

CARACTERIZACIÓN DE PERFILES ATMOSFÉRICOS PARA LA CADENA DE SIMULACIÓN DE LA COLABORACIÓN LAGO

Propuesta de trabajo de grado para optar al título de Física

Jennifer Grisales Casadiegos^{1,2}

Director: Luis Alberto Núñez^{1,2}

Co-Director: Christian Sarmiento Cano ³

¹Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación GIRG

²Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales

³Instituto en Tecnologías de Detección y Astropartículas, ITeDA
(CNEA-CONICET-UNSAM)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2018

Índice

1. Introducción	2
2. Planteamiento del problema	3
3. Marco teórico	4
3.1. Los rayos cósmicos	4
3.2. Interacción de las partículas con la atmósfera	6
3.2.1. Efecto compton	7
3.2.2. Producción de pares	8
3.2.3. Radiación de frenado (Bremsstrahlung)	8
3.3. Cascadas aéreas extensas o EAS	9
3.3.1. Componentes de las cascadas	11
3.3.2. Cascadas generadas por un fotón o un electrón	11
3.3.3. Cascadas originadas por un protón o hadrón	13
3.4. CORSIKA	14
3.4.1. Modelos atmosféricos en CORSIKA	15
3.4.2. Flujo de secundarios y perfiles atmosféricos predefinidos	17
4. Objetivos	17
5. Metodología	19
6. Cronograma de Actividades	19

Resumen

La colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory) estudia la influencia de la actividad solar en las variaciones del flujo de partículas secundarias, producidas durante la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. Con este objetivo, se realiza una cadena de simulaciones que estima, de forma detallada, el desarrollo del rayo cósmico desde su ingreso a la atmósfera terrestre, hasta la respuesta en el detector WCD (Water Cherenkov Detector). Estos cálculos se realizan en función de la posición geográfica, altura, campo geomagnético y dirección de arribo.

En la cadena de simulaciones, la atmósfera tiene gran importancia ya que es el medio en el que se producen todas las interacciones con los rayos cósmicos. Las fluctuaciones en la atmósfera, influyen en la detección de partículas secundarias que se realiza a nivel del suelo. Por esta razón, CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade), código usado en la cadena para recrear cascadas aéreas extensas, permite construir un perfil atmosférico respecto a un momento y sitio particular. Sin embargo, LAGO realiza simulaciones para intervalos largos de tiempo, lo que requiere un modelo de atmósfera que sea pertinente bajo esas circunstancias.

La mayoría de sitios LAGO, usan modelos atmosféricos que no son construidos en base a parámetros que caracterizan específicamente las localizaciones de los detectores. Por lo tanto, en este trabajo, se propone construir perfiles atmosféricos mensuales, usando datos extraídos del GDAS (Global Data Assimilation System). Además, se propone estudiar las variaciones que generan dichos perfiles en el flujo simulado, en comparación con el perfil actualmente utilizado para Bucaramanga y de esta manera, poder establecer una metodología para crear perfiles atmosféricos sobre cualquier otra localización.

Palabras clave: rayos cósmicos, perfiles atmosféricos, cascadas aéreas extensas.

1. Introducción

El flujo del fondo de rayos cósmicos en la superficie de la Tierra, es consecuencia de partículas provenientes del espacio que llegan a la atmósfera e interactúan con ella. La producción de partículas en la atmósfera está determinada por efectos de dispersión, decaimientos de partículas inestables, y absorción. Dicho flujo, para partículas con energías por debajo de 10^{15} eV, está generado por el viento solar. La influencia de esta actividad solar en el campo geomagnético y su relación con el funcionamiento de muchos dispositivos tecnológicos de la vida diaria, hacen que el transporte de partículas a través de la heliósfera sea un tema de gran interés en la física espacial.

Por tal razón, la colaboración LAGO, ha desarrollado el programa de Clima Espacial, el cual busca entender la influencia del viento solar en el flujo de rayos cósmicos, a partir de detectores distribuidos en grandes áreas. Dichos detectores pueden registrar indirectamente primarios de baja energía, con lo que se puede obtener información sobre la actividad solar, complementaria a las observaciones que pueden realizarse desde el espacio.

Con base en lo anterior, una de las tareas fundamentales que se propone el programa de clima espacial de LAGO es estimar de forma precisa el flujo de partículas que llegan a nivel del suelo [5]. Para tal fin, se ha desarrollado una cadena de simulaciones que tienen en cuenta el transporte de primarios en la heliósfera, el flujo modulado de primarios a través de la magnetósfera, la llegada de primarios a la atmósfera, la formación de lluvias de secundarios o cascadas aéreas extensas (EAS), y la llegada de partículas al detector. Las simulaciones en detalle de las características, interacción y propagación de partículas secundarias en las EAS se realizan mediante el código CORSIKA [8].

La presente propuesta de trabajo de grado se enfoca cuantificar la influencia de la atmósfera en el aumento o disminución del flujo de radiación a nivel del suelo. Un estudio de la atmósfera mediante la variación de la temperatura, altura y presión, de acuerdo a diferentes épocas del año y localizaciones geográficas, permitirá estimar de forma detallada el flujo de partículas que pueden llegar a la red de detectores de la colaboración.

Para tal fin, se propone una revisión de los modelos atmosféricos predeterminados en CORSIKA, diseñado para la simulación detallada de cascadas aéreas extensas. Se estudiará, la influencia de diferentes condiciones climatológicas en el flujo simulado y también la pertinencia de la construcción y uso de perfiles atmosféricos promediados, usando el GDAS[13].

2. Planteamiento del problema

Las EAS (Extensive Air Shower, por su siglas en inglés), son cascadas de partículas producidas por la interacción de un rayo cósmico primario, con los núcleos de elementos constituyentes de la atmósfera. La densidad atmosférica depende de la temperatura y la presión a una altura determinada y variaciones en éstas pueden influir significativamente en el desarrollo de las EAS.

El programa de clima espacial de LAGO busca estudiar los fenómenos relacionados a esta modulación. LAGO cuenta con una red de detectores WCD a nivel del suelo, que abarcan sitios con diferentes latitudes (desde México hasta la región antártica), y altitudes (desde el nivel del mar hasta más de 5000 metros) [4]. Al combinar todos los datos medidos en estos sitios, LAGO proporciona información detallada de la evolución temporal del flujo de secundarios en diferentes ubicaciones geomagnéticas [5].

Para calibrar el sistema de detección de la red, es necesario el desarrollo de una cadena de simulaciones que tenga en cuenta los procesos físicos involucrados en la generación de las EAS, y un modelo atmosférico realista. Esta cadena de simulaciones se establece en tres bloques principales: el cálculo de los efectos del campo geomagnético en la propagación de partículas cargadas, que contribuyen a la radiación de fondo a nivel del suelo y que se caracterizan por la rigidez de corte en cada sitio LAGO [5]. La estimación del flujo de partículas secundarias al nivel de los detectores, originado por la interacción de los primarios con la atmósfera. Y, la obtención de la respuesta del detector para los diferentes tipos de partículas secundarias [10].

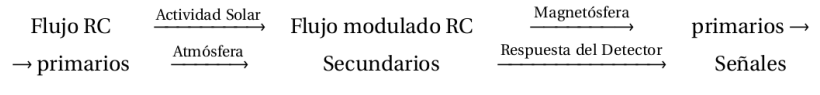


Figura 1: Esquema de la cadena de simulaciones propuesta para la estimación del flujo de secundarios al nivel del suelo.

Trabajos anteriores se han enfocado en cada uno de los tres bloques principales de la cadena. Hasta el presente, para el segundo bloque, se usa el código CORSIKA. Este código permite hacer simulaciones de EAS en base a perfiles atmosféricos construidos por el usuario o perfiles pre-establecidos, diseñados en base a las localizaciones de grandes experimentos. También, posee perfiles construidos respecto a condiciones climatológicas generales, por ejemplo, estaciones o regiones del globo. Adicionalmente, la última versión del CORSIKA, permite que el usuario, cree un perfil atmosférico ajustado a un día, hora y sitio particular a partir de datos extraídos del GDAS.

Los perfiles atmosféricos construidos en base al GDAS tienen la ventaja de ser más cercanos a la realidad debido a que GDAS recoge información climatológica de detectores en todo el planeta y realiza una predicción punto a punto de un momento posterior. Esa predicción luego es calibrada con datos medidos en ese nuevo instante de tiempo[6].

Sin embargo, a pesar de la posibilidad de usar perfiles construidos con el GDAS en CORSIKA, el programa de LAGO aún sigue haciendo uso de los perfiles atmosféricos prefdefinidos. Para el caso de Bucaramanga, usa el perfil Subtropical que más se asemeja a las condiciones atmosféricas locales. Por tanto, para mejorar el segundo bloque de la cadena de simulaciones, es necesario crear perfiles basados en los datos de GDAS y estudiar las diferencias que se pueden observar en el flujo de secundarios obtenido en las simulaciones.

Mediante el presente trabajo de grado, se propone la construcción de perfiles mensuales para Bucaramanga usando GDAS. Dichos perfiles serán contrastados con los perfiles predeterminados en CORSIKA de tal forma que se determine la afectación de la atmósfera en flujo de rayos cósmicos secundarios de baja energía y la pertinencia del uso de estos perfiles mensuales.

3. Marco teórico

3.1. Los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son fotones, electrones o núcleos atómicos de origen astrofísico, viajan por el espacio interestelar a velocidades cercanas a las de la luz y pueden llegar a penetrar en la atmósfera terrestre. Fueron descubiertos en el año 1912 por el Físico Víctor Hess quien a través de experimentos con globos aerostáticos, encontró evidencia de radiación que provenía del espacio. Estas partículas incidentes son llamadas **primarias** y poseen energías en un rango de más de 14 órdenes de magnitud. Se inicia alrededor de los 10^5 eV, que corresponde al viento

solar y fuentes provenientes de la galaxia, hasta más allá de 10^{20} eV, correspondientes a fuentes extragalácticas[2].

La detección de rayos cósmicos se realiza directa o indirectamente dependiendo del rango de energía de los primarios. En la figura 2 se puede observar el flujo de primarios como función de la energía. A éste se ajusta a una ley de potencias de la forma:

$$\frac{dN}{dE} \approx E^{-\alpha}, \quad (1)$$

donde N es el número de partículas que llegan a la atmósfera, E es la energía y α el índice espectral. Las mediciones de los experimentos para diferentes rangos de energía mostrados en la figura evidencian tres cambios en este índice, α . A las zonas donde el valor de α cambia, se les llama rodilla (10^{15} eV), segunda rodilla (10^{17} eV), tobillo 10^{18} eV y corte 10^{19} eV [12].

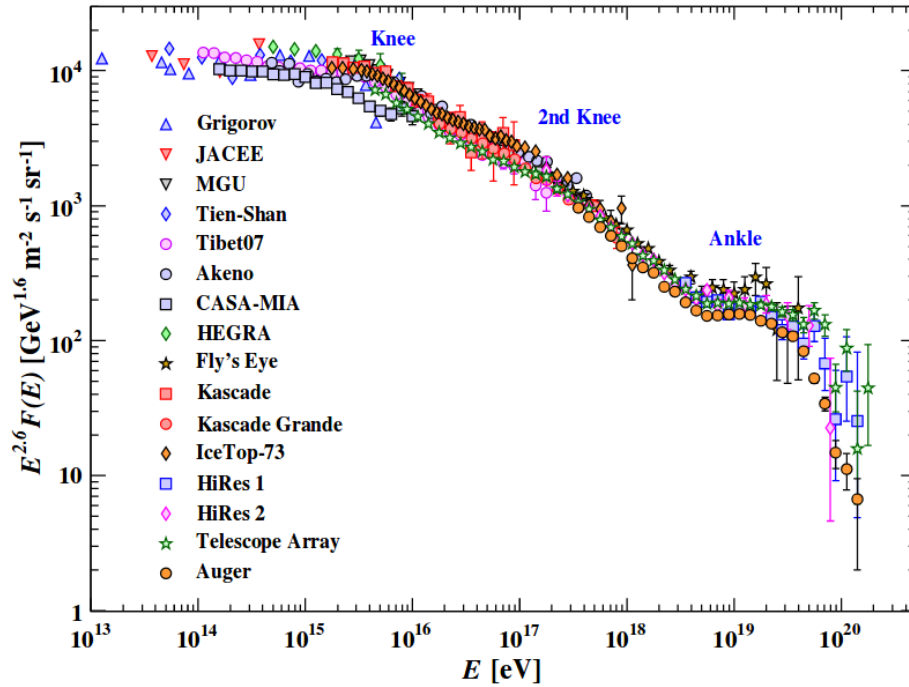


Figura 2: Espectro diferencial de rayos cósmicos como función de la energía. Se ha elevado a la potencia 2.6 para hacer más notables los cambios en la pendiente del espectro. Se distinguen entonces la rodilla (10^{15} eV), segunda rodilla (10^{17} eV), tobillo 10^{18} eV y corte 10^{19} eV. La gráfica es construida a partir de diferentes experimentos que miden directa o indirectamente en un rango de energías específico. Las grandes barras de error entre 10^{18} a 10^{20} eV se debe a que la incidencia de partículas en estos rangos de energía tiene mucha menor ocurrencia. Figura tomada de [12]

La detección directa de los primarios se puede realizar en la región de bajas energías hasta $\approx 10^{15}$ eV. Aquí detectores en satélites pueden identificar partículas individuales, separar diferentes isótopos del mismo elemento y discernir entre energía, carga y masa [14]. Por encima de los 10^{15} eV el flujo de partículas primarias está por debajo de decenas de partículas por metro cuadrado al año, lo que hace muy pequeña la probabilidad de detectarlas directamente.

Sin embargo, estos primarios de altas energías al penetrar en la atmósfera interactúan con los núcleos del aire, y producen otras partículas con menos energía. Este fenómeno se produce en cadena desde el punto más alto de la atmósfera hasta que, finalmente, llegan a la superficie de la tierra partículas menos energéticas como electrones, fotones y muones. Así, la detección directa es reemplazada por instrumentos a nivel del suelo que registran el rastro que deja estas cascadas [4]. Los instrumentos son diseñados en base al conocimiento y análisis de los procesos físicos involucrados en la interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera.

3.2. Interacción de las partículas con la atmósfera

Cuando el primario llega a la atmósfera e interactúa con los núcleos de aire, se desarrolla una reacción en cadena donde se forman partículas cada vez menos energéticas. Estos fenómenos de pérdida de energía son de tipo dispersivo. Este fenómeno es caracterizado por el cambio de dirección del momentum de la partícula frente a una colisión o acercamiento a otra partícula o núcleo [7]. La magnitud fundamental que caracteriza este fenómeno es la sección eficaz diferencial σ , que equivale a la razón del número de partículas dispersadas por unidad de tiempo en un ángulo sólido $dN_{disp}(\theta, \phi)$, dividido entre la densidad del flujo de las partículas incidentes j_{inc} ,

$$d\sigma = \frac{j_{disp}}{j_{inc}} dS. \quad (2)$$

Donde los ángulos θ y ϕ corresponden a la dirección del movimiento de las partículas dispersadas, j_{disp} es el flujo de partículas dispersadas, dS es el elemento de superficie perpendicular al vector de posición, con origen en el centro de la dispersión.

Integrando la expresión [2], obtenemos la sección eficaz de dispersión:

$$\sigma = \frac{1}{j_{inc}} \oint j_{disp}(r, \theta, \phi) dS = \frac{\Phi_{disp}}{j_{inc}}. \quad (3)$$

Donde Φ_{disp} es el flujo de partículas dispersadas que pasan a través de una superficie cerrada. Dependiendo la energía y la naturaleza del primario incidente, se tendrá una sección eficaz que determinará el tipo de interacción resultante. Para los rangos de energía de las EAS, predominan la producción de pares, el efecto compton, efecto compton inverso y radiación de frenado o Bremsstrahlung. Los cuales describiremos a continuación.

3.2.1. Efecto compton

Consiste en la colisión elástica entre un fotón con una partícula masiva. Este fenómeno es independiente del material o la longitud de onda, y sólo depende del ángulo de incidencia sobre la superficie (figura 3). En el caso de las EAS, el material dispersivo es la atmósfera [7]. La variación de la longitud de onda después de la interacción es:

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - \cos(\theta)). \quad (4)$$

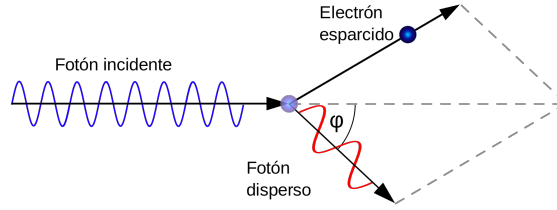


Figura 3: Esquema representativo de la dispersión Compton generada por la interacción de un fotón (línea azul) con un electrón el cual recibe energía cinética del fotón (línea roja). [1]

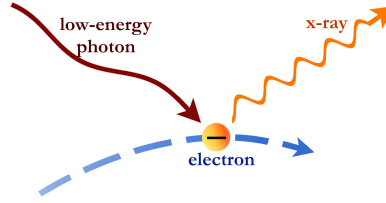


Figura 4: Representación gráfica del efecto Compton inverso. Este fenómeno es producido por un electrón que se mueve a altas energías (trayectoria azul punteada) e interactúa con un fotón (flecha roja) que es acelerado aumentando su energía. [1]

También, aplicando el principio de conservación del cuadrimomento, podemos encontrar la energía que se transfiere al electrón,

$$E_e = \frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} \frac{1 - \cos\theta}{(E_\gamma/m_e c^2)(1 - \cos\theta)}. \quad (5)$$

Observamos que la ecuación anterior tiene un valor máximo correspondiente a

$$E_e(max) = \frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} \frac{2}{1 + 2(E_\gamma/m_e c^2)}. \quad (6)$$

La anterior expresión muestra que la energía cinética transferida no puede ser igual a la energía del fotón, hecho que se denomina límite de Compton.

Ahora bien, si un fotón colisiona con un electrón de alta energía luego del choque el electrón cede parte de su energía y por ende, la longitud de onda del fotón aumenta (figura 4) tenemos entonces Efecto Compton inverso [7]. En este caso la energía del fotón dispersado puede expresarse de la siguiente forma:

$$E'_\gamma = \frac{E_p}{1 + m_{p0}^2 c^4 / E_\gamma E_p}. \quad (7)$$

3.2.2. Producción de pares

Otro proceso involucrado en el desarrollo de las EAS se da cuando un fotón de alta energía γ pasa cerca a un núcleo y se desintegra en un par electrón-positrón. La energía de un fotón puede transformarse en energía en reposo y cinética en el vacío y transferir parte de esta al núcleo [4].

La energía mínima del fotón incidente será:

$$E_\gamma = h\nu_{min} = m_0^- c^2 + m_0^+ c^2 = 2m_0 c^2 = 1,02 MeV. \quad (8)$$

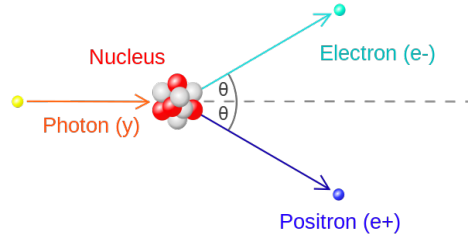


Figura 5: Fotones de alta energía pueden interactuar con la materia y producir un par electrón-positrón, este efecto es imposible en el vacío. La presencia de un núcleo atómico permite la conservación del momento en la interacción.

3.2.3. Radiación de frenado (Bremsstrahlung)

Este fenómeno consiste en la emisión de un fotón por una partícula cargada cuando se acelera en cercanías a un núcleo atómico (figura 6). La pérdida de energía de una partícula por este fenómeno a través de un medio viene dado por la expresión:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{brems} = 4\alpha N_A \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} E. \quad (9)$$

Donde son características del medio: número atómico Z , el peso atómico A , y de la partícula incidente: la carga eléctrica z y su energía E . De la ecuación se observa que la pérdida de

energía es proporcional al $1/m^2$ lo que muestra que es un efecto dominante para partículas de poca masa o livianas como el electrón o el muón. Estas, son productos habituales en las cadenas de interacción las cuales describiremos en secciones posteriores. Ahora bien, si para el caso del electrón expresamos los términos que acompañan a la energía E de la partícula como:

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}. \quad (10)$$

Entonces podemos escribir la pérdida de energía como,

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{brems} = \frac{E}{X_0}. \quad (11)$$

Donde X_0 se denomina longitud de radiación. Al solucionar la ecuación diferencial ?? se obtiene,

$$-\langle E \rangle_{brems}^{elec} = E_0 e^{\frac{-x}{X_0}}. \quad (12)$$

Dicha solución muestra que después de pasar un espesor X_0 este electrón pierde una fracción $1/e$ de su energía inicial.

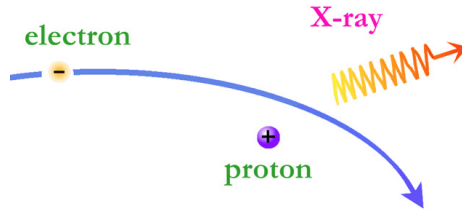


Figura 6: Cuando un electrón que lleva una determinada energía cinética pasa cerca a un núcleo, puede ser desacelerado y como consecuencia, emitirá radiación. En el proceso el electrón pierde parte de su energía y seguirá interactuando siempre que su energía sea superior a la energía de ionización.

3.3. Cascadas aéreas extensas o EAS

Se denomina Cascada aérea extensa al fenómeno de producción de partículas en cadena ocasionada por la interacción de un Rayo Cósmico primario con un núcleo constituyente de la atmósfera. La evolución de este fenómeno depende de la energía y el ángulo cenital de incidencia y el tipo de primario. Además, el número de partículas generadas, depende de la cantidad de atmósfera atravesada o profundidad atmosférica $X(l)$. Este parámetro permite saber la cantidad de materia con la que ha interactuado el primario al penetrar en la atmósfera desde

un punto lejano hasta la posición l sobre la trayectoria de su movimiento[14]. Teniendo en cuenta la variación de la densidad atmosférica con la altura sobre el nivel del mar $\rho(l')$, la cantidad

$$X(l) = \int_l^\infty \rho(l') dl', \quad (13)$$

permite cuantificar la cantidad de materia que atraviesa el primario en su viaje por la atmósfera. Así mismo, despreciando la curvatura terrestre, se puede aproximar una relación para el recorrido del primario en relación con la altura, mediante la expresión: $h \approx l' \cos \theta$. Donde θ corresponde al ángulo cenital y $\rho(l')$ se determina a partir de la ecuación barométrica,

$$\rho(h) = \rho(h_0) \left(\frac{T(h_0)}{T(h)} \right) \exp \left(- \int_{h_0}^h \frac{Mg(h)}{RT(h)} dh \right), \quad (14)$$

donde $g(h)$ es la aceleración de la gravedad, $T(h)$ es la temperatura a la altura h , R es la constante universal de los gases y M la masa molar del aire.

Otros parámetros de utilidad para el análisis de las EAS son: el frente de la lluvia, el eje de la lluvia y el número de secundarios en función de la altura. La figura 7 muestra una simulación de una cascada producida por un protón de 10^{14} eV. La parte (a) muestra el frente de la lluvia sobre el nivel del mar. El frente de la lluvia, es la distribución de secundarios perpendiculares al eje de la lluvia. Dicho eje, corresponde a la trayectoria que el primario llevaría hasta el suelo si este no interactuara con la atmósfera. La parte (b) muestra el número de partículas secundarias como función de la altura en km. Se puede observar, que el mayor número de partículas se obtiene a una altura aproximada de 6 km. Finalmente, la parte (c) muestra el número de secundarios como función de la distancia radial al eje de la lluvia.

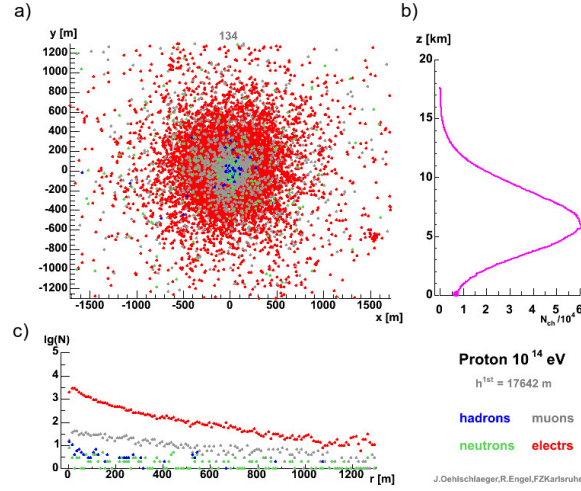


Figura 7: Simulación del desarrollo de una EAS generada por un protón de $10^{14}eV$ como función de la altura sobre el nivel del mar. La parte (a) muestra el frente de la lluvia, a una altura de 134m sobre el nivel del mar. La parte (b) muestra el número de partículas secundarias como función de la altura en km y la parte (c) muestra el número de secundarios como función de la distancia al eje de la lluvia.[11]

3.3.1. Componentes de las cascadas

El desarrollo de las EAS puede caracterizarse en tres componentes principales: la electromagnética, que está conformada por electrones, positrones y fotones; la hadrónica, constituida de piones, kaones y bariones, y la componente muónica, generada por el decaimiento de piones y kaones cargados. La figura 8 ilustra los procesos de interacción mostrados anteriormente y cómo estos generan cada una de las componentes.

3.3.2. Cascadas generadas por un fotón o un electrón

Cuando el primario incidente es un fotón o un electrón, los principales canales de interacción son la producción de pares y radiación de frenado. Los fotones con energía suficiente producen pares electrón positrón y estos perderán energía por bremsstrahlung generando más fotones. El proceso se detiene cuando la energía de los fotones radiados alcance los 1.02 MeV (ver sección 3.2.2). Por ejemplo, para un núcleo de aire con carga Z y número atómico A , los procesos de producción son:

$$\begin{aligned} \text{Bremsstrahlung} \quad e &\xrightarrow{Y_Z^A} e\gamma, \quad y \\ \text{Pares} \quad \gamma &\xrightarrow{Y_Z^A} e^+e^- \end{aligned} \tag{15}$$

En la detección indirecta de partículas primarias, un objetivo fundamental es saber cuáles partículas pueden llegar al detector y con qué fracción de energía del primario lo harán, por lo cual, es indispensable caracterizar las pérdidas de energía en función de la cantidad de aire que atraviesa la partícula.

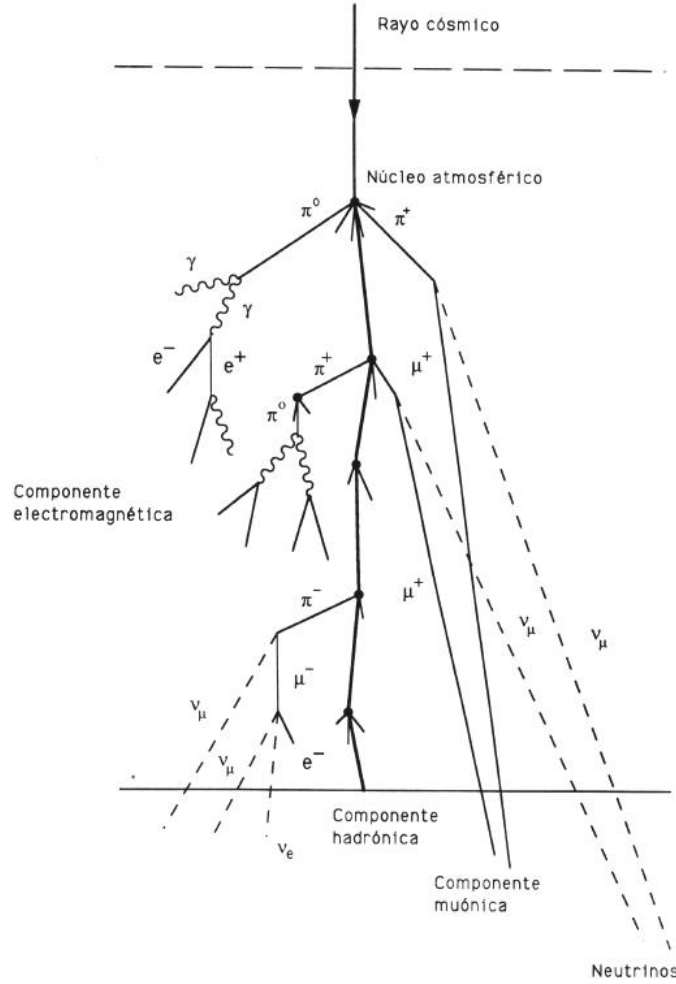


Figura 8: Esquema del desarrollo más probable de una EAS iniciada por un hadrón. En la figura se observa el decaimiento del hadrón en piones cargados y neutros, y estos a su vez, al decaer, generan fotones, electrones y muones. Se identifican tres componentes: electromagnética, muónica y hadrónica. [15]

Se define la longitud de la interacción electromagnética X_{EM} como la cantidad de aire atravesado por una partícula en dos situaciones: cuando el electrón pierde una fracción equivalente al 63 % de su energía por radiación de frenado o cuando el fotón recorre $\approx 7/9$ del camino libre medio de producción de pares [9]. La expresión general de X_{EM} para leptones cargados es:

$$X_{EM} = 716,4 \frac{A}{Z(Z+1) \ln \left(\frac{287}{\sqrt{Z}} \right)} [\text{g cm}^{-2}]. \quad (16)$$

Además, a medida que un electrón disipa energía, las pérdidas por ionización comienzan a ser comparables a la producción de fotones por frenado y, en cierto rango de energía, se detiene la producción de fotones. De esta manera, se define también otro parámetro llamado energía

crítica, entendida como la energía en donde las pérdidas por ionización luego de recorrer una longitud de interacción son equivalentes a la energía del electrón [3]. Para predecir este valor, se usa la expresión:

$$E_c^{EM} = \frac{a}{(Z + b)^\alpha}. \quad (17)$$

Donde los parámetros a, b y α dependen de las características del medio. Usando los valores para el aire [12] se obtiene un valor de 94 MeV .

Un modelo simplificado que permite predecir el desarrollo de la lluvia, es el modelo de Heitler [9]. En este modelo, se considera la componente electromagnética como un árbol binario, donde, luego de recorrida una distancia característica λ_{EM} , cada partícula interactúa y produce dos nuevas partículas, cada una con la mitad de la energía que su antecesora. Así, el número de partículas crece exponencialmente como $N \approx 2^n$ con n el número de interacciones y consecuentemente, la energía decrece como $E \approx E_p/2^n$ y el proceso se detiene cuando la energía media iguala a la energía crítica E_c que ocurre a una profundidad atmosférica dada por:

$$X_{max}^{EM} \approx \log_2 \left(\frac{E_0}{E_c^{EM}} \right). \quad (18)$$

3.3.3. Cascadas originadas por un protón o hadrón

Los hadrones son partículas subatómicas, no elementales, constituidas gracias a la fuerza nuclear fuerte. Las interacciones entre hadrones dan origen a piones cargados, neutros (π^-, π^+, π^0) y kaones que tienden a decaer antes que a interactuar. Los canales de decaimiento con mayor probabilidad para estas partículas son:

$$\begin{aligned} \pi^0 &\rightarrow \gamma\gamma \quad [98.823 \pm 0.034 \text{ \%}] \quad y \\ \pi^0 &\rightarrow e^+e^-\gamma \quad [1.174 \pm 0.035 \text{ \%}]. \end{aligned} \quad (19)$$

Estos canales contribuyen a la componente electromagnética de la lluvia. Los piones cargados dan origen a la componente muónica mediante los siguientes procesos:

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+\nu_\mu \quad [99.98 \pm 0.00004 \text{ \%}] \quad y \\ \pi^- &\rightarrow \mu^-\nu_\mu \quad [99.98 \pm 0.00004 \text{ \%}]. \end{aligned} \quad (20)$$

También, mesones extraños, principalmente Kaones producen muones luego de decaer mediante los canales,

$$\begin{aligned}
K^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad [63.56 \pm 0.11 \, \%], \\
K^+ &\rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \quad [5.07 \pm 0.004 \, \%], \\
K^+ &\rightarrow \pi^+ \pi^0 \quad [20.67 \pm 0.08 \, \%] \quad y \\
K^+ &\rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \quad [5.583 \pm 0.024 \, \%].
\end{aligned} \tag{21}$$

Las propiedades relativistas de los muones, su larga vida media, hacen que el estudio de la cascada muónica sea de especial interés. La componente muónica contiene información relevante de lo ocurrido en las primeras interacciones hadrónicas, y reflejan en forma más directa las propiedades del hadrón inicial. En los muones de más alta energía producidos en las primeras interacciones, predominan los efectos radiativos, caracterizados por pequeñas secciones eficaces y grandes fluctuaciones en la energía de las partículas resultantes. Debido a estos efectos, los muones desencadenan sub-cascadas electromagnéticas en la lluvia vía producción de pares [3]:

$$\mu^\pm \xrightarrow{Y_Z^A} \mu^\pm e^+ e^-, \tag{22}$$

además de sub-cascadas hadrónicas, gracias a interacciones del tipo:

$$\mu^\pm \xrightarrow{Y_Z^A} \mu^\pm + \text{hadrones}. \tag{23}$$

3.4. CORSIKA

Con el fin de aportar a la segunda parte de la cadena de simulaciones, este trabajo pondrá su atención en los modelos atmosféricos contruidos para el código CORSIKA. Éste código fue diseñado para recrear de forma detallada cascadas aéreas extensas iniciadas por protones, fotones, núcleos o cualquier partícula que llegue a la atmósfera. CORSIKA considera las interacciones entre núcleos y las desintegraciones de estos al interactuar con la materia. Fue desarrollado en el *Karlsruhe Institute of Technology* en Alemania para el experimento KASCADE, [8] y ha sido mejorado a lo largo de los años. El límite superior de energías para las que CORSIKA puede ser usado llega hasta 10^{20} eV.

El código está compuesto por 4 partes fundamentales. La primera se encarga del decaimiento de partículas inestables y el seguimiento de las mismas considerando las pérdidas de energía por ionización, la dispersión múltiple y el campo magnético. La segunda se encarga de las interacciones entre hadrones y la atmósfera a altas energías (rango altas energías). La tercera parte simula las interacciones hadrónicas a bajas energías (rango bajas energías) y, por último, la cuarta parte describe el transporte y la interacción de fotones y pares electrón - positrón. En las cuatro partes se han considerado todos los procesos conocidos que pudieran tener una influencia notable en las cantidades observadas de las EAS, además, CORSIKA contiene

varios modelos para llevar a cabo las tres últimas partes que se pueden activar o desactivar opcionalmente para arrojar más detalle mejorando el tiempo de cómputo [8].

CORSIKA, admite la configuración de perfiles atmosféricos, predetrminados o ingresados por el usuario, estos últimos ajustados a un momento y sitio particular. Dentro de CORSIKA, todas las partículas secundarias son rastreadas a través de sus trayectorias y sus parámetros son almacenados con una etiqueta cuando llegan al nivel de observación, lo que permite un análisis detallado de las características de las lluvias simuladas.

3.4.1. Modelos atmosféricos en CORSIKA

La atmósfera que establece CORSIKA consiste en N_2 , O_2 y Ar con unas concentraciones de 78,1 %, 21,0 % y 0,9 % [16] respectivamente. La densidad de la atmósfera es modelada mediante 5 capas donde, para las 4 primeras capas se establece una relación exponencial:

$$X_{EM} = 716,4 \frac{A}{Z(Z+1) \ln \left(\frac{287}{\sqrt{Z}} \right)} [\text{g cm}^{-2}], \quad (24)$$

$$T(h) = a_i + b_i e^{\frac{-h}{c_i}} \quad i = 1, \dots, 4 \quad , \quad (25)$$

y en la última capa, la densidad decrece linealmente con la altura de la forma:

$$T(h) = a_s - b_s \frac{h}{c_s} \quad \text{con } h_{max} = 112.8 \text{ km}. \quad (26)$$

Donde $T(h)$ es la densidad de la atmósfera a una altura h específica y los parámetros a_i , b_i y c_i se establecen de forma que la función sea continua en los límites de cada capa y se puedan apreciar las diferencias. Se construyen entonces, varios tipos de atmósferas de tal forma que reflejen características de las diferencias estacionales [8] para una localización específica. La figura 9 muestra la diferencia entre las presiones atmosféricas para distintos meses en la ciudad de Stuttgart, Alemania en comparación con la presión atmosférica estándar para Estados Unidos a diferentes altitudes. Se observa que a partir de los 30 km la diferencia entre los valores de presión disminuye a menos de 5hPa, sin embargo hay fluctuaciones significativas a lo largo de los 30km.

Además, CORSIKA admite tres configuraciones diferentes para el modelo atmosférico que usará en su simulación, MODATM que establece atmósferas predefinidas para sitios estratégicos, ATMEXT que es una configuración para atmósferas externas dependientes de la ubicación geográfica (tropical, subtropical, ártico, etc) y finalmente los modelos atmosféricos construidos en base a las predicciones numéricas realizadas por el GDAS que genera un perfil en base a una fecha y hora predefinidas por el usuario.

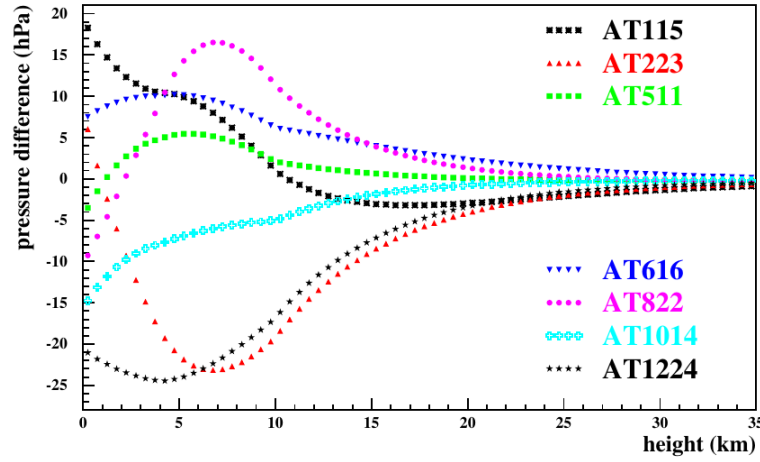


Figura 9: La gráfica muestra la diferencia entre las presiones atmosféricas para distintos meses en la ciudad de Stuttgart, y la presión atmosférica estándar para Estados Unidos a diferentes altitudes. El modelo atmosférico AT115 corresponde al mes de enero, AT223 a febrero, AT511 a mayo, AT616 a junio, AT822 a Agosto, AT1014 corresponde a octubre y AT1224 al mes de diciembre. A cada uno de estos modelos le corresponde valores de los parámetros a_i , b_i y c_i característicos cuyas diferencias se ven reflejadas en las variables atmosféricas estándar, una de estas la presión, que se observa en la gráfica. Gráfica extraída de [8]

Implementación de GDAS en CORSIKA

Para construir un modelo de atmósfera para CORSIKA, extraeremos datos GDAS que es un sistema de predicción numérica del clima en el que se construye un modelo y este incorpora el comportamiento real de la atmósfera como se encuentra en las observaciones meteorológicas. GDAS incluye observaciones de superficie, datos de globos aerostáticos, datos del perfil de viento, informes de aeronaves, observaciones de boya, observaciones de radar y observaciones de satélite. Los datos de GDAS están disponibles a través del Sistema Nacional de Archivo y Distribución de Modelos Operativos NOAA [13].

El primer paso para realizar una asimilación de datos completa es recopilar datos de instrumentos meteorológicos colocados en todo el mundo. Usando las condiciones atmosféricas en un instante determinado, un estado posterior en el tiempo se pronostica usando la predicción numérica del clima. Finalmente, la asimilación de datos se usa para ajustar la salida del modelo al estado atmosférico medido, dando como resultado una imagen tridimensional de la atmósfera. En un momento dado, el valor de una variable de estado se conoce a partir de observaciones y, para ese mismo momento, también existe un pronóstico del modelo para esta variable de una iteración anterior y así el proceso de asimilación de datos combina observación y pronóstico[6].

3.4.2. Flujo de secundarios y perfiles atmosféricos predefinidos

Una forma de observar, de manera preliminar, la incidencia del modelo de atmósfera sobre el flujo de partículas que llegan a nivel del suelo, es comparar entre los modelos atmosféricos predeterminados en CORSIKA para diferentes condiciones climatológicas. Un parámetro útil para hacer esta comparación es la función de distribución lateral (LDF) que relaciona el número de secundarios en dirección transversal al eje de la lluvia a medida que la cascada se desarrolla. De esta manera, el frente de la lluvia muestra la configuración espacial que adquieren los secundarios en su propagación hacia el suelo, y que en promedio se desplazan en la dirección del eje de la lluvia. La figura 10 muestra la variación del número de partículas por metro cuadrado por hora para un radio determinado del eje de la lluvia para cuatro modelos de atmósfera predeterminados en CORSIKA en las coordenadas de la ciudad de Bucaramanga.

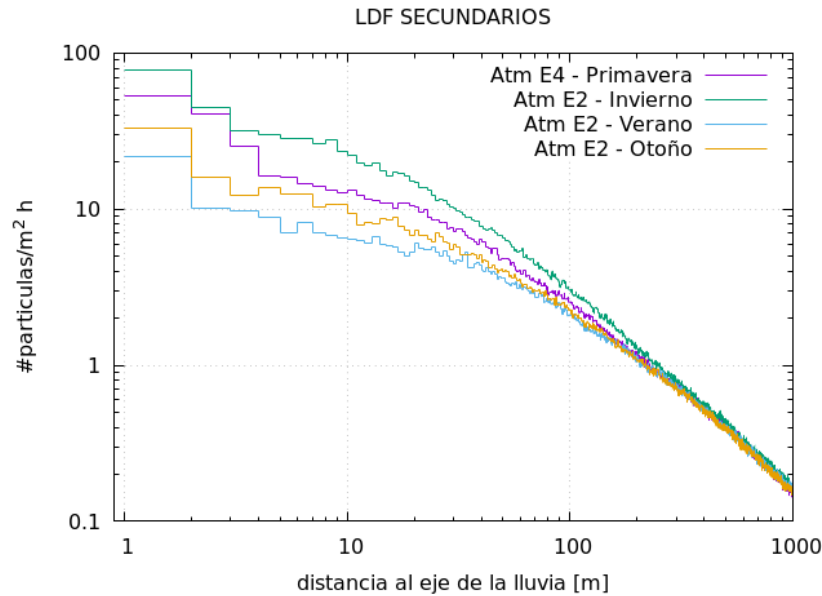


Figura 10: La gráfica muestra la variación del número de partículas por metro cuadrado por hora es decir (flujo) para un radio determinado al eje de la lluvia para cuatro modelos de atmósfera predeterminados en CORSIKA bajo las coordenadas de la ciudad de Bucaramanga. Los resultados obtenidos corresponden al flujo correspondiente a una hora.

4. Objetivos

■ Objetivo General

Caracterizar cuantitativamente el efecto de los diferentes perfiles atmosféricos sobre el flujo de partículas secundarias originados por la interacción de rayos cósmicos, de baja energía, con la atmósfera.

■ Objetivos Específicos

- Generar perfiles atmosféricos de los 12 meses del año a partir de datos del GDAS para ser usados en las simulaciones del fondo de partículas secundarias generadas por rayos cósmicos.
- Cuantificar las diferencias en el flujo de secundarios entre la atmósfera predeterminada en CORSIKA y los perfiles construidos con GDAS para Bucaramanga.
- Estimar el cambio del flujo de secundarios dependiendo de la época del año.
- Desarrollar una metodología para la creación de perfiles atmosféricos con GDAS que se usará en las simulaciones de fondo de rayos cósmicos de todos los sitios LAGO.

5. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos, se seguirá el siguiente orden de actividades:

- 1.1 Se revisará y estudiará la bibliografía especializada, tomando en cuenta desde tópicos generales hasta artículos con el fin de comprender los fundamentos físicos y técnicos del problema a abordar.
- 1.2 Se crearán perfiles atmosféricos promediados mes a mes usando datos atmosféricos extraídos del GDAS para que sean leídos como parámetros en CORSIKA para la ciudad de Bucaramanga.
- 1.3 Con los promedios mes a mes, se estudiará la variabilidad de los parámetros atmosféricos considerados para el desarrollo de la lluvia.
- 2 Se realizarán simulaciones para estimación del fondo de secundarios usando el perfil atmosférico predeterminado en CORSIKA y los perfiles mensuales construidos anteriormente.
- 3 Se estimaran las variaciones en el flujo de fondo de secundarios a partir de las simulaciones mensuales realizadas.
- 4 Se creará una metodología para la creación de un perfil mensual en cualquier otro sitio geográfico a partir del GDAS.
- 5 Se elaborará el informe final en el cual se recopilan todos los desarrollos y análisis realizados en el proyecto de grado como base para la sustentación.

6. Cronograma de Actividades

Mes/Actividad	Act 1.1	Act 1.2	Act 1.3	Act 2	Act 3	Act 4	Act 5
Enero	⊗						
Febrero	⊗	⊗					
Marzo		⊗	⊗				
Abril			⊗				
Mayo			⊗	⊗			
Junio			⊗	⊗			
Julio			⊗	⊗	⊗		⊗
Agosto					⊗	⊗	
Septiembre							⊗
Octubre							⊗

Referencias

- [1] Efecto compton y efecto compton inverso. http://chandra.harvard.edu/xray_astro/xrays.html. Accedido: 2018-07-16.
- [2] A. Aab et al. Searches for large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays detected above energy of 10^{19} ev at the pierre auger observatory and the telescope array. *Astrophys. J*, 794(2):172, 2014.
- [3] H. Asorey. *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación*. PhD thesis, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Enrgía Atómica, 2012.
- [4] H. Asorey, S. Dasso, and LAGO Collaboration. Lago: the latin american giant observatory. In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 247, 2015.
- [5] H. Asorey, L. A. Núñez, and M. Suárez-Durán. Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain. Number 5, pages 461–475.
- [6] M. W. for the Pierre Auger Collaboration. Global atmospheric models for cosmic ray detectors. In *Atmohead Workshop*, 2013.
- [7] D. J. Griffiths. *Introduction to elementary particles; 2nd rev. version*. Wiley, 2008.
- [8] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. Corsika : A monte carlo code to simulate extensive air showers. Technical Report FZKA 6019, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998.
- [9] W. Heitler. *Quantum theory of radiation*. International Series of Monographs on Physics, Oxford, 3rd ed edition, 1954.
- [10] A. Jaimes-Motta. Estimación de la respuesta de un detector chérenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en bucaramanga (956 m s.n.m). Undergraduate thesis, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Física, 2018.
- [11] J. Oehlschläger and R. Engel. Simulation of the institut für kernphysik, forschungszentrum karlsruhe. <https://web.ikp.kit.edu/corsika/movies/Movies.htm>. Accedido: 2018-07-16.
- [12] C. Patrignani et al. *Review of Particle Physics*, volume C40. Chin. Phys, 2016.
- [13] M. Rodell, P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C. J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3):381–394, 2004.
- [14] M. Spurio. *Particles and Astrophysics, A multi-messenger approach*. Switzerland, Springer, 2015.
- [15] M. Suarez-Duran. Instalación de un detector chérenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar. Master’s thesis, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2011.

- [16] R. C. Weast, S. M. Selby, and C. D. Hodgman. *CRC Handbook of chemistry and Physics*. The Chemical Rubber Co, 1986.