nivel del mar

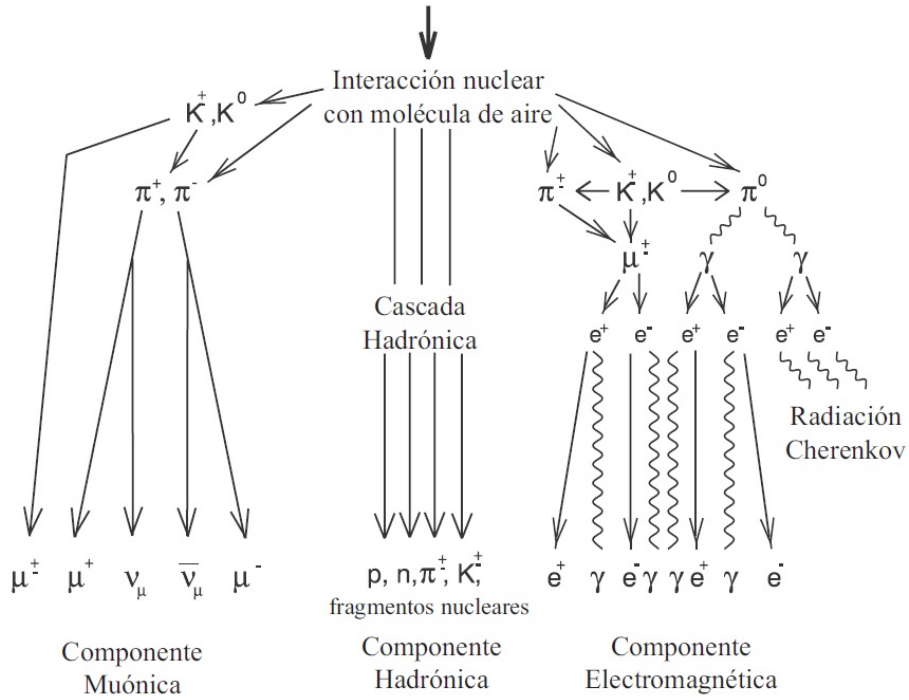


Figura 2.9: Estructura general de un EAS generada por la interacción de una partícula primaria con la atmósfera terrestre y los decaimientos posteriores[15].

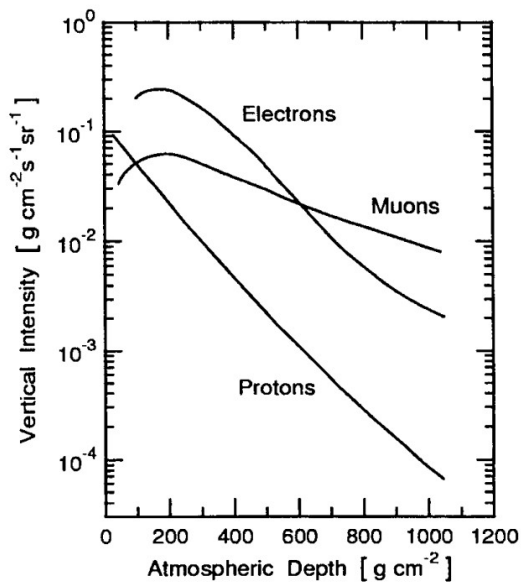


Figura 2.10: Intensidad vertical (Vertical Intensity) diferencial de partículas en función de la profundidad atmosférica (Atmospheric Depth)[8].

2.4. Flujo de muones a nivel del mar

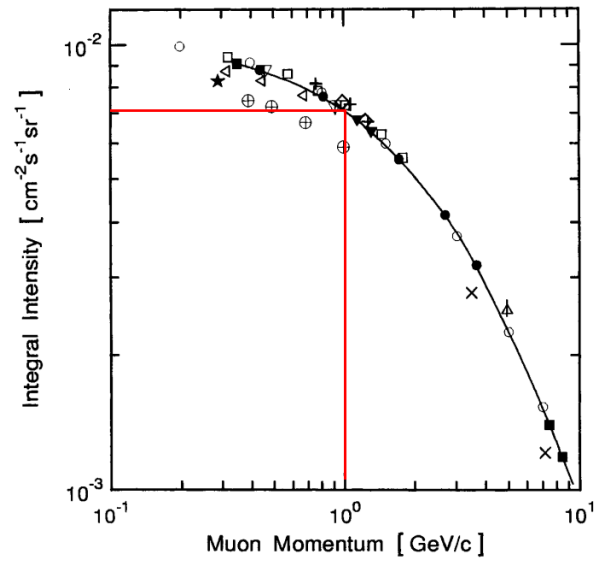


Figura 2.11: *Intensidad integral (Integral Intensity) y espectro de momento (muon Momentum) de muones a nivel del mar. La línea roja marca el flujo de muones con momento de 1 GeV, $7 \cdot 10^{-3} \text{ [cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}]$ [8].*

CAPÍTULO 3

Proyecto LAGO

El proyecto LAGO (*Large Aperture Gamma Ray Bursts Observatory*) es una colaboración latinoamericana creada con el objetivo de detectar rayos cósmicos de alta energía (superiores a 100 GeV) empleando para ello arreglos de detectores Cherenkov de agua instalados en alta montaña (más de 4000 msnm). Actualmente tiene instalados detectores en Chacaltaya (Bolivia, 5300 msnm), Sierra Negra (México, 4650 msnm), entre otros[2].

Los destellos de rayos gamma son eventos que se caracterizan por una súbita emisión de radiación en rayos X duros, longitudes de onda cercanas a 1Å, y rayos gamma suaves, entre 35 y 200 keV, que pueden durar entre 0.1 y 100 s[2]. Este tiempo de duración permite clasificarlos en dos grupos, GRB cortos, eventos menores a 2 s, y GRB largos. El método empleado por LAGO para detectar estos eventos consiste en la técnica de partícula única, que permite medir la energía y dirección de procedencia de estos eventos, a partir de los subproductos que se generan por la interacción con la atmósfera terrestres, además de tener una ventaja con respecto a los detectores espaciales, que cuentan con una probabilidad menor de detectar eventos con energías del orden de GeV debido a su limitada área de detección.

El observatorio Pierre Auger, en Argentina, ubicado a 1400 msnm (aproximadamente), emplea diferentes técnicas para la detección de RC, usando para ello más de 1600 detectores Cherenkov de Agua distribuidos en un área de 3000 km²[16]. El proyecto LAGO, partiendo del hecho que a mayor altura sobre el nivel del mar, el área de detección requerida es menor, comparada con bajas alturas, tiene como objetivo aportar información relevante y de alta calidad científica sobre el flujo y la naturaleza de los RC, instalando un menor número de detectores por encima de los 4000 msnm. La figura 3.1, muestra cómo un menor número de detectores por encima de esta altura logran una resolución equivalente a la del observatorio Pierre Auger.

Actualmente, LAGO trabaja en la puesta en coincidencia de los detectores ya instalados para ofrecer un enorme campo de visión, al tener detectores en diferentes regiones de Latinoamérica.

Colombia se inicia como parte de esta colaboración gracias a la ejecución del presente trabajo¹, que permite formar estudiantes en el montaje, calibración y análisis de datos

¹[http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/Grupo_LAGO_\(GT3\)#Objetivos](http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/Grupo_LAGO_(GT3)#Objetivos).

de estos detectores.

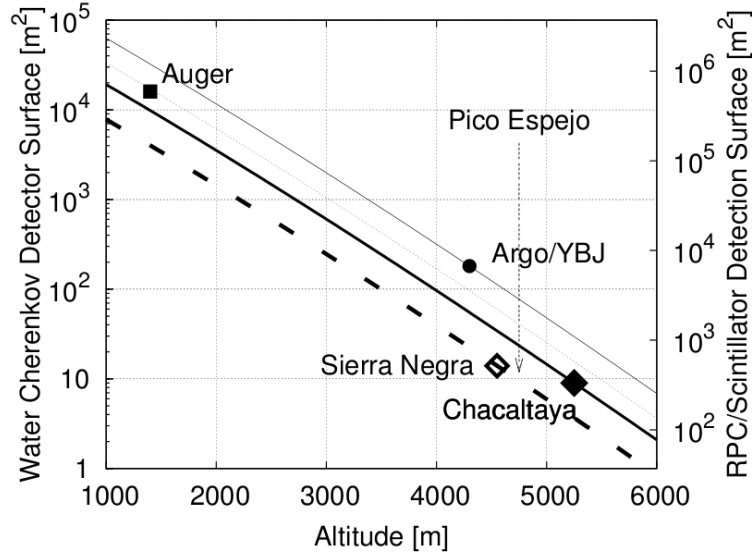


Figura 3.1: Curva de sensibilidad en función del número de detectores Cherenkov de agua y la altitud, para la detección de GRB, con respecto al observatorio Pierre Auger. La línea continua representa los detectores usados en Chacaltaya y la línea discontinua a Sierra Negra[2].

Técnica de la partícula única

Los rayos cósmicos pueden llegar a tener energías del orden de TeV y generar cascadas de partículas secundarias, en las cuales el número de partículas generadas es directamente proporcional a la energía de la partícula primaria. La técnica de partícula única consiste en hacer un conteo de todas las partículas secundarias que llegan al detector en un intervalo de tiempo, y a partir de éste establecer la tasa de flujo base para el detector. De esta forma un evento de gran energía, como por ejemplo un GRB, puede ser identificado como un cambio en la tasa de flujo base del detector[6]. Este método permite estudiar características como duración y energía depositada en el detector por dicho evento. Información que puede ser contrastada con datos de satélite u otros detectores. La figura 3.2 muestra el resultado de una simulación realizada para estimar el flujo base de partículas producido por un EAS en función de la altura sobre el nivel del mar.

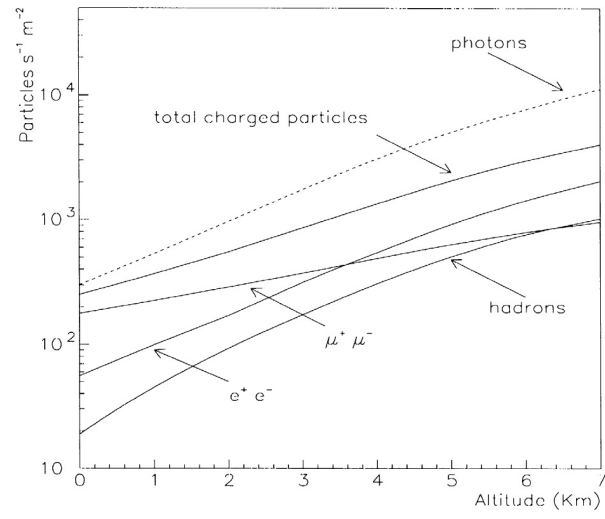


Figura 3.2: Simulación realizada para encontrar el flujo base de partículas en función de la altura sobre el nivel del mar[6].

Detector Cherenkov de agua

Un detector Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en inglés, Water Cherenkov Detector) es un dispositivo que usa el principio de radiación Cherenkov para detectar la traza de partículas secundarias, generadas en EAS. Estas partículas atraviesan un tanque con agua purificada[17, 18] que usa un fotomultiplicador, para amplificar la señal producida por efecto Cherenkov, y una electrónica para adquirir y digitalizar la señal. Un WCD se compone de dos elementos principales: tanque detector y electrónica. A continuación se describe en detalle el WCD usado para este proyecto, denominado en adelante como detector *Guane-1*.

4.1. Radiación Cherenkov

El paso de partículas cargadas por materiales dieléctricos induce campos electromagnéticos que polarizan y despolarizan las moléculas presentes en el medio, emitiendo radiación si la velocidad de las partículas incidentes es mayor que la velocidad de fase de los fotones en el dieléctrico. Desde 1934 hasta 1938, Pavel Alekseyevich Cherenkov, realizó una serie de experimentos que explicaban con gran simplicidad, y correspondencia con el desarrollo teórico, este singular fenómeno[19].

Una partícula cargada, desplazándose a baja velocidad (comparada con la velocidad de fase de la luz en el medio), emite pulsos de luz que se convierten en campos a grandes distancias (comparado con las distancias intermoleculares). La simetría existente a lo largo del eje de trayectoria implica que no se genere radiación, pero si la velocidad es mayor, entonces la simetría a lo largo del eje se rompe, y genera un campo dipolar a grandes distancias (ver figura 4.1a).

La velocidad crítica para que una partícula cargada genere radiación Cherenkov, puede encontrarse a partir de un análisis geométrico, tomando el campo dipolar inducido, como un frente de onda que se puede reconstruir a partir del principio de Huygens¹. De esta forma, para que el frente de onda genere radiación, un fotón emitido en cierto punto, debe gastar el mismo tiempo en recorrer una distancia r , que le tomaría a la partícula cargada en recorrer una distancia s . Así, estos dos fotones son emitidos con igual fase. La figura 4.1b ilustra este análisis del cual se infiere la relación

¹Todo frente de onda puede considerarse como una fuente de ondas esféricas, que se extienden en todas direcciones con la misma frecuencia y longitud de onda del que proceden.

4.2. Tanque detector

$$\cos \alpha_c = \frac{1}{\beta \sqrt{\epsilon(\omega)}}, \quad (4.1)$$

donde α_c es el ángulo crítico con el que se emiten los fotones, β es la razón entre la velocidad de la partícula y la de la luz (v_p/c), $\epsilon(\omega)$ es la constante dieléctrica del medio² y ω es la frecuencia de oscilación del campo dipolar inducido. De la expresión 4.1 se establecen dos límites, o condiciones, para que una partícula cargada produzca radiación Cherenkov en función de su velocidad,

$$\beta_{min} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\omega)}}, \quad (4.2)$$

y,

$$\beta_{max} = 1. \quad (4.3)$$

La energía de una partícula, se puede expresar de la forma

$$E = m_0 c^2 \sqrt{1 - \frac{1}{1 - \beta^2}}, \quad (4.4)$$

donde m_0 es la masa en reposo de la partícula. Esto quiere decir que la energía crítica para que se produzca radiación Cherenkov (E_c) es de la forma

$$E_c = m_0 c^2 \frac{n}{n^2 - 1}. \quad (4.5)$$

Para un muon, que atraviesa un volumen de agua ($n = 1,33$), la E_c será de 153 MeV, y el ángulo de máxima emisión ($\alpha_{c,max}$) de 41.4°. El número de fotones N_γ que se emiten por unidad de distancia e intervalo de energía es

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx dE} = \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \sin^2 \theta_c(E) \approx 370 \sin^2 \theta_c(E) eV^{-1} cm^{-1} \quad (z = 1). \quad (4.6)$$

Para muones, con energías del orden de GeV, pueden llegar a emitir del orden de 10^5 fotones, para energías en el UV. La figura 4.2 muestra el número de fotones que emite un electrón, en diferentes medios, como función de su energía.

4.2. Tanque detector

El tanque Guane-1 (TD), es un recipiente cilíndrico hecho en fibra de vidrio, con una altura de 200 cm y un diámetro de 60 cm. Es capaz de contener agua y se encuentra sellado a radiación solar del espectro visible (aislante fotónico). El TD, está forrado en su interior con un material altamente difusivo (difusor interno), que permite a los fotones propagarse y rebotar dentro del tanque hasta llegar al fotomultiplicador. La figura 4.5 muestra el esquema general del TD.

²Expresando el índice de refracción del medio como $n = \sqrt{\epsilon(\omega)}$.

4.2. Tanque detector

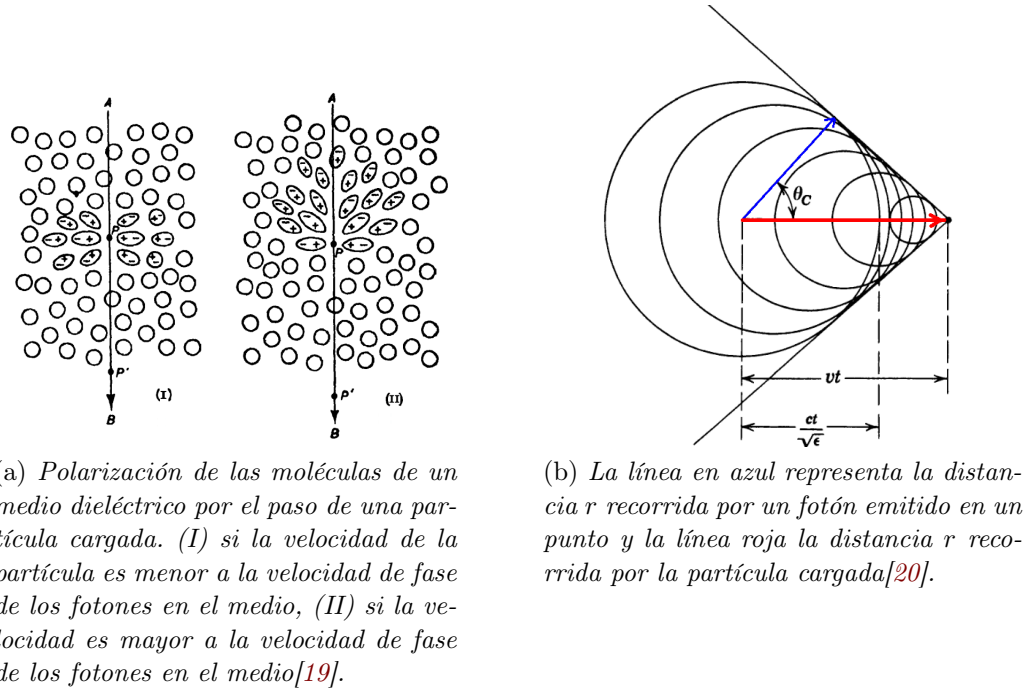


Figura 4.1: (a) Polarización de las moléculas de un medio dieléctrico por el paso de una partícula cargada que se desplaza desde A hasta B. (b) Representación del análisis geométrico para encontrar la condición de velocidad crítica de radiación Cherenkov.

4.2.1. Difusor Interno

Material sintético hecho de fibras de polietileno de alta densidad que garantiza un alto porcentaje de difusión y reflectividad de los fotones al interior del TD. Se ubica dentro del tanque en contacto directo con el agua y sujeto a las paredes con un armazón de tiras plásticas, ver figura 4.3. El material, o tyvek, que se usa es DuPont Tyvek[®] BL-25³.

4.2.2. Aislante Fotónico

Material hecho en polietileno de alta densidad con un grosor de 500 micras, ubicado dentro y fuera del TD, entre el difusor interno y las paredes del tanque, evitando la filtración de radiación, principalmente en el espectro visible(figura 4.4). Guane-1 tiene 8 capas en el interior y 15 en el exterior.

4.2.3. Agua

El agua que se usa en los WCD es uno de los componentes mas importantes para estos dispositivos, ya que de ésta depende la resolución del detector. La forma en que

³http://www2.dupont.com/Tyvek/en_US/.

4.2. Tanque detector

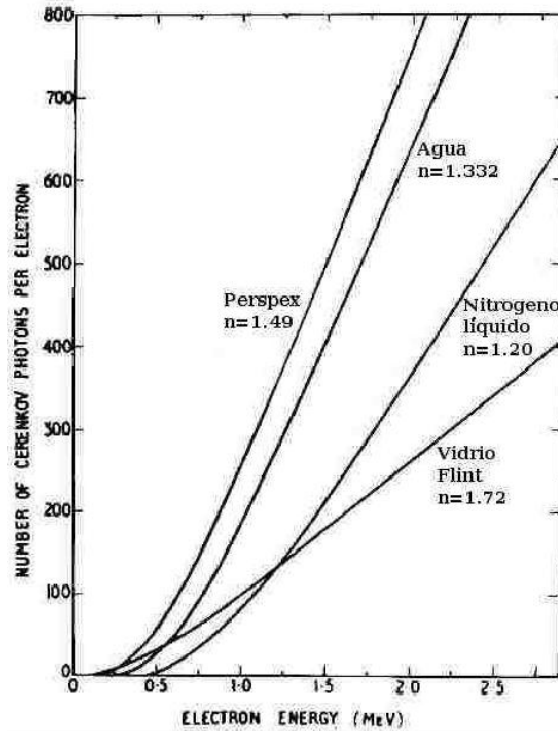


Figura 4.2: Número de fotones que se emiten en diferentes medios producto de la radiación Cherenkov causada por un electrón. Número de fotones Cherenkov por electrón (*Number of cerenkov photons per electron*), energía de electrón (*Energy Electron*) (*MeV*)[15].

se mide la calidad del agua, es en términos del coeficiente de absorción, medido en la región de máxima sensibilidad del fotomultiplicador (ver sección 4.3.1). Así, un coeficiente de absorción bajo, permite que gran parte de los fotones que se generen en el TD por efecto Cherenkov puedan llegar al fotomultiplicador.

Actualmente, la colaboración LAGO, trabaja en el establecimiento de un protocolo general para lograr un bajo coeficiente de absorción, permitiendo que cada país aplique el protocolo que mejor crea conveniente. Para Guane-1, se aplicó el protocolo establecido para los detectores de la ciudad de Mérida, Venezuela. Este protocolo consiste en tres pasos:

1. **Decantación 1 (Agua sin tratar):** Consiste en recolectar un volumen de agua mayor al 10 % del volumen del TD, y dejarla decantar durante un período de 2 meses.
2. **Tratamiento (Cloro y Alumbre):** Finalizados los 2 meses de decantación, se agregan 500 gramos de hipoclorito (cloro granulado) y 500 gramos de sulfato de aluminio (alumbre). El hipoclorito desinfecta el agua y evita la formación

4.3. Electrónica

de microorganismos, mientras el sulfato de aluminio es un agente floculante que permite un posterior proceso de decantación.

3. **Decantación 2 (Agua tratada):** Después de aplicar el tratamiento se deja decantar por un tiempo de 3 meses para que los fólculos, previamente formados por el efecto del alumbre, se depositen en la base del recipiente.

Finalizado este protocolo se deben realizar pruebas de absorción para verificar la efectividad del método.



Figura 4.3: *Difusor interno (Tyvek) empleado en Guane-1. El armazón de tiras plásticas forma una estructura con iguales dimensiones al TD que mantiene el Tyvek sujeto a las paredes de éste.*



Figura 4.4: *Aislante fotónico, ubicado al exterior e interior del TD, entre el difusor interno y las paredes del tanque.*

4.3. Electrónica

La electrónica que utilizó Guane-1 se compone de:

1. Fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés)
2. Estación local de adquisición (LS, por sus siglas en inglés)

4.3. Electrónica

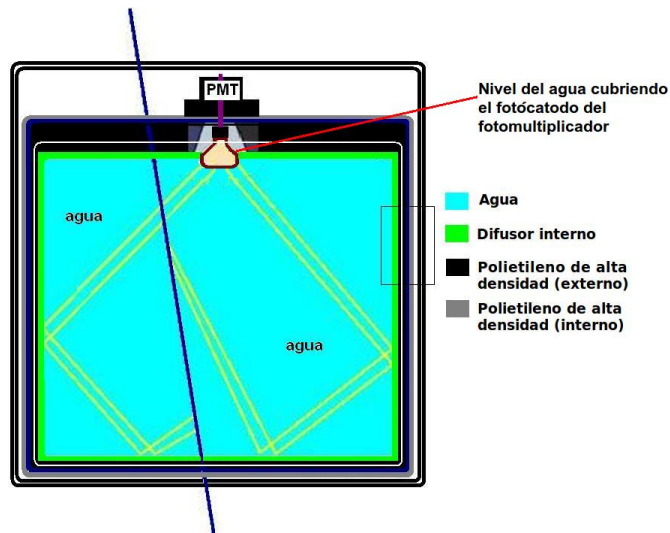


Figura 4.5: Esquema de un detector Cherenkov de agua. La línea azul representa un rayo cósmico que llega al tanque y las líneas amarillas dentro del tanque son las posibles trayectorias de los fotones emitidos por radiación Cherenkov.

4.3.1. Fotomultiplicador

El Fotomultiplicador, o PMT, es un dispositivo de alta sensibilidad espectral que usa el principio fotoeléctrico para generar un flujo de corriente, en función de un número de fotones incidentes. Consta de un fotocátodo donde se producen electrones que se aceleran por una serie de electrodos, o dínodos, conectados a una serie de diferencias de potencial en cascada⁴ (figura 4.6). Estos electrones, al llegar al último dínodo, denominado ánodo, se convierten en un pulso de tensión.

Un PMT se caracteriza por tener las siguientes regiones de trabajo: lineal, estable y exponencial. Estas regiones surgen por la forma en que los electrones son desprendidos de las moléculas que componen los electrodos. A medida que se aumenta la tensión, los electrones de valencia de los electrodos son acelerados, generando un flujo de corriente de forma lineal, en función del aumento de tensión. Después de cierto voltaje no es posible desprender más electrones, llegando a una región donde el flujo de electrones permanece constante al aumento de tensión. Esta región se conoce como región estable de trabajo. Si el voltaje sigue aumentando los electrones de las capas más internas son desprendidos y dan lugar a una región de flujo exponencial de corriente. Estas regiones se ilustran en la sección 6, con datos obtenidos por Guane-1.

El PMT usado en este detector corresponde a la referencia 9353KB de la empresa Electron Tubes⁵. Cuenta con un área sensible de detección de 430 cm² y una eficiencia

⁴La diferencia de potencial en cascada son potenciales eléctricos que aumentan de electrodo a electrodo.

⁵http://neutron.physics.ucsb.edu/docs/Large%20PMT%20Candidates/ET_9353KB.pdf.

4.3. Electrónica

cuántica de un 30 % para una longitud de onda de 350 nm⁶ (ver figura 4.7a). El control del voltaje aplicado al PMT y la forma en que éste transmite el pulso, se realiza empleando una tarjeta, o base, electrónica (ver figura 4.8), la cual permite controlar y transmitir las señales del PMT hasta la LS (ver sección 4.3.2), por medio de un canal no amplificado o amplificado. La figura 4.9 muestra un pulso característico (visto por un osciloscopio) entregado por este PMT en el detector Guane-1. Este pulso tiene por un tiempo de duración de 100 ns, un pico máximo de señal y un área bajo la curva.

Debido a su sensibilidad, es importante que el fotocátodo del PMT esté bajo el nivel de agua del TD.

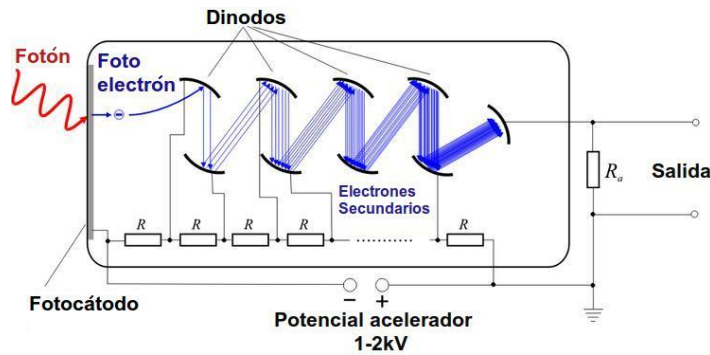
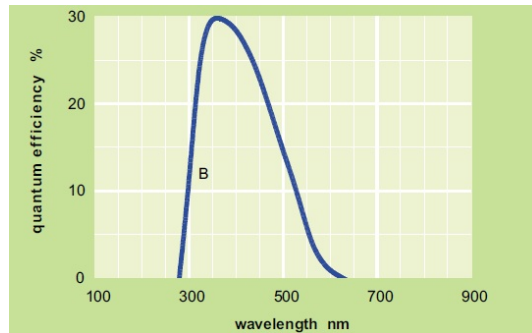


Figura 4.6: Esquema de funcionamiento de un fotomultiplicador.



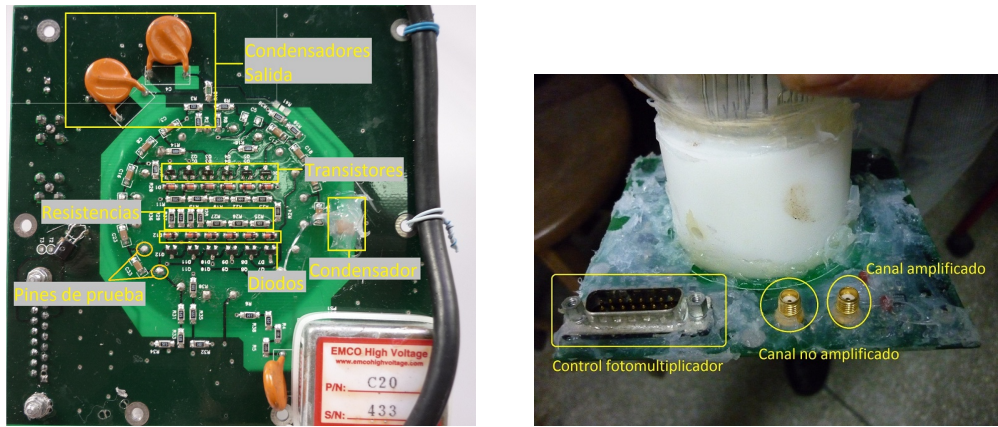
(a) Eficiencia cuántica, o respuesta espectral, para el PMT 9353KB. % eficiencia cuántica (quantum efficiency%), longitud de onda, en nm, incidente en el PMT (wavelength), http://neutron.physics.ucsb.edu/docs/Large%20PMT%20Candidates/ET_9353KB.pdf, ver apéndice B.

(b) Foto del PMT 9353KB.

Figura 4.7: (a) Eficiencia cuántica del PMT 9353KB. (b) Foto del PMT 9353KB.

⁶La eficiencia cuántica corresponde al porcentaje de fotones que chocan con la zona sensitiva y que producen, o desprenden, un electrón.

4.3. Electrónica



(a) Base electrónica del PMT 9353KB y algunas de sus partes más representativas.

(b) Puerto de control y de transmisión del pulso entregado por el PMT 9353KB.

Figura 4.8: (a) Base electrónica y partes principales para el PMT 9353KB. (b) Puerto de control y transmisión de señal del PMT 9353KB.

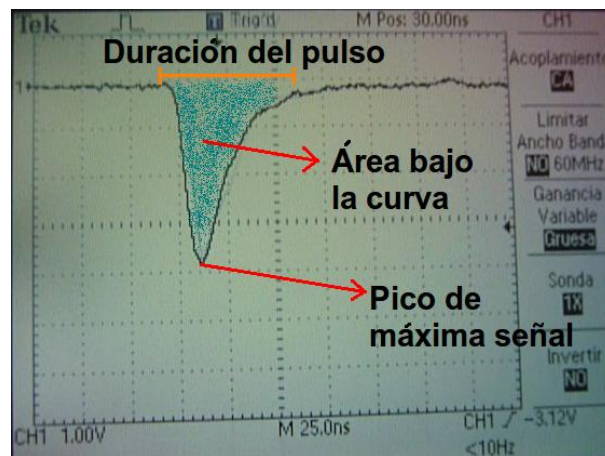


Figura 4.9: Pulso característico entregado por el PMT 9353KB en el detector Guane-1, registrado por un osciloscopio, donde se destacan sus tres características principales, duración del pulso, 100 ns, un pico de señal 4,8 V y un área bajo la curva (carga).

4.3.2. Estación local de adquisición

La LS, es un dispositivo electrónico alimentado por una fuente de 24 V que permite, por una parte, controlar el PMT y por otra adquirir, digitalizar, establecer el tiempo de exposición para la adquisición, y enviar a un computador los histogramas de conteo de señales producidas en el tanque. El proceso de digitalización lo realiza a una frecuencia de muestreo de 40Mhz y los histogramas los entrega en función de la unidad de digitalización FADC de 10 bits⁷ (por sus siglas en inglés, Flash Analog-to-Digital Converter), donde debido a las configuraciones internas de los FADC, se tiene que 1 picroCoulomb

⁷1023FADC = 2V.

4.3. Electrónica

equivale a 1 FADC.

La LS maneja dos protocolos de adquisición denominados *calib* y *DAQ*. El primero genera dos histogramas, tipo pico y tipo carga, a partir de un mínimo de energía (umbral), deseado y el segundo, *DAQ*, produce histogramas para cuatro umbrales diferentes, donde asigna una etiqueta de tiempo (hora, día, mes y año) a cada evento, o pulso registrado. Este último formato no se trabajó en Guane-1. La figura 4.10 ilustra la LS usada en Guane-1 y sus características principales.

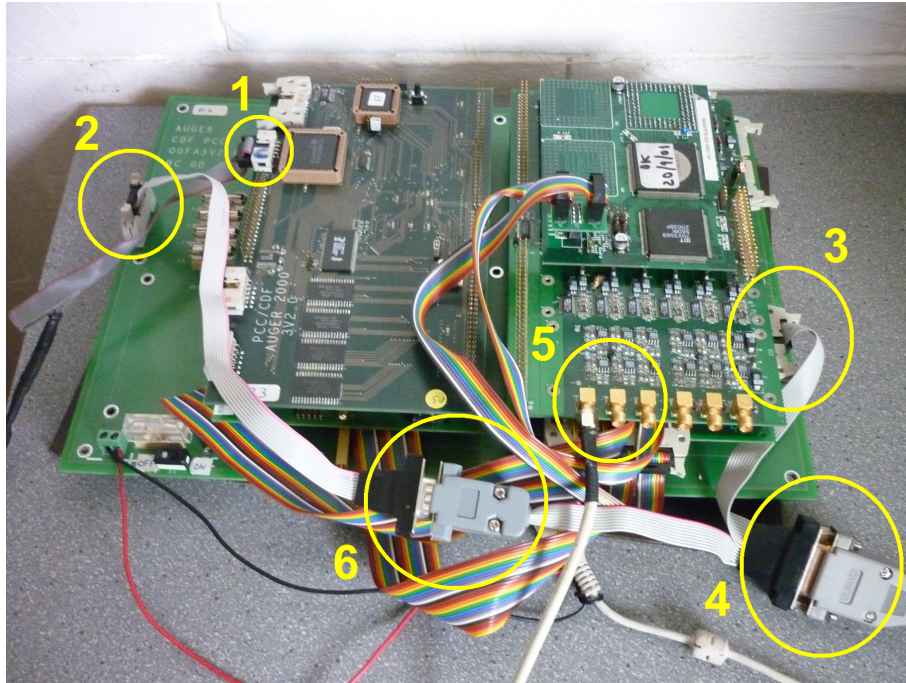


Figura 4.10: Estación local de adquisición y sus conexiones principales. Encerrado en círculo, 1 es la conexión entre el computador y la LS para el protocolo *calib*. 2 permite controlar el PMT, como asignación de voltaje. 3 alimenta al PMT (12 V). 4 comunica el PMT y la LS, transmitiendo la información del puerto 2 y 3. 5 recepción de la señal desde el PMT. 6 empalme entre 2 y 4.

4.3.2.1. Histograma tipo pico

Corresponde al pico máximo, o amplitud máxima, de voltaje de la señal que registra la LS (ver figura 4.9), a partir del umbral seleccionado (a voluntad) y un tiempo de exposición. Este tipo de histograma permite conocer el número de partículas que ingresan al detector en función de la amplitud máxima de señal, ver figura 4.11.

4.3.2.2. Histograma tipo carga

Área bajo la curva registrada por el PMT (ver figura 4.9) para eventos con un pico máximo de voltaje que superaron el umbral establecido. Un histograma de carga típico

4.3. Electrónica

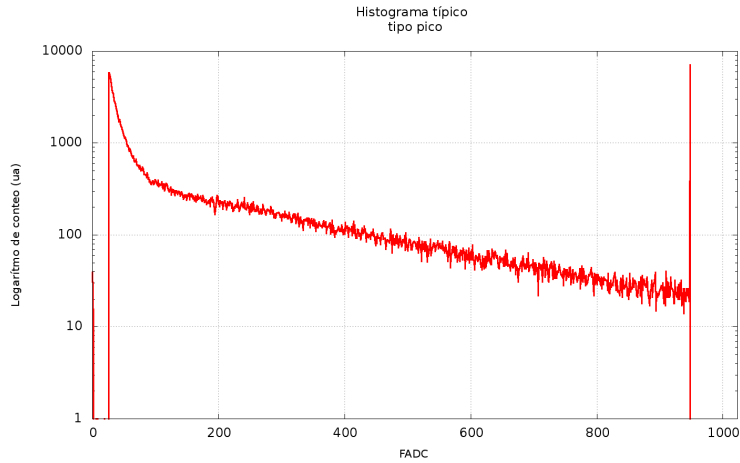


Figura 4.11: *Histograma característico tipo pico tomado a partir de un umbral de 25 FADC y un tiempo de exposición de 600 s.*

muestra la carga depositada por partícula en unidades de FADC, calculada de la forma

$$Q = \frac{1}{R} \int_{t_0}^t V(t) dt, \quad (4.7)$$

donde $V(t)$ es el voltaje registrado por el PMT y R la resistencia por la que pasa el flujo de corriente, correspondiente a la base electrónica del PMT (figura 4.8a). La figura 4.12 muestra un histograma típico de carga.

La figura 4.13 muestra el esquema de funcionamiento de un detector Cherenkov de agua y la modalidades de adquisición de datos calib.

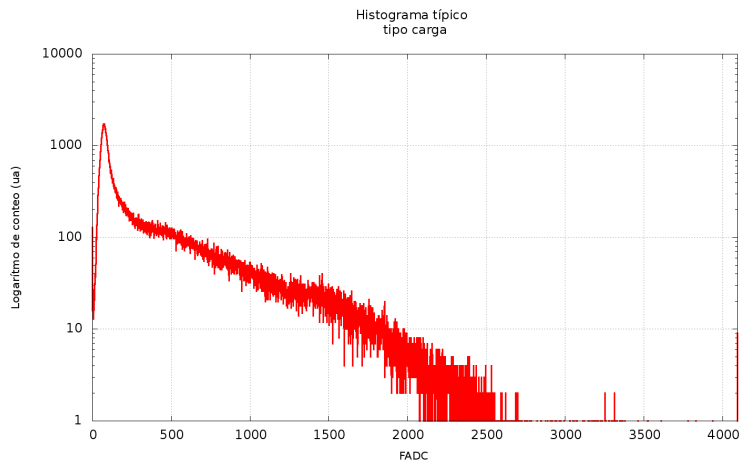


Figura 4.12: *Histograma característico tipo carga tomado para un umbral de 25 FADC y tiempo de exposición de 600 s.*

4.3. Electrónica

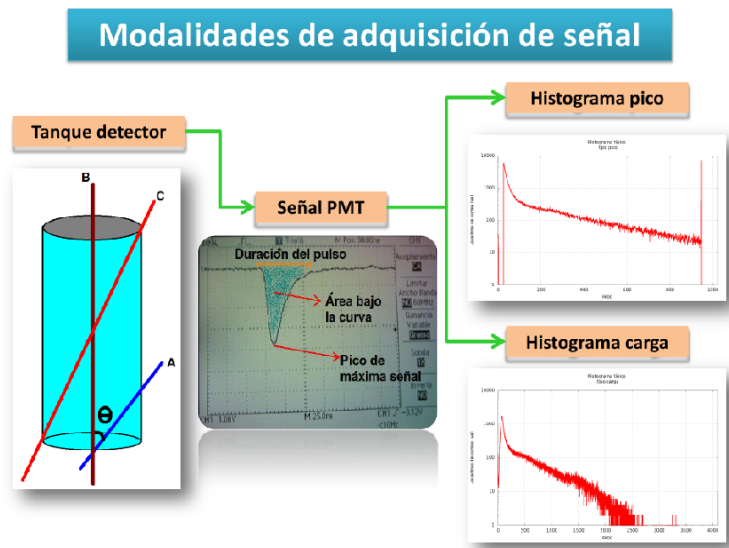


Figura 4.13: Esquema de funcionamiento de un detector Cherenkov de agua.

CAPÍTULO 5

Instalación

El lugar de instalación del detector Guane-1, es la terraza del grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales, ubicado en el edificio de humanidades en la Universidad Industrial de Santander¹, en Bucaramanga (956 msnm). Esta ubicación facilita el acceso al detector y permite tener la electrónica cerca del mismo, favoreciendo las operaciones de control, mantenimiento y análisis de datos.

Fijado el lugar de instalación, se inicia con la aplicación del protocolo de purificación de agua (sección 4.2.3), que tarda, aproximadamente, 5 meses en ejecutarse y paralelo a este procedimiento se realiza el diseño del tanque, que se hace con el objetivo de determinar la eficiencia de geometrías cilíndricas en la detección de muones que llegan verticales al detector. Finalizados estos dos pasos se procede al montaje del detector y se finaliza con la calibración del mismo.

5.1. Purificación de Agua

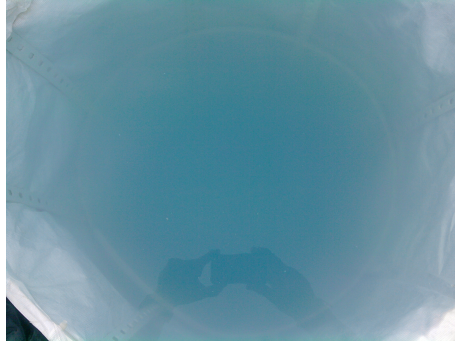
Se aplica el protocolo descrito en la sección 4.2.3, empleando dos tanques de 300 litros cada uno (ver figura 5.1). Las figuras 5.2a y 5.2b muestran el estado inicial y final del proceso, respectivamente. Con el objetivo de verificar la absorción en el rango de longitudes de onda que trabaja el PMT, se realizaron pruebas de absorción, utilizando para ello un espectrometro de absorción, que muestra la confiabilidad del método al obtenerse una absorción menor que el agua sin tratar (ver figura 5.3).



Figura 5.1: *Tanques empleados para el protocolo de purificación de agua.*

¹Coordenadas geográficas 7°08' N y 73°08'O.

5.2. Construcción del tanque



(a) Agua antes de aplicar proceso de purificación.



(b) Agua finalizado el proceso de purificación.

Figura 5.2: (a) Agua antes de iniciar el protocolo y b) finalizado el protocolo.

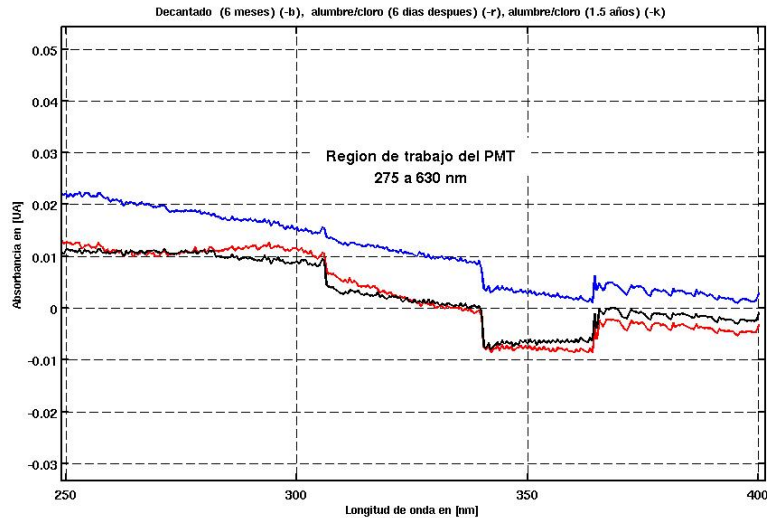


Figura 5.3: Curva de absorción para el agua usada en Guane-1, en la región de eficiencia cuántica del PMT (figura 4.7a). La curva azul representa la absorción para agua sin aplicarle el tratamiento, la roja para agua con tratamiento y la negra es la absorción para una muestra de agua, tomada de la universidad de los Andes en Mérida, que lleva 18 meses con el tratamiento.

5.2. Construcción del tanque

El primer paso en la construcción del tanque consiste en seleccionar su diseño. En el caso de Guane-1, el objetivo es ver la eficiencia de este detector para discriminar muones que le atraviesan verticalmente (entran por la tapa superior y salen por la base) de los que lo hacen de forma lateral (cualquier otra dirección). Esta diferencia en la dirección

5.2. Construcción del tanque

con la que llegan al detector se ve reflejada en una trayectoria, o traza, con longitud diferente para cada caso. La cantidad de carga que depositan en el tanque, cambia para muones verticales de Muones laterales. Se toman como referencia tres trazas características, lateral, vertical y diagonal, que tienen una longitud de 34,64 cm, 200 cm y 208,8 cm, respectivamente. De esta manera se espera que las trazas verticales depositen un 18 % más de carga que las laterales. Es de notar que la traza lateral se calcula teniendo en cuenta la distribución de flujo de muones a esta altura sobre el nivel del mar, que sigue una distribución $\cos^2(\theta)$ y es significativa hasta un ángulo de 60° [8]. La figura 5.4 ilustra cada una de estas trazas.

Seleccionada la geometría se escoge el material, el cual debe ser liviano, para facilitar su transporte y manipulación, resistente, capaz de contener la presión del agua que se deposita en su interior, y de precio asequible. El material del que está hecho el TD del detector Guane-1 es fibra de vidrio, que se encuentra forrado con 15 capas de polietileno de alta densidad y recubierto en su interior con una capa de Tyvek[®], sujeta a las paredes con un armazón de tiras plásticas (figura 5.5b). La tapa está diseñada tanto para sellar el tanque como para servir de base al PMT e igualmente se encuentra tapizada con Tyvek. La figura 5.6 muestra este diseño. Antes de instalar el tanque en su lugar definitivo se deben hacer pruebas de filtración para identificar fugas de agua, y repararlas si es el caso.

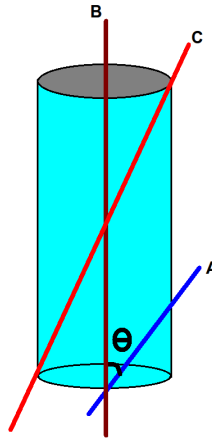


Figura 5.4: Trazas principales para Guane-1, laterales (A), verticales (B) y diagonales (C). El ángulo θ se mide respecto de la vertical.

5.2. Construcción del tanque



(a) *Tanque en fibra de vidrio.*



(b) *Tanque forrado con polietileno de alta densidad.*

Figura 5.5: (a) *Tanque en fibra de vidrio con simetría cilíndrica. Altura 200cm y diámetro 60cm.* (b) *Tanque forrado con polietileno y en su interior con Tyvek.*



(a) *Base para el PMT con una apertura para facilitar el acceso a los puertos de control y señal.*



(b) *Tapa del tanque detector diseñada para sellar el tanque y funcionar como base para el PMT. Tapizada en Tyvek*

Figura 5.6: *Tapa del tanque detector diseñada para sellar el tanque y funcionar como base para el PMT. (a) apertura para acceso a puertos de control, (b) tapa tapizada en Tyvek.*

5.3. Electrónica

El manejo de la electrónica se realiza por medio de un software que permite comunicar un computador con la LS. Este software se denomina Kermit² y se instala sobre un sistema operativo tipo UNIX. Los protocolos de adquisición deben descargarse desde la página web de la colaboración LAGO³ e instalarse en la LS, según los pasos allí especificados. El detector Guane-1 tiene instalado el protocolo calib (ver sección 4.3.2). Las conexiones que se deben realizar se muestran en la figura 4.10.

Para garantizar la adquisición continua de datos se conecta el computador y la LS a una fuente de voltaje ininterrumpible (UPS, por sus siglas en inglés).

La figura 5.7 muestra el montaje final del detector Guane-1.

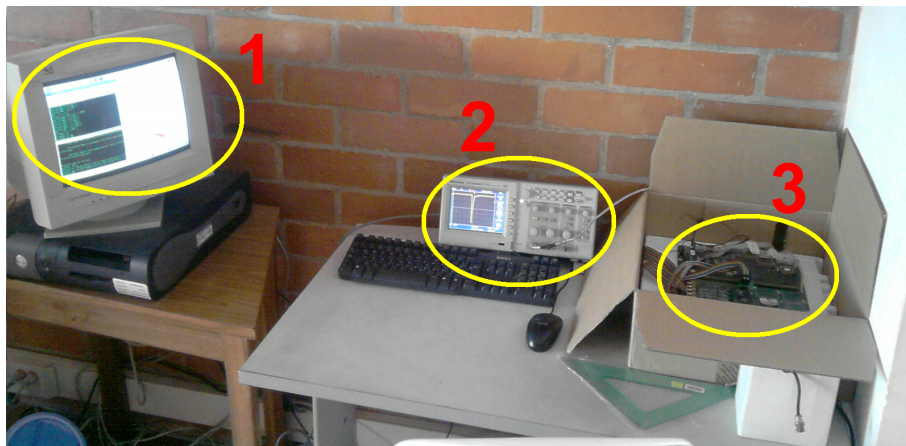


Figura 5.7: *Montaje experimental para Guane-1. 1, visualización de histogramas; 2, visualización de señales en el osciloscopio; 3, estación local de adquisición (LS).*

²<http://www.columbia.edu/kermit/>.

³<http://particulas.cnea.gov.ar/experiments/lago/>.

CAPÍTULO 6

Calibración

La calibración se realiza en dos fases, la primera consiste en conocer la región estable de trabajo para el PMT, es decir, encontrar el intervalo de voltaje para el cual el conteo, o flujo de eventos, permanece constante (ver sección 4.3.1), y la segunda en caracterizar los histogramas tipo carga y pico en función de las componentes muónicas (verticales y laterales). Para esta última se utiliza el software LAGOSim[21], desarrollado para simular el paso de partículas relativistas por un detector Cherenkov de agua y suministrado por la colaboración LAGO.

Finalmente, los resultados de la calibración permiten establecer los parámetros de adquisición bajo los cuales trabaja el detector Guane-1.

6.1. Región estable de trabajo para el PMT

Para conocer la región estable del PMT, se aplica el siguiente procedimiento:

1. Se establece un rango de umbrales, iniciando en 10 FADC y finalizando en 610 FADC, con pasos de 20 FADC.
2. Se establece el rango de voltajes a medir, que inicia en 1000 V y finaliza en 1800 V, con pasos de 100 V.
3. Se selecciona el primer umbral y a partir de éste, se realiza una toma de datos con el protocolo de adquisición calib, durante 600 s, para cada uno de los voltajes seleccionados (barrido en voltajes, BV).
4. Terminado el BV, se selecciona el siguiente umbral y se realiza, para éste, un nuevo BV. Se repite para todos los umbrales (barrido en umbrales. BU)
5. Finalizados los BU y BV se realiza el análisis de los resultados.

Los resultados de esta calibración se ilustran en la figura 6.1, donde la región estable del PMT aparece entre 1500 V y 1700 V. A partir de estos resultados se establece como voltaje de trabajo 1500 V.

6.2. Equivalente Muon Vertical

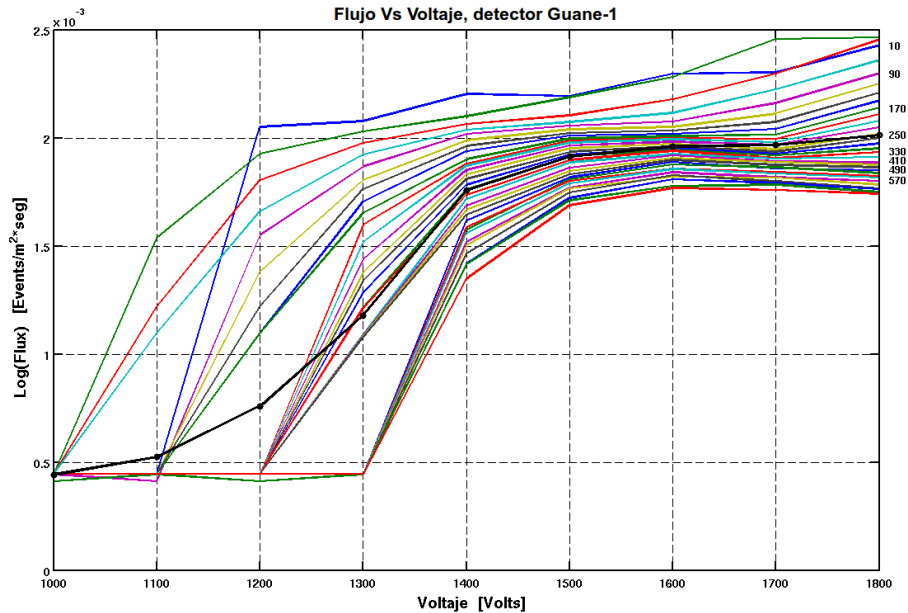


Figura 6.1: Cada curva representa el barrido en voltajes para un umbral determinado, indicado en la parte derecha de la figura. La región estable del PMT se observa entre 1500 y 1700 V.

6.2. Equivalente Muon Vertical

En la sección 2.3 se mostró que a 956 msnm el flujo de muones es mayor al de pares electrón-positrón y demás resultados de las EAS. La caracterización de los histogramas tipo carga y pico se realiza bajo el concepto de calibración del VEM (por sus siglas en inglés, Vertical Equivalent muon), que consiste en determinar la energía que deposita en el tanque un muon que le atraviesa, ingresando por la tapa y saliendo por la base, en su respectiva unidad de FADC[21]. Esta calibración se puede realizar por dos métodos. El primero consiste en colocar dos arreglos de centelladores en coincidencia, uno en la tapa del tanque y otro en la base; de esta forma se activa un disparador, o interruptor, para medir la señal en el intervalo de tiempo en el que los dos centelladores se activaron. El segundo método consiste en realizar una simulación de los pulsos que se registran en el detector por el paso de un muon (que lo atraviesa desde la tapa hasta la base) y a partir de estos construir histogramas tipo carga y pico, de los que se extrae el valor, en FADC, que es proporcional a la energía que estos han depositado en el tanque.

Para Guane-1 se usó el segundo método, empleando el software *LAGOSim*, desarrollado para realizar esta misma calibración en los detectores del observatorio Pierre Auger[21] y editado y suministrado por la colaboración LAGO. Este software consiste en un conjunto de programas escritos con EASYSIM, C y C++¹, usando algunas libre-

¹<http://www.research-systems.com/easysim/easysim.htm>.

6.2. Equivalente Muon Vertical

rias de ROOT², que permite variar los parámetros principales del detector:

- Número de eventos.
- Modo.
- Tipo de partícula.
- Energía de partícula.
- Ángulo de incidencia.
- Altura sobre el nivel del mar.
- Geometría del tanque.
- Número de PMT.
- Posición de los PMT en el tanque.
- Calidad de agua³.
- Reflectividad del Tyvek⁴.

La opción modo, se usa para escoger el tipo de simulación que se requiere y tiene tres opciones, VEM, RANDOM y FIXEDTHETA. El primero genera muones que ingresan totalmente vertical al tanque, con una energía de 1 GeV, modo que es empleado para realizar la calibración del VEM; el segundo genera partículas con distribución de velocidades aleatoria, siguiendo la respectiva distribución[8]

$$\cos^2(\theta),$$

y el tercero permite fijar el ángulo de incidencia de las partículas. Cada uno de estos modos arroja un archivo que contiene los pulsos que generan las partículas al atravesar el tanque. La figura 6.2 muestra un pulso característico arrojado por LAGOSim (en modo RANDOM), en donde cada bin del eje horizontal corresponde a 25 ns, y el eje vertical está en unidades de FADC.

Los resultados de la simulación se superponen con los histogramas obtenidos con el detector Guane-1, permitiendo de esta forma caracterizar, por comparación, los histogramas en función de los cambios de pendiente que manifiestan (ver figura 4.12). Esta calibración sólo se aplica para histogramas tipo carga, debido a la saturación que presentan los histogramas tipo pico (ver sección 7.1).

²<http://root.cern.ch/drupal/>.

³Medida por la longitud de penetración (en metros) de un fotón en el agua antes de ser absorbido.

⁴Fracción de luz que se refleja cuando un haz incide sobre el Tyvek.

6.2. Equivalente Muon Vertical

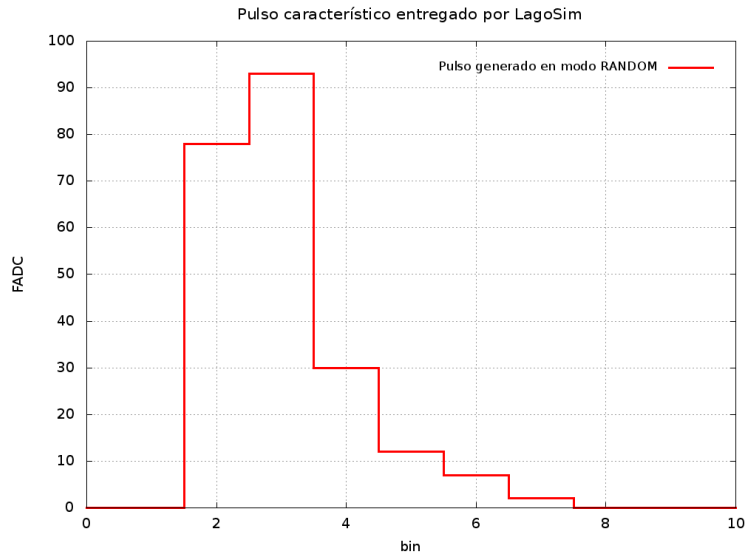


Figura 6.2: Pulso característico entregado por LagoSim en modo RANDOM. Cada bin en el eje horizontal representa 25 ns.

La simulación en modo VEM realizada para Guane-1, se ejecutó bajo los siguientes parametros:

- Número de eventos: 30000.
- Modo: VEM.
- Tipo de partícula: muon.
- Energía de partícula: 1 GeV.
- Ángulo de incidencia: 0.
- Altura sobre el nivel del mar: 956 m.
- Geometría del tanque: altura: 2 m y radio: 0.3 m.
- Número de PMT: 1.
- Posición de los PMT en el tanque: (0,0), vector posición medida respecto del centro del tanque.
- Calidad de agua: 20 m.
- Reflectividad del Tyvek: 0.94.

6.2. Equivalente Muon Vertical

Con estos parámetros se realizaron 50 histogramas que se promediaron en uno sólo (ver figura 6.3). En este histograma se realiza un ajuste gaussiano de la forma,

$$a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}}, \quad (6.1)$$

entre la región de 1300 y 1368 FADC, correspondiente a muones verticales, donde,

- $a = 156 \pm 1$ [ua],
- $b = 1329 \pm 1$ [FADC],
- $c = 154 \pm 1$ [FADC].

Los resultados de esta simulación se muestran en la figura 6.3. Los valores de calidad de agua y reflectividad del Tyvek fueron encontrados a partir del procedimiento descrito en el apéndice B.

A partir de los resultados de esta simulación, se encuentra que la ubicación (en histogramas tipo carga) de muones que ingresan verticalmente al tanque está en 1329 ± 1 FADC, y que éstos depositan una energía aproximada de 400 MeV, teniendo en cuenta que un muon deposita 2 MeV/cm en agua[22].

Para determinar si las otras jorobas, presentes en la figura 4.12, corresponden a muones laterales, se realizan 45 simulaciones en opción RANDOM y tipo de partícula muon, manteniendo constantes los demás parámetros. Los resultados de esta simulación se muestran en la figura 6.4, que al comparar con las figuras 4.12 y 6.3, permiten observar claramente, que la joroba ubicada en 368 ± 2 FADC, corresponde a muones laterales. Los valores de las constantes de ajuste son,

- $a = 40 \pm 1$ [ua].
- $b = 368 \pm 2$ [FADC].
- $c = 415 \pm 4$ [FADC].

6.2. Equivalente Muon Vertical

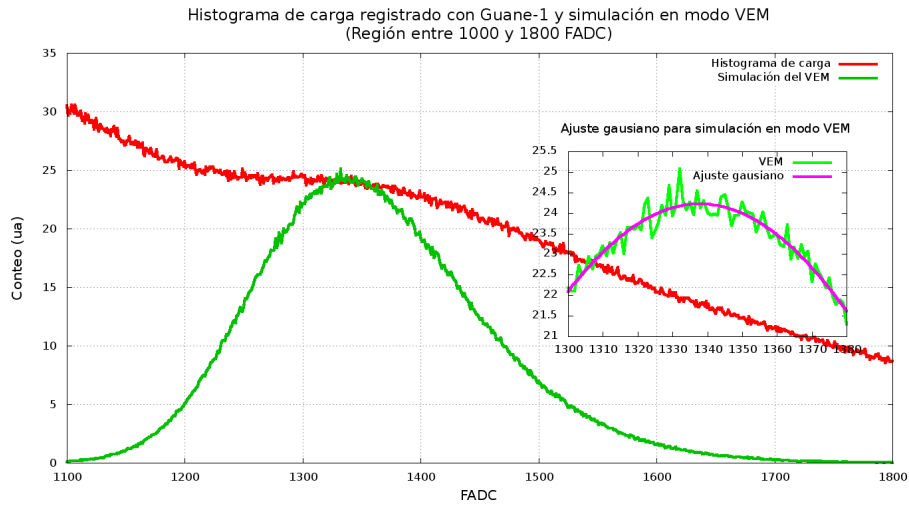


Figura 6.3: Histograma de carga registrado con Guane-1 (rojo), histograma medio (verde) para 50 histogramas tipo carga en modo VEM con calidad de agua 20 y reflectividad de Tyvek 0.94, simulados con LAGOSim. Para este histograma se realiza un ajuste gaussiano en la región entre 1300 FADC y 1368 FADC (magenta).

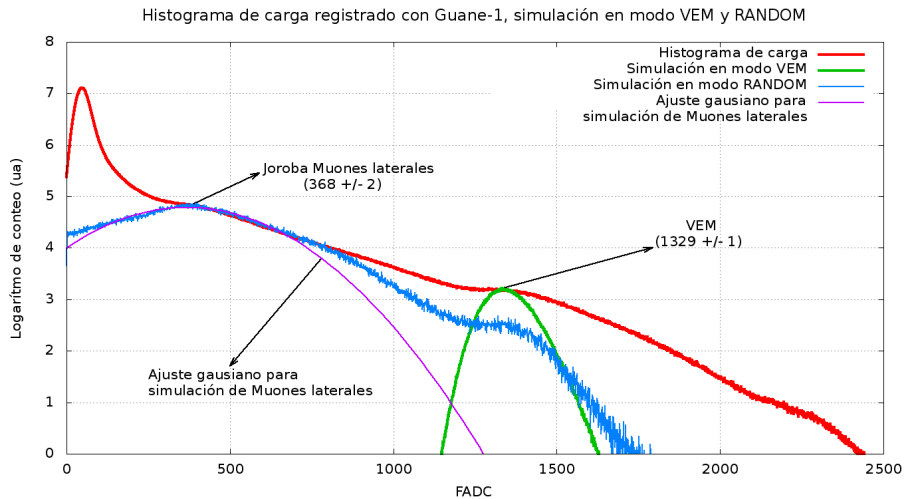


Figura 6.4: Simulación en modo RANDOM para muones oblicuos (azul), histograma de carga registrado con Guane-1 (rojo), simulación en modo VEM (verde) .

CAPÍTULO 7

Resultados

El detector Guane-1 registra un total de 27576 histogramas de tipo carga y pico, bajo los parámetros:

- Voltaje aplicado al PMT: 1500 V
- Tiempo de exposición: 600 s
- Formato: histogramas tipo carga y pico.

Los datos así registrados, permiten medir el flujo de partículas que atraviesan el detector, en virtud de la carga que depositan en él.

Los resultados se presentan en tres partes, la primera consiste en mostrar la relación carga/pico, que permite fijar qué regiones están en saturación en cada histograma. La segunda parte, muestra el flujo de muones medidos por Guane-1, permitiendo establecer el flujo de fondo de muones verticales y laterales a 956 msnm. Finalmente, se realiza un análisis de la actividad solar en virtud de los cambios de flujo medidos al medio día y media noche para regiones ubicadas entre 2 y 140 FADC.

7.1. Saturación en histogramas de carga y pico

La electrónica usada en Guane-1 tiene como límite de resolución, en amplitud de señal, 1023 FADC. Esto quiere decir que eventos que posean un pico superior a este valor no serán distinguibles, en calidad de su máxima amplitud de señal. Estos eventos se denominan eventos en saturación. Se reconocen fácilmente en histogramas tipo pico porque se ubican en el mayor valor de FADC¹ (ver figura 4.11), el cual tiene como valor promedio 972 FADC. Los eventos en saturación representan el 4,38 % del total de eventos registrados por histograma. Este resultado implica que a partir de cierto FADC (Fsat), en los histogramas tipo carga, son eventos en saturación. La forma en que se calcula este valor, se basa en el principio que todos los pulsos registrados por Guane-1 tienen el mismo tiempo de duración, lo que implica que los eventos en saturación se encuentran para FADC altos. Para determinar Fsat se procede de la siguiente forma:

¹Calculado como: $1023 - (\text{umbral} + \text{línea base})$.

7.2. Flujo de muones a 956 msnm

- Se toma cada histograma y se calcula cuántos eventos corresponden al 4,38 % de todos los registrados en el histograma.
- A partir del mayor FADC del respectivo histograma, se empiezan a contar los eventos hasta el FADC en el cual la suma de eventos corresponda al 4,38 % del total.

De esta manera se encuentra que F_{sat} es, en promedio, 1613 FADC. Los histogramas de carga y pico son, en principio, proporcionales en un factor constante α , definido como

$$\alpha = \frac{Q}{P}, \quad (7.1)$$

donde Q representa la carga y P el valor del pico para cada evento registrado. El valor de esta constante para Guane-1 es de 1,66. Los resultados se presentan en la figura 7.1.

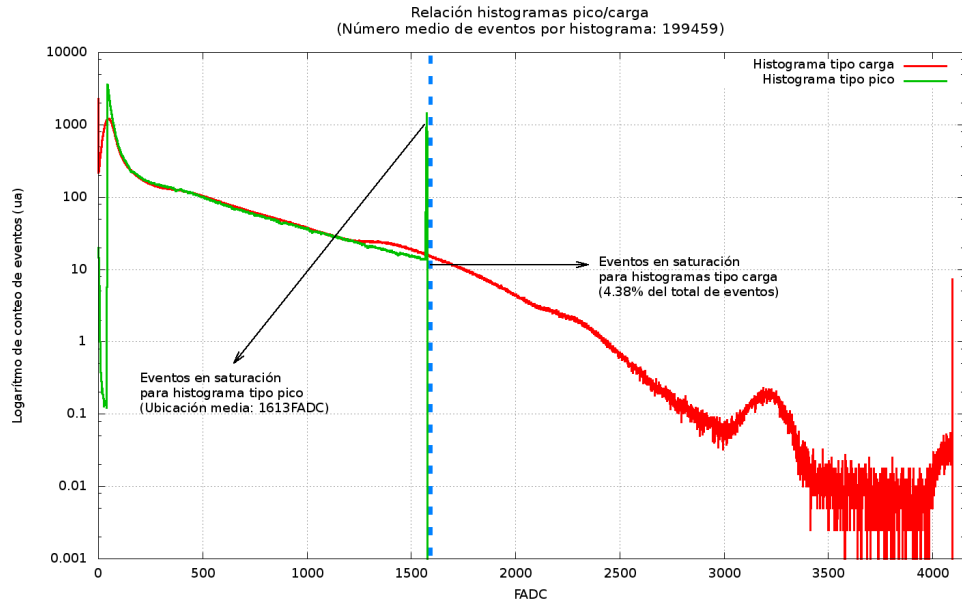


Figura 7.1: *Eventos en saturación para histogramas tipo carga y pico. El porcentaje de eventos en saturación corresponden al 4,38 % de todos los eventos que se registran por histograma. La línea azul-claro punteada determina el inicio de la región de saturación en histogramas tipo carga y el histograma tipo pico se multiplicó por un valor de α de 1,66.*

7.2. Flujo de muones a 956 msnm

La figura 6.4 muestra las regiones en las cuales se ubican los muones laterales (ML), 368 ± 2 FADC, y muones verticales (MV), 1329 ± 1 FADC. A partir de estas regiones se suman los eventos presentes y posteriormente se multiplican por el respectivo factor

7.3. Actividad solar

de flujo²: $6,4072 \cdot 10^{-7} [m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr]$ para ML y $8,5429 \cdot 10^{-6} [m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr]$ para MV. Finalmente se realiza un análisis de frecuencias de flujo que permite establecer el valor de flujo medio de muones a 956 msnm. Este análisis de frecuencias arroja dos valores de flujo para la región de MV, uno para histogramas registrados antes del 22 de enero de 2011 y otro para los registrados después de esta fecha, tal y como se muestra en la figura 7.2. La figura 7.3 muestra el flujo de muones totales medidos con el detector Guane-1.

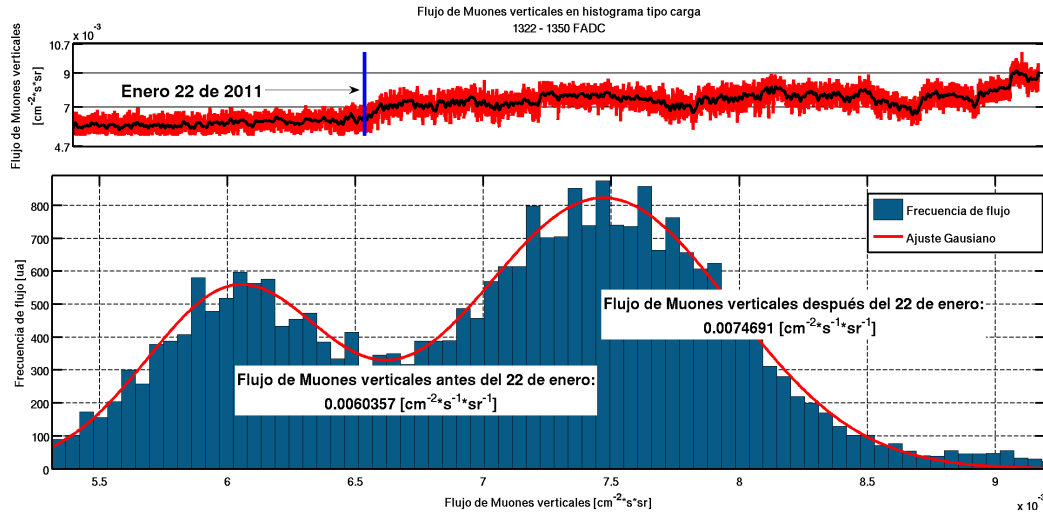


Figura 7.2: La figura superior muestra el flujo de muones verticales por histograma registrado y la figura inferior muestra la frecuencia de flujo. En este caso se presentan dos valores, uno correspondiente al flujo medido antes del 22 de enero de 2011 y otro para los medidos posteriormente a esta fecha.

7.3. Actividad solar

La actividad solar se hace evidente al estudiar los histogramas tipo carga, en la región entre 2 y 140 FADC, como se ilustra en la figura 7.4. Esta figura muestra el cambio en el conteo de eventos que se miden al medio día y la media noche. De acuerdo con los resultados presentados en la figura 6.4, esta región corresponde a partículas como electrones, positrones y demás de baja energía.

El análisis de actividad solar comienza entonces, con la selección de histogramas registrados entre las 12 y 13 horas y las 00 y 01 horas, hora local. Luego se realiza la medición de flujo en dos partes, la primera para toda la región seleccionada, y la segunda para el máximo de la región. Los flujos respectivos se presentan en las figuras 7.5 y 7.6, donde se muestran además los cambios del flujo respecto de la línea base del PMT.

²Área lateral del tanque para ML y área de la tapa para MV.

7.4. Correlación entre eventos sísmicos y flujo de Muones verticales

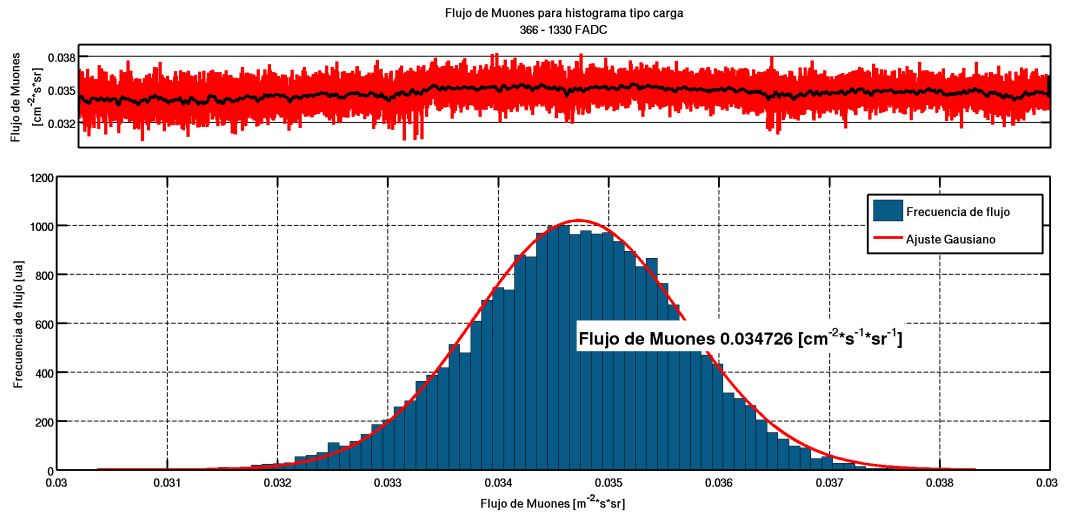


Figura 7.3: La figura superior muestra el flujo de muones por histograma registrado y la figura inferior muestra la frecuencia de flujo.

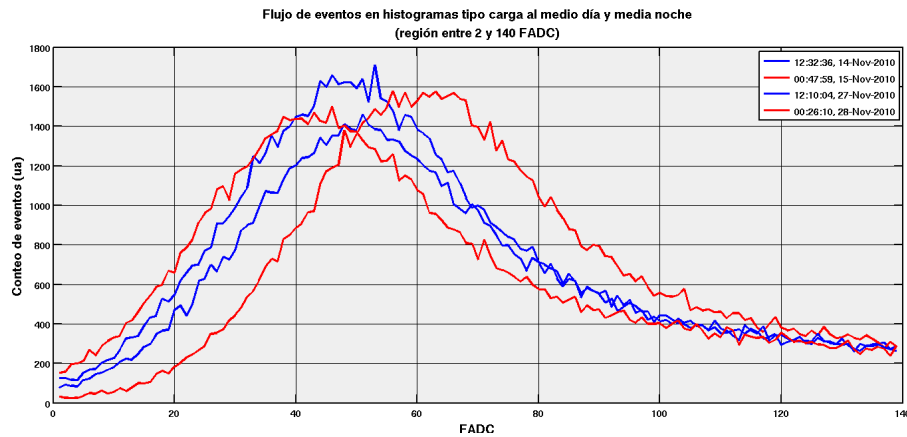


Figura 7.4: Cambio en el conteo de eventos para cuatro histogramas tipo carga registrados en diferente fecha y hora, al medio día y la media noche.

7.4. Correlación entre eventos sísmicos y flujo de Muones verticales

LAGO-Venezuela (LV) adelanta actualmente un trabajo sobre la posible correlación entre eventos sísmicos (ES) y el flujo local de muones (muones verticales (MV)). Esta correlación, de acuerdo a los avances en LV, funciona como precursor de ES, que se explica por los cambios en la permeabilidad magnética local (PML), como consecuencia del estrés mecánico que sufren las placas tectónicas antes de generarse un evento sísmico. Este cambio en la PML puede ser visto por los RC cargados que se desvían según el cambio de PML. LV tiene instalado un WCD, que sólo registra el paso de MV, y se encuentra ubicado en la ciudad de Mérida por la cual pasa la falla geológica

7.4. Correlación entre eventos sísmicos y flujo de Muones verticales

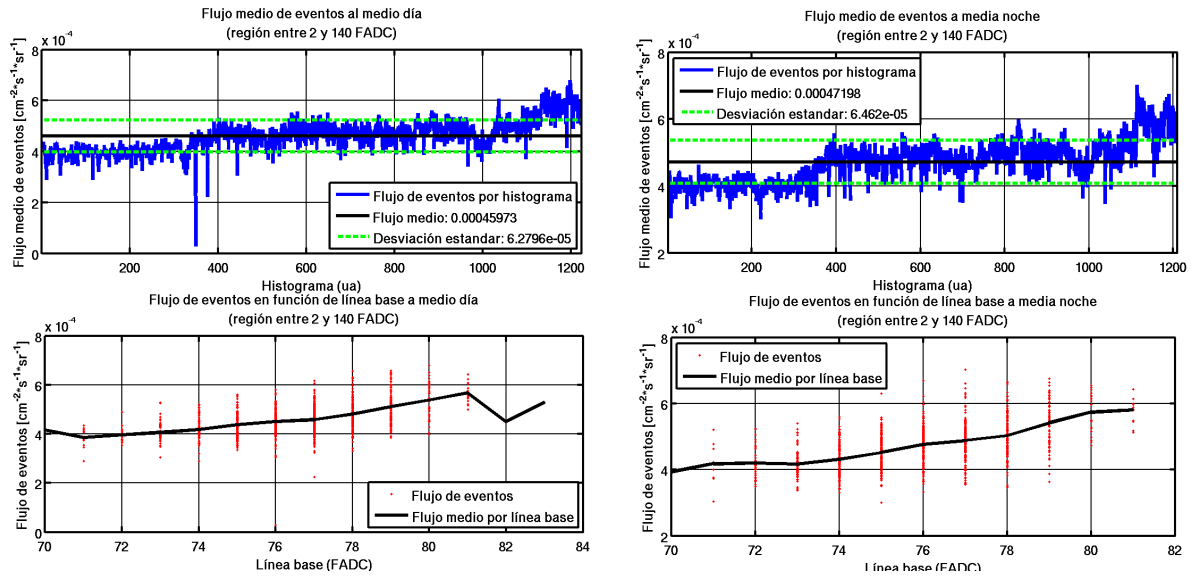


Figura 7.5: En la parte superior medición de flujo a medio día (entre las 12 y 13 horas, tiempo local) y media noche (entre las 00 y 01 horas, tiempo local) para histogramas tipo carga en la región de 2 a 140 FADC, parte superior. Las figuras de la parte inferior muestran el flujo en función de la línea base para los dos casos.

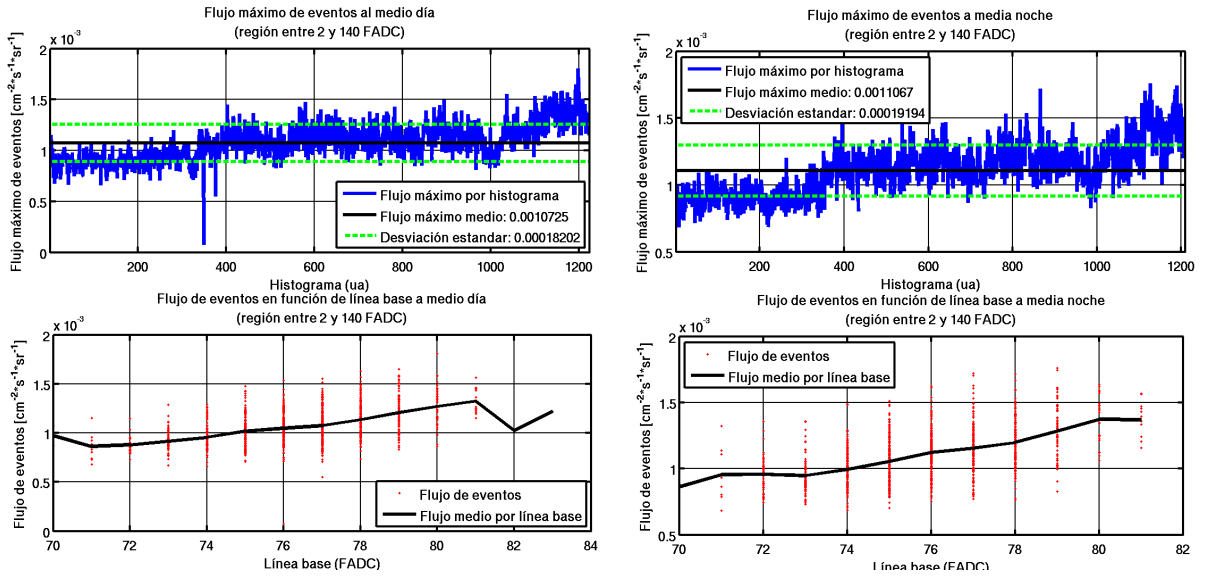


Figura 7.6: En la parte superior medición de flujo a medio día (entre las 12 y 13 horas, tiempo local) y media noche (entre las 00 y 01 horas, tiempo local) para histogramas tipo carga para el máximo de la región de 2 a 140 FADC. Las figuras de la parte inferior muestran el flujo en función de la línea base para los dos casos.

de Boconó³, fuente de constante ES que ocurren a menos de 50 km de profundidad.

³http://es.wikipedia.org/wiki/Falla_de_Bocon%C3%B3.

7.4. Correlación entre eventos sísmicos y flujo de Muones verticales

Esta falla se une en Colombia con la falla de Santa Marta, que pasa por la ciudad de Bucaramanga (ver figura 7.7), e igualmente es una fuente constante de ES, pero que ocurren entre 100 y 150 km de profundidad.

Para estudiar la posible correlación entre MV y ES, se aplica el mismo procedimiento que en LV,

- Medir el flujo de MV.
- Calcular la suma acumulada del flujo de MV.
- Registrar los eventos sísmicos ocurridos en un radio de 80 km.
- Ubicar en una misma línea de tiempo el flujo de MV y la ocurrencia de ES.

Los resultados se muestran en las figuras 7.8 y 7.9.



(a) Falla Boconó



(b) Falla Santa Marta - Boconó

Figura 7.7: (a) Falla de Boconó. (b) Falla de Santa Marta - Boconó.

7.4. Correlación entre eventos sísmicos y flujo de Muones verticales

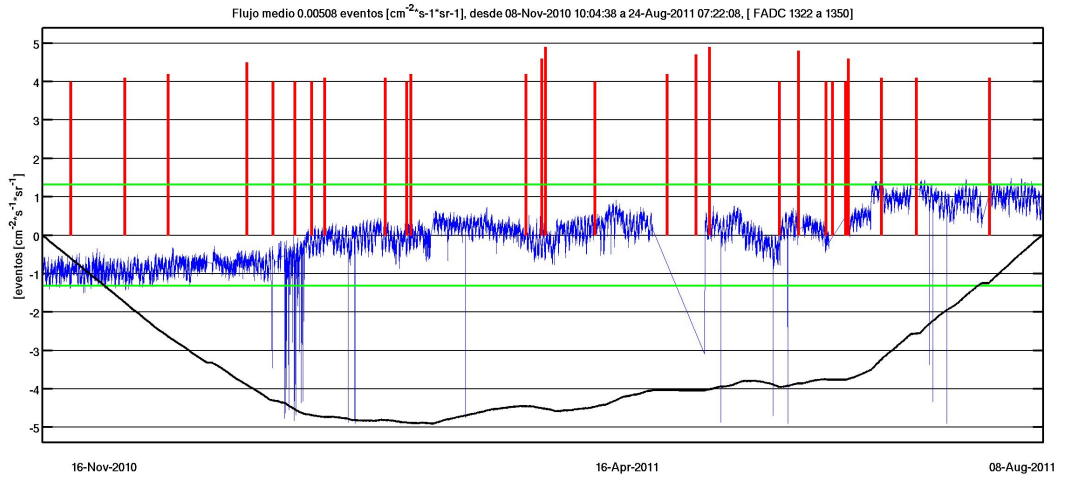


Figura 7.8: Flujo (azul) y suma acumulada (negro) de MV. El eje horizontal es la línea de tiempo sobre la cual se ubican los ES con magnitud mayor a 4.0 en la escala de Richter (rojo). El eje vertical representa la magnitud del evento sísmico. Las líneas verdes corresponden a dos desviaciones estándar del flujo.

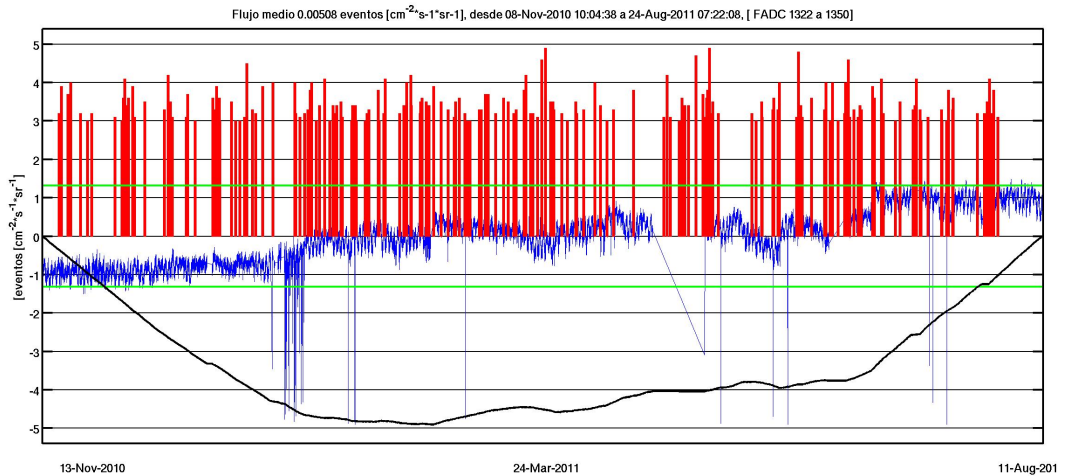


Figura 7.9: Flujo (azul) y suma acumulada (negro) de MV. El eje horizontal es la línea de tiempo sobre la cual se ubican los ES con magnitud mayor a 3.0 en la escala de Richter (rojo). El eje vertical representa la magnitud del evento sísmico. Las líneas verdes corresponden a dos desviaciones estándar del flujo.

CAPÍTULO 8

Conclusiones

La instalación, calibración y puesta en marcha del detector Guane-1, permite la detección de trazas de partículas secundarias generadas por la interacción de RC con la atmósfera terrestre. Así mismo, la Universidad Industrial de Santander, en representación de Colombia, se vincula de manera activa a la colaboración LAGO, aportando información sobre el flujo de RC a 956 msnm y el uso de detectores Cherenkov de agua con geometría cilíndrica.

La relación carga/pico ha sido usada en otros trabajos para determinar la calidad del agua usada en este tipo de detectores [15]. En el caso de Guane-1, los histogramas tipo pico muestran un FADC de saturación que corresponde al 4,38 % de los eventos que se registran por histograma. Esto quiere decir que un 4,38 % de las partículas que ingresan al detector no son distinguibles por su máximo de amplitud de señal. De acuerdo a la figura 7.1 este porcentaje hace que gran parte de la estructura presentada en histogramas tipo carga no pueda asociarse con partícula alguna, lo que a su vez impide encontrar un α (relación 7.1) que describa la calidad de agua de Guane-1 por este método. No obstante, se establece que la saturación en histogramas tipo carga está por encima de los 1613 FADC, lo que permite medir el flujo tanto de muones verticales como omnidireccionales.

Guane-1 detecta la traza de muones verticales con energías de hasta GeV, que depositan en promedio $1.33 \mu\text{C}$. El flujo de muones verticales medido es $0.0031 \text{ muones} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, mientras que el flujo de muones, omnidireccionales, es de $0.034726 \text{ muones} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, resultados coherentes con los mostrados en la figura 2.11.

Los flujos medidos a medio día y media noche muestran un resultado que no es coherente con el esperado por actividad solar y el registrado en otros lugares, como Mérida Venezuela. Las figuras 7.5 y 7.6, muestran que el flujo a medio día es 0.97 veces el flujo medido a la media noche. Para este resultado se descartaron factores como asignación de etiqueta de tiempo incorrecta y fluctaciones de la línea base, abriendo la posibilidad de que el exceso del conteo se deba a problemas relacionados con la geometría del detector, que podría ocasionar múltiples rebotes dentro del mismo.

El análisis de la correlación entre flujo de MV y ES no mostró resultados concluyentes. Esto puede deberse a que los sismos registrados en Santander ocurren a profundidades que superan los 100 km, lo que implica un cambio tan pequeño de la PML que los RC cargados no lo perciben para ser desviados. Sin embargo, los resultados obtenidos con

Guane-1 no descartan esta posible correlación, permitiendo la formulación de futuros trabajos de investigación encaminados a este objetivo.

Como resultados extras, el detector Guane-1 ha sido el propulsor de tres nuevos proyectos de investigación que se presentaron, junto con el presente, en el XXIV Congreso Nacional de Física. El primero de ellos surge a partir de la importancia de estandarizar la calidad de agua usada en todos los detectores que tiene la colaboración LAGO. Para Guane-1, a pesar que la figura 5.3 mostró una absorbancia favorable, estudios más detallados, empleando agua destilada, permiten obtener mejores resultados, tal y como se mostró con el trabajo ANÁLISIS DE AGUAS Y PROTOCOLO DE PURIFICACIÓN PARA WCD EN LA COLABORACIÓN LAGO. El segundo proyecto surge de los resultados encontrados en las simulaciones realizadas para determinar los parámetros de calidad de agua y reflectividad del Tyvek (sección 6.2), en los que se observan claras diferencias entre las pendientes de conteos para histogramas tipo carga (figuras B.3 y B.4, apéndice B). Estas diferencias pueden estar asociadas a factores como, índice de refracción del agua y la formación de micro-cascadas cerca del detector que aumentan el número de conteos registrados. El trabajo SIMULACIÓN EN DETECTORES DE AGUA CHERENKOV PARA LAGO-COLOMBIA Y LAGO-VENEZUELA mostró que estos resultados están asociados a cambios en el índice de refracción del agua. El tercer proyecto tiene como objetivo encontrar señales de GRB de forma automática en la data adquirida por los detectores de la colaboración LAGO. Gracias a la puesta en marcha de Guane-1 y a los resultados obtenidos con éste, la colaboración abrió los datos para la ejecución de este proyecto cuyos primeros resultados se mostraron en el trabajo BÚSQUEDA DE GRBs EN EL PROYECTO LAGO.

Finalmente, Guane-1 abre paso a la implementación de un nuevo detector de geometría cilíndrica con una relación altura/diámetro menor¹, denominado Guane-2. El objetivo de Guane-2, es reducir la saturación que se presenta en los histogramas tipo pico, continuar con el estudio de RC y servir como detector de aprendizaje para el laboratorio de Física moderna.

Toda la información, detalles de instalación, calibración y mediciones logrados con Guane-1 se encuentran registrados en la wiki que la colaboración LAGO ha facilitado para la comunicación de sus integrantes².

¹50 cm de diámetro por 90 cm de alto.

²<http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/WikiComunidadLAGO>.

APÉNDICE A

Características PMT

	unit	min	typ	max
photocathode: bialkali				
active diameter	mm		190	
active surface area	cm ²		430	
quantum efficiency at peak	%		30	
luminous sensitivity	μA/lm		70	
with CB filter		9	12	
with CR filter			1	
dynodes: 12LFSbCs				
anode sensitivity in divider A:				
nominal anode sensitivity	A/lm		1000	
max. rated anode sensitivity	A/lm		5000	
overall V for nominal A/lm	V		1200	1800
overall V for max. rated A/lm	V		1300	
gain at nominal A/lm	x 10 ⁶		15	
volts for 5 x 10 ⁷ gain	V		1300	2800
dark current at 20 °C:				
dc at nominal A/lm	nA		20	200
dc at max. rated A/lm	nA		100	
dark count rate	s ⁻¹		4000	10000
afterpulse rate:				
afterpulse time window	μs	0.4	5	10
pulsed linearity (-5% deviation):				
divider A	mA		30	
divider B	mA		100	
pulse height resolution:				
single electron peak to valley	ratio	1.5	2	
rate effect (I_a for Δg/g=1%):				
	μA		20	
magnetic field sensitivity:				
the field for which the output decreases by 50 %				
most sensitive direction	T x 10 ⁻⁴		0.3	
temperature coefficient:				
	% °C ⁻¹		± 0.5	
timing:				
single electron rise time	ns		3.5	
single electron fwhm	ns		4.5	
single electron jitter (fwhm)	ns		2.7	
multi electron rise time	ns		4	
multi electron fwhm	ns		6	
transit time	ns		70	
weight:				
	g		650	
maximum ratings:				
anode current	μA			100
cathode current	nA			1500
gain	x 10 ⁶			70
sensitivity	A/lm			5000
temperature	°C	-30		60
V (k-a) ⁽¹⁾	V			2250
V (k-d1)	V			600
V (d-d) ⁽²⁾	V			300
ambient pressure (absolute)	kPa			202

⁽¹⁾ subject to not exceeding max. rated sensitivity ⁽²⁾ subject to not exceeding max rated V(k-a)

Estimación de calidad de agua y Tyvek

Para conocer los parámetros calidad de agua (A_g) y reflectividad del Tyvek (R_f) se aplica un método de comparación, a partir de simulaciones con LagoSim. Para esto se aplica el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar una muestra de 400 histogramas de carga y pico tomados con Guane-1 y realizar un histograma medio (HmG) de éstos y encontrar dos características propias.
2. Estimar el número de partículas que deben ser simuladas a partir del número medio de partículas que registró Guane-1 por histograma.
3. Realizar las respectivas simulaciones usando LagoSim variando los parámetros de agua y reflectividad de Tyvek.
4. A partir del punto anterior encontrar los parámetros correspondientes del detector y realizar una simulación en modo VEM para encontrar el valor FADC respectivo.

Para el primer paso se seleccionaron 400 histogramas de carga, tomados cada uno en un tiempo de 600 s. De acuerdo a la figura B.1 se determinan dos regiones características, marcadas como región uno y región dos. El tipo de partículas que producen estas regiones se determinan a partir de una simulación de muones en modo RANDOM.

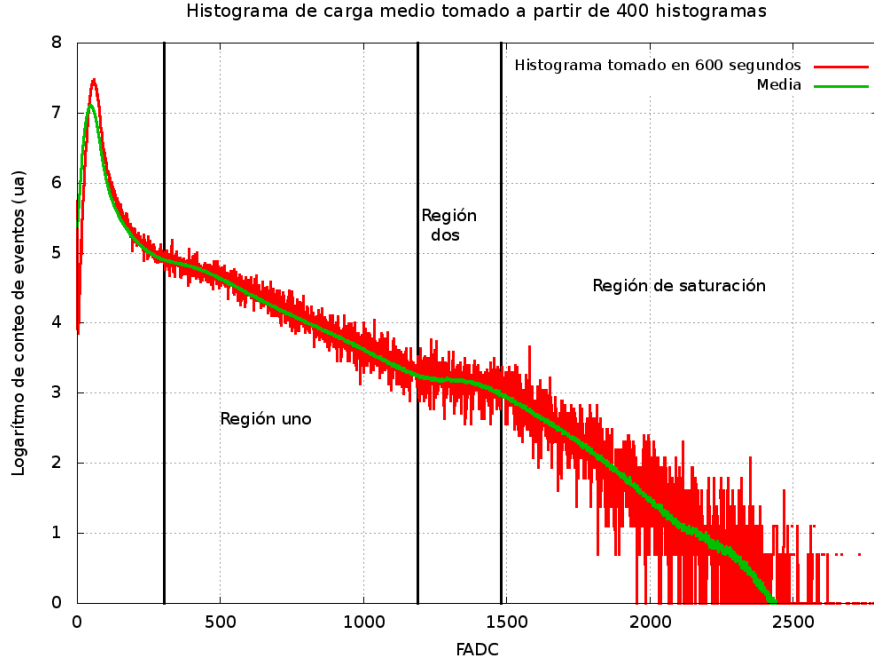


Figura B.1: Logaritmo del conteo de eventos para histogramas de datos reales. La región de saturación corresponde a eventos que superaron 1023 FADC. En negro se muestra el promedio para 400 histogramas de carga y en rojo un histograma cualquiera de los 400.

La caracterización de las regiones uno y dos se realiza con ajustes de la forma,

$$f(x) = a_1 \cdot e^{-x/b_1}, \quad (\text{B.1})$$

$$g(x) = a_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2}, \quad (\text{B.2})$$

donde a_1 , a_2 , b_1 , b_2 y c_2 son constantes. Estos ajustes se presentan en la figura B.2, cada uno de ellos con una variancia de residuo (VR), calculada como el cociente entre la desviación cuadrática ponderada (WSSR¹),

$$W^2 = \sum_i^N [y_i^2 - f(x_i)]^2, \quad (\text{B.3})$$

donde y_i , en este caso, corresponde a los conteos y $f(x_i)$ es el valor para la función que deseamos ajustar², y ndf es el número de grados de libertad,

$$\text{VR} = \frac{\text{WSSR}}{\text{ndf}} \quad (\text{B.4})$$

¹por sus siglas en inglés, weighted sum of squared residuals.

²<http://www.unioviedo.es/qcg/d-qb2/Problemas.pdf>.

Los valores de las constantes de ajustes se presentan en el cuadro B.1.

VR	VR	a_1	b_1
Exponencial	Gaussiano		
0.17	0.059	82.48 ± 0.04	330.15 ± 0.55

VR	VR	a_2	b_2	c_2
Exponencial	Gaussiano			
0.17	0.059	24.46 ± 0.06	1275 ± 4	452.85 ± 4.89

Cuadro B.1: Cuadro de valores de constantes de ajuste para la figura B.2.

La figura B.2, y de acuerdo a los valores anteriores, permite determinar dos características importantes de este los histogramas de DBmga, el primero es que la región entre 600 y 1200 FADC se comporta como una función exponencial y la región comprendida entre 1300 y 1600 FADC lo hace de acuerdo a una función tipo gaussiana centrada en 1275 ± 4 FADC.

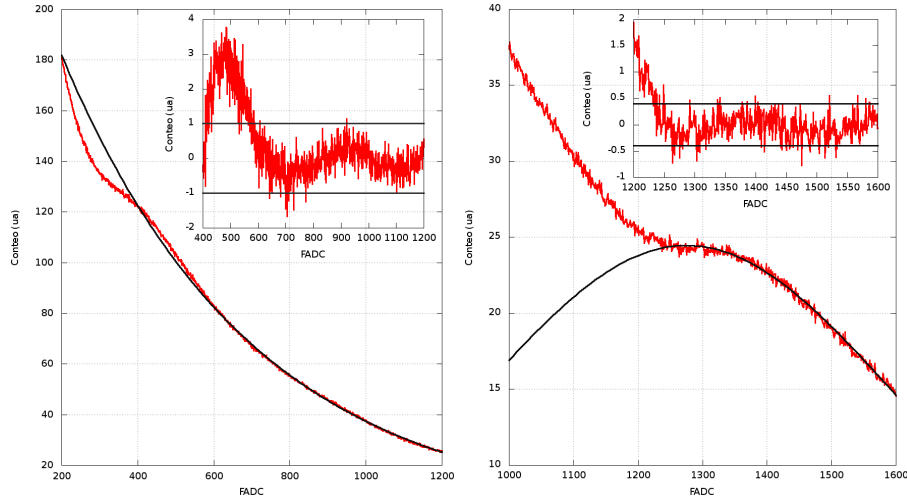


Figura B.2: Ajustes para histograma medio tipo carga para la región uno, entre 600 y 1200 FADC (izquierda, ajuste exponencial B.1), y la región dos, 1300 y 1600 FADC (derecha, ajuste gaussiano B.2). Cada ajuste presenta una variancia de residuo de 0.17 y 0.059, respectivamente. La sub-figura que se muestra corresponde a la sustracción del respectivo ajuste de la región ajustada.

El segundo paso se calcula a partir del histograma Guane-1; calculando el número medio de partículas que registra DBmga (N_{mpr}) como,

$$N_{mpr} = \frac{\sum \text{eventos/histograma}}{400}, \quad (\text{B.5})$$

que corresponde a un total de 197168 eventos. Con esta información se debe realizar simulaciones de 200000 partículas, lo cual excede en un factor de 1.014 el número de partículas medio registrado por el detector.

Los parámetros de Ag y Rf, usados para la simulación, van de 20 a 30 y de 0.92 a 0.96, respectivamente. Esto da un total de 18 simulaciones. Debido al tiempo de ejecución de cada simulación para 200000 partículas (45 minutos aproximadamente), se realizan simulaciones de 50000 partículas. El cuadro B.2 resume la información de cada simulación, mostrando los valores de VR para cada ajuste.

Reflectividad	Calidad de agua	VR para ajuste exponencial	VR para ajuste gaussiano
0.92	20	30.874	23.456
0.94	20	23.221	32.873
0.96	20	43.721	13.573
0.92	22	67.981	21.983
0.94	22	19.871	11.907
0.96	22	34.071	67.986
0.92	24	45.861	26.861
0.94	24	78.191	16.977
0.96	24	23.780	98.763
0.92	26	56.873	2.612
0.94	26	34.130	15.183
0.96	26	89.325	71.791
0.92	28	84.623	23.033
0.94	28	16.081	89.871
0.96	28	72.234	18.575
0.92	30	14.341	32.783
0.94	30	93.373	67.313
0.96	30	75.126	87.980

Cuadro B.2: Cuadro de simulaciones realizadas con LagoSim para estimar los parámetros calidad de agua y reflectividad de Tyvek para DBmga. Cada simulación se realizó para 50000 partículas.

La mala calidad de los ajustes (VR) sugiere dos cosas, la primera, que se debe realizar las mismas simulaciones para un número de 200000 partículas, y la segunda que se debe usar un mayor número de histogramas para disminuir al máximo la dispersión de los puntos, tal y como se mostró en la figura B.1 usando 400 histogramas para obtener Guane-1. Estas simulaciones implican un tiempo considerable (aproximadamente

2 días por cada 50 histogramas) de simulación. Por esta razón y basados en un análisis cualitativo de los resultados obtenidos de las simulaciones listadas en B.2, se escogen los siguientes parámetros de Ag y Rf para realizar 50 histogramas, cada uno con un número aproximado de 200000 partículas,

Ag: 20, 22

Rf: 0.94

Los resultados se presentan en las figuras B.3 y B.4, de acuerdo a las expresiones B.1 y B.2. El cuadro B.3 resume las constantes obtenidas para los respectivos ajustes.

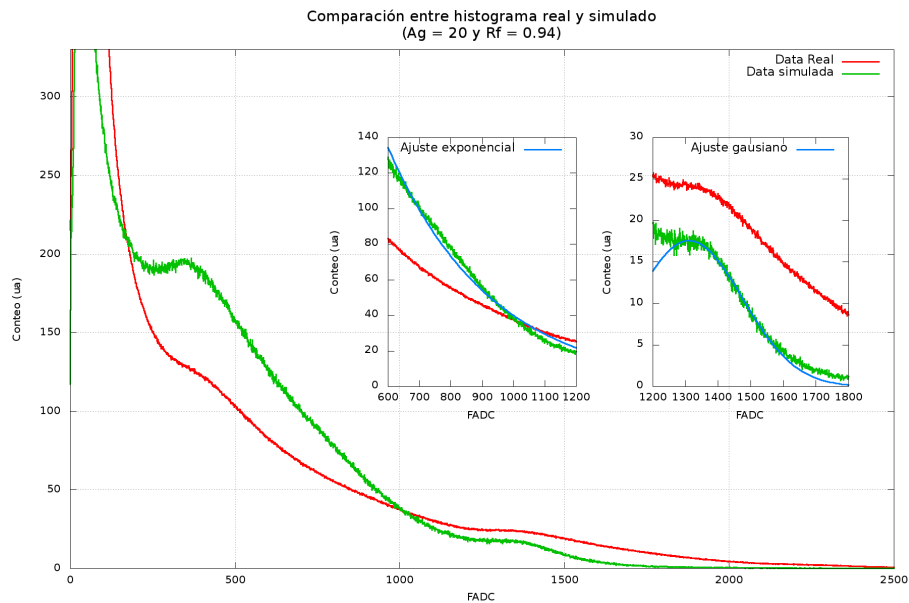


Figura B.3: Histograma medio (verde) para 50 histogramas simulados con calidad de agua 20 y reflectividad de Tyvek 0.94. El valor VR, para el ajuste exponencial, es de 11.61, y para el ajuste gaussiano es 0.25.

Con los resultados de los cuadros B.1 y B.3 encontramos que los mejores parámetros de Ag y Rf corresponden a 20 y 0.94, respectivamente.

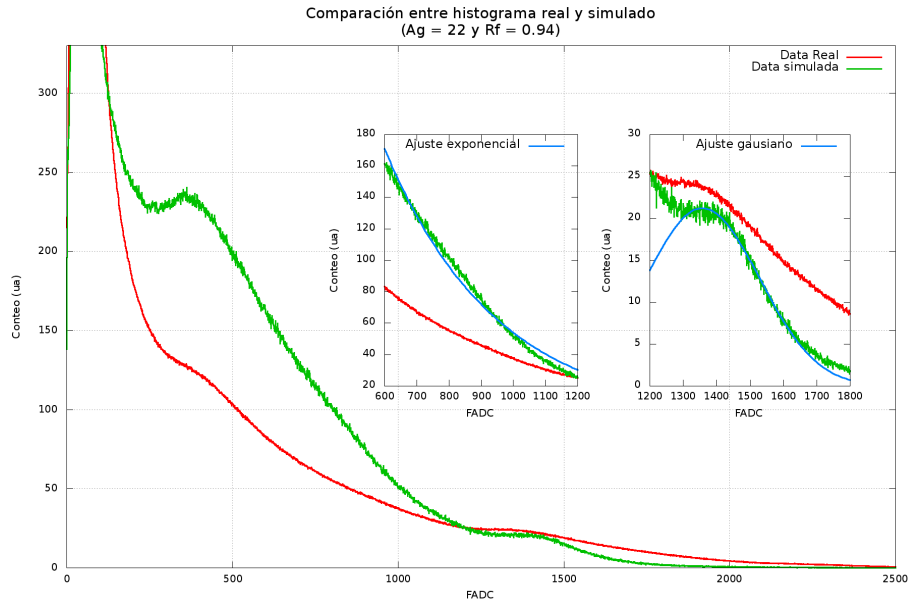


Figura B.4: Histograma medio (verde) para 50 histogramas simulados con calidad de agua 22 y reflectividad de Tyvek 0.94. El valor VR, para el ajuste exponencial, es de 18.26, y para el ajuste gaussiano es 0.39.

Ag	VR Exponencial	VR Gaussiano	a_1	b_1
20	11.61	0.25	134.29 ± 0.04	330.15 ± 1.66
22	18.26	0.394808	170.97 ± 0.45	346.78 ± 1.73

Ag	VR Exponencial	VR Gaussiano	a_2	b_2	c_2
20	11.61	0.25	17.58 ± 0.08	1311 ± 3	230.49 ± 2.70
22	18.26	0.394808	21.22 ± 0.05	1358 ± 1.7	240.99 ± 2.53

Cuadro B.3: Cuadro de valores para las constantes de ajustes de las figuras B.3 y B.4.

Bibliografía

- [1] I. Allekotte, A. Barbosa, P. Bauleo, C. Bonifazi, B. Civit, C. Escobar, B. Garcia, G. Guedes, M. Gomezberisso, and J. Harton, The surface detector system of the Pierre Auger Observatory, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **586**(3), 409–420 (Mar 2008). (Cited on page 13.)
- [2] D. Allard, I. Allekotte, C. Alvarez, H. Asorey, H. Barros, X. Bertou, O. Burgoa, M. G. Berisso, O. Martínez, and P. M. Loza, Use of water-Cherenkov detectors to detect Gamma Ray Bursts at the Large Aperture GRB Observatory (LAGO), *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* **595**(1), 70–72 (2008). (Cited on pages 14, 28 and 29.)
- [3] G. R. Mejía and C. Aguirre, *La Radiación Cósmica*, Programa regional para el desarrollo científico y tecnológico, Secretaría general de la Organización de los Estados Americanos, Washington, D.C., 1973. (Cited on pages 15 and 23.)
- [4] G. P. S. Occhialini and C. F. POWELL, Observations on the production of mesons by cosmic radiation., *Nature* **162**(4109), 168–173 (1948). (Cited on page 15.)
- [5] T. K. Gaisser, J. Cronin, and S. P. Swordy, *Cosmic Ray at the Energy Frontier*, volume 276, *Scientific American*, 1997. (Cited on page 16.)
- [6] S. Vernetto, Detection of gamma-ray bursts in the 1 GeV-1 TeV energy range by ground-based experiments, *Astroparticle Physics* **13**, 75–86 (Mar. 2000). (Cited on pages 17, 18, 29 and 30.)
- [7] B. Ostlie., *Introduction to modern astrophysics*, PEARSON, Addison Wesley, Institute of Physics, University of Bern, Bern, Switzerland, second edition, 2007. (Cited on pages 16, 17 and 18.)
- [8] P. K. F. Grieder, *COSMIC RAYS AT EARTH, Researcher's Reference Manual and Data Book*, Elsevier Science, Institute of Physics, University of Bern, Bern, Switzerland, 2001. (Cited on pages 17, 18, 24, 26, 27, 44 and 49.)
- [9] R. E. Benestad., *Solar Activity and Earth's Climate*, Springer, second edition, 2006. (Cited on page 18.)
- [10] K. Nagamine., *Introductory Muon Science*, Cambridge University Press, 2007. (Cited on page 20.)
- [11] F. Arqueros Martínez, Las partículas más energéticas de la naturaleza, *A Distancia* (2009). (Cited on page 22.)

Bibliografía

- [12] Y. Pérez, Caracterización de detectores Cherenkov en el Proyecto LAGO, Master's thesis, Universidad de los Andes de Mérida, 2009. (Cited on page 23.)
- [13] T. Stantev., *High Energy Cosmic Rays*, Springer, Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, second edition, 2010. (Cited on page 23.)
- [14] J. Hobbs., *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, Elsevier Science, University of Washinton, second edition, 2006. (Cited on pages 23, 24 and 25.)
- [15] C. Quintero., Calibración de los Detectores Prototipos del Proyecto L.A.G.O (Venezuela), Master's thesis, Universidad de los Andes de Mérida, 2011. (Cited on pages 26, 34 and 60.)
- [16] D. Allard, Detecting GRBs with the Pierre Auger Observatory using the single particle technique, *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)* **165**, 110–115 (2007). (Cited on page 28.)
- [17] F. Acero, F. Aharonian, A. G. Akhperjanian, G. Anton, U. Barres de Almeida, A. R. Bazer-Bachi, Y. Becherini, B. Behera, K. Bernlohr, A. Bochow, C. Boisson, J. Bolmont, V. Borrel, J. Brucker, F. Brun, P. Brun, R. Buhler, T. Bulik, I. Busching, T. Boutelier, P. M. Chadwick, A. Charbonnier, R. C. G. Chaves, A. Cheesebrough, L.-M. Chounet, A. C. Clapson, G. Coignet, M. Dalton, M. K. Daniel, I. D. Davids, B. Degrange, C. Deil, H. J. Dickinson, A. Djannati-Atai, W. Domainko, L. O. Drury, F. Dubois, G. Dubus, J. Dyks, M. Dyrda, K. Egberts, D. Emmanoulopoulos, P. Espigat, C. Farnier, S. Fegan, F. Feinstein, A. Fiasson, A. Forster, G. Fontaine, M. Fussling, S. Gabici, Y. A. Gallant, L. Gerard, D. Gerbig, B. Giebels, J. F. Glicenstein, B. Gluck, P. Goret, D. Goring, D. Hauser, M. Hauser, S. Heinz, G. Heinzlmann, G. Henri, G. Hermann, J. A. Hinton, A. Hoffmann, W. Hofmann, P. Hofverberg, S. Hoppe, D. Horns, A. Jacholkowska, O. C. de Jager, C. Jahn, I. Jung, K. Katarzynski, U. Katz, S. Kaufmann, M. Kerschhaggl, D. Khangulyan, B. Khelifi, D. Keogh, D. Klochkov, W. Kluzniak, T. Kneiske, N. Komin, K. Kosack, R. Kossakowski, G. Lamanna, J.-P. Lenain, T. Lohse, V. Marandon, O. Martineau-Huynh, A. Marcowith, J. Masbou, D. Maurin, T. J. L. McComb, M. C. Medina, J. Mehault, R. Moderski, E. Moulin, M. Naumann-Godo, M. de Naurois, D. Nedbal, D. Nekrassov, B. Nicholas, J. Niemiec, S. J. Nolan, S. Ohm, J.-F. Olive, E. de Ona Wilhelmi, K. J. Orford, M. Ostrowski, M. Panter, M. P. Arribas, G. Pedalletti, G. Pelletier, P.-O. Petrucci, S. Pita, G. Puhlhofer, M. Punch, A. Quirrenbach, B. C. Raubenheimer, M. Raue, S. M. Rayner, O. Reimer, M. Renaud, F. Rieger, J. Ripken, L. Rob, S. Rosier-Lees, G. Rowell, B. Rudak, C. B. Rulten, J. Ruppel, V. Sahakian, A. Santangelo, R. Schlickeiser, F. M. Schock, U. Schwanke, S. Schwarzburg, S. Schwemmer, A. Shalchi, M. Sikora, J. L. Skilton, H. Sol, L. Stawarz, R. Steenkamp, C. Stegmann, F. Stinzing, G. Superina, A. Szostek, P. H. Tam, J.-P. Tavernet, R. Terrier, O. Tibolla, M. Tluczykont, C. van Eldik, G. Vasileiadis, C. Venter, L. Venter, J. P. Vialle,

Bibliografia

- P. Vincent, M. Vivier, H. J. Volk, F. Volpe, S. J. Wagner, M. Ward, A. A. Zdziarski, and A. Zech, Detection of Gamma Rays from a Starburst Galaxy, *Science* **326**(5956), 1080–1082 (2009). (Cited on page 31.)
- [18] X. Bertou and D. Allard, Detection of GRB with water Cherenkov detectors, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research* **A553**, 299–303 (Jan 2005). (Cited on page 31.)
- [19] J. J. V., *Cerenkov Radiation and its applications*, Pergamon Press, 1958. (Cited on pages 31 and 33.)
- [20] J. D. John., *Classical Electrodynamics*, John Wiley Sons, third edition, 1998. (Cited on page 33.)
- [21] A. Etchegoyen, P. Bauleo, X. Bertou, C. B. Bonifazi, A. Filevich, M. C. Medina, D. G. Melo, A. C. Rovero, A. D. Supanitsky, A. Tamashiro, and The Pierre AUGER Collaboration, Muon-track studies in a water Cherenkov detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **545**, 602–612 (June 2005). (Cited on pages 47 and 48.)
- [22] A. Velarde, R. Ticona, and P. MIRANDA, PROYECTO LAGO BOLIVIA, *Revista Boliviana de Física* **15**(15), 32–38 (2009). (Cited on page 51.)