

Estimar la respuesta de un WCD al fondo de
radiación cósmica en Pamplona

HEIDAR MARCEL PARADA VILLAMIZAR



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE FÍSICA
PAMPLONA
2022

Estimar la respuesta de un WCD al fondo de
radiación cósmica en Pamplona

Trabajo de Grado como requisito para optar al título de

Físico:

HEIDAR MARCEL PARADA VILLAMIZAR

Director:

Mauricio Suárez Durán

Grupo Integrar



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE FÍSICA
PAMPLONA
2022

Epígrafe

“Me enseñaron que el camino del progreso no es ni rápido ni fácil.”

Marie Curie

“Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano.”

Isaac Newton

“La naturaleza vive en movimiento”

James Hutton, utilizada como epígrafe en “La aventura del Universo” de Timothy Ferris

Agradecimientos

Empiezo estos agradecimientos reconociendo a Dios Todo Poderoso como mi Padre bondadoso el cual siempre me ha bendecido y lo sigue haciendo.

De manera especial agradezco a mi familia por siempre haberme apoyado incondicionalmente; su respaldo fue mi eje en el transcurso de toda mi carrera, y así poderla ver en estos momentos culminada. Es así que, muy especialmente quiero mencionar a mis seres más queridos: mi nona Yolanda Galvis de Parada (Q.E.P.D), a mis tíos: Ada Luz, Igor, Carolina y Gina (Q.E.P.D), a mis primos: Juan Aparicio por su gran ayuda, Angel Santiago, Diva Zafira y Tarmelán y a mi hermano Adler Sanyai. Todos ellos de forma unánime siempre estuvieron conmigo y me acompañaron en todo momento.

Agradezco profundamente a mi director de tesis el Dr. Mauricio Suárez Durán, que de forma desinteresada, siempre me dio su guía, su asesoramiento, y sus conocimientos los cuales fueron de gran ayuda para el desarrollo de este trabajo de grado; sus consejos siempre me servirán de apoyo en el desarrollo de mi profesión.

Doy gracias también a los jurados Dr. Iván Sidelnik y Dr. Jairo Alonso Mendoza, y al director del Departamento de Física Dr. Jorge Enrique Rueda por su presencia y por el tiempo que se dignaron prestarme en la sustentación de este trabajo.

No puedo olvidar mencionar a mis amigos de carrera y estudio: Julio Mario Mejía Saucedo, Jonathan Mercado, Yorlan Pérez, Michely Parada Jaime y José Leal.

Agradezco además a mi Alma Mater la Universidad de Pamplona donde curse mis estudios pasando de un joven bachiller a convertirme en un profesional de Física.

De todo corazón muchas gracias.

Heidar Marcel Parada Villamizar

Índice general

1.	Introducción.....	1
2.	Rayos cósmicos	3
2.1	Espectro de energía rayos cósmicos	3
2.2	Transporte de rayos cósmicos en la Heliósfera	5
2.3	Lluvias atmosféricas extendidas	6
3.	Observatorio LAGO	9
3.1	Detectores Cherenkov de agua	10
3.1.1	Radiación Cherenkov	11
3.1.1	Tubo Fotomultiplicador (PMT).....	14
3.1.1	Calibración de un WCD	15
4.	Estimación de la radiación secundaria de rayos cósmicos en Pamplona	19
4.1	CORSIKA y lluvias atmosféricas extendidas	19
4.2	Corrección por campo Geomagnético	20
4.3	Espectro esperado de radiación secundaria en Pamplona.....	23
5.	Modelado computacional de un detector Cherenkov de agua.....	25
5.1	Geant4 y respuesta de un WCD al fondo de radiación en Pamplona	25
5.1.1	Histograma de Carga	31
5.2	Efecto de la geometría de un WCD en su respuesta a las EAS.....	33
6.	Discusión de resultados	37
7.	Conclusiones.....	39
8.	Bibliografía.....	41

Índice de Figuras

Figura 1. Flujo de rayos cósmicos	4
Figura 2. La Heliósfera.....	5
Figura 3. Esquema de las componentes electromagnética, hadrónica y muónica.....	8
Figura 4. Distribución geográfica y altitudes de WCDs del LAGO.....	9
Figura 5. Esquema de un detector de partículas.	11
Figura 6. Polarización de las moléculas de un medio dieléctrico	12
Figura 7. Esquema de emisión de radiación Cherenkov	12
Figura 8. Número de fotones producido por efecto Cherenkov en distintos medios	14
Figura 9. Esquema de amplificación de la señal entrante en un PMT.	15
Figura 10. Producción de fotones Cherenkov en función del impulso del e^- y del muon ...	17
Figura 11. Histograma de carga del WCD de Chitaga	18
Figura 12. Ilustración de la técnica de trayectoria en reversa	21
Figura 13. Espectro de energía de secundarios	24
Figura 14. Geometría cilíndrica de un WCD modelado con Geant4	26
Figura 15. Histograma del número de fotones Cherenko.....	27
Figura 16. Histograma de fotoelectrones debido al flujo de secundarios de Pamplona para distintas geometrías	29
Figura 17. Histograma de fotoelectrones debido al flujo total	30
Figura 18. Histograma de fotoelectrones debido al flujo de secundarios para todas las partículas.....	32
Figura 19. Residuo del ajuste de la joroba del muon	33
Figura 20. Cociente del Máximo/Mínimo en función del cociente de Diámetro/Altura	34
Figura 21. Primeross 20 FE.....	35
Figura 22. Cociente del Prom/Máximo en función del cociente de Diámetro/Altura.....	36

Índice de Tablas

Tabla 1. Distribución de primarios a simular	23
Tabla 2. Dimensiones de tanques comerciales y su distribuido	27
Tabla 3. Valores χ^2 del ajuste para los distintos detectores	32
Tabla 4. Resultado cociente Max./Min. de cada geometría.....	34
Tabla 5. Cociente Promedio/Máximo de cada geometría.....	36
Tabla 6. Costos para la implementación WCD	40

Índice de Símbolos

Símbolos, abreviaturas y siglas utilizadas.

ϵ	Constante dieléctrica
A	Número másico
c	Velocidad de la luz
CG	Campo Geomagnético
$CORSIKA$	COsmic Ray SIMulations for KAscade
D/A	Diámetro sobre altura
e^-	Electrón
e^+	Positrón
EAS	Cascadas atmosféricas extendidas
$EGS4$	Electron Gamma Shower
eV	Electro Volt.
FE	Foto-electrones
$GHEISHA$	Gamma Hadron Electron Interaction SHower code
l	Distancia
$LAGO$	Observatorio Gigante de la Latinoamérica
nT	nano tesla
PMT	Tubo fotomultiplicador
$Q.E.$	Eficiencia cuántica
$QGSJET$	Quark Gluon String model with JETs
RC	Rayos cósmicos
R_c	Rigidez de corte
R_m	Rigidez magnética
$s.n.m$	Sobre el nivel del mar
UV	Ultravioleta
VEM	Vertical-Equivalent Muon. Unidad de señal del detector de superficie
WCD	Detector Cherenkov de Agua
Z	Número atómico
θ	Angulo cenital
ρ	Densidad
φ	Angulo azimutal
ω	Frecuencia de oscilación

Resumen

TÍTULO: Estimar la respuesta de un WCD al fondo de radiación cósmica en Pamplona

AUTOR:

HEIDAR MARCEL PARADA VILLAMIZAR

PALABRAS CLAVE:

Rayos Cósmicos, Clima Espacial, Detector Cherenkov de agua, Geometrías de tanques.

DESCRIPCION:

Los estudios de rayos cósmicos (RC) se realizan principalmente mediante el uso de detectores instalados en el suelo; estos detectores registran la radiación secundaria producida por la interacción de RC con la atmósfera terrestre. Desde el año 2019 la Universidad de Pamplona es miembro activo del observatorio a gran escala LAGO (Observatorio Gigante Latinoamericano). Este observatorio operaba una serie de detectores de agua Cherenkov (WCD) distribuidos en América Latina en una amplia gama de latitudes. La instalación de un nuevo WCD requiere la realización de una serie de simulaciones, desde el cálculo del flujo de primarios que llegan a la atmósfera de Pamplona, hasta la respuesta del WCD a la radiación secundaria, siendo esta la cascada de lluvia atmosférica. Aquí estamos mostrando como principal resultado la estimación del espectro de energía de secundarios esperado en Pamplona a una altitud de 2342 m s.n.m, representando la cantidad de partículas generadas de electrones, protones, muones, fotones y neutrones siendo recibida esta señal para distintas geometrías de WCD. Para ello, hemos utilizado el kit de herramientas ARTI de LAGO, un marco de técnicas y códigos computacionales (CORSIKA, GEANT4, C ++, Python) para estimar las señales WCD producidas por la radiación cósmica en el suelo. Es así que, el WCD nos permite separar la señal depositada por los muones de los electrones y positrones. A partir de los cálculos referenciados mostrar la señal de muones lejos de la señal de ruido, se espera que un WCD instalado en Pamplona pueda funcionar como un conteo de muones. Como estimación probable, hemos comprobado en distintas geometrías que, la capacidad del WCD puede medir el tiempo de vida media del muon, esto implica que un WCD desplegado en la Universidad de Pamplona se puede utilizar como equipo de laboratorio para enseñar física de partículas.

Summary

TITLE: Estimate the response of a WCD to the cosmic radiation background in Pamplona

AUTHOR:

HEIDAR MARCEL PARADA VILLAMIZAR

KEYWORDS:

Cosmic Rays, Space Weather, Cherenkov Water Detector, Tank Geometries.

ABSTRACT:

Cosmic ray (CR) surveys are conducted primarily through the use of ground-mounted detectors; These detectors record the secondary radiation produced by the interaction of RC with the Earth's atmosphere. Since 2019, the University of Pamplona has been an active member of the large-scale observatory LAGO (Giant Latin American Observatory). This observatory operated a series of Water Cherenkov Detectors (WCD) distributed throughout Latin America in a wide range of latitudes. The installation of a new WCD requires the performance of a series of simulations, from the calculation of the primary flow that reaches the atmosphere of Pamplona, to the response of the WCD to secondary radiation, this being the atmospheric rain cascade. Here we are showing as the main result the estimation of the secondary energy spectrum expected in Pamplona at an altitude of 2342 mamsl, representing the amount of particles generated from electrons, protons, muons, photons and neutrons, this signal being received for different WCD geometries. For this, we have used LAGO's ARTI toolkit, a framework of techniques and computational codes (CORSIKA, GEANT4, C++, Python) to estimate the WCD signals produced by cosmic radiation on the ground. Thus, the WCD allows us to separate the signal deposited by the muons from the electrons and positrons. From the referenced calculations showing the muon signal away from the noise signal, it is expected that a WCD installed in Pamplona can function as a muon count. As a probable estimate, we have verified in different geometries that the capacity of the WCD can measure the half-life of the muon, this implies that a WCD deployed at the University of Pamplona can be used as laboratory equipment to teach particle physics.

1. Introducción

El presente trabajo tiene como temática central la detección de rayos cósmicos (RC) usando detectores Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en inglés) instalados a nivel del suelo. Estos RC son partículas atómicas y sub-atómicas provenientes del espacio exterior, cuya detección suele ser posible gracias a la radiación secundaria que producen éstos a nivel del suelo. El desarrollo de la investigación, parte del campo contemporáneo del estudio de fenómenos físicos espaciales, que actualmente ha llamado la atención de grupos de investigadores y comunidad científica en general.

Estos rayos cósmicos son considerados de importancia para entender la física detrás de fenómenos como explosiones supernova y los núcleos activos de galaxias, entre otros [1]; además de ayudar a monitorear el clima espacial [2][3]. Es conveniente destacar que el abordaje metodológico que ha seguido esta investigación se ha desarrollado siguiendo los lineamientos del observatorio LAGO (por sus siglas en inglés Latin American Giant Observatory) [4].

Con el interés de fortalecer el desarrollo científico y académico, la Universidad de Pamplona se ha vinculado a LAGO desde el año 2019, a través de su participación en la Colaboración LAGO; organismo que coordina las actividades del observatorio. Como un primer paso en la consolidación de la Universidad de Pamplona como miembro activo de LAGO, este trabajo apunta a establecer los cálculos iniciales para la instalación de un WCD en el municipio de Pamplona, Colombia; en particular, en establecer la geometría de tanque comercial que mejor permita la calibración de este tipo de detector en Pamplona.

La metodología implementada en este trabajo se llevó a cabo mediante cuatro actividades. La primera consistió en la estimación de la fluencia de rayos cósmicos que llegan a la atmósfera de la tierra y sobre el municipio de Pamplona, usando para esto su espectro medido por diferentes observatorios [5]. En la segunda actividad se realizó el modelado computacional de la interacción de cada uno de éstos RC, obteniéndose de esta manera el espectro estimado de radiación secundaria a nivel del suelo por primera vez y para Pamplona, Colombia; Considerando aspectos como composición, posición geográfica, tipo de atmosfera, y campo geomagnético, entre otros [6]. Estas dos primeras actividades se realizaron a través de las herramientas computacionales (*hardware* y *software*) dispuestas por LAGO para este tipo de estudios; herramienta denominada ARTI [7].

Antes de pasar a la tercera actividad, se realizó una búsqueda por tanques comerciales contenedores de agua con geometría cilíndrica, tal y como lo sugiere la Colaboración LAGO¹. A partir de estas geometrías, y haciendo uso del ARTI, se modela la interacción de cada uno de los secundarios, obtenidos en la actividad 2, con las geometrías comerciales de WCD anteriormente encontradas.

¹ <http://lagoproject.net/wcd.html>

Como cuarta actividad, se estableció una metodología que permitió identificar la mejor geometría comercial, representada ésta en el cociente diámetro/altura de sus dimensiones. Dicha metodología está basada en la distribución de carga que depositan los muones en un WCD, estableciendo dos parámetros que permiten identificar el mejor el cociente diámetro/altura que facilita la calibración de este tipo de detectores.

El presente libro se ha estructurado de la siguiente manera, en el capítulo II se presentan los conceptos básicos asociados a la física de los rayos cósmicos; el capítulo III se aborda y presenta el observatorio LAGO, definiendo allí qué es un WCD y su calibración; luego, el capítulo IV se centra en la realización de las actividades uno y dos; finalmente, el capítulo V aborda el modelado computacional para distintos detectores Cherenkov en base a geometría de tanques comerciales, con un enfoque a determinar el diseño más óptimo en la detección de rayos cósmicos, esto es actividades 3 y 4.

2. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos (RC) se definen como partículas cargadas o núcleos atómicos los cuales se originan fuera de la atmósfera terrestre. Desde antes de 1912 los RC ya habían sido observados, sin embargo dicho descubrimiento es atribuido a Victor Hess debido a que realizó una serie de experimentos en los cuales montó cámaras de ionización sobre globos aerostáticos elevándose a alturas mayores de 5 km sobre el nivel del mar, esto lo hizo con el fin de estudiar la dependencia de la radioactividad observada en función de la altura, esperando a que las cámaras de ionización a mayor altura disminuyera, más sin embargo ocurrió lo contrario la tasa de ionización aumentaba [8]. Tras la serie de experimentos en distintos vuelos realizados tanto de día, de noche y durante un eclipse solar excluyó al Sol como fuente principal de esta radiación, Hess concluyó que "los resultados sólo pueden ser explicados suponiendo que una radiación con gran poder de penetración ingresa desde arriba" [9].

En 1925 R.A. Millikan introdujo el término "rayos cósmicos", suponiendo que este proceso era debido a los rayos gamma, siendo esta la radiación más penetrante hasta el momento. Luego se determinó que en realidad los gamma era solo una pequeña fracción y la mayor parte era formado por núcleos atómicos [10], donde en su mayoría eran protones, el ~10% núcleos de helio, el ~2% electrones y una pequeña porción de rayos gammas y elementos más pesados (por ejemplo el hierro).

2.1 Espectro de energía rayos cósmicos

Las mediciones del espectro de los rayos cósmicos nos pueden ayudar a comprender la transición entre fuentes galácticas y extra-galácticas y, por lo tanto, acerca de las propiedades de las fuentes de los rayos cósmicos. Hoy en día conocemos que el espectro de energía de los RC abarca varios ordenes de magnitud, desde 10^9 eV hasta 10^{20} eV [5]. Este espectro ha sido medido por diferentes experimentos y se ajusta a 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, E su energía, y el exponente α se denomina índice espectral. La figura 1 presenta el espectro medido de RC por diferentes experimentos, sin incluir en esta los RC provenientes del sol ($\sim 10^9$ eV).

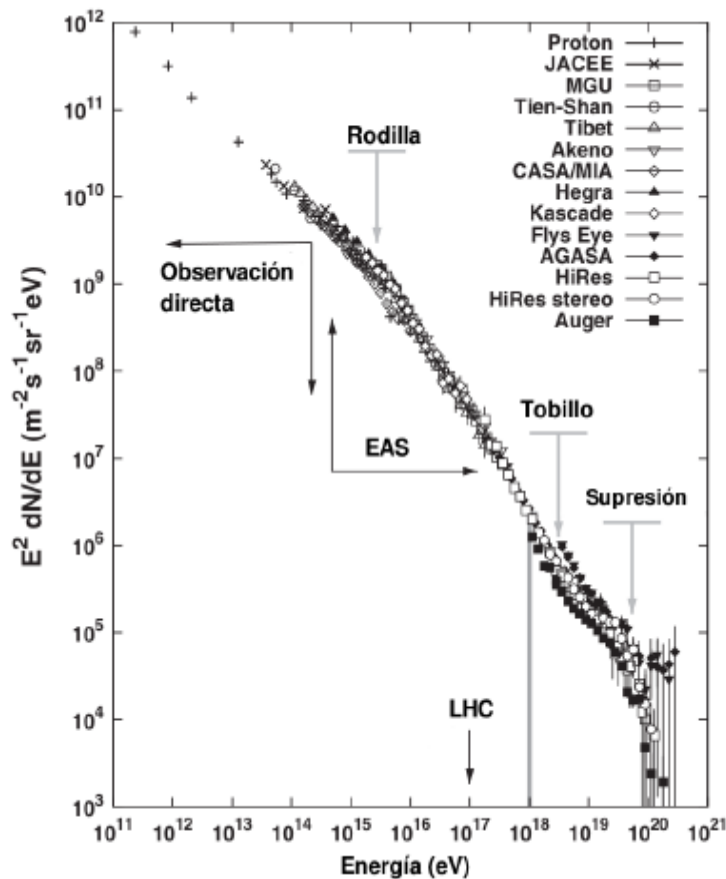


Figura 1. Flujo de rayos c3smicos en funci3n de la energa. Se observa un cambio significativo del valor α indicado con las flechas grises. En este trabajo se consideran los rayos c3smicos hasta una energa de 10^{15} eV, con un ndice espectral $\alpha=3$. Figura tomada de [11].

El estudio de RC se realiza en tres bandas de energa que se encuentran delimitadas por los cambios en el ndice espectral:

- Baja: RC con energas menores a 10^{15} eV.
- Alta: RC con energas entre 10^{15} y 10^{18} eV.
- Ultra alta energa: RC con energas superiores a 10^{18} eV.

Estos cambios en el ndice espectral se denominan "rodilla", a aproximadamente 10^{15} (eV), "tobillo" a aproximadamente 10^{18} (eV), y "Corte" a 10^{19} (eV), y estn asociados a los procesos ffsicos de aceleraci3n y transporte de los rayos c3smicos; ver m3s detalles en [12].

2.2 Transporte de rayos cósmicos en la Heliósfera

Los campos magnéticos presentes en el medio interestelar causan la deflexión de la trayectoria de los RC. El grado de deflexión depende del cociente entre la cantidad de movimiento y la carga de las partículas. Los RC deben de atravesar el medio interplanetario antes de poder llegar a la atmosfera terrestre, este medio interplanetario se extiende desde el Sol hasta la región en la que el viento solar interactúa con el medio interestelar. A todo este espacio influenciado por el Sol es la Heliósfera cuya estructura se ve en la figura 2 [13].

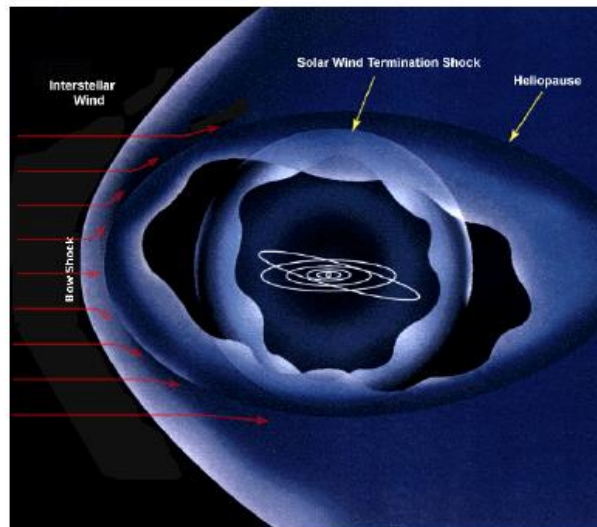


Figura 2. La Heliósfera es la esfera que contiene el Sistema solar, el viento solar y que se encuentra rodeada por el medio interestelar. La propagación del viento solar inicia en el sol y se extiende hacia fuera del Sistema solar, esta luego es interrumpida por la región final de choque; a medida que el viento solar avanza llega a la zona Heliopausa, zona en la que la velocidad del viento solar llega a ser casi cero y con forma de esferoide prolato. El Sol y la Heliósfera se mueven respecto del fondo del medio interestelar. Figura tomada [13].

Debido a la distribución y el transporte de los RC dentro de la Heliósfera está condicionado a procesos de convección y de tipos estocástico por la interacción con el viento solar, siendo así que las partículas de alta energía no se verán afectadas, atravesando así el viento solar como si éste no existiera. Pero los RC con energía moderada, es decir hasta unas pocas decenas de GeV, verán afectada su trayectoria de tal manera que no se propaguen en línea recta.

El campo magnético en la Heliósfera es altamente variante durante los periodos de elevada actividad solar, es decir, cuando el número de manchas solares, pero también de fulguraciones y las inyecciones de masa coronal, es alto. El campo magnético turbulento desvía a los RC de forma mucho más eficiente que en los periodos de baja actividad, cuando el campo magnético es más regular. Las fuertes fluctuaciones del campo magnético no sólo reducen el número de RC que alcanzan la Heliósfera interior y la Tierra, sino que también

cambian su espectro de energía (porque las partículas de menos energía son afectadas más intensamente que las más energéticas) y su dirección de propagación (anisotropía) [13].

El avance de las partículas secundarias dependerá del tipo de partícula, su energía y la densidad atmosférica. Esta última depende principalmente de la altura sobre el nivel del mar y de la posición geográfica [14]. La cantidad de atmosfera atravesada por una partícula que ingresa a la atmósfera es definida con el término “profundidad atmosférica” denotado por $X(l)$. Este término nos dice la cantidad de masa de aire por unidad de área que debe atravesar la partícula, la cual ha recorrido una cierta distancia a lo largo de su trayectoria desde el infinito² hasta una cierta posición geográfica l [15]. Dicha cantidad se expresa:

$$X(l) = \int_l^{\infty} \rho(l') dl' , \quad (2.2)$$

donde para el caso de la atmósfera $\rho(l)$ corresponde a la densidad del aire en la posición l que a su vez depende de la altura h sobre la superficie, y de la dirección en la que viaja la partícula. Las unidades para X corresponden a $[g/cm^2]$ [15].

2.3 Lluvias atmosféricas extendidas

Cuando un RC penetra la atmósfera se encuentra con un número cada vez más numeroso de átomos y moléculas, especialmente oxígeno y nitrógeno. En consecuencia, se producen colisiones que generan nuevas partículas, creando de esta forma una reacción en cadena en forma de cascada las cuales se denominan partículas secundarias. A este fenómeno se le conoce como “Cascadas atmosféricas extendidas” (EAS, por sus siglas en inglés *Extensive Air Shower*) [9].

Por ejemplo, el primario es un protón energético; por consiguiente, la cascada será de tipo hadrónica, entonces, al este interactuar con las moléculas de la atmosfera producirá nuevas partículas, esto equivale a producción de pares;

$$\gamma \rightarrow e^+e^- \quad (2.3)$$

$$e^{\pm} \rightarrow e^{\pm}\gamma \quad (2.4)$$

en las que se encuentran los piones cargados positiva y negativamente o neutros; en cada interacción 1/3 de la energía disponible es llevada a la componente electromagnética, debido a los piones neutros, donde a medida que estas partículas avanzan llegarán a un punto limite, siendo absorbidas por la atmosfera, a toda está interacción tendrá la siguiente cualidad junto a su porcentaje de ocurrencia;

² Se considera desde l hasta el infinito porque de esta manera se incluye toda la materia que atraviesa la partícula antes de su primera interacción.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma [98,8\%] \quad (2.5)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^- [1,2\%] \quad (2.6)$$

Mientras, que el restante (2/3) permanecen con los piones cargados positivamente, que decaen en muones y neutrinos muónicos formando la componente muónica de la lluvia, dicha interacción tendrá la siguiente cualidad y el porcentaje de que este ocurra;

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu [99.99\%] \quad (2.7)$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e [0,01\%] \quad (2.8)$$

Estas interacciones son equivalentes, para sus conjugadas de carga, que decaen de vuelta en más muones [\[16\]](#).

La figura 3 presenta la estructura de una EAS, la cual se divide en tres componentes dependiendo del tipo de partícula: electromagnética, hadrónica y muónica, las cuales se definen:

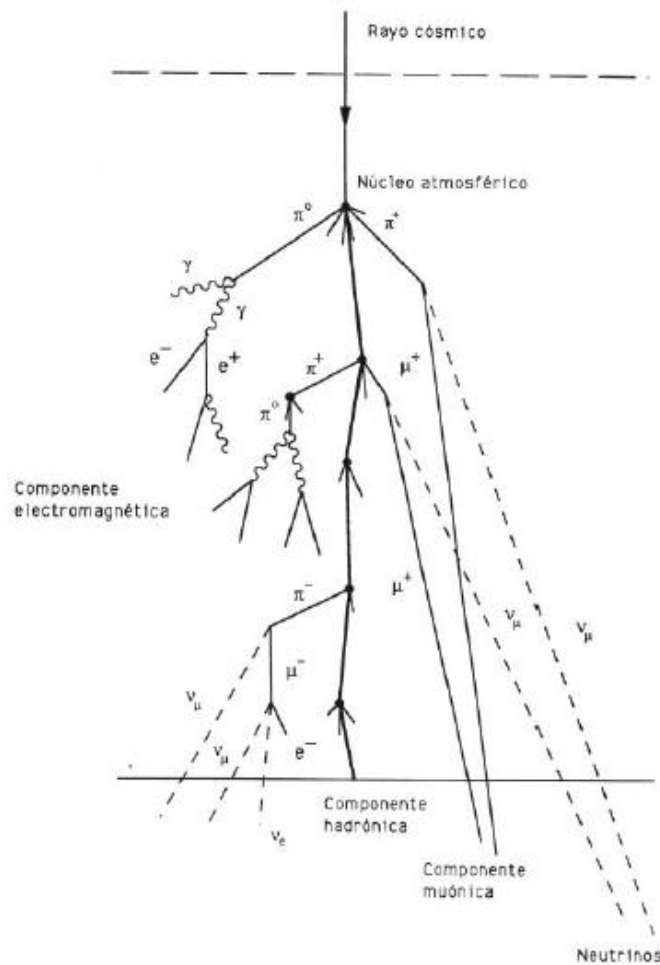


Figura 3. Esquema de las componentes electromagnética, hadrónica y muónica de una lluvia atmosférica extendida Figura tomada de [17].

- Electromagnética: formada por electrones, positrones y fotones. Estos últimos decaen posteriormente en un par e^-e^+ y representa cerca del 99% del total de partículas producidas en la lluvia. Lo anterior debido a que en las interacciones hadrónicas la tercera parte de la energía involucrada va a la producción de pares e^-e^+ lo que implica que la componente electromagnética contenga del orden del 90% de la energía total del primario.
- Muónica: compuesta por muones, producidos a partir del decaimiento de piones y kaones cargados.
- Hadrónica: formada por todas las partículas tipo hadrones.

3. Observatorio LAGO

El Observatorio LAGO, por sus siglas en inglés *Latin American Giant Observatory*, es un Observatorio de Astropartículas a escala global orientado especialmente en tres ramas de investigación [4],

- El universo extremo: son todos los fenómenos de RC de ultra alta energía.
- Los fenómenos meteorológicos espaciales (Clima espacial), el cual consiste en el estudio de la interacción del viento y fenómenos solares con el campo geomagnético terrestre.
- La radiación atmosférica a nivel del suelo: se fundamenta en instalar detectores Cherenkov de agua en diferentes posiciones geográficas con el objetivo detectar las cascadas de áreas extensas.

LAGO es operado por una red colaborativa no centralizada de científicos e instituciones denominada Colaboración LAGO, constituida en su mayoría por países latino americanos³ y España. LAGO emplea detectores Cherenkov de Agua (WCD, por sus inglés *Water Cherenkov Detector*) para la detección de partículas secundarias, ubicados en diferentes posiciones geográficas, algunas a más de 5000 m s.n.m., tal y como se ilustra en la figura 4. En esta figura se incluye además el rango de rigidez magnética que cubre el observatorio.

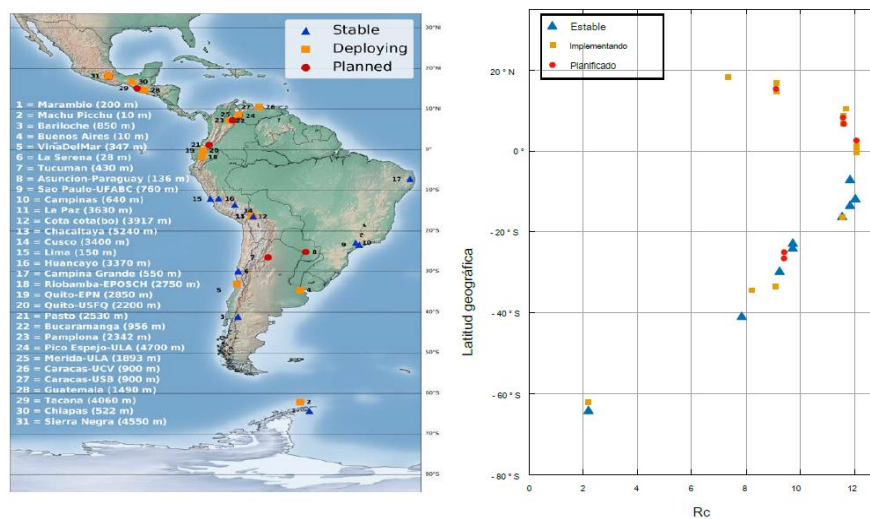


Figura 4. (Izquierda) Distribución geográfica y altitudes de los detectores de agua Cherenkov del LAGO: los que están en funcionamiento están representados con triángulos azules, los cuadrados naranjas son los que están en despliegue y los sitios planificados están indicados en círculos rojos. (derecha) Corte de rigidez vertical en cada sitio LAGO. Figura tomada de [7].

³ Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Perú y Venezuela

LAGO está abierto a la incorporación de nuevos sitios, de tal manera que cada vez aumenta su red de detectores y por ende mediciones de radiación cósmica, facilitando de esta manera cumplir con sus objetivos científicos [18]. En este sentido, desde el año 2019 la Universidad de Pamplona se ha vinculado como miembro activo de la Colaboración LAGO, siendo el presente trabajo el primer paso para la eventual instalación de un detector Cherenkov de Agua en las instalaciones de esta universidad.

3.1 Detectores Cherenkov de agua

El detector Cherenkov de agua se compone de dos elementos principales: tanque detector y electrónica de adquisición. El tanque detector (figura 5) consiste en un contenedor de agua, usualmente construido en plástico o polietileno, que se llena con agua purificada⁴ y se sella con el fin de evitar el ingreso de la luz. En el interior se instala un dispositivo foto sensible denominado fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés *Photo Multiplier Tube*). Este PMT se ubica de tal forma que apunte hacia el agua, permitiendo de esta forma la mayor captación posible de los fotones que se generan por radiación Cherenkov. Estos fotones son debidos al paso de partículas cargadas relativistas por el volumen de agua, como se explicará con más detalle en la sección 3.1.1.

El PMT transforma estos fotones Cherenkov en señales eléctricas que son leídas por la electrónica de adquisición, para luego procesarlas y transformarlas en señales digitales que se almacenan en un disco rígido. La electrónica de adquisición está conformada por: almacenamiento local de datos, digitalizadora y el PMT [15]. Actualmente la colaboración LAGO está implementando nueva tecnologías de adquisición de datos, basadas en tarjetas integradas como RedPitaya STEMLab⁵ [19].

⁴ La calidad del agua se mide en términos del coeficiente de absorción. La colaboración LAGO permite que cada país aplique el protocolo que mejor se adapte a las condiciones particulares de cada lugar.

⁵ <https://redpitaya.com/>

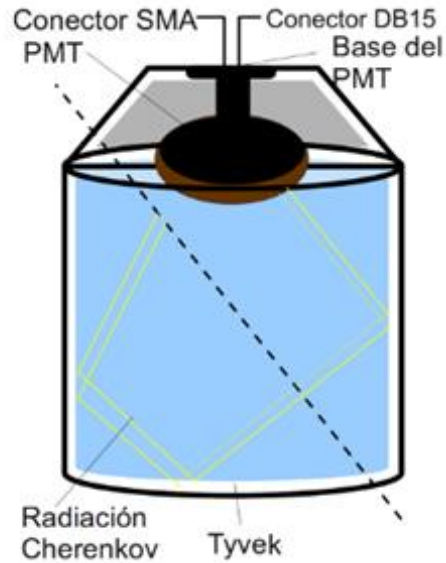


Figura 5. Esquema de un detector de partículas. La línea punteada indica la partícula cargada que atraviesa el detector, la línea amarilla el efecto Cherenkov y trayectoria hasta alcanzar el PMT. Figura tomada de [20].

3.1.1 Radiación Cherenkov

Las partículas cargadas que se propagan en materiales dieléctricos pueden inducir campos electromagnéticos que polarizan y despolarizan las moléculas presentes en el medio; esto es debido a que la velocidad de fase de los fotones en el material es menor que la velocidad de propagación de las partículas. En tal sentido, una partícula cargada, al desplazarse a baja velocidad (comparada con la velocidad de fase de la luz en el medio), polariza el medio de forma simétrica, por lo que los campos eléctricos inducidos se anulan mutuamente, tal y como se representa en el panel izquierdo de la figura 6. Por otra parte, si la partícula se desplaza más rápido que la velocidad de fase, entonces se genera una asimetría en los campos dipolares inducidos, generando la emisión de pulsos de luz que se convierten en campos a grandes distancias, comparado con las distancias intermoleculares, tal y como se representa en el panel derecho de la figura 6 [14].

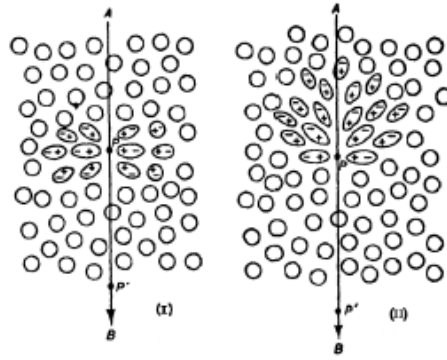


Figura 6. Polarización de las moléculas de un medio dieléctrico por el paso de una partícula cargada que se desplaza desde A hasta B; se presentan dos casos: (I) si la velocidad de la partícula es menor a la velocidad de fase de los fotones en el medio, (II) si la velocidad es mayor a la velocidad de fase de los fotones en el medio. Figura tomada de [14].

La velocidad crítica para que una partícula genere radiación Cherenkov puede encontrarse a partir de un análisis geométrico. Para esto, se interpreta el campo dipolar inducido como un frente de onda que se puede reconstruir a partir del principio de Huygens. De tal manera que, para que el frente de onda genere radiación Cherenkov, un fotón emitido en cierto punto debe gastar el mismo tiempo en recorrer una distancia r , que el tiempo que le tomaría a la partícula en recorrer una distancia s . Así, estos dos fotones son emitidos con igual fase. La figura 7 ilustra este análisis del cual se interfiere la relación

$$\cos(\alpha_c) = \frac{1}{\beta\sqrt{\epsilon(\omega)}}, \quad (3.1)$$

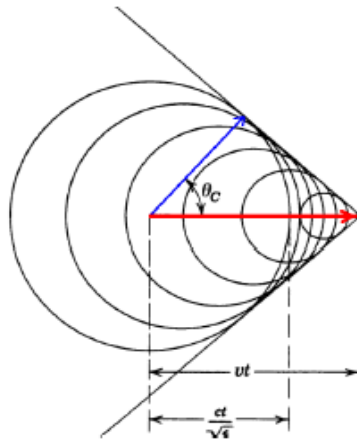


Figura 7. Esquema de emisión de radiación Cherenkov, en azul la distancia recorrida por un fotón emitido en un punto, en rojo la distancia recorrida por la partícula. Figura tomada de [14].

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 medio y ω es la frecuencia de oscilación del campo dipolar inducido. De la expresión (3.1) se establecen dos condiciones para que una partícula cargada produzca radiación Cherenkov en función de su velocidad, considerando el límite $\cos(\alpha_c) = 1$,

$$\beta_{min} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\omega)}}, \quad (3.2)$$

y,

$$\beta_{max} = 1, \quad (3.3)$$

La energía mínima para que una partícula genere radiación Cherenkov (E_{Ch}) se expresa,

$$E_{Ch} = m_0 c^2 \frac{n}{(n^2 - 1)^{1/2}}, \quad (3.4)$$

Donde m_0 es la masa en reposo de la partícula, c la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice refracción. En el caso de muon, que atraviesa un volumen de agua ($n = 1,33$), la E_{Ch} sería de 162,1 MeV, mientras que para el caso del electrón E_{Ch} sería de 0.777 MeV; con un ángulo límite de emisión de $\sim 41^\circ$ para ambos casos.

En la figura 8 se puede apreciar el número de fotones que emite un electrón, en diferentes medios como función de su energía [14].

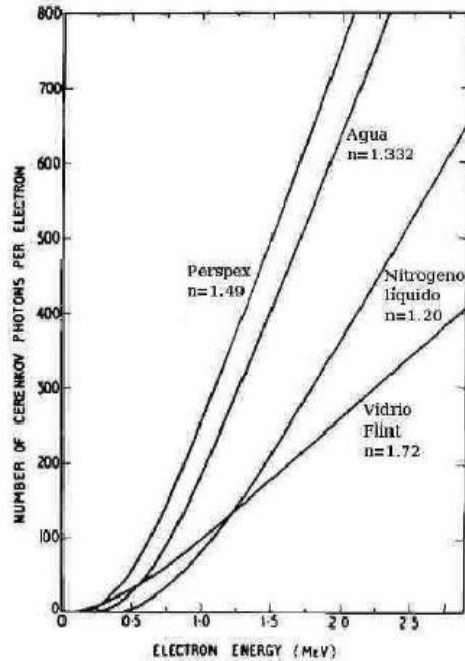


Figura 8. Número de fotones producido por efecto Cherenkov en distintos medios por un electrón en función de la energía (MeV). Figura tomada de [14].

3.1.2 Tubo Fotomultiplicador (PMT)

El PMT es el sensor encargado de capturar los fotones Cherenkov producidos al interior del agua, estos son recolectados por el fotocátodo, cuya función es convertir, con cierta probabilidad, los fotones de luz incidentes en electrones de baja energía. Por consiguiente, a este proceso de foto detección se le considera como una serie de pasos, que inician con la incidencia del fotón en el fotocátodo, que convierte estos fotones en fotoelectrones. Estos fotoelectrones son luego acelerados por un campo eléctrico externo hacia una serie de electrodos (dinodos), de forma de que este foto-electrón inicial es multiplicado por esta sucesión de dinodos, amplificando la corriente de electrones hasta llegar al último de los dinodos (denominado ánodo). De esta manera, el PMT proporciona una señal o impulso de tensión medible, tal y como se ilustra en la figura 9.

La energía mínima del fotón que incide para producir un fotoelectrón suele estar entre las longitudes de onda que corresponden al rojo u infrarrojo cercano del espectro. Una característica importante de los fotocátodos es la eficiencia cuántica (QE, por sus siglas en inglés), término que se define en la Ec (3.5). La QE depende de la energía el fotón incidente y suele tener un máximo en el rango de 20-30 % [21].

$$QE \equiv \frac{\text{Número de fotoelectrones emitidos}}{\text{Número de fotones incidentes}}, \quad (3.5)$$

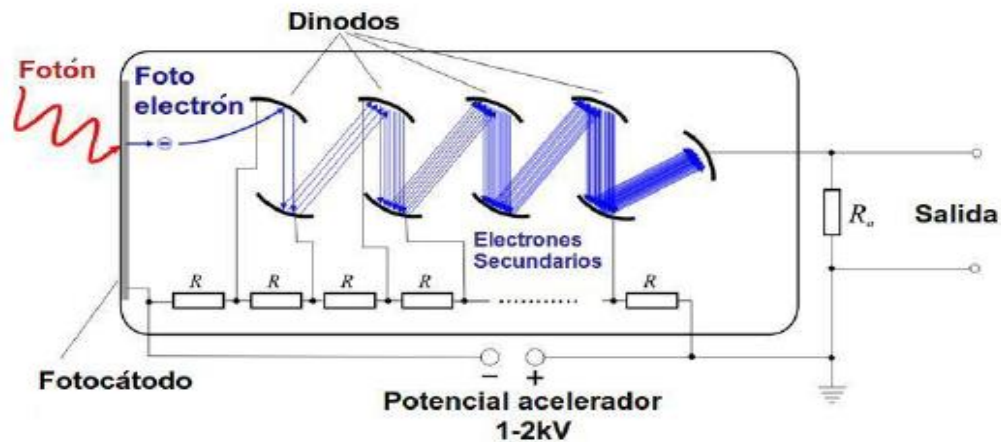


Figura 9. Esquema de amplificación de la señal entrante en un PMT. El fotón incidente (rojo) el cual interactúa con el fotocátodo produciendo un foto-electrón, siendo atraído por los dinodos (azul), causado por el campo eléctrico producido por la diferencia de potencial. Entre mayor sea la diferencia de potencial producida por los dinodos, mayor es la aceleración del electrón y su energía cinética para la creación de pares de electrones. Figura tomada de [15]

3.1.3 Calibración de un WCD

La calibración de un detector es una parte fundamental en cualquier medición. En el caso particular de los WCD del observatorio LAGO, la calibración de estos instrumentos se define de tal forma que permita comparar la señales medidas entre los diferentes detectores que constituyen el observatorio. En este sentido, la calibración se realiza en base a la energía que depositan los muones al interior del WCD, siendo estos muones que se originan en las EAS. Esto facilita el proceso de calibración, ya que de esta manera no se requiere de fuentes externas, además de permitir la calibración de forma continua [22].

De todos los muones del fondo de radiación secundaria que ingresan a cierto WCD, LAGO se enfoca la señal que depositan aquellos muones que atraviesan de forma vertical del detector, es decir, los que ingresan por la tapa y salen por la base, recorriendo una distancia igual a la altura del instrumento; teniendo en cuenta la geometría cilíndrica de los WCD de LAGO. La señal producida por este tipo de partículas se denomina VEM (por sus siglas en inglés *Vertical Equivalent Muon*) y se basa en el proceso de calibración implementado en el observatorio Pierre Auger [23].

Por otra parte, los muones son partículas relativamente fáciles de detectar, debido a su alto poder de penetración en la materia [16]. En este sentido, la detección de muones usando WCD es un factor clave, no solo para entender la física de las EAS (ya que son producidos en éstas) sino además para entender la respuesta del detector al fondo de radiación (el cual da origen a las EAS). Entonces, las razones por las cuales los muones son usados para la

calibración del detector son: su producción en EAS, su alta capacidad de penetración en la materia (tienen ~ 200 veces más masa que el e^-) y su poder de frenado en agua $\sim 2 \text{ MeV/cm}$. [16].

Una propiedad física importante para entender el uso del VEM, como unidad de calibración, es la producción de fotones Cherenkov en agua. Esta producción es constante a partir de un cierto valor del momentum de la partícula, tal y como se observa en la figura 10. Allí, se puede observar que para los e^\pm esta saturación se presenta alrededor de 10MeV, mientras que para los muones se presenta en 2 GeV. Esto se traduce en que la mayoría de electrones del fondo de radiación (como se mostrará más adelante en la figura 13) pierden toda su energía luego de recorrer 10 cm de agua, mientras los muones pueden atravesar verticalmente un detector de más de 100 cm de alto.

De esta manera, una partícula que se propaga al interior de un WCD generará una señal que se interpreta, en primera aproximación, como la convolución entre: la distancia recorrida en el detector, la producción de fotones Cherenkov y la respuesta del PMT. Por ejemplo, que la cantidad de señal que se registra para un e^\pm típico es menor que para un muon tipo VEM.

Por otra parte, la corriente producida por el PMT se traduce en un pulso de voltaje, lo quiere decir que:

$$V = R \frac{dq}{dt}, \quad (3.6)$$

$$Q = \frac{1}{R} \int V(t) dt, \quad (3.7)$$

donde R es la resistencia del respectivo circuito electrónico, V la diferencia de potencial, y Q será la carga total depositada por la partícula en el tiempo de integración; en este caso, el tiempo que lo toman a los fotones Cherenkov ser absorbidos por el agua. Dado que la electrónica de adquisición no lee un pulso continuo, sino uno discontinuo, la carga registrada por un WCD de LAGO para una partícula que ingresa en el instrumento se calcula de la forma:

$$Q = \frac{1}{R} \sum V \Delta T, \quad (3.8)$$

siendo ΔT la frecuencia de muestreo empleada; 40 MHz para el caso de las electrónicas de LAGO [15]. La figura 11 presenta la medición de la distribución de carga depositada por el fondo de radiación en uno de los detectores de LAGO, el detector Chitaga, instalado en la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Allí se identifican dos picos, el primero corresponde a una distribución de señales producidas por la componente electromagnética, la cual deposita

poca señal en el detector, y el segundo pico, o joroba, corresponde al pico asociado al pasaje muones que atraviesan al detector en forma.

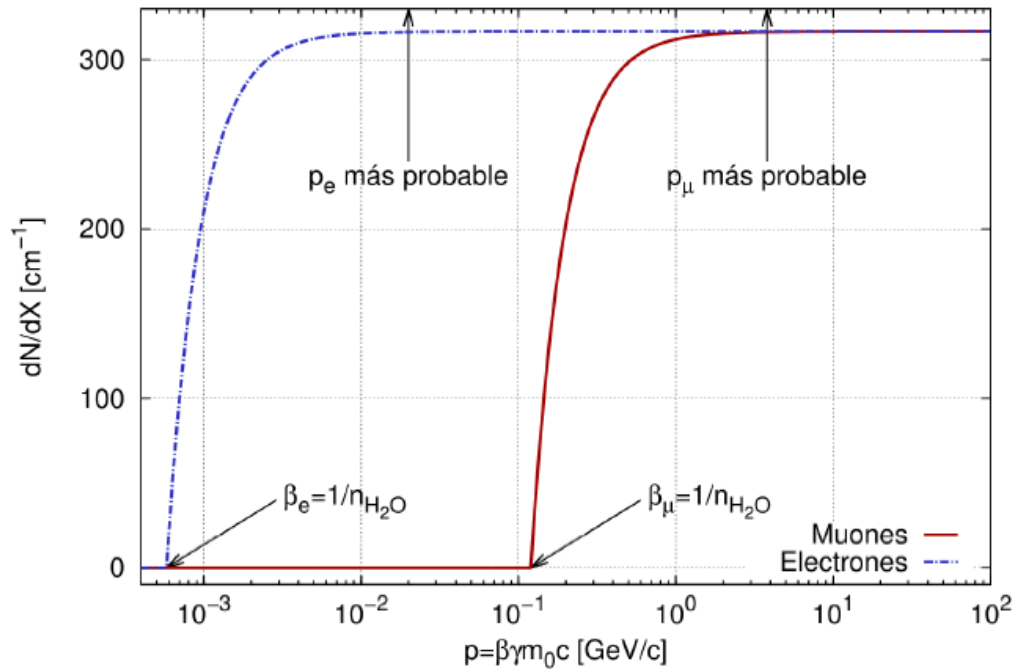


Figura 10. Producción de fotones Cherenkov como función del impulso de un electrón (azul) y de un muon (rojo), luego de haber recorrido 1 cm en agua líquida. Figura tomada de [12]

Suponiendo que un detector tiene un 1.0 m de altura y es luego atravesado por un muon de forma vertical, donde el poder de frenado en el agua es de $\sim 2 \text{ MeV}/\text{cm}$, se tiene entonces que la energía depositada por este muon es de $\sim 200 \text{ MeV}$. De esta manera, la identificación de la joroba del muon nos permite convertir de unidades relativas de la electrónica a unidades físicas, ya que podemos establecer una relación de correspondencia entre la señal medida por el instrumento y una unidad física como la carga depositada por el muon [16].

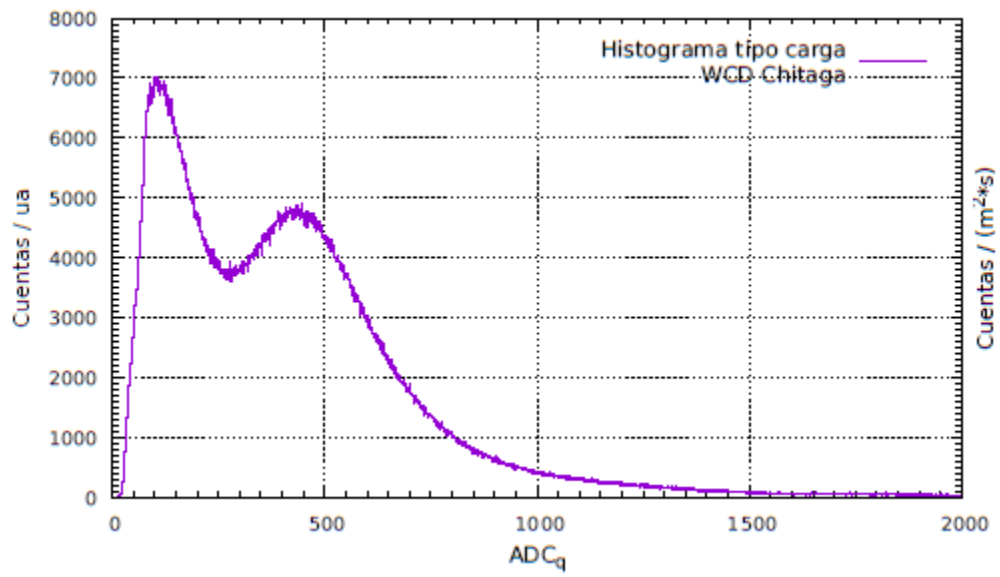


Figura 11. Histograma medido por el WCD Chitaga a la altura de Bucaramanga (956 m s.n.m). Figura tomada de [15].

4. Estimación de la radiación secundaria de rayos cósmicos en Pamplona

4.1 CORSIKA y lluvias atmosféricas extendidas

Dado que este trabajo se enfoca en determinar la mejor geometría para la implementación de un WCD a instalar en el municipio de Pamplona, usando como criterio fundamental la identificación del VEM, se hace necesario estimar el fondo de radiación a la altura de Pamplona. Para esto, se describe a continuación el procedimiento realizado para estimar el flujo de secundarios producidos por una hora de flujo de rayos cósmicos.

El análisis de datos experimentales de EAS requiere de entender y modelar las interacciones físicas de altas energías ($> \text{GeV}$), las cuales suceden entre los rayos cósmicos y los elementos presentes en la atmósfera terrestre. Para ello se realizan modelados computacionales utilizando métodos Monte Carlo donde se consideran las interacciones fuertes a altas y bajas energías, además de las electromagnéticas. En el presente trabajo, este modelado computacional se realizó con la herramienta CORSIKA (por sus siglas en inglés *COsmic Ray Simulations for KAScade*)[24] versión 7.44 [25]. Esta herramienta se especializa en modelar las EAS iniciadas por diferentes tipos de rayos cósmicos, desde protones hasta el núcleo atómico del hierro. Existen distintos modelos⁶ para las interacciones hadrónicas [24], el modelo utilizado en este trabajo es QGSJET-II-4⁷ [26][27][28] (altas energías) y GHEISHA-2002⁸ [29](bajas energías) y para la interacciones electromagnéticas se utiliza el modelo EGS4⁹ [30].

Es importante destacar que CORSIKA no calcula la fluencia de RC primarios, es decir ni el tipo ni cantidad de núcleos que ingresarían a la atmósfera en cierto tiempo y área. Por esta razón, en este trabajo se ha calculado esta fluencia, para una hora de flujo, haciendo uso de la herramienta computacional ARTI [7]; dispuesta por la colaboración LAGO para este propósito.

ARTI permite estimar el número y tipo de RC que ingresan a la atmósfera para una cierta posición geográfica, y durante un cierto tiempo. Para esto, se parte del espectro medido de primarios (ver figura 1) el cual se puede modelar como ley de potencias de la forma:

$$\Phi(E, Z, A, \Omega) = \frac{dN(E)}{dsd\Omega dt dE} \simeq j_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\alpha(E, Z, A)}, \quad (4.1)$$

donde dN es el número de partículas, dt es el tiempo, ds el área, $d\Omega$ es el ángulo sólido (definido como $d\Omega = 2\pi \sin(\theta) d\theta$), dE es el intervalo de energía, j_0 es una constante de proporcionalidad que se ajusta al rango de energías de interés a través del índice espectral

⁶ VENUS, QGSJET y DPMJET

⁷ Quark Gluon String model with JETs, version II-4.

⁸ Gamma Hadron Electron Interaction SHower code.

⁹ Electron Gamma Shower, versión 4

alfa y $\alpha(E, Z, A)$ el índice espectral, Z es el número atómico y A el número másico. Al integrar la ecuación (4.1) se puede obtener el número esperado de primarios por núcleo (Z, A)

$$N(Z, A, \theta) = \mathfrak{N}(\theta) j_0(Z, A) \frac{(E/E_0)^{\alpha'(Z, A)}}{\alpha'(Z, A)} \Big|_{E_{\min}}^{E_{\max}}, \quad (4.2)$$

Donde $\mathfrak{N}(\theta) \equiv \sin^2(\theta) \pi \Delta s \Delta t$ siendo θ el ángulo cenital, $\alpha'(Z, A) = \alpha(Z, A) + 1$ y $E_{\max} - E_{\min} \equiv \Delta E$ es la banda de energía [15].

En este trabajo se calculó el número y tipo de primario equivalentes para una hora de flujo de RC que arriban a la atmósfera, justo en el cenit del municipio de Pamplona. Para esto, en la herramienta ARTI, se ajustaron los siguientes parámetros:

- Para el campo geomagnético se utiliza la posición $L(\varphi, \lambda, h)$ ¹⁰ y estimado a partir del modelo IGRF12¹¹.
- El nivel de observación 2342 m s.n.m¹² para Pamplona.
- Rango de primarios de $1 < Z < 26$ y $1 < A < 56$.
- Rango de energía de los primarios de 5 GeV a 10^9 GeV.
- Angulo cenital de incidencia de los primarios de 0° hasta 90° .
- Modelo atmosférico Tropical.
- Magnitud de la componente horizontal (26.783 nT) y vertical (16.265 nT) del campo magnético terrestre.

Dado que el flujo de RC es afectado por el campo geomagnético [15], en la presente sección se presenta como opera esta corrección para la afluencia estimada con los parámetros anteriormente descritos.

4.2 Corrección por campo Geomagnético

La trayectoria de los RC al interaccionar con el campo geomagnético (CG) es influenciada por éste desviando su dirección, de manera que para estimar el espectro de RC se tendría un modelo de EAS+CG con el fin de estimar la producción de secundarios a nivel del suelo como función del tiempo para cualquier posición geográfica [13][31].

¹⁰ Donde φ es latitud, λ longitud y h altura sobre el nivel del mar

¹¹ Es un modelo numérico que permite estimar el vector \vec{B} en cualquier posición geográfica de la Tierra.
<http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcPointIGRF>

¹² s.n.m acrónimo para sobre el nivel del mar

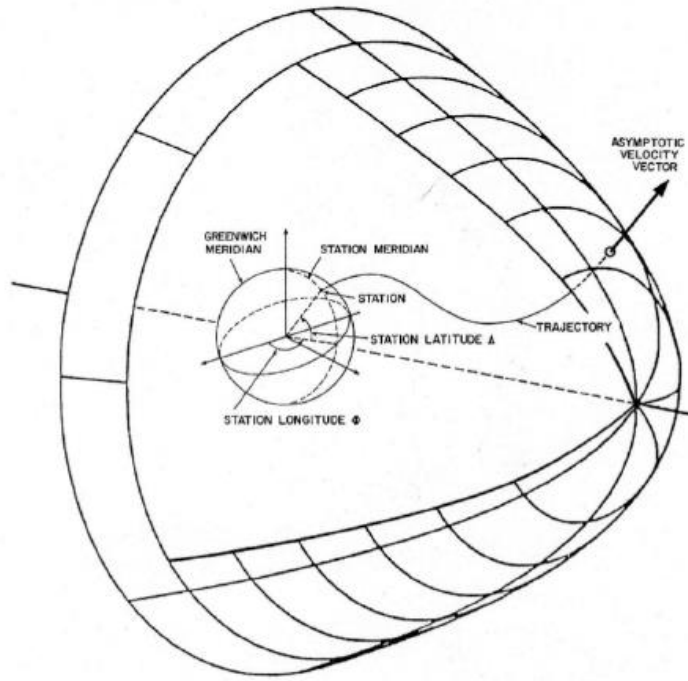


Figura 12. Ilustración de la técnica de trayectoria en reversa, la cual consiste en propagar la anti-partícula desde un punto geográfico L hacia afuera de la Tierra. Figura tomada de [15].

Determinar el camino que seguirán los RC a través del CG hasta una posición geográfica $L(\varphi, \lambda, h)$ ¹³ dependerá del cambio de la dirección de su propagación determinada por

$$\frac{d\vec{l}_v}{ds} = \frac{Ze}{pc} (\vec{l}_v \times \vec{B}), \quad (4.3)$$

Donde el inverso del termino Ze/pc se denomina rigidez magnética,

$$R_m \equiv \frac{pc}{Ze}, \quad (4.4)$$

Donde \vec{l}_v va siendo el vector unitario que apunta en la dirección de la velocidad de la partícula (\vec{v}/v), ds es el desplazamiento de la partícula, Ze la partícula cargada c la velocidad de la luz, p el momento y \vec{B} el campo magnético. Esta ecuación representa la resistencia de una partícula cargada al cambiar su dirección de propagación dentro de un campo magnético (figura 12).

Los RC según el valor de rigidez magnética (R_m) puede presentar tres situaciones:

¹³ Donde φ es latitud, λ longitud y h altura sobre el nivel del mar

- R_m permitida: Son aquellos RC cuya trayectoria les permite arribar en una cierta posición geográfica, es decir contienen todos los valores R_m permitos.
- R_m prohibida: Son aquellos RC que logran arribar si se presenta un rango continuo que va desde cero hasta el primer valor de rigidez permitida
- R_m penumbra: Son aquellos RC que tiene un valor R_m en el rango R_m permitida y R_m prohibida, de tal manera que su trayectoria puede ser permitida o prohibida, siguiendo un proceso estocástico.

Sin embargo, la penumbra se caracteriza por un único valor de rigidez magnética efectivo, valor que permite establecer si una partícula puede alcanzar, o no, cierta posición geográfica. Por tanto, este valor denominado rigidez de corte (R_c) está definido como:

$$R_c = R_U - \sum_{k=R_L}^{R_U} \Delta R_k^{\text{permitida}} , \quad (4.5)$$

donde ΔR_k es la resolución con la que se estima la R_m . Teniendo R_U (permitidas) y R_L (prohibidas), al igual que la R_m , dependen de: el tiempo (t), la dirección de arribo (donde θ es el ángulo cenital y φ el ángulo azimutal), la posición geográfica (latitud (Lat) y longitud (Lon)), y la altura (Alt), por lo que se considera el método de corte de rigidez magnética local definido como,

$$R_m = R_m(Lat, Lon, Alt, t, \theta, \varphi) , \quad (4.6)$$

A partir de esta última definición Ec.(4.5) se supone implícitamente que todas la trayectorias contribuyen de igual forma a la región de penumbra, por consiguiente si la Ec (4.2) es filtrado a través del termino E_{min}

$$E_{min} = \sqrt{P_{min}c^2 + m(Z, A)^2c^4} , \quad (4.7)$$

Donde el valor mínimo de momento está definido

$$P_{min} = \frac{Ze}{c} R_{c(i)} , \quad (4.8)$$

Con todo esto se pueden identificar tres tipos de flujos de primarios dependiendo de la condición $R_{c(i)}$ [15].

Finalmente, luego de aplicar esta corrección, la tabla 1 presenta los resultados del número de y tipo de primario que arribarían a la atmósfera terrestre durante una hora, por metro cuadrado y sobre el cenit del municipio de Pamplona.

Tabla 1. Distribución de primarios a simular para estimar el flujo de secundarios para 1 hora a la altura de Pamplona. Columna uno corresponde el tipo de elemento, columna dos al número atómico, columna 3 el número másico y columna cuatro la cantidad de núcleos que se simulan.

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

4.3 Espectro esperado de radiación secundaria en Pamplona

Una vez calculada la fluencia de primarios sobre el cenit del municipio de Pamplona, se estimó el flujo de secundarios producidos por ésta a la altura de Pamplona (2343 m s.n.m). Para esto, se empleó el CORSIKA desplegado en el cluster computacional ACME, administrado por el CIEMAT¹⁴ y facilitado su acceso gracias a la colaboración LAGO.

¹⁴ <http://rdgroups.ciemat.es/web/sci-track/facilities>

La estimación de secundarios a nivel del suelo de Pamplona usando CORSIKA, se realizó ajustando los modelos de interacción mencionados en la sección 4.1, además de ajustar el tipo de atmósfera como tropical (usando el modelo atmosférico MODTRAM). Los resultados de esta estimación se presentan en la figura 13, donde se observa la distribución del momento por tipo secundario que arribarían a la altura del municipio de Pamplona, Colombia. En esta figura, se observa que los fotones dominan el espectro a energías menores de 10^{-1} GeV, seguidamente vemos a los e^{\pm} en el rango de los MeV, donde el pico máximo del e^{-} se presenta en ~ 10 MeV y el del e^{+} en ~ 40 MeV. Luego tenemos los muones cuya máxima cantidad es $\sim 4 \times 10^4$ cuentas/ $m^2 \cdot h$ para una energía de ~ 3 GeV.

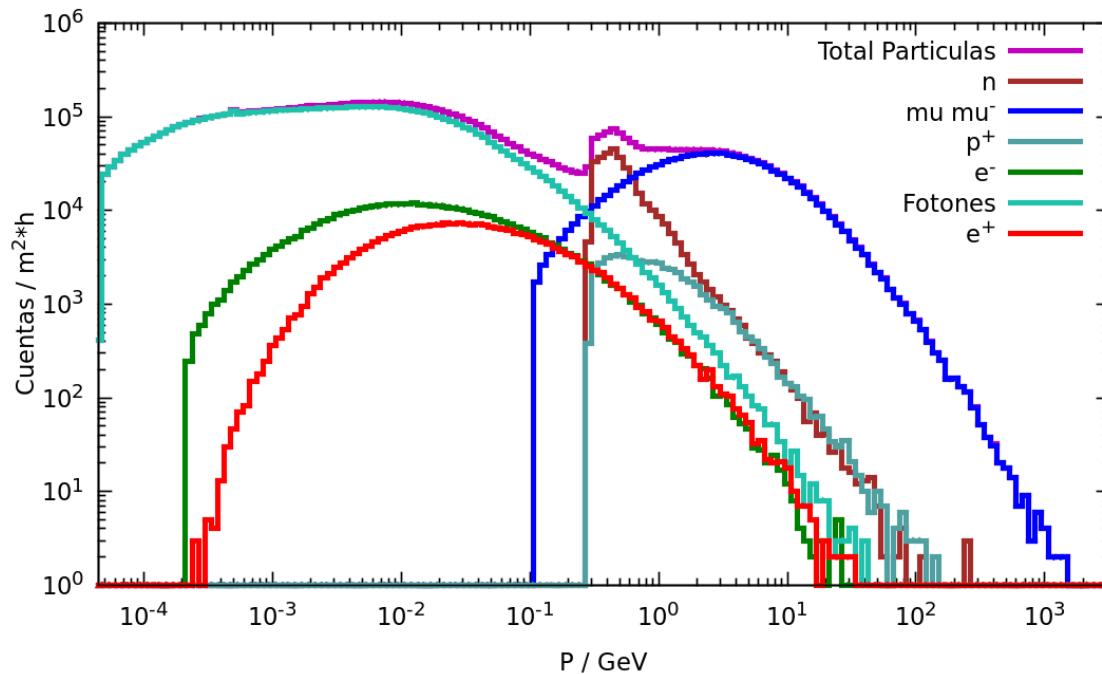


Figura 13. Espectro de energía de secundarios que se produce para una hora de flujo al nivel del suelo de Pamplona (2343 m s.n.m). En morado el espectro de todos los secundarios, en azul los muones (positivos y negativos). El pico de energía para los muones es aproximado en 3 GeV

5. Modelado computacional de un detector Cherenkov de agua

La selección de la geometría de un WCD, tipo LAGO, requiere de conocer y/o estimar la respuesta del mismo al paso de las partículas secundarias, provenientes de las EAS. Para ello es necesario recrear la forma y estructura que contiene un WCD y modelar de manera detallada la respuesta que éste tendrá.

Con el fin de definir la mejor geometría para un WCD a instalar en la Universidad de Pamplona, se realizó un modelo computacional del mismo empleando Geant4 [32], que es un código computacional escrito en C++ y desarrollado por la colaboración CERN. Geant4 permite modelar la propagación de partículas a través de la materia. En este trabajo, al igual que con el CORSIKA, se ha empleado la implementación de Geant4 existente en el ARTI de LAGO, y se han corrido los respectivos cálculos computacionales en la plataforma ACME.

Es importante destacar que en el modelo de WCD implementado en ARTI, el fotocátodo del PMT tiene una geometría elipsoidal y no se modela la electrónica. En su lugar, la respuesta del PMT se expresa en términos de la probabilidad que tiene un fotón Cherenkov de producir un foto-electrón. Esto quiere decir que la respuesta del PMT se da en términos del número de foto-electrones que produciría el paso de un secundario a través del WCD. Por otra parte, el recubrimiento interior del detector se modela como un material difusor y dispersor, el cual es previamente definido en las librerías de Geant4, y maximizando el impacto de fotones Cherenkov en el fotocátodo.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo es estimar la respuesta de diferentes geometrías de WCD al fondo de radiación a la altura de Pamplona. Entonces, empleando el flujo de secundarios obtenidos en la sección 4.3, y presentados en la figura 13, se ha modelado la respuesta para diferentes configuraciones cilíndricas (diámetro/altura) de WCD.

5.1 Respuesta de un WCD al fondo de radiación en Pamplona

En este trabajo se modelaron 6 geometrías, 5 comerciales (presentadas en la tabla 2.) y una de referencia. Respecto de las geometrías comerciales, éstas se seleccionaron luego de una búsqueda por diferentes proveedores de tanques contenedores de agua para y en el municipio de Pamplona. La geometría de referencia corresponde a la del WCD Chitaga, detector instalado en la ciudad de Bucaramanga, Colombia (956 m s.n.m), en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander. Este detector cuenta con dimensiones de: diámetro 210 cm y altura 90 cm; tal y como se describe en la referencia [16]. Esta geometría se denomina aquí como referencia porque nos permite establecer el comportamiento de un detector que ya funciona, a una altura diferente, con respecto del mismo instrumento instalado a una altura

diferente. De esta manera podemos comparar el comportamiento de diferentes configuraciones cilíndricas con una ya existente y funcional.

La figura 14 presenta un ejemplo gráfico del modelo implementado en ARTI de Geant4, donde se observa el paso de un muon tipo VEM (línea roja) y la propagación de fotones Cherenkov al interior del detector.

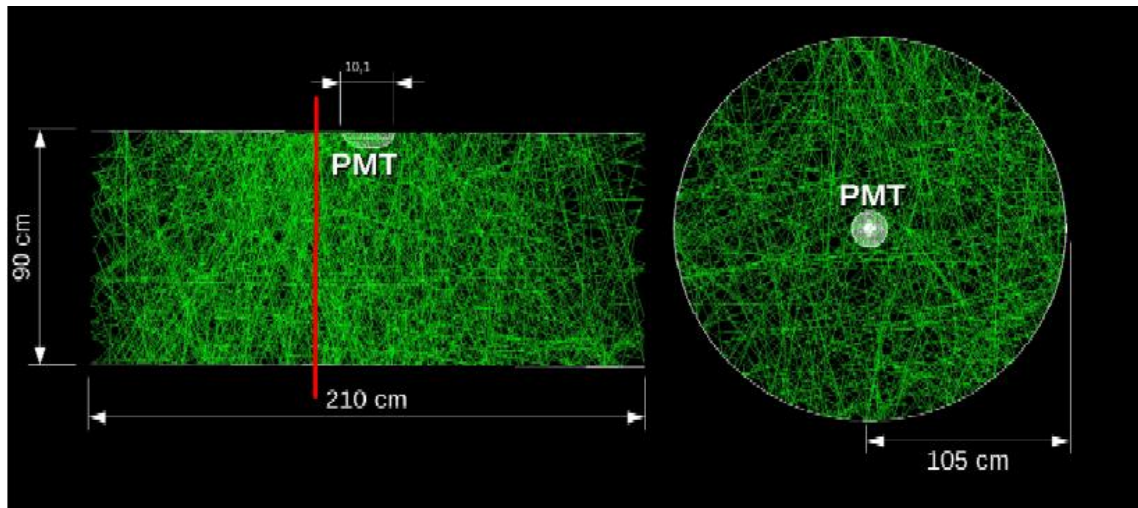


Figura 14. Geometría cilíndrica de un WCD modelado con Geant4. En rojo la partícula cargada atravesando el detector y en verde la trayectoria fotones Cherenkov por el paso de la partícula cargada. Figura tomada de [16].

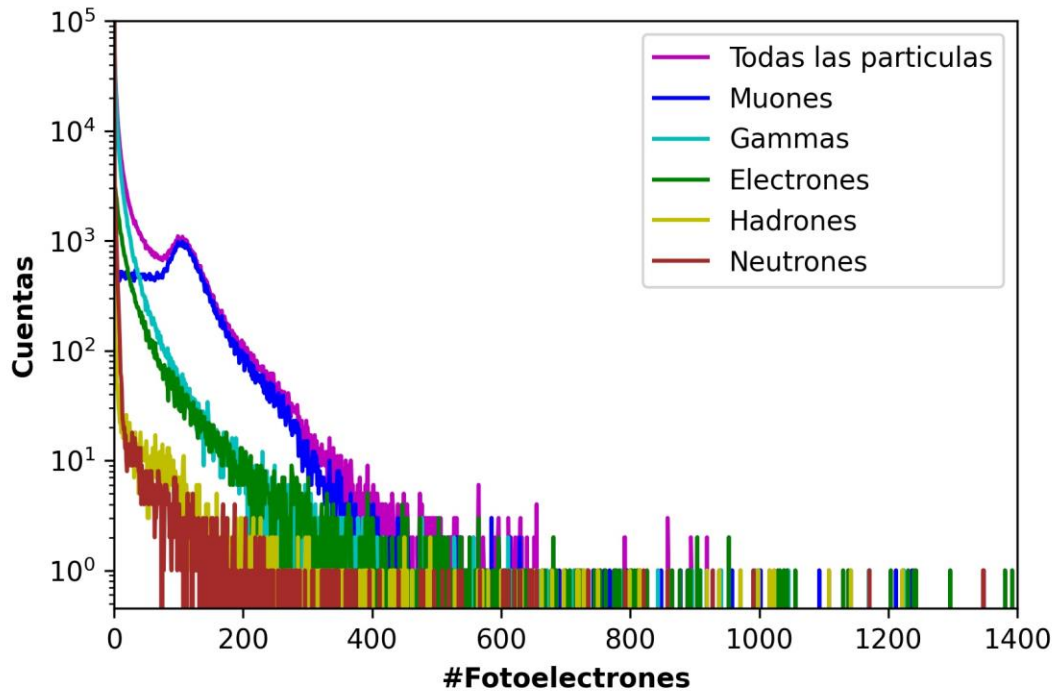


Figura 15. Histograma del número de fotones Cherenkov producidos como consecuencia de la interacción de partículas secundarias esperados en Pamplona y un WCD con dimensiones H= 90 cm y D= 210 cm. El flujo total de secundarios de todas las partículas en morado e individualmente para cada una de las partículas.

En la figura 15 vemos que de todas las partículas detectadas la que predomina y tiene mayor detección son los muones, no obstante, los fotones Cherenkov asociados a partículas tipo gamma son debido a aquellos fotones en que la energía en la producción de pares (e^- y e^+) es lo suficiente haciendo que se genere efecto Cherenkov, proceso conocido como indirecto.

Una vez determinado el espectro de carga en el *detector prueba* se realizó una búsqueda por posibles tanques comerciales que puedan servir para la construcción de un WCD (ver tabla 2). Esto último obedeciendo el objetivo final del presente trabajo que es sentar las bases y fundamentos para la instalación de un WCD en la ciudad de Pamplona.

Tabla 2. Dimensiones de tanques comerciales y su distribuidor

Tanque	Altura (cm)	Diámetro (cm)	D/A	Fabricante
1	108	86	0.796	Colempaques
2	67	104	1.552	Eternit
3	81	69	0.852	Colempaques
4	76	128	1.684	Colempaques
5	38	192	5.053	Colempaques

Para los distintos tanques comerciales se realizó el modelado con el Geant4 el cual implementa un algoritmo tipo montecarlo metrópoli, así como se realizó con el tanque prueba; se determina el espectro esperado para cada una de las distintas geometrías de la tabla 2 la cual se presenta en la figura 16.

En la figura 16.a, se puede observar que un tanque con cociente D/A de 0.796, la componente muónica no se forma una joroba si no que tiende a mantenerse de manera constante, luego al pasar de los ~490 el número de fotoelectrones comienza a decaer.

Mientras de la geometría figura 16.b se aprecia para el muon hay un pico máximo por ~380 y hay mayor concentración de partículas captadas por el PMT en cambio a lo obtenido en el *detector prueba*. Además, la joroba no es tan pronunciada a como se observa al del *detector prueba* (ver figura 15)

De esta geometría figura 16.c tiende a suceder parecido al tanque con dimensiones H= 108 cm y D= 86 cm (figura 16.a) donde el comportamiento del muon es constante y no sé puede distinguir un pico máximo al no formarse una joroba.

La figura 16.d se presenta una joroba sin tanto ruido en comparación con el tanque comercial de dimensiones H= 67 cm y D= 104 cm, en donde su picó máximo esta aproximado en 244, una vez atravesado este punto comienza a decrecer.

Luego tenemos la figura 16.e donde se presenta una joroba muy pronunciada del muon mejor a la obtenida en el *detector prueba*, se estima que su pico máximo se forma a los ~135 fotoelectrones, enseguida es notable el comportamiento captado de hadrones donde su presencia tiene mejor visualización a lo conseguido en el *detector prueba*.

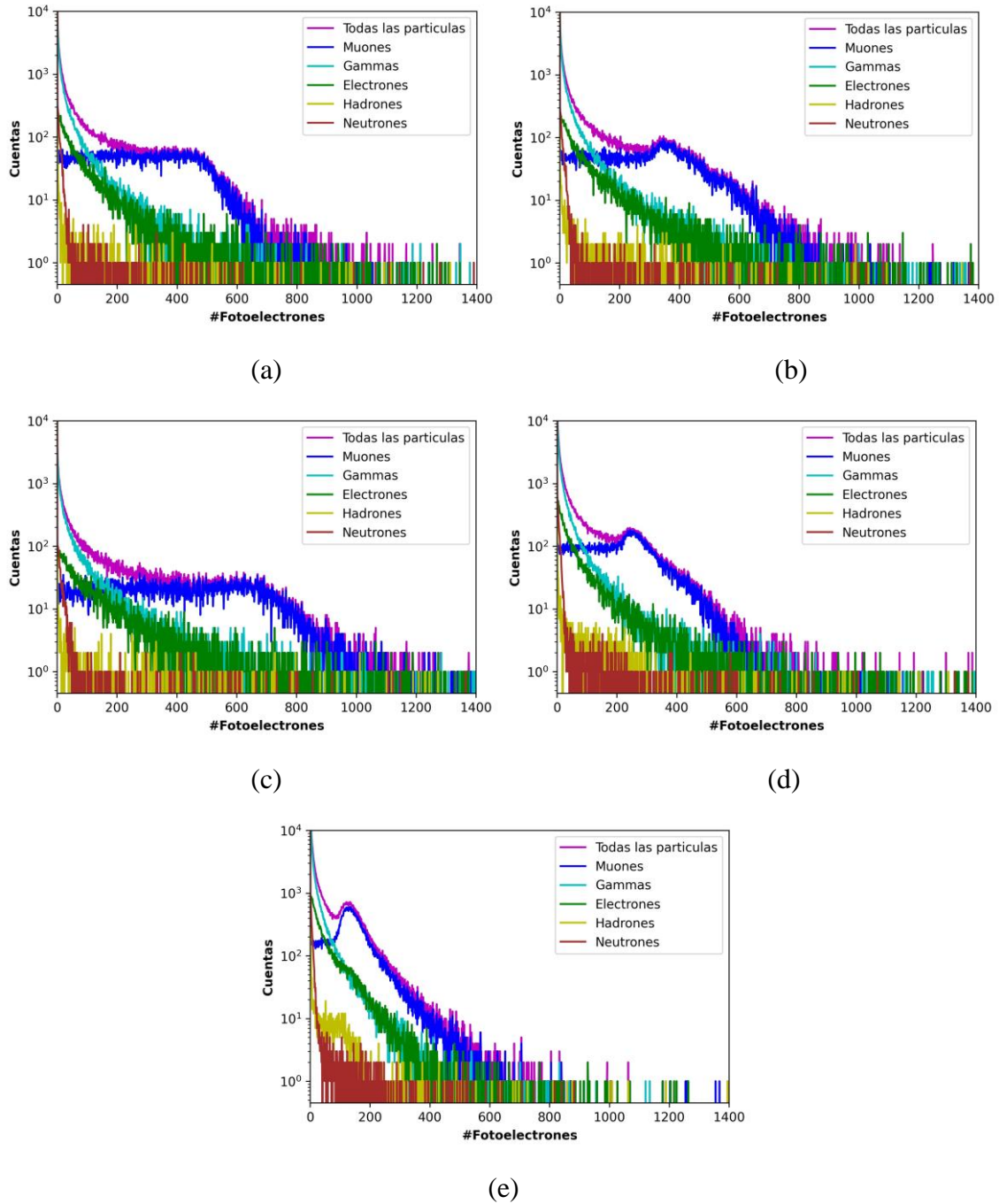


Figura 16. Histograma de fotoelectrones debido al flujo de secundarios de Pamplona para distintas geometrías de tanque comerciales. (a) tanque con dimensiones H= 108 cm y D= 86 cm, (b) tanque con dimensiones H= 67 cm y D= 104 cm, (c) tanque con dimensiones H= 81 cm y D= 69 cm, (d) tanque con dimensiones H= 76 cm y D= 128 cm, (e) tanque con dimensiones H= 38 cm y D= 192 cm.

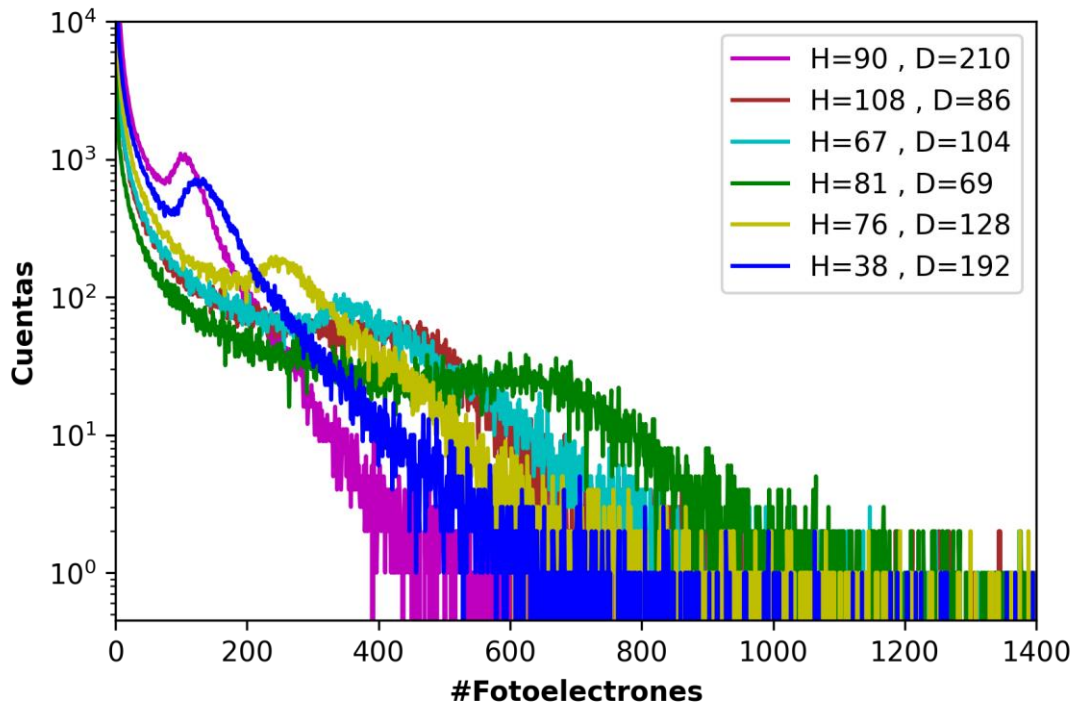


Figura 17. Histograma de fotoelectrones debido al flujo total de secundarios que se producen a la altura de la ciudad de Pamplona. Los colores identifican diferentes geometrías de detector.

La figura 17 representa el espectro de fotoelectrones obtenido para cada una de las geometrías de detector. Se observa que la joroba de muones para el *tanque prueba* es mayor en comparación a la de los otros WCD, sin embargo la joroba para otros detectores también se encuentran bien definidas como el detector H=38 cm y D=192 (azul) y el detector H=76 y D=128 (amarillo). Además, vemos que a medida que el diámetro disminuye la joroba se corre hacia la derecha entre más número de fotoelectrones y es más difícil de distinguir.

El espectro de carga en las distintas geometrías del WCD en la figura 16 se asemejan en que todos presentan un decaimiento de forma exponencial por parte de todas las partículas distintas al muon, además la joroba con mayor cuenta de fotoelectrones corresponde al *tanque prueba* pues en las geometrías de los tanques comerciales utilizados en este estudio fue menor de 10^3 .

En este caso podemos establecer que la geometría más favorable es aquella que nos permite identificar y ver de forma clara el VEM. De esta manera, de las geometrías estudiadas hasta el momento, las que mejor se adaptarían para implementar un WCD son aquellas que permitan ajustar la joroba del muon, como una función polonomial de orden 2, y maximizar la distancia entre ésta y el valle que la precede.

5.1.1 Histograma de Carga

El histograma de carga representa el número de pulsos generados por el PMT como función de la energía depositada en el tanque por la partícula que lo penetró [20], este cálculo es determinado por la electrónica en base a las cargas integradas de los pulsos registrados por el PMT durante un determinado período de tiempo [12], a partir del histograma de carga se define el pico cuyo ajuste señala el VEM.

Por consiguiente, de las geometrías estudiadas podemos determinar la ubicación de su calibración correspondiente al VEM (ver sección 3.1.3) debido a que el muon en comparación a otras partículas como el caso del electrón, el muon produce mayor cantidad de fotones que el electrón por ende significa que deposita más carga al detector. A partir de la figura 16 tomamos el histograma de todas las partículas siendo esta el histograma de carga.

El VEM se identifica como la joroba en el histograma de carga, en la figura 16 hay dos tanques que no sé puede determinar el VEM es por ello que los tanques comerciales con dimensiones $H= 108$ cm y $D= 86$ cm y $H= 81$ cm y $D= 69$ cm son descartados.

En la siguiente sección, y con el objetivo de caracterizar la joroba del muon, se realizarán ajustes polinomiales para cada una de las geometrías presentadas anteriormente y a partir de estos definir la geometría que mejor permite identificar el VEM.

De la figura 18, para cada una de las distintas geometrías el ajuste negro representa la componente electromagnética, la roja representa la componente muónica y los puntos rojos vertical y horizontal representa donde se presentó el VEM. La importancia de este ajuste es tener claro su máximo y mínimo con el fin de encontrar el tanque más óptimo en la detección de RC, detallado en la sección 5.2. En tabla 3 se presenta los grados de libertad para el ajuste del polinomio de grado 2 para cada caso de los detectores.

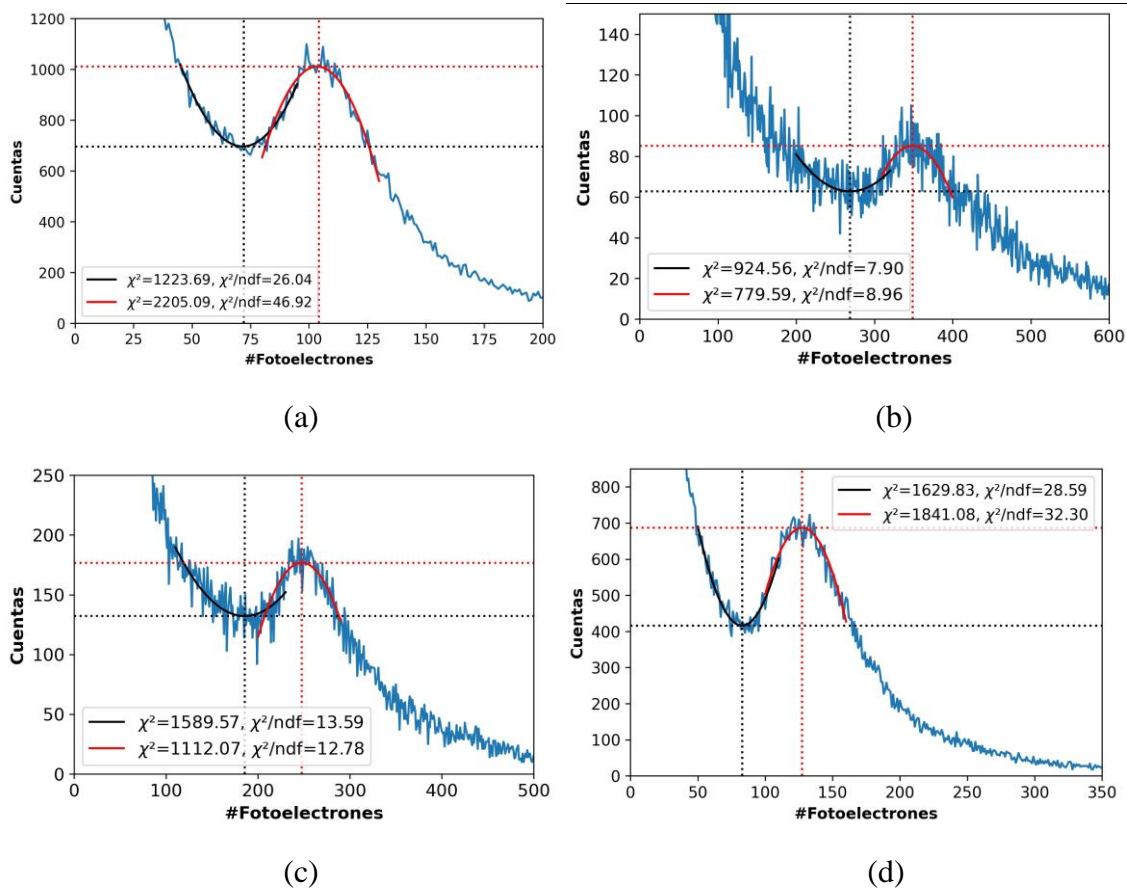


Figura 18. Histograma de fotoelectrones debido al flujo de secundarios para todas las partículas. La joroba con ajuste en rojo designa la mayor cantidad de muones que atraviesan el detector de manera vertical, mientras el ajuste en negro corresponde a la electromagnética. (a) tanque con dimensiones H= 90 cm y D= 210 cm (*Tanque prueba*), (b) tanque comercial con dimensiones H= 67 cm y D= 104 cm, (c) tanque comercial con dimensiones H= 76 cm y D= 128 cm, (d) tanque comercial con dimensiones H= 38 cm y D= 192 cm.

Tabla 3. Valores χ^2 del ajuste para los distintos detectores. Columna 1 corresponde al tanque, columna 2 al cociente Diámetro/Altura, columna 3 χ^2 mínimo, columna 4 χ^2 máximo, columna 5 χ^2/ndf mínimo y columna 6 χ^2/ndf máximo.

Tanque	D./A.	χ^2 para el mínimo	χ^2 para el máximo	χ^2/ndf para el mínimo	χ^2/ndf para el máximo
H=90 y D=210	2.3333	1223.69	2205.09	26.04	46.92
H=67 y D=104	1.5522	924.56	779.59	7.90	8.96
H=76 y D=128	1.6842	1589.56	1112.07	13.59	12.78
H=38 y D=192	5.0526	1629.82	1841.08	28.59	32.30

Con el objetivo de verificar los ajustes con valores extremos de χ^2 ($D/A = 1.55$ y $D/A= 5.05$), la figura 19 presenta los respectivos residuos.

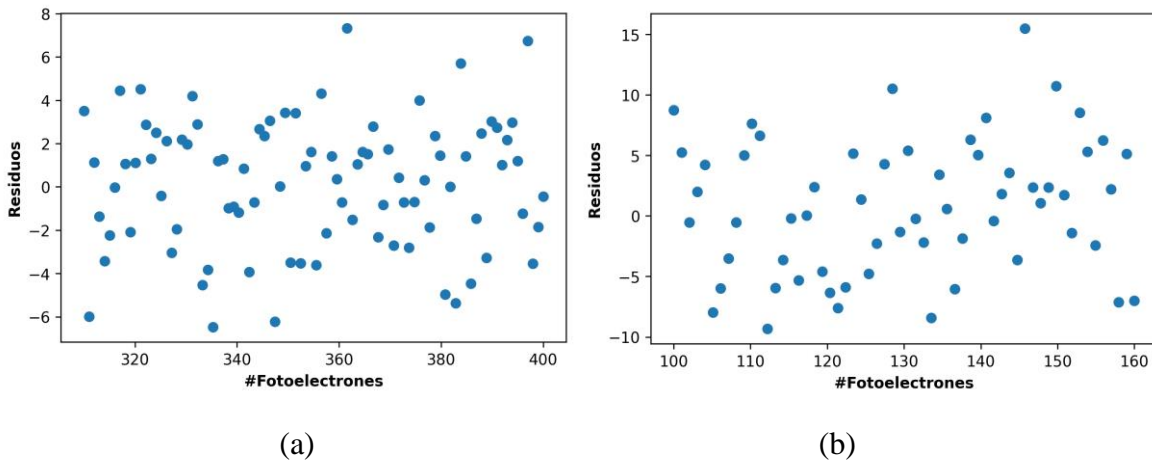


Figura 19. (a) Residuo del ajuste para la joroba del muon del detector H= 67 cm y D=104cm, (b) Residuo del ajuste para la joroba del muon del detector H= 38 cm y D= 192

Se observa que la optimización por parte de este ajuste se debe al rango y por consiguiente al tener un rango menor de separación el tanque H= 67 cm y D=104 cm muestra que tiene mejor eficiencia por parte del ajuste, sin embargo al observar la figura 17 y 18, el tanque H= 38 cm y D= 192 se observa que la joroba del muon es más pronunciada que la del otro detector.

5.2 Efecto de la geometría de un WCD en su repuesta a las EAS

A partir de las geometrías presentadas en la tabla 2 se analizan y determinan qué tan eficaz es cada una de éstas. Para esto, se realizó una comparación por medio de su cociente diámetro/altura y del cociente máximo/mínimo de los ajustes del histograma de cargas (ver figura 18).

En este proceso se utiliza la definición de máximo y mínimo de una función, donde la función corresponde al arreglo de polinomio de segundo grado siendo este el ajuste aplicado en la figura 18, en base a esta definición el punto máximo se identifica en la figura 18 como el centro de las líneas puntuadas rojas y el punto mínimo viene siendo el centro de las líneas puntuadas negras, este resultado se presenta en la tabla 4 junto a su cociente y error relativo.

Tabla 4. Resultado adquirido para los distintos tanques. Columna 1 corresponde al tanque, columna 2 al cociente Diámetro/Altura, columna 3 y 4, máximo y mínimo, y columna 5 cociente del máximo/mínimo. Los espacios en blanco corresponden aquellas geometrías en las que no se determina el VEM por consiguiente el cociente Max./Min. se les considera cero además de la anexión de dos tanques no comerciales.

Tanque	D./A.	Máximo (#fotoelectrones)	Mínimo (#fotoelectrones)	Max./Min.
H=108 y D=86	0.4778	-	-	0
H=81 y D=69	0.8518	-	-	0
H=90 y D=210	2.3333	104 ± 25	72 ± 8	1.44 ± 0.38
H=67 y D=104	1.5522	349 ± 61	269 ± 16	1.3 ± 0.24
H=76 y D=128	1.6842	248 ± 19	185 ± 6	1.34 ± 0.11
H=38 y D=192	5.0526	127 ± 22	83 ± 7	1.54 ± 0.3
H=14.3y D=50	3.4965	424 ± 2	278 ± 1	1.52 ± 0.01
H=16.7y D=75	4.4910	364 ± 13	227 ± 0	1.6 ± 0.06

A este resultado comparativo se presenta lo de la figura 20 donde en forma de rombo negro se tiene en cuenta a dos tanques no comerciales, cuyo propósito es permitirnos detallar de mejor manera la progresión de los resultados.

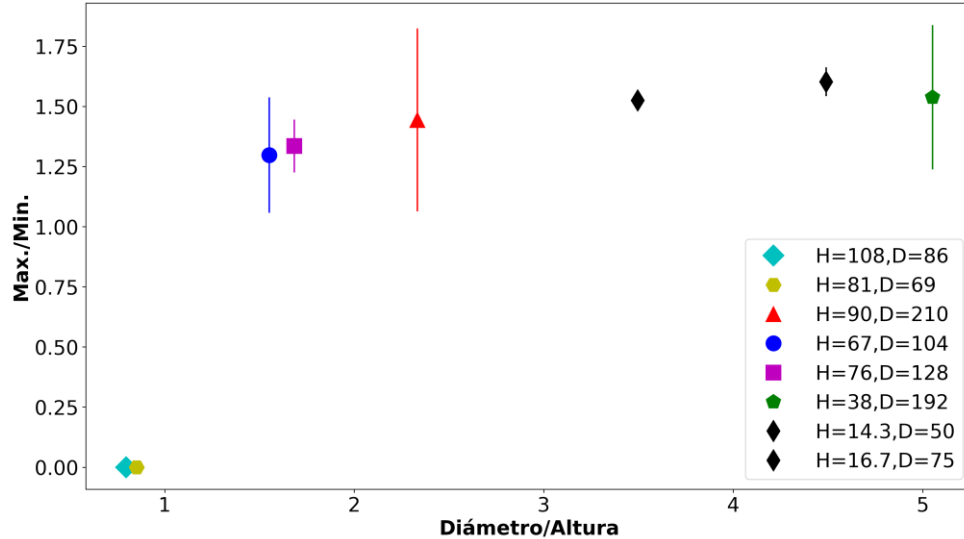


Figura 20. Cociente del Máximo/Mínimo en función del cociente de Diámetro/Altura para cada una de las distintas geometrías.

La geometría de los tanques comerciales con H=108 y D=86, y H=81 y D=69 en la figura 20 al no presentar una joroba se considera que su cociente máximo/mínimo es cero. También se determina que la diferencia entre el tanque comercial H=67 y D=104 (circulo azul) no es tan diferente a la del tanque comercial H=76 y D=128 (cuadrado magenta) mientras que la del tanque comercial H=38 y D=192 (pentágono verde) su diferencia en comparación a los otros

tanques es alta por consiguiente tiende a tener una mejor respuesta al paso de muones, aunque es cierto que las barras de error de este tanque se cruza con la de los demás tanques, en cambio el tanque utilizado para la progresión de la gráfica, como lo es $H= 16.7$ y $D = 75$ sus barras de error no tiene contacto con otros tanques, su respuesta a la detección de RC sería mejor y optima, sin embargo los costos de este tanque sería mayor a los otros, debido a que se debería mandar a fabricar.

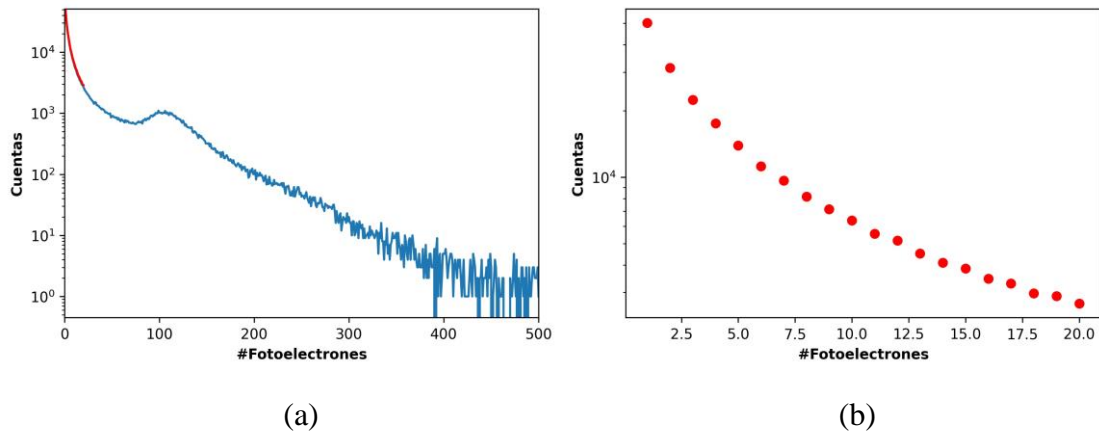


Figura 21. Histograma de fotoelectrones debido al flujo de secundarios para el *tanque prueba*. (a) El color azul representa todas las partículas en rojo los primeros 20 FE, (b) acercamiento de los primeros 20 FE a promediar.

Ahora si promediamos las cuentas para los primeros 20 foto-electrones (FE), tal y como se muestra en la figura 21, podemos estimar la eficiencia del detector en término de la componente muónica, y luego realizando el cociente de este promedio respecto al máximo como se muestra en la tabla 5, entonces entre más cercano este de 1 menos afectación tendrá la componente muónica por parte de la componente electromagnética, resultado que se aprecia en la figura 22. (se aclara que los resultados en forma de rombo negro no son de un tanque comercial así que no son considerados en este estudio, su único propósito es permitirnos ver la progresión por parte a las distintas geometrías)

Tabla 5. Promedio de los 20 bins y cociente Promedio/Máximo de cada geometría.

Tanque	$\langle 20_{FE} \rangle$	$Error_{\langle 20_{FE} \rangle}$	$\langle 20_{FE} \rangle / \text{Max.}$
H=90 y D=210	10821	2662	10.56 ± 2.7
H=67 y D=104	2287	394	26.87 ± 5.5
H=76 y D=128	3808	729	21.54 ± 4.4
H=38 y D=192	5855	1170	8.52 ± 1.7
H=14.3 y D=50	159	23	8.78 ± 2.5
H=16.7 y D=75	409	64	8.42 ± 1.8

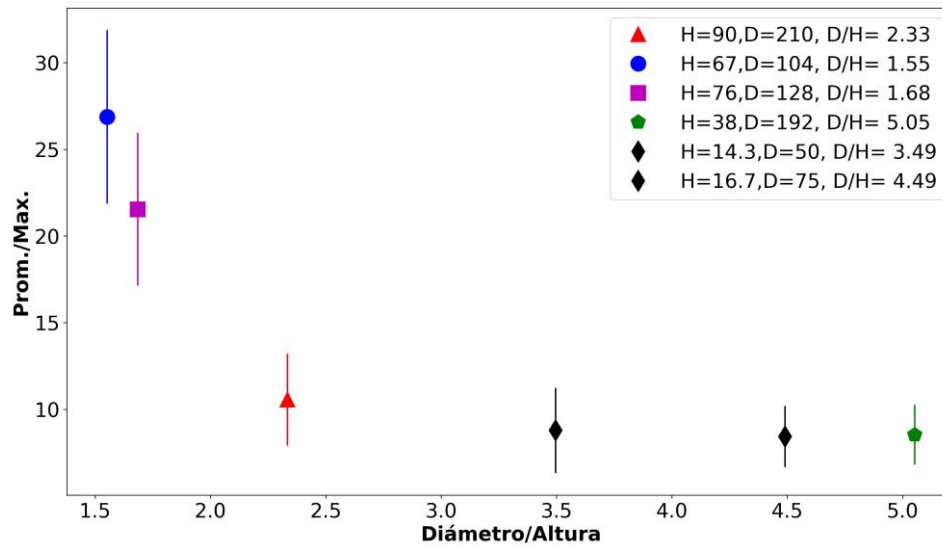


Figura 22. Cociente del Prom/Máximo en función del cociente de Diámetro/Altura para cada una de las distintas geometrías.

El tanque comercial H=38 y D=192 la separación con respecto a la parte electromagnética no es tanta, por ende, va presentar menos ruido por tanto la componente electromagnética va a tener una mejor filtración. Sin embargo, el tanque comercial H=67 y D=104 es el que presenta mayor ruido lo cual es muy notable en el histograma de carga (ver figura 18.b).

6. Discusión de resultados

En el presente trabajo se planteó como hipótesis en determinar y diseñar la geometría más favorable posible para un detector de rayos cósmicos a instalarse en Pamplona, a partir de esta idea se tiene en cuenta que las geometrías a utilizar estarán basadas en tanques comerciales ofrecidos en el mercado.

En primera instancia, se calculó el flujo de rayos cósmicos que llegan a la altura de 2342 m s.n.m en Pamplona y por corrección del CG, como se muestra en la figura 13, de este resultado se pudo determinar que la componente en dominar el espectro es la componente electromagnética y a partir del rango de los ~ 400 MeV éste comienza ser dominado por la componente muónica y una pequeña parte por neutrones; asimismo a este resultado se determinó la energía con la que llegan la mayor cantidad de muones (energía típica) siendo de ~ 3 GeV; y el de los electrones (energía típica) a ~ 10 MeV, dato que nos permite precisar que los muones producen mucha más energía.

En segunda instancia, de la simulación adquirida por CORSIKA y con la utilización del código Geant4 se modeló la respuesta de un detector típico de LAGO, y para cada una de las distintas geometrías de tanques comerciales (tabla 2), resultado que genera el número de fotoelectrones debido al flujo completo y por tipo de partícula figura 15 y 16; por consiguiente se determina que la joroba se da por el paso de muones verticales, sin embargo no en todas las geometrías se presenta este caso, esto debido a su coeficiente D/A al ser menor de 1. Además del resultado de la figura 17 se comprobó que a mayor rango de fotoelectrones la joroba es difícil de distinguir.

La calibración de un detector se realizó a partir de la señal depositada por un muon que atraviesa de forma vertical a este, conocido en la literatura como VEM. Por consiguiente para los detectores en los que no se distingue el VEM, son menos favorables para este estudio. De los detectores que presentan el VEM, resultado mostrado en la figura 18, se realizó un ajuste de polinomio de grado 2 que muestra con más claridad que tan pronunciada fue la joroba del muon en donde se presentó el VEM; igualmente se aplicó este mismo ajuste a la componente electromagnética, esto nos permitió observar y determinar qué tanta separación hay entre la componente muónica y electromagnética. Luego se realizó el cálculo de los grados de libertad y el residuo en consecuencia al ajuste de polinomio de grado 2, proporcionándonos que el tanque menos afectado por este ajuste fue para el detector H= 67 cm y D=104 cm esto debido a que el rango de la dispersión de los datos tiene menos separación en comparación a los otros detectores.

En tercera instancia, para definir qué tan óptimo es el detector se procedió a la utilización del histograma de carga presentada en la figura 18, para adquirir el máximo y mínimo del ajuste utilizado, por medio de la definición de máximo y mínimo de una función, a esto se le sacó el coeficiente Max./Min. para luego ser comparado contra su coeficiente D/A como se muestra en la figura 20, de este resultado se determinó que el detector comercial H=38 cm y

D=192 cm es el que mejor presenta detección de RC debido al rango de separación contra el valle formado por las demás partículas.

Finalmente, se determinó que tan alta es la señal de la componente electromagnética en frente a la componente muónica, para ello se tomaron los primeros 20 bins que están antes de la joroba del muon y se realizó el promedió. Luego se obtuvo el cociente $\langle 20_{FE} \rangle / \text{Max}$. como se muestra en la tabla 5, este resultado se comparó contra su coeficiente D/A como se puede observar en la figura 22, permitiendo determinar qué tan favorable es la respuesta del detector hacia la componente muónica y que tan alejado está de la componente electromagnética.

7. Conclusiones

Se estimó el flujo de radiación secundaria a nivel de la ciudad de Pamplona, Colombia, incluyendo correcciones por campo Geomagnético, tal y como se observa en la figura 13. En esta misma figura se puede observar que para esta ciudad se espera el máximo de muones a energías alrededor de 3 GeV, y de 10 MeV para el caso de la componente electromagnética.

El modelo computacional de la interacción entre el fondo de radiación esperado en la ciudad de Pamplona y diferentes geometrías para un WCD, nos permitió estimar la separación entre la señal producida por muones de la producida por partículas electromagnéticas. Lo cual está en concordancia con la mayor capacidad de penetración de los muones respecto de los e^\pm .

A partir de los histogramas de carga de las distintas geometrías de tanques comerciales presentados en la figura 18 la mejor relación entre el máximo y mínimo a fin de identificar en la que resalta mejor la joroba del muon es en el tanque comercial H=38 cm y D=192 cm debido a que su máximo es de 127 ± 22 fotoelectrones y su mínimo es de 83 ± 7 fotoelectrones como se observa en detalle en la tabla 4.

Se observa que la contribución de la componente electromagnética comparada con la joroba del muon es mínima en el tanque comercial con dimensiones H=38 cm y D=192 cm debido a que su coeficiente $\langle 20_{FE} \rangle / \text{Max.}$ se acerca más a 1 y es máxima para el tanque comercial con dimensiones H=67 cm y D=104 cm ya que se aleja de 1 como se observa en la figura 22 y tabla 5.

De los resultados obtenidos para cada una de las distintas geometrías estudiadas (figura 16) y teniendo en cuenta el cociente Diámetro/Altura (tabla 2) se observa que si su cociente es mayor que 1 se distingue la joroba del muon, de manera que dicha geometría es favorable a las trayectorias del muon con respecto a las trayectorias de la componente electromagnética, en caso contrario al ser menor a 1 dicha geometría es menos favorable para poder ser calibrada por medio del VEM.

De todo el trabajo realizado determinó que, a partir de los estudios y análisis hechos, para los tanques comerciales objeto de investigación, se encontró que la geometría óptima para la instalación de un tanque en Pamplona corresponde al tanque con dimensiones H=38 cm y D=192 cm o un tanque cercano a las mismas características que presento este tanque. De igual forma, al observar las figuras 20 y 22 el tanque comercial H=76 cm y D=128 cm el valor medio es mejor comparado con el valor para las otras geometrías, la barras de error se sobreponen, por lo que este tanque podría ser una opción recomendable, dado que al ser más pequeño requiere de un menor espacio para su instalación, además de facilitar su manipulación.

La siguiente tabla presenta un estimado de los materiales más indispensables para la construcción de un WCD.

Tabla 6. Costos para la implementación de un WCD. Columna 1 material y columna 2 costos en peso colombiano.

Material	Costos (Pesos Colombianos)
Tanque cilíndrico	1000000
Dupont Tyvek	700000
Aislante fotonico	150000
Redpitaya (STEMlab)	2300000
PMT (Hamamatsu)	12000000
Computador	3000000
TOTAL	19150000

El presente trabajo se presentó en los siguientes eventos académicos:

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

8. Bibliografía

1. Alves Batista, R., Biteau, J., Bustamante, M., Dolag, K., Engel, R., Fang, K., ... & Unger, M. (2019). *Open questions in cosmic-ray research at ultrahigh energies*. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6, 23.
2. Kudela, K., Storini, M., Hofer, M. Y., & Belov, A. (2000). *Cosmic rays in relation to space weather*. In *Cosmic Rays and Earth* (pp. 153-174). Springer, Dordrecht.
3. Durán, M. S., Asorey, H., Dasso, S., Nunez, L., Pérez, Y., Sarmiento, C., & FT LAGO Collaboration. (2015, July). *The LAGO Space Weather Program: Directional Geomagnetic Effects, Background Fluence Calculations and Multi-Spectral Data Anal.* In 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015) (Vol. 34, p. 142).
4. Alvarez, W. & Alvarez, C. & Araujo, C. & Areso, O. & Arnaldi, Luis & Asorey, Hernán & Audelo, Mario & Barros, Haydn & Bertou, X. & Bonnett, M. & Calderón-Ardila, Rolando & Calderón, Mario & Campos-Fauth, A. & Carramiñana, A. & Carrasco, Esperanza & Carrera Jarrin, Edgar & Cazar Ramírez, Dennis & Cifuentes, E. & Cogollo, Diego & López, Alex. (2016). *The Latin American Giant Observatory: Contributions to the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015)*. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.3847525.
5. Grieder, P. K. F (2001). *Cosmic Rays at Earth. Researcher's Reference Manual and Data Book*. Institute of Physics University of Bern Bern Switzerland: Elsevier Science.
6. Casadiegos, J. G., Cano, C. S., & Núñez, L. A. (2018, September). *Caracterización de perfiles atmosféricos de CORSIKA para la cadena de simulaciones de la colaboración LAGO*. In *Semana Internacional de la Ciencia: Retos para el siglo XXI*.
7. Sarmiento-Cano, C., Suárez-Durán, M., Calderón-Ardila, R., Vásquez-Ramírez, A., Jaimes-Motta, A., Dasso, S., ... & Asorey, H. (2020). *Performance of the LAGO water Cherenkov detectors to cosmic ray flux*. *arXiv preprint arXiv:2010.14591*
8. Tamashiro, A. A. (2010). *Espectro y composición de los rayos cósmicos en el rango de energía de la transición galáctica-extragaláctica* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
9. Quintero, Carlos & Rosales, Misael. (2009). *Calibración de los Detectores Prototipo del Proyecto L.A.G.O (Venezuela)*. 10.13140/RG.2.2.12060.10880.
10. Sidelnik, I. P. (2012). *Estudio de rayos cósmicos de muy alta energía con AMIGA, una extensión del Observatorio Pierre Auger: detectores de superficie y contadores*

de muones para estudiar la composición, dirección de arribo y espectro de los rayos cósmicos (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

11. Letessier-Selvon, A., & Stanev, T. (2011). *Ultrahigh energy cosmic rays*. Reviews of modern physics, 83(3), 907. <http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.83.907.1>
12. Asorey, H. (2012). *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 125, 131.
13. Suarez Duran, M. (2015). *Modulación De Rayos Cósmicos Secundarios A Nivel Del Suelo Por Cambios En Campo Geomagnético* (Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Física).
14. Durán, M. S., Rosales, M., & Nunez, L. A. (2011). *Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar* (Doctoral dissertation, Tesis pregrado, Universidad Industrial de Santander).
15. Suárez-Durán, M. (2019). *Variaciones del flujo de radiación cósmica en distintos escenarios geofísicos* (Doctoral dissertation, doctoral thesis, Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia).
16. Jaimes-Motta, A. (2018). *Estimación de la respuesta de un detector cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga*. Bachelor thesis, Universidad Industrial de Santander.
17. Arqueros Martínez, F. *Las partículas más energéticas de la naturaleza*. Dialnet, (2), 66–75, 2009. <http://goo.gl/JNaqDw>.
18. Torres, I. (2017). *Proyecto internacional LAGO*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México.
19. Arnaldi, L. H., Cazar, D., Audelo, M., & Sidelnik, I. (2019, July). *Preliminary results of the design and development of the data acquisition and processing system for the LAGO Collaboration*. In 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (Vol. 36, p. 175).
20. Romero, N. (2012, Junio) *Modulación del flujo de rayos cósmicos por actividad solar* (Instituto Balseiro)
21. Guarín González, N. (2017). *Eficiencia de un detector Cherenkov en agua para la detección de neutrones* (Tesis Maestría, Universidad Nacional de Cuyo).

22. Galindo, A., Moreno, E., Carrasco, E., Torres, I., Carramiñana, A., Bonilla, M., ... & Zavala, L. (2017). Calibration of a large water-Cherenkov detector at the Sierra Negra site of LAGO. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 861, 28-37.
23. Etchegoyen, A., Bauleo, P., Bertou, X., Bonifazi, C. B., Filevich, A., Medina, M. C., ... & Pierre AUGER Collaboration. (2005). Muon-track studies in a water Cherenkov detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 545(3), 602-612.
24. Heck, D., Knapp, J., Capdevielle, J., Schatz, G., Thouw, T. *CORSIKA : A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*. FZKA, 6019, 1–98, 1998.
25. Heck, D., Pierog, T. *Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide. 7a ed.* Karlsruhe, Germany, 2013. <http://www-ik.fzk.de/corsika/>.
26. Ostapchenko, S. *QGSJET-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions*. págs. 1–4, dic. 2004. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0412332>.
27. Ostapchenko, S. *Nonlinear screening effects in high energy hadronic interactions*. *Physical Review D*, 74 (1), 1–17, jul. 2006. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.74.014026>.
28. Ostapchenko, S. *On the re-summation of enhanced pomeron diagrams*. *Physics Letters B*, 636 (1), 40–45, abr. 006. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370269306003261>.
29. Fesefeldt, H. C. *GHEISHA program, Technical Report PITHA 85-02*. Inf. téc., III Physikalisches Institut, Aachen, Germany, 1985.
30. Nelson, W. R., Hirayama, H., Rogers, D. W. *The EGS4 Code System*. Inf. téc., SLAC, 1985. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-265.html>.
31. Asorey, H., Núñez, L. A., & Suárez-Durán, M. (2018). *Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain*. *Space Weather*, 16(5), 461-475.
32. Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., *et al.* *Geant4 - a simulation toolkit*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506 (3), 250–303, jul 2003. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900203013688>.