

Prefacio

Contenido del prefacio.

Índice de contenido

Lista de Figuras	ix
Lista de Cuadros	xi
Título del resumen	xiii
1 Introducción	1
2 Objetivos	3
2.1 Objetivo general del megaproyecto	3
2.2 Objetivo general del módulo	3
2.3 Objetivos específicos	3
3 Justificación	5
4 Marco Teórico	7
4.1 Rayos cósmicos	7
4.1.1 Generalidades y descubrimiento de los rayos cósmicos	7
4.1.2 Espectro de rayos cósmicos	8
4.2 Actividad solar y rayos cósmicos	8
4.3 Cascadas de área extensa	8
4.3.1 Generalidades de las cascadas de área extensa	8
4.3.2 Distribución de energías a nivel del suelo	9
4.3.3 Simulación de cascadas de área extensa	10
4.4 Radiación de Vavilov-Cerenkov	11
4.5 Vida media del muón	11
4.6 Detectores Cherenkov en agua (WCD)	11
4.6.1 Simulación Geant4 de detectores Cherenkov en agua	11
5 Antecedentes	15
5.1 Latin American Giant Observatory	15
5.1.1 Sitios de LAGO	15
5.1.2 Calibración de datos en LAGO	16
5.2 Observatorio Pierre Auger	16

5.3	Uso de Geant4 en LAGO y otros experimentos	17
6	Metodología	19
6.1	Instalación del WCD	19
6.2	Calibración por histograma de datos del WCD	19
6.3	Vida media del muón con datos del WCD	19
6.4	Simulación	19
6.4.1	Geometría	19
6.4.2	Detección	21
6.4.3	Generación de evento	21
6.4.4	Datos de salida	22
7	Resultados	23
7.1	Distribuciones de fotones para un evento por simulación	23
7.2	Pulsos característicos de partículas incidentes por simulación	23
8	Discusión	27
9	Bibliografía	29
10	Anexos	31
10.1	Normalidad de fotones producidos y detectados en la simulación	32
10.2	Gráficas de los 2000 pulsos analizados para la caracterización de la simulación . . .	34

Lista de figuras

4.1	Distribución de la energía de muones generada con números aleatorios basado en la fórmula de Geisser	10
4.2	Ilustración de las posibles reflexiones que el modelo <i>UNIFIED</i> calcula para la dirección de reflexión de fotones ópticos incidentes a superficies ásperas. Las áreas sombreadas ilustran la probabilidad gaussiana de cada reflexión.	13
5.1	Distribución geográfica de los detectores de LAGO operacionales (triángulos azules), y los que comenzarán a funcionar entre 2016 y 2017 (cuadrados rojos), y a la izquierda el umbral de rigidez vertical (vertical rigidity cutoff) del campo geomagnético para cada estación.	15
6.1	Ilustración de la geometría general del detector en la simulación Geant4, mostrando el recubrimiento Tyvek en forma cilíndrica y las superficies de vidrio y fotocátodo del fotomultiplicador	20
6.2	Distribución para el ángulo θ generadas por el algoritmo del muestreo por rechazo (histograma) y la curva $\cos^2(\theta)$	21
7.1	Promedio del número de fotones detectados respecto a la energía del muón vertical incidente. Las barras de error representan el intervalo de un 95% de confianza . . .	24
7.2	El promedio de todos los pulsos para cada tipo de partícula calculados con intervalos de 95% de confianza	25
7.3	Representación gráfica de la relación entre amplitud y <i>rise time</i> para los diferentes tipos de partículas que generaron los pulsos en la simulación	25
10.1	Histogramas de los fotones producidos, fotones detectados y el cociente de los fotones detectados sobre los producidos para un muón vertical de 4GeV en la simulación, con un tamaño muestral de 1000 eventos	33
10.2	a) 1000 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para muón vertical de 4GeV, b) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para partículas gamma de 100 MeV, c) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para electrón de Michael de 37 MeV	34

Lista de tablas

4.1	Procesos físicos para la simulación de radiación Cherenkov	11
6.1	Descripción de las propiedades de la superficie Agua-Tyvek asignadas para dos energías de fotón	20
7.1	Resultados de la regresión lineal de los valores del promedio de fotones detectados respecto a energía de muón vertical incidente	23
7.2	Intervalos de confianza para los valores medios de amplitud y <i>rise time</i> para cada tipo de partícula incidente	24
10.1	Descripción de los objetos en la simulación y sus jerarquías lógicas	31
10.2	Propiedades de material asignadas al agua en la simulación a través de la clase G4MaterialsPropertiesTable y asignadas a 32 energías de fotón	32
10.3	Valores p para la prueba Shapiro-Wilk de normalidad de las distribuciones de los fotones producidos, detectados y el cociente	33

Título del resumen

Aquí va el texto del resumen

1 Introducción

El presente Megaproyecto tiene como objetivo diseñar y construir un detector de radiación Cherenkov de agua (WCD por sus siglas en inglés) para tomar y procesar datos en la determinación de eventos atmosféricos como consecuencia de reducción Forbush. Al culminar la realización de este proyecto se pretende promover un intercambio generacional de conocimientos de partículas de altas energías, contribuir el área de investigación de este tipo en Guatemala, colaborar con la recopilación de información por parte de observatorios LAGO, y servir como referencia para la construcción de observatorios similares a mayores altitudes en otras regiones del país.

El módulo de física en este megaproyecto abarca la caracterización de señal de eventos. Esto incluye la elaboración de una simulación Monte Carlo de eventos en el tanque y la elaboración de estrategias para la calibración de datos y la identificación de partículas a partir de la señal de eventos. La simulación Monte Carlo tiene como objetivo caracterizar el conteo de fotones por el fotomultiplicador para el evento de un muón o gamma secundario, y se realizará utilizando la herramienta GEANT4 desarrollada por CERN. El resultado de esta simulación será una completa descripción de la forma esperada de la señal en el fotomultiplicador para un evento típico de muón que atravieza el tanque, muón que decae y el electrón que produce, y rayos gamma que producen pares, y esto para diferentes ángulos de incidencia y a lo largo del espectro de energético de un muón o rayo gamma como partícula secundaria proveniente de una cascada extensa. Esta descripción es crucial para cumplir con el objetivo perteniente a la determinación de la identidad de las partículas que generan los eventos que observaremos ya que la forma de la señal que obtendremos del multiplicador serán comparadas con los resultados de la simulación con fines de calibración.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general del megaproyecto

Diseñar y construir un detector de radiación Cherenkov de agua para tomar y procesar datos, en la identificación de partículas secundarias provenientes de cascadas extensas de rayos cósmicos inciden en el detector de radiación Cherenkov de agua.

2.2 Objetivo general del módulo

Calibrar las señales obtenidas del fototubo dentro del WCD utilizando el modo histograma y comparando a resultados de una simulación Monte Carlo con Geant4.

2.3 Objetivos específicos

- Obtener la calibración por el muón vertical equivalente (VEM) a partir de la simulación y compararlo con el análisis de primer nivel de los datos de ACQUA del montaje experimental del tanque.
- Calcular la vida media del muón a partir de una corrida del experimento en el WCD.
- Obtener la forma representativa de pulsos en el tiempo con la simulación en geant4 para muones que atraviesan, muones que decaen, electrones, sus antipartículas respectivas, y partículas gamma.

3 Justificación

Ya que la actividad solar y eventos en el medio interplanetario tienen efectos disruptivos sobre la magnetósfera, el estudio del efecto de fenómenos solares desde diferentes posiciones en la Tierra es muy valioso para prevenir daños sobre satélites y problemas en transmisiones de radio.

Por otro lado, este es uno de los pocos proyectos de física experimental en Guatemala, por lo que su valor formativo en el trabajo científico en nuestra comunidad es importante ya que establecerá una plataforma para continuar la investigación de partículas de altas energías de origen astrofísico. El intercambio generacional que originará el proyecto, así como su mantenimiento y replicación serán formativos para estudiantes de física, química e ingenierías. Además, el trabajo en la electrónica de instrumentación del proyecto será un gran avance en el desarrollo tecnológico del país.

4 Marco Teórico

4.1 Rayos cósmicos

4.1.1. Generalidades y descubrimiento de los rayos cósmicos Los rayos cósmicos son partículas, con excepción de fotones, que se originan fuera del Sistema Solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano. Generalmente estas partículas son núcleos atómicos, desde hidrógeno hasta de hierro. En la literatura, se les denomina también «primarios», especialmente en el contexto de cascadas de área extensa (descritas en la siguiente sección. Los rayos cósmicos fueron descubiertos porque en laboratorios de física se observaba que electrómetros cargados y aislados de fuentes radioactivas se descargaban sin aparente razón. (Asorey, H. , 2012)

Theodor Wulf a los inicios del siglo XX desarrolló un electroscoipo más sensible y notó que en la punta de la Torre Eiffel la tasa de decaimiento era mayor de la esperado tomando únicamente la radiación gamma, como pensado en esa época. Por otro lado, Domenico Pacini, realizó tres mediciones: a nivel del suelo, en la superficie del Lago Bracciano, y a tres metros de profundidad en el lago. Comparando estas mediciones, en las que se destacaba que bajo el agua la tasa disminuía, concluyó que debe de haber una fuente de radiación adicional. (Asorey, H. , 2012)

V.F. Hess en 1912 fue quien finalmente dijo que la fuente de esta radiación es de origen extraterrestre y que ingresa desde arriba de la atmósfera con gran poder penetrante. El experimento que realizó le ganó el Nobel de Física en 1936. Consistía en la medición de tasas de ionización a diferentes altitudes. Las mediciones las realizó durante 10 vuelos en globos aereostáticos hasta los 5000 m.s.n.m. La dependencia de la tasa de ionización sobre la altitud fue lo que llevó a su importante conclusión. (Asorey, H. , 2012)

Los rayos cósmicos tienen un rango de energía extremadamente amplio: desde $10^5 eV$, que incluye partículas del viento solar hasta $10^{20} eV$, partículas intergalácticas. Los rayos cósmicos de ultra alta energía son primarios con energías superiores a $E_p \geq 10^{18} eV$. Su medición directa es casi imposible debido al bajísimo flujo. En cambio, se infiere su existencia por la detección de las partículas secundarias producidos por la cascada de área extensa producida por el ingreso del primario. Esto fue observado por primera vez en 1934 por Bruno Rossi quien notó que equipos separados por gran distancia detectaban simultáneamente aumentos en el conteo de partículas; Pierre Auger infirió en 1938 que esto era explicado por el ingreso de una partícula primaria de energías superiores a los $10^{15} eV$. (Asorey, H. , 2012)

Los modelos de aceleración explican cómo estas partículas pueden alcanzar energías tan altas.

Un mecanismo de aceleración es cuando RC atraviesan una nube de gas en el medio interplanetario. El efecto de esta interacción es un aumento en la energía del RC. Sin embargo, este aumento es ineficiente a menos que la velocidad propia de la nube sea de magnitudes relativistas ($\beta \approx 1$), como con los frentes de choque producidos por supernovas. Sin embargo, estos modelos sufren aún de sobresimplificación, ya que consideran la densidad en los frentes de choque como funciones escalón y que el frente es no relativista, por lo que la explicación de rayos cósmicos de ultra alta energía es todavía un problema abierto. (Asorey, H. , 2012)

4.1.2. Espectro de rayos cósmicos

4.2 Actividad solar y rayos cósmicos

Estos fenómenos consisten en la variación rápida de la intensidad de los rayos cósmicos, seguida por una eyección coronal desde el Sol. Este efecto fue descubierto por Scott E. Forbush en 1937, que también observó que la intensidad de los RC al alcanzar la Tierra se encontraban inversamente correlacionados con los 11 años de ciclo solar de las manchas solares. Un detector que lleve la cuenta permanente de los rayos cósmicos que llegan a tierra puede dar información acerca de estos eventos solares que originan los decrecimientos Forbush. A partir de los datos residuales de los tanques de agua del Pierre Auger, han construido un análisis de modulaciones solares de rayos cósmicos -en los que entran los Forbush decreases- y los compararon con los mismos análisis para estos eventos estudiados en detectores de neutrones, concluyendo que es un estudio valioso, viable, y complementario en especial a las mediciones por sondas espaciales in situ que recolectan esa info en el espacio; el análisis de rayos cósmicos desde el suelo es complementario porque puede dar información de la estructura de la heliósfera y de ICME (interplanetary corona mass ejection), ya que la capacidad de las sondas de hacer esto es mínima. (Villaseñor et al , 2011)

4.3 Cascadas de área extensa

4.3.1. Generalidades de las cascadas de área extensa Una cascada de área extensa (CAE) se origina de una partícula primaria de alta energía que entra en la atmósfera. Al interactuar con los núcleos de los átomos germina una cascada de partículas secundarias que eventualmente nos llegan al suelo. Una cascada lleva a tres componentes: electromagnético, de muones y de hadrones; 1% es de hadrones, 10% son muones y 89% son partículas cargadas (electrones y positrones). El 90% de la energía está en el canal electromagnético. El número total de partículas secundarias depende de a) la energía de la partícula primaria (12-20 órdenes de magnitud eV) b) ángulo cenital (entre 0° , vertical, y 90° , horizontal), c) punto de primer interacción. El ángulo cenital influye en gran medida, porque una partícula que ingresa a la atmósfera con un ángulo cercano a 90 grados tiene una cascada sobre el suelo 40 veces menos energética que una que entró verticalmente. El primer punto de interacción depende además del tipo de partícula primaria. (Asorey, H. , 2012)(Suarez , 2014)

Lo que determina la forma de la cascada es la cantidad de materia atravesada, por lo que la densidad (y, por ende, la presión atmosférica) tiene una influencia directa sobre el flujo de partículas en el suelo. Esta anticorrelación entre presión atmosférica y flujo debe de ser corregida si se quiere obtener información sobre el flujo de partículas. La distribución lateral al eje de la lluvia tiene un máximo en algún lugar sobre el nivel del mar, típicamente entre 4 y 7 km (la cascada tiene una forma como de nabo, gorda en medio). Luego de este punto de mayor radio de la cascada, la creación de partículas secundarias disminuye y la densidad de partículas también. Se caracteriza la edad de la cascada (S) alrededor de este punto máximo ($S=1$ para antes de ese máximo, $S=1$ cuando ocurre ese máximo y $S=2$ para luego del máximo). La distribución energética de los muones y rayos gamma en la simulación de este proyecto se tomará de la literatura citada [1]. (Asorey, H. , 2012)(Suarez , 2014)

La distribución lateral al eje de la lluvia tiene un máximo en algún lugar sobre el nivel del mar, típicamente entre 4 y 7 km (la cascada tiene una forma como de nabo, gorda en medio). Luego de este punto de mayor radio de la cascada, la creación de partículas secundarias disminuye y la densidad de partículas también. Se caracteriza la edad de la cascada (S) alrededor de este punto máximo ($S=1$ para antes de ese máximo, $S=1$ cuando ocurre ese máximo y $S=2$ para luego del máximo). (Suarez , 2014)

4.3.2. Distribución de energías a nivel del suelo Para el observatorio de Pierre Auger, es importante conocer la distribución de energía de muones ya que los de energías mayores a 0.3 GeV son los que atraviesan los tanques y se usan para calibración. Otro tipo de partícula que alcanzan detectores son los rayos gamma de 100 MeV, sin embargo, el flujo de rayos gamma disminuye luego del máximo de la cascada así que únicamente detectores de gran altitud los detectan apreciablemente. (Watson, A , 2002)

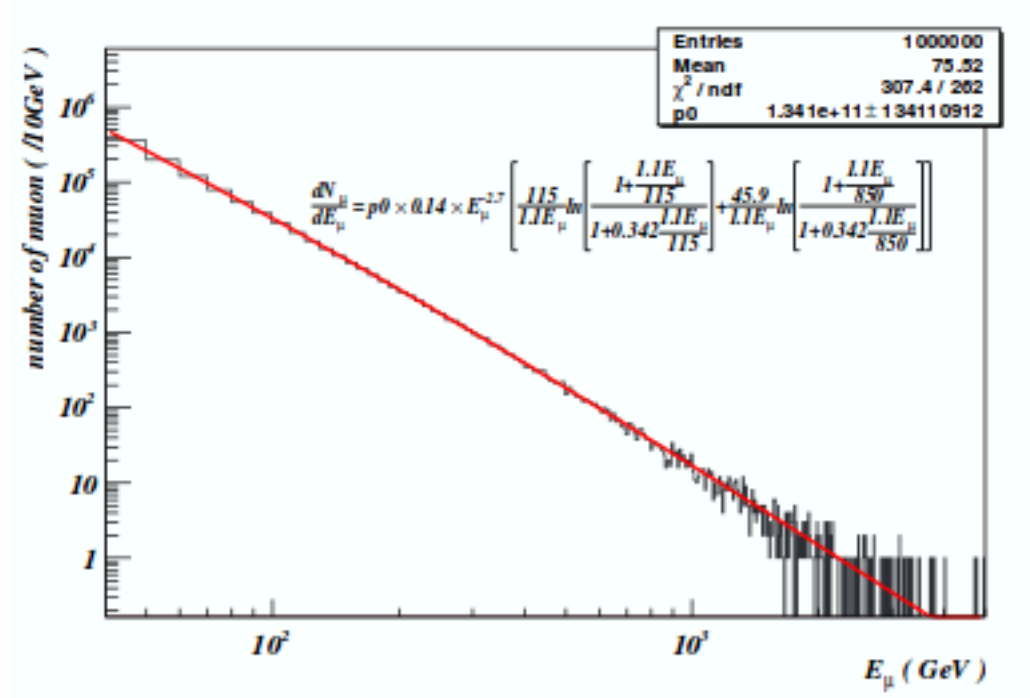
La fórmula estándar de Geisser describe la distribución energética de muones a nivel del suelo cuando la curvatura de la Tierra puede ser obviada y cuando el decaimiento de muones es negligible. Estas condiciones son equivalentes a tomar únicamente eventos con ángulo cenital menor a 70 grados y considerar muones con energías mayores a $100/\cos\theta \text{ GeV}$. Sin embargo, la mayoría de muones encontradas a nivel del suelo tienen energías menores a este límite. El trabajo de Guan et al. extiende la fórmula de Geisser agregando parámetros ajustados por datos experimentales. La distribución energética dada es entonces

$$\frac{dN}{dE} = p_0 0.14 E^{-2.7} \left[\frac{115}{1.1E} \ln \left[\frac{1 + \frac{1.1E}{115}}{1 + 0.342 \frac{1.1E}{115}} \right] + \frac{45.9}{1.1E} \ln \left[\frac{1 + \frac{1.1E}{850}}{1 + 0.342 \frac{1.1E}{850}} \right] \right] \quad (4.1)$$

donde θ es el ángulo polar y E es la energía en GeV . Esta fórmula representa la distribución de muones de cascadas extensas a nivel del suelo. Los parámetros mencionados se ajustaron usando CORSIKA usando una densidad atmosférica de 114.8 g/cm^3 . La figura 4.1 muestra esta

distribución. Un ajuste de potencia a esta gráfica arroja la siguiente distribución más manejable (Guan et al. , 2006)

$$d(E) = (4.114 \pm 0.003) \times 10^{10} E^{-3.07143 \pm 0.00004} \quad (4.2)$$



Extraído de (Guan et al. , 2006)

Figura 4.1: Distribución de la energía de muones generada con números aleatorios basado en la fórmula de Geisser

4.3.3. Simulación de cascadas de área extensa Para realizar simulaciones de cascadas de área extensa se puede utilizar el programa CORSIKA, desarrollado por el Instituto de Física Nuclear de Karlsruhe (IKP). Este simula las distintas interacciones de las distintas partículas que se van generando a partir de una primera partícula de alta energía (partícula primaria) para así construir la cascada. (Heck, D. et al , 1998)

El modelo de Heitler es un modelo simplificado que predice el comportamiento del canal electromagnético de la cascada. Los dos mecanismos de interacción que describe son el de frenado (bremsstrahlung) y de pares: el primero es un electrón que al encontrarse con un tomo de la atmósfera desprende un electrón de menor energía y una partícula gamma, el segundo es la generación de un electrón y positrón cuando una partícula gamma se encuentra un tomo en la atmósfera. Estas interacciones cesan cuando la energía perdida por ionización del electrón es igual a su energía en reposo (otros criterios existen para detener el proceso dentro de una simulación). (Suarez , 2014)

Para las interacciones hadrónicas de alta energía se utilizan los modelos VENUS, QGSJET, DPMJET y SIBYLL. Para las hadrónicas de baja energía utiliza GHEISHA. Por último las electrónicas las simula con EGS4 y NKG. CORSIKA necesita que se le ingresen los siguientes datos: datos de la atmósfera en donde se realizará la simulación, el sistema coordenado a utilizar, el campo geomagnético del lugar a simular y el sistema de unidades que se utilizar. (Heck, D. et al , 1998)

4.4 Radiación de Vavilov-Cerenkov

La radiación Cherenkov presenta una diferenciación marcada en relación a la luminiscencia. Esto se debe a que tanto la polarización de las moléculas, la intensidad y tiempo de excitación no son alterables. La luz emitida en este fenómeno presenta una asimetría pronunciada, la cual se debe al movimiento de una partícula cargada a una velocidad de fase mayor a la de la luz en el medio. En donde, cada punto que es tocado por la partícula cargada una excitación electromagnética es generada, propagándose en la forma de una onda retardada desde estos puntos. (Cherenkov, P. , 1958)

4.5 Vida media del muón

4.6 Detectores Cherenkov en agua (WCD)

4.6.1. Simulación Geant4 de detectores Cherenkov en agua

4.6.1.1. Modelos físicos Los procesos físicos que se incluyen para modelar la radiación Cherenkov los maneja Geant4 por distintas clases, desglosadas en el cuadro 4.1.

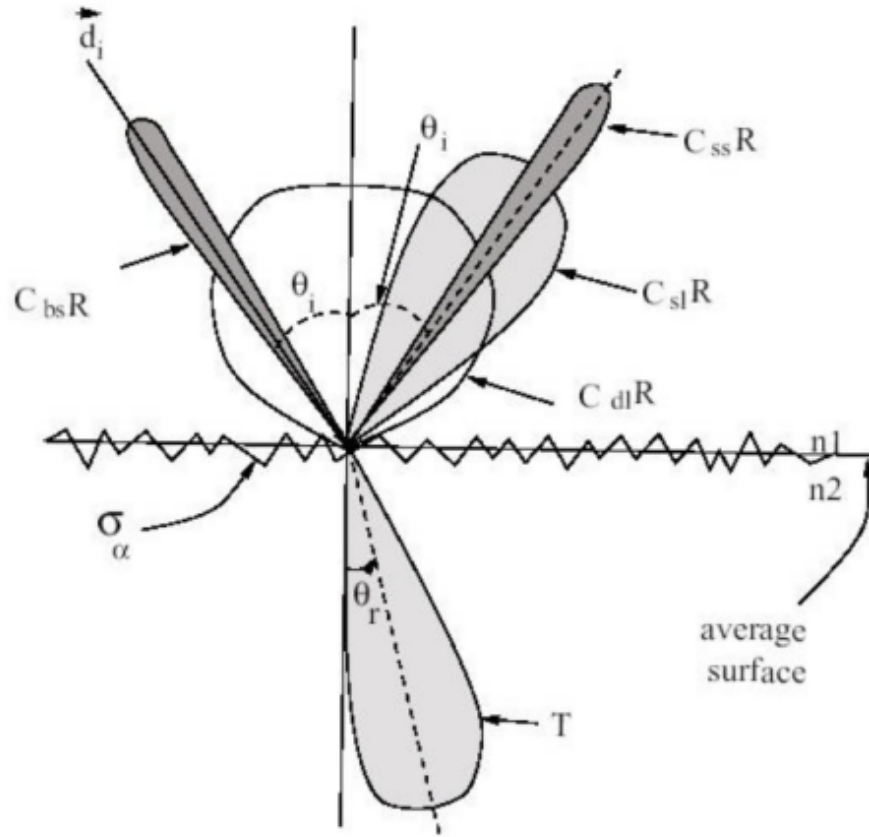
Cuadro 4.1: Procesos físicos para la simulación de radiación Cherenkov

Nombre	Clase en G4	Descripción
--------	-------------	-------------

4.6.1.2. Efectos en los bordes de volumen Los modelos *UNIFIED* y *GLISUR* son modelos que integran las principales características de modelos ópticos geométricos y físicos para reflexión en superficies en diferentes longitudes de onda y aspereza. La diferencia entre los modelos está en cómo dan la distribución de la dirección de la reflexión de fotones.

- *UNIFIED* modela esta distribución como proporcional a la gaussiana de un parámetro de aspereza (llamado *sigma_alpha* y medido en radianes). En la figura 4.1.
- *GLISUR* toma un parámetro de aspereza diferente *polish*, que toma valores de 0 (máxima aspereza) a 1 (mínima aspereza), crea una esfera con radio *polish*, escoge un punto al azar en su superficie y agrega el vector de la normal en ese punto a la dirección de reflexión.

Geant4 incluye la radiación Cherenkov como un proceso físico que puede implementarse desde los archivos de procesos físicos. Calcula las secciones eficaces a partir de la descripción molecular del material refractor.



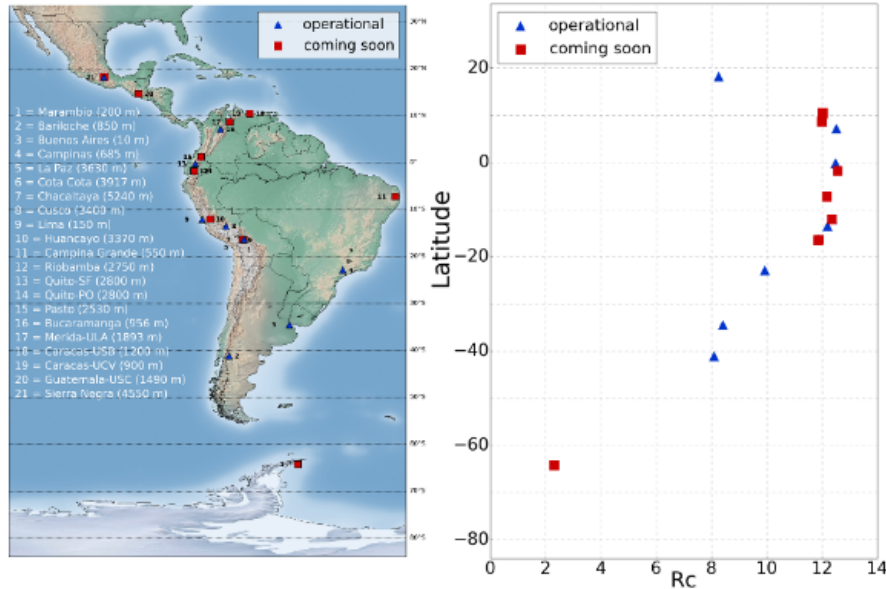
- $C_{bs}R$: Reflexión por retrodispersión
 $C_{dl}R$: Reflexión Lambertiana interna
 $C_{ss}R$: Reflexión con la normal de la superficie promedio
 $C_{sl}R$: Reflexión con la normal de la rugosidad
 θ_i : Ángulo de incidencia
 T : Transmisión
 θ_r : Ángulo de transmisión
 σ_α : Aspereza
 Extraído y modificado de (Gumplinger , 2002)

Figura 4.2: Ilustración de las posibles reflexiones que el modelo *UNIFIED* calcula para la dirección de reflexión de fotones ópticos incidentes a superficies ásperas. Las áreas sombreadas ilustran la probabilidad gaussiana de cada reflexión.

5 Antecedentes

5.1 Latin American Giant Observatory

5.1.1. Sitios de LAGO LAGO (Latin American Giant Observatory, por sus siglas en inglés) es un proyecto internacional con más de ochenta científicos de ocho países latinoamericanos que empezó en 2005. Está orientado principalmente a la investigación básica de tres ramas de la astrofísica de partículas: el universo en condiciones extremas, clima interplanetario y radiación atmosférica a nivel del suelo. La red de detectores de LAGO consiste en un pequeños tanques de agua a nivel de tierra sobre diferentes localidades y latitudes a lo largo del continente latinoamericano, abarcando desde México hasta el cono sur de América. El proyecto LAGO se ha dividido en dos estudios objetivos dependiendo de la altitud del detector. Los detectores en altitudes superiores de 4,500m sobre el nivel del mar permiten detectar GRB con mayor sensibilidad; y los detectores de altitudes menores son utilizados para estudios físicos del sol (Forbush Decreases). (Asorey, H. y S. Dasso , 2015)



Extraído de (Asorey, H. y S. Dasso , 2015)

Figura 5.1: Distribución geográfica de los detectores de LAGO operacionales (triángulos azules), y los que comenzarán a funcionar entre 2016 y 2017 (cuadrados rojos), y a la izquierda el umbral de rigidez vertical (vertical rigidity cutoff) del campo geomagnético para cada estación.

Este proyecto tiene como objetivo observar Gamma Ray Bursts (GRB) (destellos de rayos

gamma) utilizando detectores de agua Cherenkov (WCD). Los WCD de LAGO pueden ser utilizados para medir el flujo de rayos cósmicos en la tierra ya que su modulación es una medición directa de la actividad solar. Por último, los detectores instalados en universidades sirven para enseñar a estudiantes sobre física de partículas y astropartículas. Existen ya varios observatorios de LAGO en operación. Uno está el de Sierra Negra, México, a 4550 metros sobre el nivel del mar. Tiene funcionando tres tanques de 4 metros cuadrados de superficie y dos de un metro cuadrado. Otro está en Chacaltaya, Bolivia, a 5250 metros sobre el nivel del mar, el detector a mayor altitud de la estructura LAGO. Tiene tres tanques en operación, dos de 4 metro cuadrado y uno de 1 metro cuadrado. El otro está en Marcapomacocha, Perú, a 4450 metros sobre el nivel del mar, con un tanque de dos metros cuadrados en operación desde el 2010. En Guatemala, ya dio inicio el proyecto en la Universidad San Carlos de Guatemala, pero aún no está en operación. (Villaseñor et al , 2011)

5.1.2. Calibración de datos en LAGO Las referencias (Allison, P. et al. , 2005) y (Alarcón, M. et al , 1999) describen cómo utilizar información de eventos de muones secundarios en el tanque para calibrar los datos a partir de eventos de muones verticales equivalentes (VEM). El VEM es la medida de la señal máxima obtenida de la distribución de carga de muones que cruzan verticalmente. Esta medida se puede determinar a partir de los histogramas de carga integrada obtenidos de los programas cal.cc aplicados a datos obtenidos de ACQUA. El valor de VEM es el de la de carga integrada (medida en ADCq) que corresponde al segundo máximo de figura. Este máximo, a su vez, corresponde a la energía de un muón vertical. Dos métodos para obtener este valor es a través de regresión cuadrática o diferenciación finita. Este valor se puede comparar con el obtenido directamente de la simulación de un muón vertical incidente.

En los histogramas de carga arrojados por sol.cc y cal.cc, se revela además el tipo de partícula de la lluvia que inciden en el detector. En el modo histograma, estos se usan para dividir las señales en cuatro bandas: la electromagnética (para valores de ADCq menores al valor de transición), la muónica (que incluye el valor de VEM), las partículas de mini-lluvias (arriba del límite del muón de máxima trayectoria), y una cuarta banda que reúne muones desde el VEM hasta el resto de partículas sobre este valor. (?)

Para el monitoreo de la modulación solar de los rayos cósmicos, los datos del WCD deben de corregirse por la anticorrelación entre presión atmosférica y conteo de partículas secundarias. Esta corrección es de tipo multiplicativa ya que la variación de la presión atmosférica es local. (?) (Asorey, H. , 2012)

5.2 Observatorio Pierre Auger

La instalación más grande de detectores de agua de radiación Cherenkov es Pierre Auger, en Argentina. Consiste en 1660 tanques de agua dispuestos en una región triangular de 3000 kilómetros cuadrados, espaciados a 1500 metros. El arreglo en Pierre Auger tiene un área total de $16000m^2$

y funciona a 10^8 conteos por minuto. Algunas especificaciones del modelo Scaler en Pierre Auger: Muestreo de 40MHz por seis 10-bit flash analog-to-digital converter (FADC), enlace de radio al CDAS (central data acquisition system), sistema GPS para sincronizar los 1660 tanques. Un área total de 16000m² y mil millones de conteos por minuto. La respuesta del detector está hecha de un conjunto de simulaciones de showers de baja energía usando CORSIKA 6.980 modelo QGSJET-II para hadrones alta energía y GHEISHA para bajas. El flujo de partículas primarias a 100 km se simula como una ley de poder, cuyo exponente se obtuvo de mediciones de espectro de energías de la partícula primaria. (Villaseñor et al , 2011)

5.3 Uso de Geant4 en LAGO y otros experimentos

Para realizar las simulaciones de GEANT4 se siguieron las guías de desarrollador de aplicación y se tomarán de referencias otros artículos con simulaciones parecidas, (Nielsen, C. , 2010), (Chen, M. et al. , 2006), (Calderon, R., H. Asorey y L. Núñez , 2005).

6 Metodología

6.1 Instalación del WCD

6.2 Calibración por histograma de datos del WCD

6.3 Vida media del muón con datos del WCD

6.4 Simulación

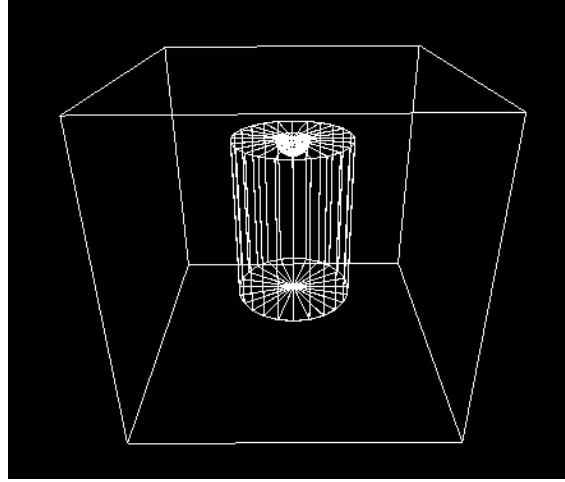
Se instaló Geant4 10.2 descargando todos los datos de instalación y con QT y OpenGL como interfaz gráfica. Se utilizaron de referencia los ejemplos que trae la librería, en particular OpNovice (que implementa la radiación Cherenkov), HitLXE (que utiliza fotomultiplicadores). El desarrollo del programa fue auxiliado por el trabajo de Héctor Pérez durante todo el proceso; ambos programas están disponibles en el repositorio <https://github.com/hepfpeh/Geant4-WCD.git>.

6.4.1. Geometría

6.4.1.1. Objetos y colocación Los objetos de la construcción del detector relevantes para la simulación son los objetos con los que interactúan los fotones ópticos y los secundarios incidentes dentro del tanque. Estos objetos son el recubrimiento de Tyvek, que se toma como un capa cilíndrica, el agua dentro del Tyvek, la superficie de vidrio borosilicato del fotomultiplicador y el fotocátodo de aluminio, ambos tomados como semiesferas. Geant4 permite organizar objetos según jerarquías: el cuadro 10.1 en el capítulo de Anexos describe la forma, dimensiones y colocación de los objetos y sus jerarquías bajo los respectivos volúmenes madre. Las dimensiones del Tyvek y de las semiesferas que conforman la parte del fotomultiplicador en contacto con el agua fueron medidas directamente del tanque del experimento. Esta geometría se expone visualmente en la figura 6.1.

6.4.1.2. Materiales Los materiales se tomaron del catálogo de NIST de Geant4, y con la clase G4MaterialsPropertiesTable se asignaron valores de índices de refracción y largo de atenuación al agua correspondientes a una lista de energía de fotón (para las tablas completas, ver el cuadro 10.2 en Anexos) y el índice de refracción del borosilicato se tomó como 1.50. El vacío se modeló como gas hidrógeno a una temperatura de 0.1 kelvin y con la densidad promedio del universo.

6.4.1.3. Superficies Se especificaron dos superficies: la superficie entre el agua y el recubrimiento de Tyvek, y el borde del fotocátodo. Ambos bordes se crearon con la clase G4OpticalSurface, y son



(Fuente propia)

Figura 6.1: Ilustración de la geometría general del detector en la simulación Geant4, mostrando el recubrimiento Tyvek en forma cilíndrica y las superficies de vidrio y fotocátodo del fotomultiplicador

- Agua-Tyvek: El tyvek se colocó como volumen madre del agua para que ambos estuvieran completamente en contacto en el borde del volumen del agua (a excepción del contacto del agua con el vidrio de borosilicato). Esta superficie es de tipo dieléctrico-metal (reflexión o absorción), terminado *ground* por la aspereza del Tyvek, y se le asignó el modelo *unified* de Geant4. Los detalles de las propiedades que se especificaron para esta superficie usando una tabla de propiedades de material, que se resumen en el cuadro 6.1.
- Fotocátodo: El fotocátodo es el volumen de detección de la simulación, por lo que en su superficie se especificó una eficiencia de 1. Se creó de tipo dieléctrico-metal (reflexión o absorción), con terminado *polished* y se le asignó el modelo *glisur* de Geant4 (sin embargo, debido a que se tomó como superficie lisa, los efectos de superficie no son relevantes y el modelo no es usado)

Cuadro 6.1: Descripción de las propiedades de la superficie Agua-Tyvek asignadas para dos energías de fotón

Energía del fotón(eV)	Reflectividad	Eficiencia	Coefficiente de refracción	Constante especular	Constante retrodispersión
2.034	0.2534	0	1.333	0.3	0.2
4.136	0.2534	0	1.333	0.3	0.2

Los valores de reflectividad del Tyvek y el índice de refracción del agua fueron obtenidos por Karen Guárcax para este megaproyecto en el módulo de "Medio de distribución de detector de radiación Vavilov-Cherenkov" mediante un experimento de reflectividad del Tyvek sumergido en jarras con agua y con la refracción en agua de la luz de una lámpara de sodio.

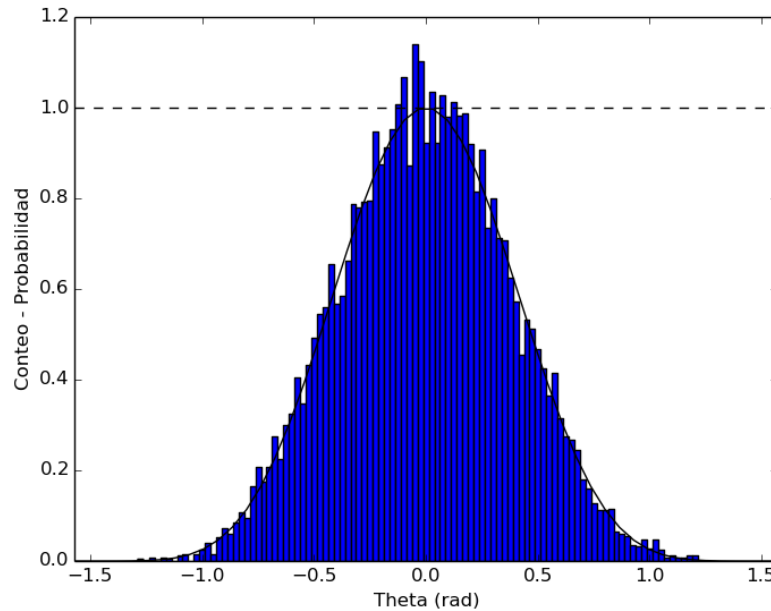
6.4.2. Detección Se definió al fotocátodo como detector asignándolo como el *SensitiveDetector*. Con la clase *ProcessHits* se registró cada vez que un fotón entra en contacto con el fotocátodo y se guardó el tiempo de detección de cada fotón y el conteo total.

6.4.3. Generación de evento

6.4.3.1. Procesos físicos Se utilizó el modelo de fotones ópticos. Los procesos físicos que se incluyeron en la simulación se desglosaron en el cuadro ? en el marco teórico y las clases respectivas se incluyeron en el archivo "KinichAhuPhysicsList".

6.4.3.2. Posición y dirección La simulación consistió en dos partes, una para obtener los pulsos característicos de cada tipo de partícula incidente y otra parte para obtener la distribución de carga integrada (ADCq) simulada de muones verticales. Para la primera se definieron la posición y dirección de las partículas incidentes como constantes de tal manera que atravesaran el tanque completo verticalmente.

En la segunda parte del experimento se utilizó una distribución uniforme sobre la tapa superior del tanque para definir la posición, una distribución uniforme para el ángulo azimutal (medido paralelo a la horizontal), y una distribución dada por $\cos^2(\theta)$ para el ángulo polar (medido respecto a la vertical). Para definir θ , se utilizó muestreo por rechazo para obtener valores de theta según la distribución.



(Fuente propia)

Figura 6.2: Distribución para el ángulo θ generadas por el algoritmo del muestreo por rechazo (histograma) y la curva $\cos^2(\theta)$

6.4.4. Datos de salida Los tres tipos de salida principales fueron el número total de fotones producidos por evento, el número total de fotones detectados por evento, y el tiempo de cada detección. Los primeros dos tipos de datos de salida se utilizaron para investigar cómo son sus distribuciones para eventos repetidos y para determinar si la energía de muones verticales incidentes está correlacionada con la cantidad de fotones detectados. La literatura predice que la señal obtenida del fototubo para muones verticales que atraviesan depende principalmente de la longitud del tanque.

El tercer tipo de salida se utilizó para la caracterización de los pulsos generados por a) muones verticales que atraviesan (4GeV), b) partícula gamma de 100 MeV (detectable a grandes altitudes) y c) electrones de Michael producidos por el decaimiento de muones en el tanque (37 MeV). Cada fotón excita una cantidad de electrones en el fotocátodo, produciendo corriente en el fotomultiplicador. Esta cantidad de electrones está dada por la eficiencia cuántica, que para la longitud de onda de interés es de 25 (medidos en amperios sobre milivatios). Cada detección carga al multiplicador y esta carga decae como en un circuito RC,

$$Q(t) = Q_0 e^{t/\tau} \quad (6.1)$$

Donde τ se determinó experimentalmente alimentando el osciloscopio directamente del fotomultiplicador, arrojando un valor 18.76 ± 0.03 . Se encontraron pulsos promedio para cada tipo de evento y se realizaron gráficas de amplitud versus *rise time* para cada tipo de evento, ya que se espera que haya una diferencia visible en las gráficas de cada uno según ().

7 Resultados

7.1 Distribuciones de fotones para un evento por simulación

Primero se investigó la normalidad de los fotones producidos, detectados y el cociente de estos valores para el evento de un muón vertical de 4GeV. Los detalles de este análisis se encuentran en anexos. Se compararon las cantidades de fotones detectados para diferentes energías de muones verticales. Para poner a prueba las hipótesis:

- H_0 : No hay relación entre la energía de un muon vertical que atraviesa y el número de fotones detectados.
- H_a : Hay relación entre la energía de un muon vertical que atraviesa y el número de fotones detectados

El análisis de la normalidad de las distribuciones revela que la distribución de los fotones detectados para una energía no sigue una distribución normal, sin embargo, el análisis ANOVA para la diferencia de dos medias es robusto ante la suposición de normalidad, en especial porque el tamaño muestral es grande ($n=1000$ o 500). Por lo tanto, se prosigió a calcular la media de fotones detectados para diferentes energías. Su representación gráfica se muestra en la figura 7.2

Cuadro 7.1: Resultados de la regresión lineal de los valores del promedio de fotones detectados respecto a energía de muón vertical incidente

Pendiente	$10.3 (GeV)^{-1}$
Intercepto	320
Coefficiente de correlación (r^2)	0.876
Valor p	0.006006693

Debido a que el valor p es menor a $\alpha = 0.05$, se acepta la hipótesis alterna con un 95% de confianza.

7.2 Pulsos característicos de partículas incidentes por simulación

Se calcularon los pulsos para 1000 eventos de muones, 500 eventos de partículas gamma y 500 eventos de electrones de Michael. Las gráficas de los 2000 pulsos se pueden encontrar en la sección de anexos. La forma característica del pulso de cada tipo de partícula se ilustra en la figura 7.2.

El cuadro 7.2 y la figura 7.3 exponen los resultados de analizar la amplitud máxima (valor discreto más grande en los datos) y *rise time* (tiempo en que la señal toma desde 0% hasta su

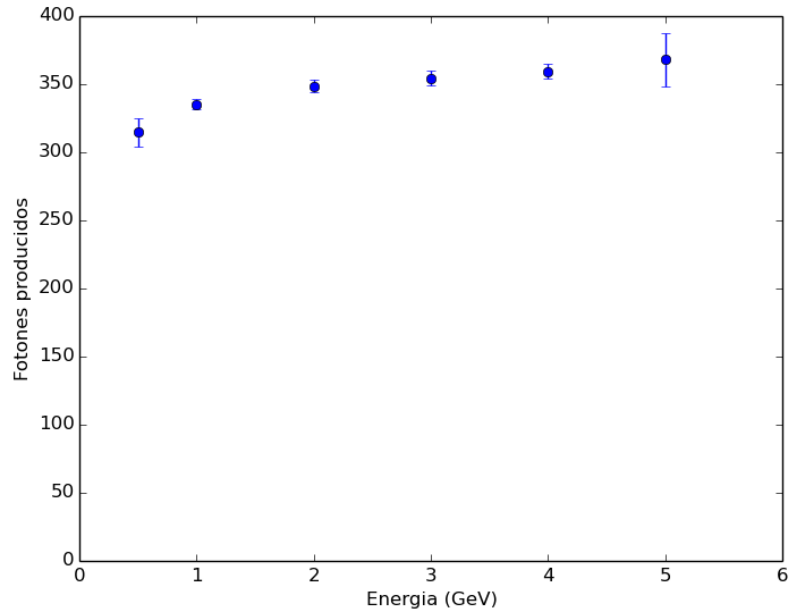


Figura 7.1: Promedio del número de fotones detectados respecto a la energía del muón vertical incidente. Las barras de error representan el intervalo de un 95% de confianza

amplitud máxima) para los pulsos generados de cada partícula en la simulación

Cuadro 7.2: Intervalos de confianza para los valores medios de amplitud y *rise time* para cada tipo de partícula incidente

Tipo de partícula	Amplitud (A/mW)	<i>Rise time</i> (ns)
Muón vertical 4GeV	(4802, 4950)	(10.15, 10.19)
Electrón de Michael 37MeV	(3201, 3631)	(6.63, 6.94)
Partícula Gamma 100 MeV	(1393, 1830)	(8.66, 9.19)

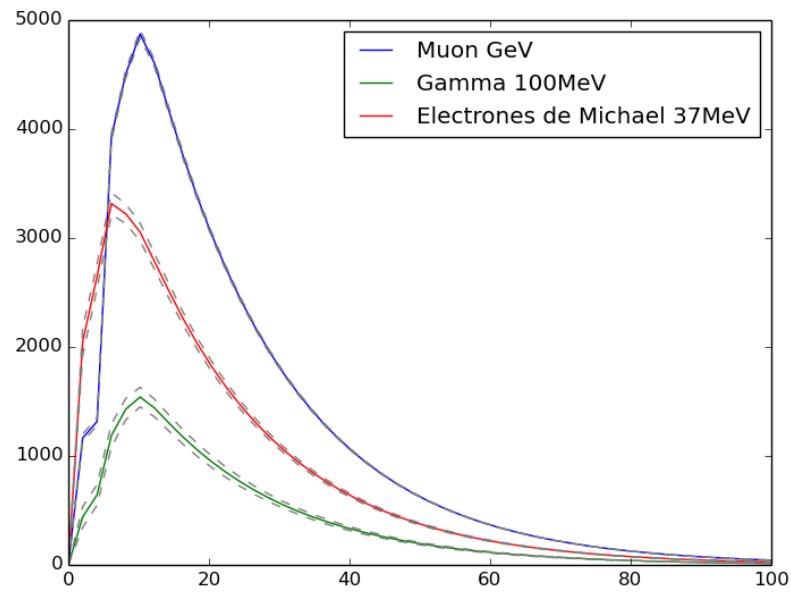


Figura 7.2: El promedio de todos los pulsos para cada tipo de partícula calculados con intervalos de 95% de confianza

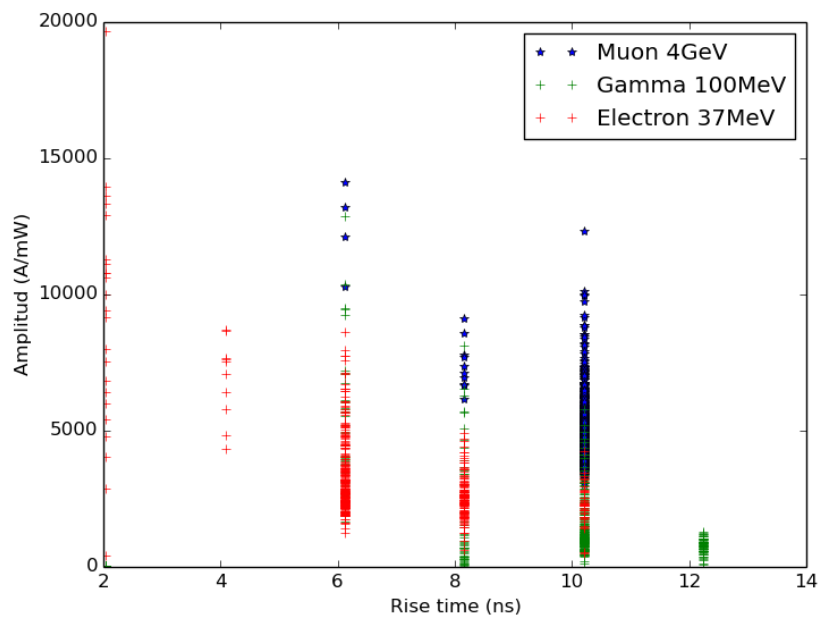


Figura 7.3: Representación gráfica de la relación entre amplitud y *rise time* para los diferentes tipos de partículas que generaron los pulsos en la simulación

8 Discusión

9 Bibliografía

- Alarcón, M. et al. 1999. *Calibration and monitoring of water Cherenkov detectors with stopping and crossing muons*. Nuclear Instruments and Methods in Physics. Research A 420: 39-47. Disponible en: http://www.ung.si/public/pao/bibl/nim_420_ma.pdf [con acceso el 16 de noviembre del 2015]
- Allison, P. et al. 2005. *Observing muon decays in water Cherenkov detectors at Pierre Auger Observatory*. 29th International Cosmic Ray Conference Pune 00, 101-104. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0509238.pdf> [tomado el 16 de noviembre del 2015]
- Asorey, H. 2012. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. Tesis Universidad Nacional de Cuyo. 286 páginas.
- Asorey, H. y S. Dasso. 2015. *LAGO: the Latin American Giant Observatory*. The 34th International Cosmic Ray Conference. The Hague, Países Bajos.
- Calderon, R, H. Asorey y L. Núñez *Geant4 based simulation of the Water Cherenkov Detectors of the LAGO project*. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/1503.07270.pdf> [consultado el 4 de julio 2016]
- Chen, M. et al. 2006. *A study of the water Cherenkov calorimeter*. Preimpresin presentada a Eliver Science. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/physics/0602169.pdf> [consultado el 15 de marzo del 2016]
- Cherenkov, P. 1958. *Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics*. Nobel Lecture. P. 15.
- Dasso, S. y H. Assorey. 2012. *he Scaler Mode in Pierre Auger Observatory to study heliospheric modulations of cosmic rays*. arXiv:1204.6196
- Geant4. 2015. *Geant4 User's Guide For Application Developers* -. Disponible en: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html> [consultado el 15 de mayo del 2016]
- Guan, M. et al. 2006. *Muon Simulation at the Daya Bay site*. Disponible en: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1006397> [con acceso el 17 de octubre del 2016]
- Gumplinger, P. 2002. *Optical Photon Processes in GEANT4*. Users' Workshop en SLAC, Universidad de Stanford. Disponible en:

- <http://geant4.slac.stanford.edu/UsersWorkshop/PDF/Peter/OpticalPhoton.pdf> [con acceso el 19 de octubre del 2016]
- Heck, D. 1998. *CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate Extensive Air Showers*. Disponible en: https://web.iikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf [con acceso el 18 de marzo del 2016]
- Lukens, J., B. Reid y A. Tuggle. 2010. *Experiment in muon Decay*. Universidad de Alabama.
- Nielsen, C. 2010. *Calibration Through Simulation of a Low-Energy Cherenkov Detector*. Tesis University of California, Santa Barbara. Disponible en: <http://www.physics.ucsb.edu/sites/secure.lsit.ucsb.edu/phys.d7/files/sitefiles/education/Nielsen.pdf> [con acceso el 2 de junio del 2016]
- Suarez, M. 2014. *Seminario Cascadas Aéreas Extensas (EAS) para la colaboración LAGO, Sesión 2*. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=AP9i5pdbJNc> [con acceso el 2 de septiembre del 2015]
- Villaseñor, L. y et al. 2011. *Search for Gamma Ray Bursts and Forbush Decreases in the LAGO Observatory*. International Cosmic Ray Conference, Beijing. (10): 314.
- Watson, A. 2002. *Extensive Air Shower and Ultra High Energy Cosmic Rays*. Disponible en: <http://www.ast.leeds.ac.uk/Auger/augerthesis/mexlects3.pdf> [con acceso el 21 de octubre del 2016]

10 Anexos

Cuadro 10.1: Descripción de los objetos en la simulación y sus jerarquías lógicas

Nombre	Volumen madre (posición)	Material	Tipo	Dimensiones
World	ninguno	Aire	G4Box	1 metro por lado
Tyvek	World (0,0,0)	Tyvek	G4Cons	Radio interno a = 0m Radio interno b = 0m Radio externo a = 40.1m Radio externo b = 40.1m Altura = 57.1cm Ángulo mínimo = 0° Ángulo máximo = 360°
Agua	Tyvek (0,0,0)	Agua	G4Cons	Radio interno a = 0m Radio interno b = 0m Radio externo a = 40.0m Radio externo b = 40.0m Altura = 57.0cm Ángulo mínimo = 0° Ángulo máximo = 360°
Vidrio PMT	Agua (0,0,57cm)	Borosilicato	G4Sphere	Radio interno = 0.0m Radio externo = 11.4cm Ángulo ϕ mínimo = 0° Ángulo ϕ que abarca = 360° Ángulo θ mínimo = 0° Ángulo θ que abarca = 360°
Fotocátodo PMT	Vidrio PMT (0,0,0)	Aluminio	G4Sphere	Radio interno = 0.0m Radio externo = 11.1cm Ángulo ϕ mínimo = 0° Ángulo ϕ que abarca = 360° Ángulo θ mínimo = 0° Ángulo θ que abarca = 360°
Vacío dentro PMT	Fotocátodo PMT (0,0,0)	Vacío	G4Sphere	Radio interno = 0.0m Radio externo = 11.0cm Ángulo ϕ mínimo = 0° Ángulo ϕ que abarca = 360° Ángulo θ mínimo = 0° Ángulo θ que abarca = 360°

Cuadro 10.2: Propiedades de material asignadas al agua en la simulación a través de la clase G4MaterialsPropertiesTable y asignadas a 32 energías de fotón

Energía del fotón (eV)	Índice de refracción	Largo de atenuación (m)	Energía del fotón (eV)	Índice de refracción	Largo de atenuación (m)
2.034	1.3435	3.448	2.757	1.3522	55.556
2.068	1.344	4.082	2.82	1.353	52.632
2.103	1.3445	6.329	2.885	1.3535	52.632
2.139	1.345	9.174	2.954	1.354	47.619
2.177	1.3455	12.346	3.026	1.3545	45.455
2.216	1.346	13.889	3.102	1.355	41.667
2.256	1.3465	15.152	3.181	1.3555	37.037
2.298	1.347	17.241	3.265	1.356	33.333
2.341	1.3475	18.868	3.353	1.3568	30
2.386	1.348	20	3.446	1.3572	28.5
2.433	1.3485	26.316	3.545	1.358	27
2.481	1.3492	35.714	3.649	1.3585	24.5
2.532	1.35	45.455	3.76	1.359	22
2.585	1.3505	47.619	3.877	1.3595	19.5
2.64	1.351	52.632	4.002	1.36	17.5
2.697	1.3518	52.632	4.136	1.3608	14.5

10.1 Normalidad de fotones producidos y detectados en la simulación

Los histogramas en la figura 7.1 sugieren que las distribuciones no siguen una distribución normal. Como complemento se usó la prueba Shapiro-Wilk para las hipótesis:

Fotones producidos

- H_{1o} : La distribución de fotones producidos para el evento de un muón vertical tiene normalidad
- H_{1a} : La distribución de fotones producidos para el evento de un muón vertical no tiene normalidad

Fotones detectados

- H_{2o} : La distribución de fotones detectados para el evento de un muón vertical tiene normalidad
- H_{2a} : La distribución de fotones detectados para el evento de un muón vertical no tiene normalidad

Cociente de fotones detectados sobre fotones producidos

- H_{3o} : La distribución del cociente de fotones detectados sobre fotones producidos para el evento de un muón vertical tiene normalidad

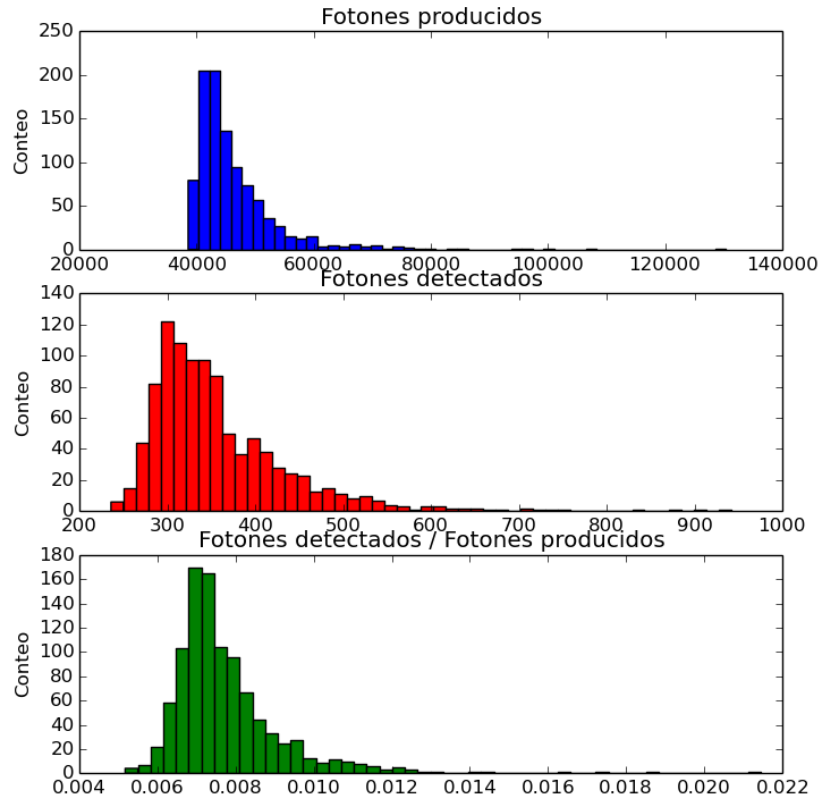


Figura 10.1: Histogramas de los fotones producidos, fotones detectados y el cociente de los fotones detectados sobre los producidos para un muón vertical de 4GeV en la simulación, con un tamaño muestral de 1000 eventos

- H_{3a} : La distribución del cociente de fotones detectados sobre fotones producidos para el evento de un muón vertical no tiene normalidad

Cuadro 10.3: Valores p para la prueba Shapiro-Wilk de normalidad de las distribuciones de los fotones producidos, detectados y el cociente

Distribución	valor p de la prueba
Fotones producidos	5.922653054979643e-32
Fotones detectados	1.7184711613370248e-39
$\frac{Fotones\ detectados}{Fotones\ producidos}$	9.682787576723116e-34

Por los valores dados en el cuadro 7.1 por la prueba Shapiro-Wilk y por la forma de los histogramas en la figura 7.1, se concluye que ninguna de las distribuciones tiene normalidad.

10.2 Gráficas de los 2000 pulsos analizados para la caracterización de la simulación

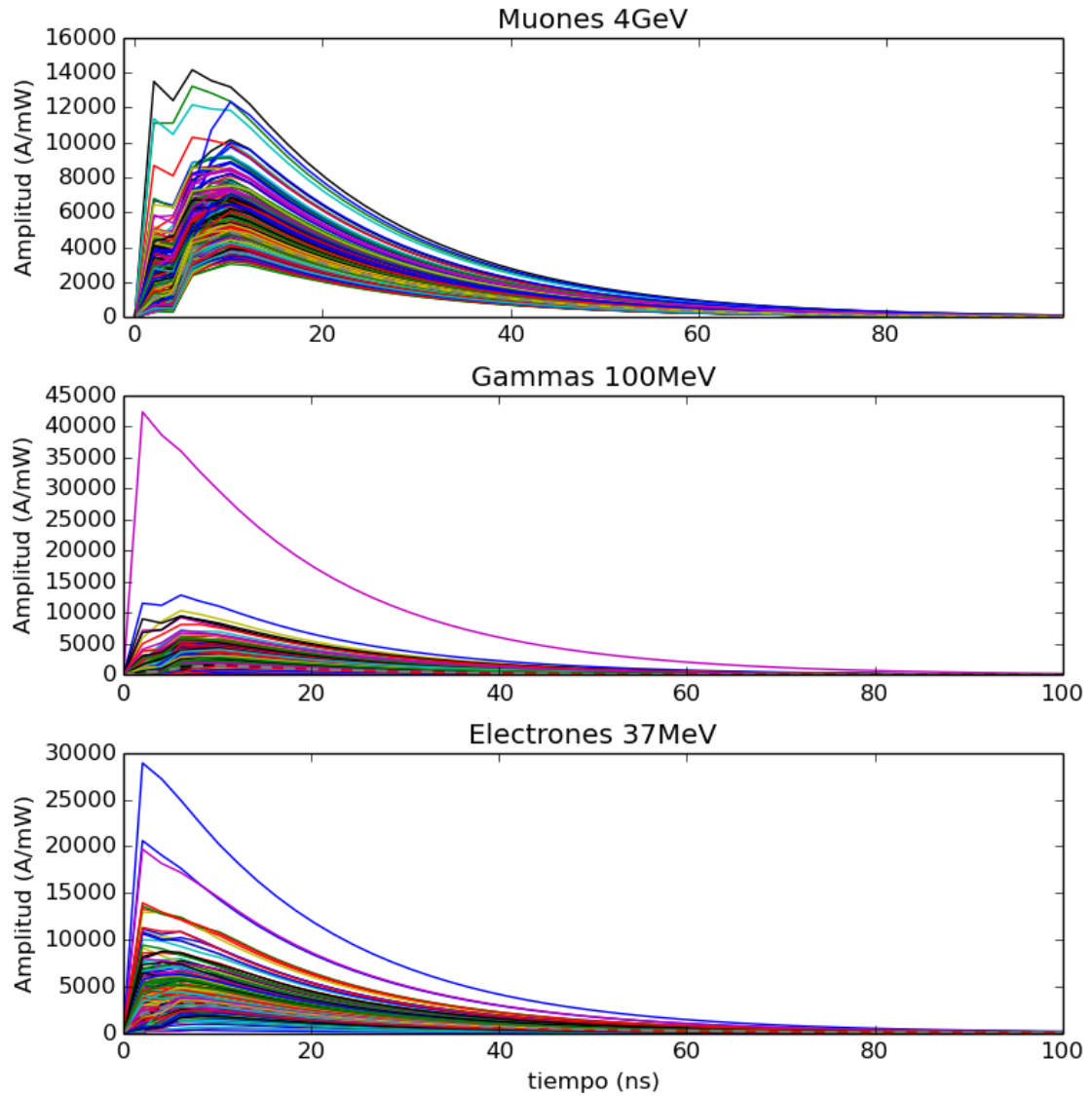


Figura 10.2: a) 1000 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para muón vertical de 4GeV, b) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para partículas gamma de 100 MeV, c) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para electrón de Michael de 37 MeV