

**ESTUDIO DE LAS COMPONENTES DE
SECUNDARIOS EN CAJSCADAS ORIGINADAS
POR RAYOS C3SMICOS PARA
APLICACIONES SOBRE ESTRUCTURAS
GEOL3GICAS**

MARTHA LILIANA VALENCIA OTERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2016**

**ESTUDIO DE LAS COMPONENTES DE
SECUNDARIOS EN CAÑCADAS ORIGINADAS
POR RAYOS CÓSMICOS PARA
APLICACIONES SOBRE ESTRUCTURAS
GEOLÓGICAS**

MARTHA LILIANA VALENCIA OTERO

**Trabajo de Grado para optar al título de
Físico**

**Director
LUIS A. NÚÑEZ
Físico. Ph.D**

**Codirector
CHRISTIAN A. SARMIENTO CANO
Físico. MS.c**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2016**

AGRADECIMIENTOS

Ofrezco un agradecimiento muy especial a todas las personas que realizaron un aporte tanto intelectual como motivacional al desarrollo de este trabajo. Entre ellas se encuentran principalmente mis padres y mis hermanos, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento. Los doctores Luis A. Nuñez y Hernán Asorey, por confiar en mí y enseñarme como se lleva a cabo la investigación científica de calidad. A Christian Sarmiento y Mauricio Suárez, por guiarme en este proceso y brindarme su apoyo en aquellos momentos cruciales para mi desarrollo como investigadora científica. A Saku, por ofrecerme la oportunidad de tener buenas experiencias y por brindarme su amistad y apoyo. Y a Kazu, por siempre cuidar de mí, interesarse por mis sueños y ser todo lo que yo siempre busqué en una amiga. Finalmente, agradezco a aquellos que nunca sabrán todo lo que han hecho por mí y dedico el esfuerzo puesto en este trabajo a Iori, por motivar mi existir.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1 MUONES ORIGINADOS EN LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS	17
1.1 LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS	17
1.2 TOMOGRAFÍA DE MUONES	20
1.2.1 Muongrafía volcánica	21
1.3 SIMULACIÓN DE LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS Y CORRECCIÓN POR CAMPO GEOMAGNÉTICO	26
1.3.1 COsmic Ray SIMulations for KAscade	27
1.3.2 MAGnetoCOSmics	28
2 ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE MUONES SOBRE EL VOLCÁN GALERAS	30
2.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE SECUNDARIOS SOBRE EL VOLCÁN GALERAS	31
2.1.1 Corrección del flujo de muones por campo geomagnético	32
2.2 PERFIL DEL VOLCÁN GALERAS	34
2.2.1 Consideraciones del telescopio	35
2.2.2 Ubicación de la cámara	37
2.3 FLUJO DIFERENCIAL DE MUONES COMO FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN DE ARRIBO	39
3 ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE MUONES A TRAVÉS DEL GALERAS	44
3.1 PROPAGACIÓN DE MUONES EN ROCA ESTÁNDAR	44

<i>Contenido</i>	7
3.2 FLUJO DE MUONES QUE ATRAVIESA EL VOLCÁN GALERAS	46
3.3 TIEMPO DE EXPOSICIÓN	52
4 CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	58
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS	60

LISTA DE FIGURAS

1.1	Espectro de energía de los rayos cósmicos, entre 10^9 y 10^{21} eV. Pueden observarse los puntos que marcan el cambio en el espectro, como la rodilla en $\sim 10^{16}eV$ o el tobillo en $\sim 10^{18,5}eV$	18
1.2	Reconstrucción de la densidad interna de bloques de diferente material (Izquierda). Imagen de un contenedor lleno de metal chatarra, en el cual se oculta un bloque de plomo (Derecha). Puede notarse que los materiales más densos presentan una coloración naranja en las imágenes obtenidas mientras que el metal chatarra y materiales de menor densidad como el cobre, se observan de color azul.	21
1.3	Esquema de los volcanes tipo estratovolcán (izquierda), caldera volcánica (centro) y escudo (derecha).	23
1.4	Imagen de la distribución de densidad promedio para el Mt. Iwodake, en un plano paralelo al plano del detector. Esta imagen fué construida usando la técnica de muongrafía y en ella puede apreciarse parte de la geometría del conducto volcánico.	26
1.5	Diferentes trayectorias que puede recorrer una partícula para alcanzar un punto sobre la superficie terrestre. En la figura, la Tierra es representada por la esfera azul y las curvas 1, 2, 3, 4 y 5 muestran las trayectorias trazadas por iones positivos con diferentes rigideces de corte. Las partículas 1, 2, 3 y 4 poseen una rigidez alta que les permite ingresar en la atmósfera terrestre sin que su trayectoria se defleccione en gran medida, mientras que la partícula 5 tiene baja rigidez, por lo cual es fuertemente deflectada por el campo geomagnético.	29
2.1	Espectro de secundarios que inciden sobre el punto de observación seleccionado para la simulación de EAS. Se presenta una comparación entre el flujo de partículas, para aquellas más abundantes al interior de la cascada de secundarios.	32
2.2	Diferencia porcentual entre el flujo de muones obtenido sin corrección por campo geomagnético y aquel con corrección por campo geomagnético, para la simulación con CORSIKA sobre el volcán Galeras. En la parte derecha de la figura se muestra una ampliación de la curva, entre 1 GeV/c y 20 GeV/c.	33

2.3	Imagen del volcán Galeras, con los posibles puntos de disposición para el telescopio de muones. Se ha tomado en cuenta una circunferencia de diámetro 2 km (1 km respecto al cráter), debido al límite de penetración de los muones en roca. La zona verde corresponde a regiones en dominio de Parques Naturales Colombianos, mientras que la línea marrón indica las vías de acceso al volcán.	34
2.4	Telescopio de muones diseñado para el proyecto MuTe. Gracias a su geometría, se tiene un ángulo de apertura total de $\beta = 61.93^\circ$ y la estructura que lo soporta permite inclinar la cámara un determinado ángulo.	35
2.5	Filtrado azimutal para los puntos A y B. Se tiene un ángulo de apertura de 61.93° , el ángulo azimutal es medido respecto al norte magnético terrestre y el punto C representa la ubicación del cráter volcánico.	36
2.6	Esquema de la apertura angular total del telescopio sobre el volcán Galeras, para un ángulo de inclinación de 0° . Puede notarse que la mitad del ángulo de apertura del telescopio, se encuentra dirigido hacia la parte inferior del volcán, donde el diámetro supera los 2 Km. También se observa que incluso con un ángulo de inclinación de 0° , parte de la apertura angular se dirige hacia el cielo, proporcionando cierto ruido a la medición.	37
2.7	División angular en bandas de 5° para la mitad del ángulo de apertura total del telescopio de muones. Esto permite discretizar las direcciones de incidencia de los muones sobre el detector y las posibles trayectorias a través de la estructura geológica, con el fin de observar la variación del flujo de muones respecto al ángulo cenital.	37
2.8	Perfil de elevación para el punto A obtenido a partir de la topografía del volcán Galeras y dirección de incidencia de muones sobre el punto, para las bandas angulares tomadas en consideración.	38
2.9	Perfil de elevación para el punto B (cercano a la vía de acceso) obtenido a partir de la topografía del volcán Galeras y dirección de incidencia de muones sobre el punto, para las bandas angulares tomadas en consideración.	39
2.10	Flujo de muones obtenido por simulación, que arriba al punto A en función del momentum (superior) y la distancia en roca estándar que pueden atravesar los muones (inferior). Las curvas trazadas en las gráficas, representan el flujo incidente para las bandas angulares cenitales consideradas en las convenciones.	40
2.11	Flujo de muones obtenido por simulación, que arriba al punto B en función del momentum (superior) y la distancia en roca estándar que pueden atravesar los muones (inferior). Las curvas trazadas en las gráficas, representan el flujo incidente para las bandas angulares cenitales consideradas en las convenciones.	41

2.12	Flujo muónico de fondo que arriba al punto A en función de la dirección de incidencia dada por los ángulos azimutal y cenital. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$	42
2.13	Flujo muónico de fondo que arriba al punto B en función de la dirección de incidencia dada por los ángulos azimutal y cenital. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$	43
3.1	Tabla de las pérdidas de energía de los muones al propagarse en roca estándar ($2.650\ g/cm^3$). La tercera columna corresponde a la función A y la cuarta y quinta columna a la función B de la ecuación 1.6. El código desarrollado emplea la primera y la octava columna para estimar la máxima distancia que recorre un muón en roca estándar al incidir con un momentum inicial dado.	45
3.2	Momentum mínimo necesario para que un muón atravesase cierta distancia en roca estándar. Se han considerado dos valores de densidad, correspondientes a $2.650\ g/cm^3$ (línea azul) y $0.7\ g/cm^3$ (línea roja).	45
3.3	Flujo de muones que arriba al punto de observación para el volcán Galeras y distancia en roca que atraviesa, debido a la energía de los muones incidentes.	46
3.4	Topografía (inferior) y vista superior (superior) del volcán Galeras. Valores obtenidos mediante interpolación sobre los datos topográficos para las coordenadas geográficas del volcán Galeras.	47
3.5	Modelos contruidos para la estructura del volcán Galeras. Se presenta el modelo #1 como un modelo homogéneo (izquierda), el modelo #2 con una chimenea cilíndrica de menor densidad (centro) y el modelo 3 como modelo de prueba (derecha).	48
3.6	Flujo de muones que atraviesa el modelo #1 del volcán Galeras y arriba al punto B en función de la dirección de incidencia. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$	48
3.7	Flujo de muones que atraviesa el modelo del volcán Galeras y arriba al punto B en función de la dirección de incidencia. Volcán de modelo #1 (superior), con código de color reducido y resta entre flujo obtenido para modelo #2 - modelo #1 (inferior). El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$	49
3.8	Flujo de muones que atraviesa el modelo #3 del volcán Galeras y arriba al punto B en función de la dirección de incidencia. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$	50
3.9	Flujo de muones que atraviesa el modelo del volcán Galeras y arriba al punto A en función de la dirección de incidencia. Volcán de modelo #1 (superior) y resta entre el flujo obtenido para el modelo #2 - modelo #1 (inferior). El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$	51

3.10	Tiempo de exposición en función de la aceptación del telescopio de muones. Puede observarse que el punto B presenta menores tiempos de exposición que el punto A.	52
1	Perfiles de elevación obtenidos con Google Earth, para los diferentes puntos sugeridos por el SGC. Las líneas negras representan la ubicación de cada punto, mientras que las líneas rojas muestran el punto en el cual se encuentra el cráter para cada perfil de elevación.	61
2	Figura 1:(Continuación)	62
3	Perfil del volcán Galeras obtenido con Google Earth desde el punto 1 (0,3964) al punto 5 (2000, 4064), con el cráter volcánico ubicado entre los dos puntos (1000, 4074).	63
4	Perfil del volcán Galeras obtenido con Google Earth para el punto 8 (0,3893), con el cráter volcánico en el punto señalado (772, 4074).	63
5	Direcciones de incidencia de muones sobre el telescopio ubicado en el punto 1 (inferior) y 5 (superior), para las bandas angulares consideradas. A diferencia del punto 1, el punto 5 se encuentra en la zona de fácil acceso, debido a la cercanía con la carretera. Cada una de las líneas de incidencia, representa la línea trazada para el ángulo medio de cada una de las bandas angulares de la figura 2.7.	64
6	Direcciones de incidencia de muones sobre el telescopio ubicado en el punto 8 (cercano a la vía de acceso), para las bandas angulares consideradas. Cada una de las líneas de incidencia, representa la línea trazada para el ángulo medio de cada una de las bandas angulares de la figura 2.7.	65
7	Dirección de incidencia de muones sobre el telescopio, para las bandas angulares tomadas en consideración en un punto cercano al punto 1. Cada una de las líneas de incidencia, representa la línea trazada para el ángulo medio de cada una de las bandas angulares de la figura 2.7. Puede notarse que más de la mitad de las líneas de incidencia pasan a través de la estructura volcánica.	66

SIGLAS

LAGO	L atin A merican G iant O bservatory
WCD	W ater C erenkov D etector
MuTe	M uon T elescope
CORSIKA	C osmic R ay S imulation for K ASCADE
CME	C oronal M ass E jection
MAGCOS	M AGneto C OSmics
IGRF	T he I nternational G eomagnetic R eference F ield
EAS	E xtensive A ir S hower
PDG	P article D ata G roup

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LAS COMPONENTES DE SECUNDARIOS EN CASCADAS ORIGINADAS POR RAYOS CÓSMICOS PARA APLICACIONES SOBRE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS¹.

AUTOR: MARTHA LILIANA VALENCIA OTERO².

PALABRAS CLAVES: FLUJO MUÓNICO, TOPOGRAFÍA DEL VOLCÁN, ROCA ESTÁNDAR, DIRECCIÓN DE ARRIBO.

DESCRIPCIÓN:

En el marco del proyecto MuTe (Muon Telescope), se presenta la estimación del flujo de muones que atraviesa un modelo del volcán Galeras e incide sobre un punto ubicado en los alrededores de la estructura geológica. Inicialmente se estimó el flujo muónico de fondo, con base en simulaciones de lluvias atmosféricas extendidas (EAS) realizadas con el código CORSIKA y corregidas por campo geomagnético con el código MAGCOS, para un punto de observación dado por las coordenadas geográficas del volcán. En segundo lugar, considerando la topografía del volcán Galeras, la distancia límite en roca estándar que pueden atravesar los muones y el acceso al cono volcánico, se seleccionó un punto clave para la disposición de un telescopio de muones con determinada geometría y se tuvo en cuenta un modelo homogéneo de densidad de roca estándar para la estructura del volcán. Posteriormente, a partir del punto elegido, las coordenadas geográficas del cráter volcánico y los datos topográficos, se estimó la distancia que atraviesan los muones en la estructura, para las diferentes direcciones de incidencia. Finalmente, la distancia máxima que recorren los muones incidentes en roca estándar fué determinada a partir del modelo de propagación de los muones en la materia y se comparó con la distancia a través de la topografía del Galeras, para filtrar el flujo muónico de fondo y obtener el flujo de muones que atraviesa la estructura en función de su dirección de arribo.

¹Trabajo de grado

²Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis Alberto Núñez (Director), Christian Andrés Sarmiento Cano (Co-director).

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE COMPONENTS OF SECONDARY PARTICLES IN CASCADES ORIGINATED BY COSMIC RAYS FOR APPLICATIONS ON GEOLOGICAL STRUCTURES³.

AUTHOR: MARTHA LILIANA VALENCIA OTERO⁴.

KEY WORDS: MUON FLUX, VOLCANO TOPOGRAPHY, STANDARD ROCK, ARRIVAL DIRECTION.

DESCRIPTION:

Within the framework of the Mute (Muon Telescope) project, the estimation of the background muon flux crossing a model of the Galeras volcano and reaching a point located near the geological structure is presented. In this work the background muon flux was estimated based on simulations of extensive air showers (EAS) made with CORSIKA code and corrected by geomagnetic field with MAGCOS code, for an observation point given by the geographical coordinates of the volcano. Second, considering the Galeras volcano topography, the limit distance on standard rock traveled by muons and the accessibility to the volcanic cone, a key point was selected for the provision of a muon telescope with certain geometry, also an homogeneous model of standard rock for the volcano structure was constructed. Subsequently, starting from the chosen point, the geographical coordinates of the volcanic crater and the topographic data, it was estimated the distance in the structure traveled by muons from different arrival directions. Finally, the maximum distance traveled by the incident muons on standard rock was determined from the model of muons propagation in matter and compared to the distance across the Galeras volcano topography, to filter the background muon flux and obtain the muon flux crossing the structure in function of its arrival direction.

³Undergraduate Thesis

⁴Faculty of Science, Department of Physics, Luis Alberto Núñez (Advisor), Christian Andrés Sarmiento Cano (Co-advisor).

INTRODUCCIÓN

Los rayos cósmicos se definen como partículas cargadas y núcleos atómicos provenientes del espacio exterior, que logran llegar a la Tierra e interactúan con los núcleos de elementos presentes en la atmósfera; generando así, cascadas de partículas secundarias que se propagan hacia la superficie terrestre e interactúan formando nuevas partículas. Entre las partículas generadas en una cascada de secundarios se encuentran los muones, los cuales tienen un alto poder de penetración en la materia y un flujo considerable en comparación con otras partículas presentes en la cascada. Estas características hacen de los muones una partícula de interés para aplicaciones en técnicas de tomografía.

La tomografía de muones o muongrafía es una técnica que permite crear imágenes de la estructura interna de algún objeto, mediante la detección de muones de cascadas de secundarios generadas por rayos cósmicos. La muongrafía puede ser aplicada sobre diversos objetos, incluyendo estructuras geológicas como montañas o volcanes. Estas últimas estructuras resultan de gran interés debido al riesgo que presentan para las poblaciones cercanas y la información que puede obtenerse sobre su comportamiento, mediante el estudio de su estructura interna.

En relación con lo anterior, la Universidad Industrial de Santander (UIS) en colaboración con el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Universidad del Tolima (UT) se encuentran desarrollando actualmente un proyecto en muongrafía volcánica. El proyecto MuTe (Muon Telescope) financiado por Colciencias (Departamento administrativo de ciencia, tecnología e investigación) consiste en aplicar la técnica de muongrafía sobre algunos volcanes en Colombia, con el fin de completar o mejorar los modelos existentes de sus estructuras internas, mediante el diseño, fabricación, puesta en funcionamiento e instalación de un telescopio detector de muones, que permita construir un perfil de densidad media del volcán seleccionado.

Adicionalmente, Colombia forma parte de la colaboración LAGO⁵ desde la instalación del primer tanque detector en la ciudad de Bucaramanga [1]. LAGO es una colaboración que se dedica al estudio de fenómenos de universo externo, meteorología espacial y radiación atmosférica a nivel del suelo. Además, cuenta con una red de detectores WCD ubicados en los 9 países adjuntos a la colaboración, lo cual le confiere un gran área de detección. De esta forma, las técnicas empleadas en LAGO resultan ser una herramienta adicional a las técnicas de detección de muones, que se utilizarán en el desarrollo del proyecto MuTe.

Ahora bien, en el marco del proyecto MuTe, el presente trabajo muestra la estimación del flujo de muones que atraviesa el volcán Galeras, por medio del estudio y simulación de las cascadas de secundarios generadas por rayos cósmicos. Con base en la topografía del volcán y en la geometría del telescopio diseñado para el proyecto MuTe, se realiza una selección de los puntos más convenientes para la ubicación de éste en los alrededores del volcán Galeras y mediante simulaciones con el código CORSIKA se obtiene el flujo de muones de fondo que incide sobre los puntos escogidos. Posteriormente, a partir de un modelo homogéneo de roca estándar para el volcán, se determina la distancia que recorren los muones al atravesar la estructura por las diferentes direcciones de incidencia. Por último, teniendo en cuenta esta distancia y la propagación de los muones en la materia, se realiza un filtrado sobre el flujo de muones de fondo para determinar cuales de los muones incidentes tienen la energía mínima para atravesar la distancia requerida en la estructura del volcán Galeras.

Finalmente, con la intención de contribuir al desarrollo del proyecto MuTe en aspectos como la selección del volcán sobre el cual se aplicará muongrafía, se construyó un método que permite estimar el flujo de muones que atraviesa una estructura geológica arbitraria e incide sobre un punto de observación en el cual resulta conveniente ubicar un telescopio de muones.

⁵Sitio web de LAGO: <http://lagoproject.org/>

Capítulo 1

MUONES ORIGINADOS EN LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS

1.1 LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS

Diariamente, los seres que habitamos la Tierra nos vemos expuestos a radiación proveniente del espacio exterior. Esta radiación se produce cuando una partícula primaria o rayo cósmico ingresa en la atmósfera terrestre e interactúa con las moléculas de aire allí presentes. Los rayos cósmicos fueron descubiertos en 1912 por el físico austriaco Victor Hess, al llevar una cámara de ionización a bordo de un globo aerostático, para medir la ionización a grandes alturas [2]. Así, cuando una partícula energética incidía sobre la cámara, el gas al interior se ionizaba por el voltaje aplicado y los iones generados se movían hacia una de las placas metálicas internas, creando una corriente medible. A partir de este experimento y de las comparaciones realizadas durante un eclipse de sol, Hess logró determinar la existencia de una radiación poderosa que provenía del espacio exterior.

Con respecto a los rayos cósmicos, estos son partículas originadas en fuentes que se encuentran en el espacio galáctico o extragaláctico y se propagan hasta llegar a la Tierra [5]. Ahora bien, el espectro de los rayos cósmicos se refiere al flujo de partículas como función de la energía y su comportamiento puede ser ajustado a una ley de potencias dada por E^α , en casi todo el rango conocido (La figura 1.1 muestra el espectro construido a partir de los datos proporcionados por diferentes observatorios). El espectro de energías de rayos cósmicos presenta variaciones en el flujo, que son asociadas a cambios en la composición química o en el origen de los rayos cósmicos. Estas variaciones delimitan regiones en el espectro que vienen indicadas por el cambio en el índice espectral α . Así pues, se asocia el tobillo ($\alpha = -2,7$) a partículas de origen extragaláctico, mientras que la rodilla ($\alpha = -3$) hace referencia a rayos cósmicos de origen galáctico, con ausencia de elementos pesados en la segunda rodilla ($\alpha = -3,3$) [3].

FIGURA 1.1: Espectro de energía de los rayos cósmicos, entre 10^9 y 10^{21} eV. Pueden observarse los puntos que marcan el cambio en el espectro, como la rodilla en $\sim 10^{16}$ eV o el tobillo en $\sim 10^{18,5}$ eV.

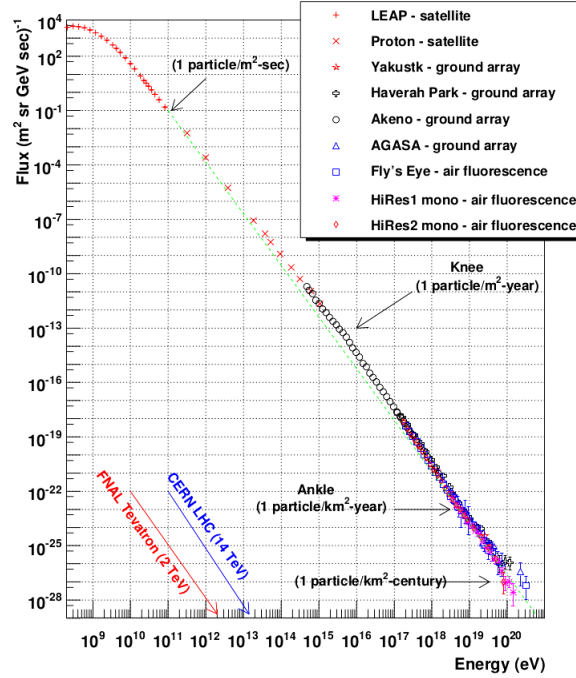


Figura tomada de [4].

Los rayos cósmicos son principalmente núcleos de elementos entre protón y hierro. Algunas de estas partículas primarias ingresan en la atmósfera terrestre e interactúan produciendo secundarios y perdiendo energía con cada interacción, hasta que alcanzan una energía límite que impide nuevas interacciones. Entre las partículas secundarias generadas por rayos cósmicos se pueden distinguir tres componentes [5]:

- **Componente Electromagnética:** Cuando el primario es un electrón o un fotón, la cascada de secundarios presentará en su mayoría una componente electromagnética. Esta componente está formada por electrones, positrones y fotones, los cuales resultan del decaimiento de los piones neutros y del acople de las siguientes interacciones:

$$e^{\pm} \rightarrow e^{\pm}\gamma \quad (1.1)$$

$$\gamma \rightarrow e^{+}e^{-} \quad (1.2)$$

- **Componente Hadrónica:** Cuando el primario es un nucleón, la cascada será de tipo hadrónico. Así, las primeras interacciones generan piones neutros que alimentan la componente electromagnética de la cascada, mientras que los piones y kaones cargados, producen otro tipo de partículas como muones energéticos, neutrinos y nuevos piones.
- **Componente Muónica:** Cuando un protón impacta un núcleo atómico atmosférico, interactúa formando piones cargados, los cuales a su vez, decaen rápidamente en muones y neutrinos muónicos. Estas dos últimas partículas constituyen la componente muónica de la cascada de secundarios y entre ellas el muón representa una partícula de interés para el presente trabajo. A continuación se muestran los decaimientos que generan la componente muónica de las cascadas de secundarios y sus respectivos porcentajes de ocurrencia:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad [99,99 \text{ \%}] \quad (1.3)$$

$$\kappa^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad [63,43 \text{ \%}] \quad (1.4)$$

El muón es una partícula elemental inestable, con tiempo de vida de $2.2 \mu s$ y forma parte de los leptones. Es decir, es un fermión (partícula elemental que obedece el principio de exclusión de Pauli), tiene spin semientero y no experimenta la interacción fuerte. El descubrimiento del muón se dió en 1936, cuando el físico americano Carl Anderson observó partículas curvarse ante la presencia de un campo magnético [6]. Sin embargo, el comportamiento mostrado por una de estas partículas, difería de aquel conocido para los electrones y otras partículas ya descubiertas. Para una misma velocidad, esta nueva partícula mostraba una trayectoria más curvada que aquella trazada por los electrones y menos que la trazada por los protones. Por lo cual, Anderson dedujo que debía tratarse de una partícula con carga negativa, pero que tuviese una masa mayor que el electrón. Posteriormente, a esta partícula se le adjudicó el nombre de muón.

Ahora bien, los muones generados en lluvias atmosféricas extendidas pueden interactuar con los núcleos atómicos por Bremsstrahlung o creación de pares [7]:

- Se conoce como Bremsstrahlung o radiación de frenado a aquel proceso por el cual, una partícula se desacelera al ser deflectada por un núcleo atómico o un electrón. De esta forma, al perder energía cinética, la partícula libera radiación electromagnética.
- La creación de pares es un proceso en el cual una partícula incide sobre un núcleo atómico, creando dos o más partículas diferentes.

Adicionalmente, los muones pueden decaer formando nuevas partículas. Esto ocurre cuando la energía que poseen no es suficiente para permitir nuevas interacciones o alcanzan el límite en su tiempo de vida. A continuación, se muestran las expresiones que representan el decaimiento del muón:



Al poseer mayor masa que los electrones, los muones no sólo son acelerados en menor medida por los campos electromagnéticos, sino que también emiten menor radiación de frenado [8]. Por esta razón, los muones resultan ser partículas relativistas con un alto poder de penetración en la materia, ya que sus pérdidas energéticas se dan principalmente por ionización.

1.2 TOMOGRAFÍA DE MUONES

La tomografía de muones o muongrafía es una técnica por medio de la cual, se construye una imagen de la distribución de densidades internas de algún objeto, con base en la detección de muones generados en cascadas de rayos cósmicos. Debido a su gran poder de penetración en la materia y a que su flujo es mayor respecto al de otras partículas como protones o piones para altitudes por debajo de ≈ 5 km [9], los muones han sido utilizados como principal elemento en técnicas de tomografía.

Inicialmente, la técnica de tomografía con partículas de cascadas generadas por rayos cósmicos fué utilizada en 1955 por E.P. George, para medir la profundidad de un túnel en Australia [10]. Posteriormente, se hizo famosa gracias al experimento realizado por Luis Alvarez en 1970, en el cual se empleó tomografía de muones para obtener imágenes de la pirámide de Chephren en Giza, en búsqueda de túneles o cámaras secretas al interior de la estructura [11]. Al ubicar los detectores al interior de una cavidad bajo la base de la pirámide, logró medir el flujo a diferentes ángulos cenitales y compararlo con sus mediciones del fondo natural de muones. Sin embargo, aunque Alvarez no encontró ninguna cavidad nueva, demostró que la tomografía de muones puede ser una técnica exitosa a la hora de determinar la configuración material de una estructura.

Entre los ejemplos más recientes de las aplicaciones de la técnica de tomografía de muones se encuentra la detección de fuentes radiactivas ocultas en medio de material chatarra [12]. La figura 1.2 muestra las imágenes que se obtienen al aplicar tomografía de muones sobre bloques de materiales de distinta densidad y como se logran detectar estos materiales

ocultos en contenedores llenos de metal chatarra, mediante la estimación de la densidad media a lo largo de la trayectoria trazada por los muones de rayos cósmicos en el material.

FIGURA 1.2: Reconstrucción de la densidad interna de bloques de diferente material (Izquierda). Imagen de un contenedor lleno de metal chatarra, en el cual se oculta un bloque de plomo (Derecha). Puede notarse que los materiales más densos presentan una coloración naranja en las imágenes obtenidas mientras que el metal chatarra y materiales de menor densidad como el cobre, se observan de color azul.

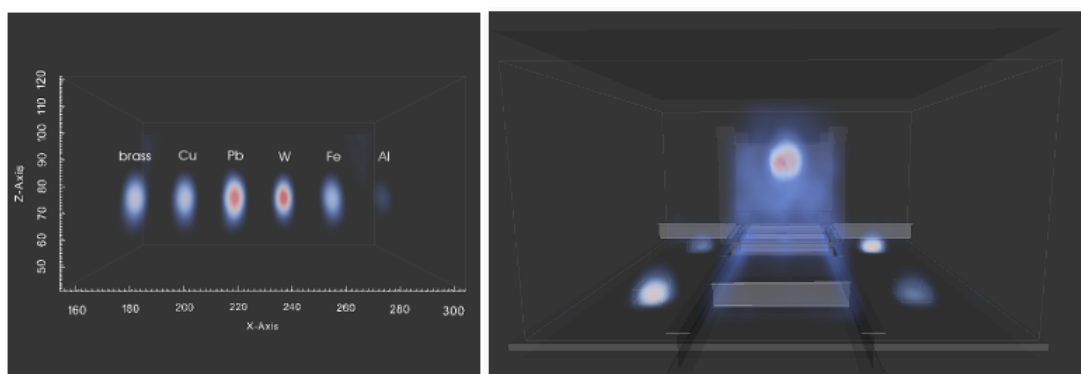


Figura obtenida de la página del proyecto¹.

Hasta nuestros días, la tomografía de muones ha sido utilizada en diversas aplicaciones tales como: inspeccionar cavidades en cuevas al interior de una montaña [13], detección de materiales de elevado número atómico [14, 15], determinar el estado de una planta nuclear [16] o muongrafía volcánica [17, 18].

1.2.1 Muongrafía volcánica Los volcanes son estructuras geológicas que representan una ruptura en la corteza terrestre, por la cual emerge lava, ceniza y gases provenientes de cámaras magmáticas subterráneas. Usualmente se forman en lugares donde las placas tectónicas convergen o divergen y dependiendo de su periodo de actividad, pueden llegar a convertirse en un riesgo para los seres vivos que habitan en las cercanías. Conforme a las características del magma volcánico tales como la temperatura, la composición o la viscosidad, las erupciones volcánicas tendrán ciertas particularidades. Algunas de estas erupciones poseen lava de alta fluidez, que se desliza por la ladera del volcán recorriendo grandes distancias. Contrarias a éstas, se encuentran aquellas erupciones cuya lava se solidifica rápidamente, generando explosiones fuertes y gran cantidad de material

¹Imágenes obtenidas de: Cosmic muon tomography project. <http://mutomweb.pd.infn.it:5210/>

piroclástico². Además, se pueden presentar grandes cantidades de ceniza cubriendo ciudades cercanas y lagos al interior del cráter, cuya agua se mezcla con restos sólidos durante la erupción, formando torrentes y avalanchas de barro que se deslizan por la ladera del volcán, causando gran destrucción.

Algunos ejemplos de las consecuencias que traen consigo las erupciones volcánicas, se pueden encontrar en nuestros volcanes colombianos: El Nevado del Ruiz y el complejo Galeras. Mientras el volcán Galeras ha registrado erupciones de carácter explosivo en los años 1993, 2006 y de 2008-2010, el Nevado del Ruiz ha presentado tres erupciones representativas en 1595, 1845 y 1985. El Nevado del Ruiz, posee un tipo de erupción violenta con grandes cantidades de gas volcánico, fragmentos y ceniza. Adicionalmente, las altas temperaturas derriten los glaciares y la nieve, creando lahares que se deslizan por la ladera del volcán. Uno de estos lahares, cubrió la ciudad de Armero el 13 de Noviembre de 1985, causando una tragedia. Por consiguiente, los volcanes representan un alto riesgo para las poblaciones que se ubican en las cercanías y resultan ser estructuras geológicas de gran interés, en cuanto a la descripción de su comportamiento y la caracterización de su estructura interna.

En relación con lo anterior, la tomografía de muones ha sido utilizada en la construcción de imágenes y mapas de distribución interna de densidades de estas estructuras geológicas. Esta técnica puede contribuir no sólo a la recolección de información y al estudio del comportamiento y composición de los volcanes, sino que también nos puede brindar conocimiento sobre la geometría de los conductos internos y con ello, los posibles puntos de riesgo cercanos al cráter volcánico. La forma de la estructura volcánica es una característica importante a la hora de aplicar muonografía sobre este tipo de cuerpos geológicos, debido a que los muones generados en EAS tienen la capacidad de atravesar desde cientos de metros, hasta un máximo de un par de kilómetros en roca. Así pues, entre las formas más comunes (mostradas en la figura 1.3) se encuentran:

- Estratovolcán: Volcán cónico de gran altura (superior a 2500 m), formado por varias capas de lava endurecida de erupciones pasadas.
- Caldera volcánica: Presenta una gran depresión en su cúspide, ocasionada por el colapso del edificio volcánico al alcanzar gran altura respecto a su base.
- Volcán escudo: Estructura geológica de gran tamaño, la cual posee una gran base en comparación con su altura.

²Tomado de: <http://pubs.usgs.gov/gip/volc/>

- Adicionalmente se encuentran los conos de escoria, los cuales pueden hallarse en los edificios volcánicos mencionados anteriormente y se refieren a montículos formados a partir de fragmentos volcánicos. Por lo general expelen lava y cuentan con alturas entre diez y cientos de metros.

FIGURA 1.3: Esquema de los volcanes tipo estratovolcán (izquierda), caldera volcánica (centro) y escudo (derecha).

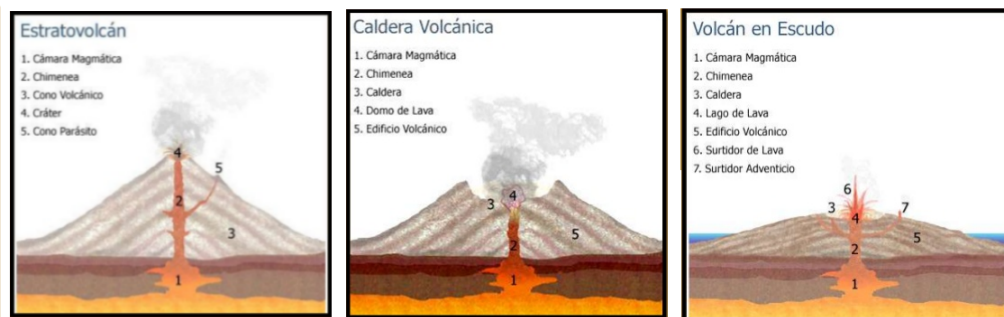


Figura obtenida de fuente³.

Con respecto a lo anterior, los conos de escoria y los estratovolcanes resultan ser blancos adecuados para la técnica de muongrafía volcánica, debido a que poseen mayor altura que los volcanes escudo y las calderas volcánicas, con lo cual los muones de EAS tendrán que recorrer menor distancia en roca para atravesar la zona superior del volcán, se detectará un flujo mayor de muones a través de la estructura y con ello se obtendrá una mejor visualización de la zona de interés.

En cuanto a la técnica de muongrafía volcánica, esta consiste en:

1. Estimar el flujo muónico de fondo que arriba al punto en el cual se ubicará el detector. Esto puede realizarse mediante cálculos basados en modelos teóricos empíricos existentes [9, 19, 20] o simulaciones de EAS con códigos como CORSIKA. Entre los principales fenómenos que afectan de forma directa el flujo de partículas y por lo tanto deben ser considerados, se encuentran:
 - El flujo y el tipo de partículas que se producen al interior de una cascada de secundarios varía con la altitud del punto de observación.

³Imágenes obtenidas de: <http://es.slideshare.net/carmadruga/the-most-important-volcanoes-in-the-world>

- Las partículas cargadas de origen galáctico presentan una alteración en sus trayectorias debido al efecto del campo geomagnético, que regula el ingreso de estos primarios a la atmósfera terrestre.
 - Nuestra estrella el Sol modula el flujo de rayos cósmicos de baja energía, al aumentar la cantidad de partículas que inciden sobre la superficie terrestre durante los periodos de actividad solar. Sin embargo, la variación que se presenta es muy pequeña y el periodo de máxima actividad solar (11 años) excede el tiempo de exposición que se emplea en la técnica de muongrafía volcánica [21].
 - Los cambios en las condiciones atmosféricas del punto geográfico en el cual se realiza la estimación, inducen pequeñas variaciones en las interacciones de las partículas de rayos cósmicos con las moléculas de aire presentes en la atmósfera.
2. Estimar el flujo de muones que atraviesa la estructura volcánica e incide sobre el punto en el cual se ubicará el detector. Para ello se establece un modelo de la estructura geológica, con una determinada distribución de densidades (en el presente trabajo se considera un modelo homogéneo conformado por roca estándar $\langle Z/A \rangle = 0,5$ $\rho = 2,650$ [g/cm^3]) y a partir de las pérdidas energéticas de los muones en la materia, se determina la energía mínima que requiere un muón para atravesar la opacidad⁴ dada por su trayectoria incidente en la estructura geológica. Al atravesar la materia, los muones pierden energía por ionización y por interacción con los electrones y nucleones del material. Así, las pérdidas energéticas de los muones en la materia se pueden describir como [21]:

$$-\frac{dE}{d\varrho} = A(E) + B(E)E. \quad (1.6)$$

Donde ϱ es la opacidad y A y B representan funciones que dependen del material en el cual se propagan los muones. La opacidad se define como la densidad del material ρ integrada a lo largo de la trayectoria L que recorre el muón al atravesar la materia.

$$\varrho(L) \equiv \int_L \rho(\xi) d\xi. \quad (1.7)$$

En la ecuación 1.6, la función A representa las pérdidas por ionización y B comprende interacciones de creación de pares y Bremsstrahlung. El *Particle Data Group* (PDG) es una colaboración internacional que compila y analiza resultados publicados relacionados con propiedades de las partículas y sus interacciones fundamentales⁵.

⁴Ver figura 1.7

⁵Sitio web del PDG: <http://pdg.lbl.gov/>

El PDG proporciona valores para las funciones A y B en diversos materiales y a diferentes energías⁶.

Al determinar las pérdidas de energía de los muones en el material, se puede estimar la energía mínima que requiere una de estas partículas para atravesar cierta opacidad.

$$E_{min} = E_{\mu} + \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho} d\varrho. \quad (1.8)$$

Donde E_{μ} representa la energía de masa en reposo.

Con base en esta energía mínima y en la apertura angular del detector, se prosigue a realizar un filtrado sobre el flujo de muones de fondo para obtener el flujo muónico que atraviesa la estructura volcánica e incide sobre el punto en el cual se ubicará el detector.

3. Medir el flujo muónico que incide sobre el detector ubicado en un punto cercano a la estructura geológica y compararlo con el flujo estimado mediante simulaciones y cálculos. Con base en la dirección de incidencia de los muones detectados, se determina la longitud de la trayectoria trazada por el muón al interior de la estructura y al comparar el flujo detectado con el flujo estimado que se obtuvo para la misma trayectoria incidente, se puede conocer la variación en la densidad promedio a lo largo del camino recorrido por el muón. Así pues, cuando se observa que el flujo detectado es mayor al esperado, la densidad promedio a lo largo de esa trayectoria debe ser menor que la densidad considerada y viceversa [17]. A partir de las diferencias que se presenten, se podrá determinar la densidad media para las diversas trayectorias de muones incidentes y construir un perfil de densidad de la estructura interna del volcán.

Para ilustrar, la técnica de muongrafía volcánica ha sido aplicada a volcanes como el Mt. Asama y el volcán Iwodake en Japón [22], La soufrière en Guadeloupe [23], La Montagne pelée en Martinique, The Soufrière Hills en Monserrat o el volcán Etna en Sicilia, Italia [24]. De esta forma, se han obtenido diferentes perfiles de densidad que en conjunción con otras técnicas geológicas, han permitido crear modelos de la estructura interna de estos volcanes. Esta técnica no sólo permite resolver espacialmente la estructura interna de un volcán con adecuada resolución, sino que también ha confirmado los datos provenientes de otras técnicas utilizadas. Particularmente, la técnica de muongrafía volcánica logró comprobar la desaparición de material magmático durante la erupción del Mt. Asama en Japón en 2009 [18]. En la figura 1.4 puede observarse uno de los perfiles de densidad obtenidos

⁶Tablas en: <http://pdg.lbl.gov/2011/AtomicNuclearProperties/>

mediante la técnica de muongrafía, para el volcán Iwodake en la isla Satsuma-Iwojima en Japón.

FIGURA 1.4: Imagen de la distribución de densidad promedio para el Mt. Iwodake, en un plano paralelo al plano del detector. Esta imagen fué construida usando la técnica de muongrafía y en ella puede apreciarse parte de la geometría del conducto volcánico.

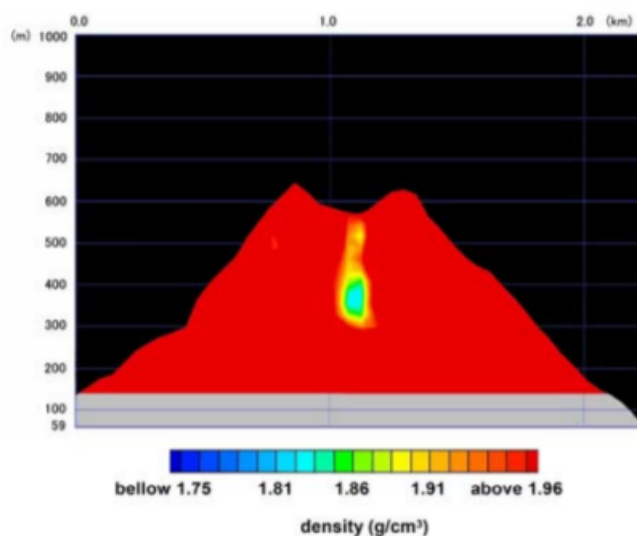


Figura obtenida de [22].

Adicionalmente, si se logran obtener imágenes consecutivas del perfil de densidad de la estructura, esto podría ofrecer información de la dinámica de una erupción, ya que un cambio en la densidad a través del tiempo, puede representar procesos geológicos como movimiento del magma presente en los conductos. Sin embargo, esto último depende en gran medida del tiempo de exposición requerido para obtener cada imagen. Finalmente, los perfiles de densidad construidos con la técnica de muongrafía volcánica, pueden ofrecer información valiosa a la hora de establecer las zonas de riesgo en las cercanías del volcán y con ello, los diferentes mecanismos de prevención o protección ante la inminente erupción de estas estructuras.

1.3 SIMULACIÓN DE LLUVIAS ATMOSFÉRICAS EXTENDIDAS Y CORRECCIÓN POR CAMPO GEOMAGNÉTICO

A través de los años, los investigadores se han basado en los datos observacionales existentes, para desarrollar diversos modelos físicos que simulen las interacciones que se llevan a

cabo durante el avance de una cascada de secundarios. Algunos de estos modelos han sido implementados en el desarrollo de códigos. Entre estos se encuentran el código EGS4 [25] que se encarga de simular las interacciones que dan origen a la componente electromagnética y los códigos creados por Capdevielle [26] y Grieder [27] que simulan las interacciones hadrónicas a altas y bajas energías respectivamente. Posteriormente, ajustando adecuadamente estos tres códigos, con el fin de reproducir los datos experimentales de la forma más acertada, se creó el código CORSIKA en el año 1989⁷.

1.3.1 COsmic Ray SIMulations for KAscade CORSIKA es un código que permite simular las cascadas de secundarios generadas por un rayo cósmico o primario que ingresa en la atmósfera terrestre e interactúa con las moléculas de aire allí presentes. Basándose en varios modelos teóricos de interacciones hadrónicas y en el porcentaje de ocurrencia de estas, CORSIKA recrea el desarrollo de la cascada de secundarios, teniendo en cuenta las interacciones de las partículas con los núcleos de elementos presentes en la atmósfera y el decaimiento de partículas inestables como piones, muones y kaones.

Por otra parte, CORSIKA contiene diferentes modelos que facilitan la simulación de las interacciones de las partículas cargadas a diferentes energías. Las interacciones hadrónicas a alta energía pueden simularse mediante la implementación de modelos como VENUS, QGSJET, y DPMJET, mientras que para las interacciones hadrónicas a bajas energías se tienen los modelos GHEISHA e ISOBAR [7]. Adicionalmente, cuenta con modelos atmosféricos (como U.S standard atmosphere, South pole y Middle Europe) que se ajustan a la composición que posee la atmósfera en diferentes puntos geográficos y posibilita la modificación de las componentes de campo geomagnético, en concordancia con las presentes en el punto de observación seleccionado por el usuario. Así pues, todos estos aspectos influyen en el desarrollo de la cascada de secundarios y la propagación de la misma hacia la superficie terrestre.

Con respecto a las interacciones en CORSIKA, se considera que al ingresar en la atmósfera, las partículas sólo pueden interactuar o decaer. De esta forma, dependiendo de la energía que posea una partícula, se determinan las longitudes de interacción y decaimiento, que definen si la partícula decae o interactúa con los núcleos de aire, para formar partículas secundarias.

Finalmente, los datos de salida que proporciona CORSIKA, brindan información sobre el tipo de secundario, su energía, la dirección de incidencia, el tiempo de llegada y la posición,

⁷Sitio web de CORSIKA: <https://www.ikp.kit.edu/corsika/>

respecto al punto de observación ingresado por el usuario. Gracias a estas características, CORSIKA resulta ser una herramienta útil para el estudio de las interacciones de rayos cósmicos. Y aunque maneja aproximaciones en sus cálculos, permanece en continua evolución, y se realizan diversas pruebas y modificaciones de acuerdo a los nuevos resultados observacionales obtenidos [28–30]; logrando así, su utilidad en la optimización de proyectos o futuros experimentos referentes a rayos cósmicos y EAS.

1.3.2 MAGnetoCOSmics El campo geomagnético defleca la trayectoria de las partículas cargadas de origen galáctico que llegan a la Tierra, regulando el ingreso de los primarios a la atmósfera terrestre. Adicionalmente, el viento solar y las eyecciones de masa coronal (CME), características de la actividad solar, afectan constantemente al campo geomagnético, generando cambios en la estructura de la magnetósfera. Al simular con CORSIKA, las componentes de campo geomagnético ingresadas por el usuario, permiten analizar el efecto de éste sobre los secundarios desde una altitud promedio de 112 km, ya que a esta altura sucede la interacción entre el primario y los núcleos de elementos presentes en la atmósfera. Sin embargo, cuando el análisis de los efectos del campo geomagnético sobre los rayos cósmicos se extiende hacia la magnetósfera o magnetopausa, CORSIKA requiere de una herramienta adicional.

Con respecto a lo anterior, existe un código conocido como MAGCOS, el cual no sólo permite computar trayectorias de partículas cargadas en presencia de un campo magnético, sino que también cuenta con diferentes modelos que se ajustan al campo magnético terrestre. Entre los modelos que usa el código MAGCOS, se encuentra el modelo IGRF [31] y tres versiones del modelo Tsyganenko [32]. Mientras el modelo IGRF considera el campo magnético terrestre como un dipolo geomagnético y se adapta bien al campo geomagnético real hasta una longitud de 5 radios terrestres, el modelo Tsyganenko considera adicionalmente, los efectos que tienen el viento solar y las corrientes externas terrestres, sobre el campo magnético de la magnetósfera.

FIGURA 1.5: Diferentes trayectorias que puede recorrer una partícula para alcanzar un punto sobre la superficie terrestre. En la figura, la Tierra es representada por la esfera azul y las curvas 1, 2, 3, 4 y 5 muestran las trayectorias trazadas por iones positivos con diferentes rigideces de corte. Las partículas 1, 2, 3 y 4 poseen una rigidez alta que les permite ingresar en la atmósfera terrestre sin que su trayectoria se deflecte en gran medida, mientras que la partícula 5 tiene baja rigidez, por lo cual es fuertemente deflectada por el campo geomagnético.

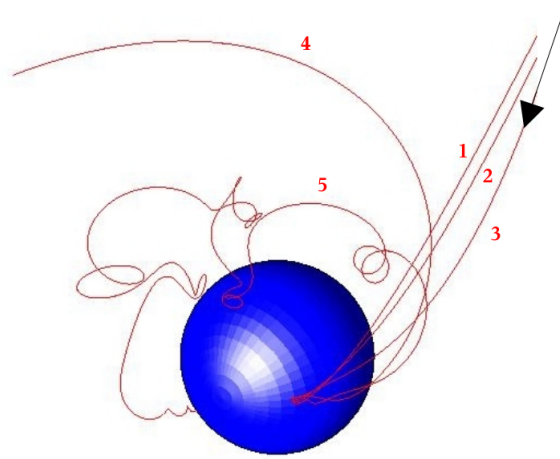


Figura obtenida de [32].

Por otra parte, el ingreso de una partícula primaria a la atmósfera por un determinado punto geográfico, depende de su dirección de incidencia a la magnetósfera y de su rigidez de corte. La rigidez de corte de una partícula se expresa en gigavoltios (GV) o megavoltios (MV) y se define como:

$$R = \frac{pc}{q}, \quad (1.9)$$

donde c representa la velocidad de la luz, p el momentum y q la carga de la partícula.

La rigidez de corte determina la desviación que sufre una partícula cargada por acción del campo geomagnético (ver figura 1.5). Para computar la llegada de los primarios a la atmósfera terrestre es importante cuantificar la rigidez mínima con la cual los rayos cósmicos pueden cruzar la magnetósfera y alcanzar un determinado punto en la atmósfera terrestre. Con base en esta rigidez, MAGCOS facilita el filtrado de los primarios inyectados en la simulación con el código CORSIKA y de esta forma, permite considerar únicamente aquellas partículas que ingresan en la atmósfera terrestre y producen secundarios en el punto de observación seleccionado.

Capítulo 2

ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE MUONES SOBRE EL VOLCÁN GALERAS

El volcán Galeras es un estratovolcán-caldérico activo que se encuentra ubicado a 9 km de la ciudad de San Juan de Pasto, en el departamento de Nariño, Colombia [?]. Aunque frecuentemente presenta erupciones menores, el volcán Galeras también tiene erupciones de carácter explosivo, con grandes cantidades de ceniza y expulsión de piroclastos¹ incandescentes. Este complejo volcánico representa un riesgo tanto para los habitantes de la ciudad, como para la fauna y flora en las zonas aledañas al lugar. Así, ante el riesgo volcánico latente, surge la necesidad de estudiar esta estructura geológica, con el fin de reunir la información necesaria para intentar prevenir cualquier tipo de desastre o tragedia.

Por otro lado, el proyecto MuTe inició actividades a principios del año 2015 y desde entonces ha desarrollado avances en temas de diseño y construcción del telescopio de muones, simulaciones de EAS y análisis topográfico de algunos volcanes en Colombia. Entre los aspectos más relevantes del proyecto MuTe se encuentra la selección del volcán sobre el cual se aplicará la técnica de muongrafía. Al ser el volcán más activo de Colombia, el Galeras resulta una opción atrayente para la construcción de un modelo adecuado de su estructura interna. En el presente trabajo, el volcán Galeras se ha seleccionado como cuerpo geológico sobre el cual se estimará el flujo de muones que atraviesa la estructura e incide en un punto cercano donde pudiese ubicarse un telescopio de muones.

Ahora bien, la técnica de muongrafía volcánica se basa en la comparación entre el flujo detectado con y sin el cuerpo de interés en la trayectoria de los muones incidentes. De esta forma, se determina la atenuación y se obtiene información sobre la densidad media a lo largo de la trayectoria trazada por los muones. Sin embargo, el flujo muónico detectado debe estimarse mediante la construcción de un modelo de densidad media base para la estructura geológica (en el presente trabajo se considera un modelo homogéneo conformado por roca estándar $\rho = 2,650 \text{ g/cm}^3$). Posteriormente, se realiza una comparación entre el flujo muónico estimado y el flujo detectado, considerando cualquier diferencia como una variación entre la densidad media del modelo y la densidad media real, para una determinada trayectoria [18].

¹Fragmento sólido de material volcánico que es expulsado durante una erupción.

En primer lugar, el flujo de muones estimado depende de dos aspectos importantes. El primero de estos corresponde al flujo de muones incidente, que puede obtenerse mediante simulaciones de EAS o cálculos realizados con base en modelos teóricos del flujo de partículas secundarias; como aquellos propuestos en [9, 19, 20]. El segundo aspecto, se refiere al modelo considerado para la estructura geológica en cuestión, es decir la topografía del lugar, el material que conforma las zonas de la estructura y su densidad y la geometría de la chimenea volcánica. Así pues, el presente capítulo muestra los resultados obtenidos para la simulación con los códigos CORSIKA y MAGCOS, así como el procedimiento y las consideraciones realizadas para obtener el flujo de muones que incide inicialmente sobre el volcán Galeras.

2.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE SECUNDARIOS SOBRE EL VOLCÁN GALERAS

La simulación realizada sobre el volcán Galeras con el código CORSIKA, se llevó a cabo con los siguientes parámetros característicos de los primarios inyectados en la atmósfera y del volcán Galeras:

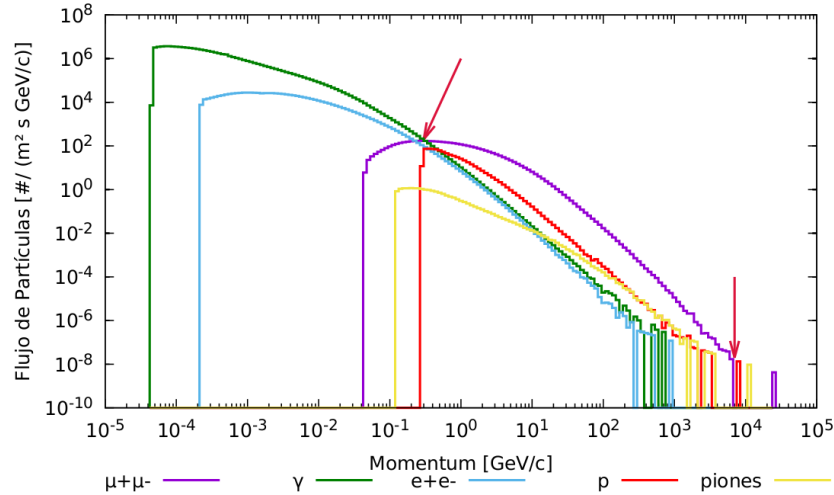
- Rango cenital de incidencia de primarios entre 0° y 90° .
- Rango de energía de primarios entre 5 GeV y 10^6 GeV.
- Tiempo de simulación 24 horas (86400 s).
- Modelo atmosférico tropical.
- Componente de campo magnético horizontal $27.14 \mu\text{T}$ y vertical $11.84 \mu\text{T}^2$.
- Altitud 4276 m s.n.m.
- Latitud 1.22° N y longitud -77.36° O.

El punto de observación considerado en la simulación, viene dado por la longitud, latitud y altitud mostradas en los parámetros anteriores, los cuales dictan una ubicación aproximada del centro del cráter volcánico. A partir de la información obtenida por simulación para los muones incidentes, se esquematiza el primer resultado en la figura 2.1. Se presenta el espectro de secundarios que inciden sobre el punto de observación, en el cual puede notarse que por encima de un determinado valor en momentum (flecha izquierda), el flujo de muones es mayor respecto al de otras partículas. Adicionalmente, se observa que los

²Valores obtenidos de: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>

muones alcanzan valores de momentum superiores (flecha derecha) al resto de partículas que se producen en la cascada.

FIGURA 2.1: Espectro de secundarios que inciden sobre el punto de observación seleccionado para la simulación de EAS. Se presenta una comparación entre el flujo de partículas, para aquellas más abundantes al interior de la cascada de secundarios.



En la figura anterior, se han tenido en cuenta las partículas más abundantes al interior de la cascada de secundarios, tales como: fotones, electrones, protones, muones y piones. Sin embargo, los resultados incluyen partículas adicionales como neutrones, neutrinos y kaones, entre otras. Y gracias a este resultado, puede observarse claramente la razón por la cual los muones representan una partícula de interés para aplicaciones de técnicas de creación de imágenes como la muongrafía volcánica.

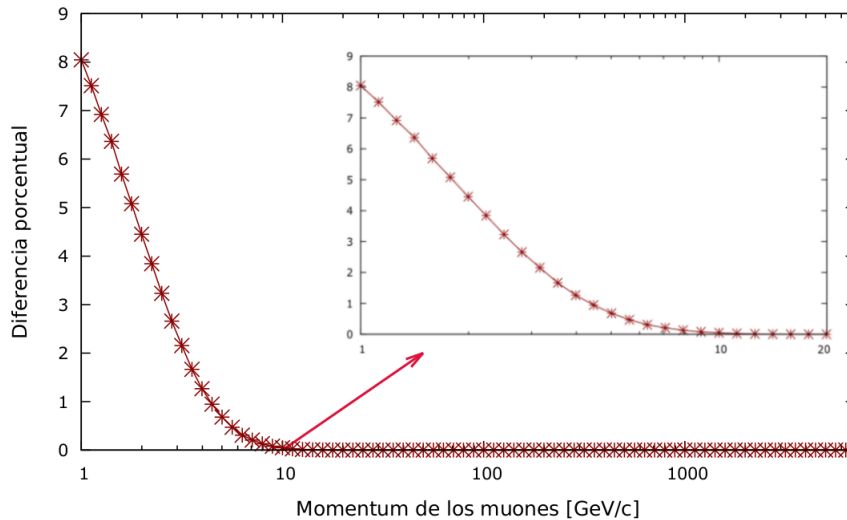
2.1.1 Corrección del flujo de muones por campo geomagnético

Al viajar por el espacio, los rayos cósmicos galácticos presentan una alteración en sus trayectorias, como consecuencia del efecto que los diversos campos magnéticos tienen sobre las partículas cargadas. Dependiendo de su energía de incidencia, algunos primarios presentarán mayor deflexión en su trayectoria debido a los efectos del campo geomagnético e ingresarán a la atmósfera terrestre por una región alejada de las coordenadas geográficas del punto de observación. Por consiguiente, los datos corregidos por campo geomagnético con el código MAGCOS, varían en el número de partículas que arriban al punto de observación seleccionado para la simulación, respecto de los datos no corregidos por campo geomagnético. De esta forma, el archivo de datos de partículas secundarias generado con corrección por campo geomagnético descarta los primarios que no ingresan a la atmósfera

del lugar y por lo tanto no contribuyen a las cascadas de secundarios que inciden sobre el punto de observación.

A continuación, se ha realizado una comparación entre los resultados de la simulación con CORSIKA y aquellos obtenidos tras realizar la corrección por campo geomagnético con el código MAGCOS, con el fin de determinar la importancia de esta corrección sobre los datos requeridos para calcular el flujo total de muones que atraviesa el volcán Galeras. La figura 2.2 esquematiza la diferencia porcentual correspondiente, en función del momentum de los secundarios incidentes. Puede observarse que a 20 GeV/c la diferencia porcentual es cero, por lo cual al conocer el momentum mínimo requerido por los muones para atravesar la estructura geológica, puede determinarse la relevancia de los efectos del campo geomagnético considerados por el MAGCOS, para las estimaciones realizadas.

FIGURA 2.2: Diferencia porcentual entre el flujo de muones obtenido sin corrección por campo geomagnético y aquel con corrección por campo geomagnético, para la simulación con CORSIKA sobre el volcán Galeras. En la parte derecha de la figura se muestra una ampliación de la curva, entre 1 GeV/c y 20 GeV/c.



Posteriormente en este trabajo³, se determina que un muón incidente con 20 GeV/c logra atravesar una distancia de ≈ 35 m en roca estándar. Sin embargo, las distancias mínimas a lo largo de una trayectoria que atraviesa la zona de interés de la estructura volcánica, se encuentran por encima de los 100 m, por lo cual se concluye que los muones requeridos para aplicar la técnica de muongrafía volcánica sobre estructuras geológicas, poseen un

³Capítulo 3: Propagación de muones en roca.

rango de energía lo suficientemente grande para que los efectos del campo geomagnético sean considerados despreciables.

2.2 PERFIL DEL VOLCÁN GALERAS

Conocer el perfil de elevación del edificio volcánico, es un aspecto de gran importancia, que permite determinar la ubicación del telescopio en las cercanías del volcán y estimar el flujo de muones que atraviesa la estructura, con base en los resultados obtenidos por simulación, para el flujo total de muones que incide sobre el cuerpo geológico. En el caso del volcán Galeras y gracias a la ayuda del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (quienes realizaron una revisión cartográfica de los posibles puntos para la ubicación del telescopio), se obtuvieron algunas alternativas para el perfil de elevación (ver figura 2.3).

FIGURA 2.3: Imagen del volcán Galeras, con los posibles puntos de disposición para el telescopio de muones. Se ha tomado en cuenta una circunferencia de diámetro 2 km (1 km respecto al cráter), debido al límite de penetración de los muones en roca. La zona verde corresponde a regiones en dominio de Parques Naturales Colombianos, mientras que la línea marrón indica las vías de acceso al volcán.

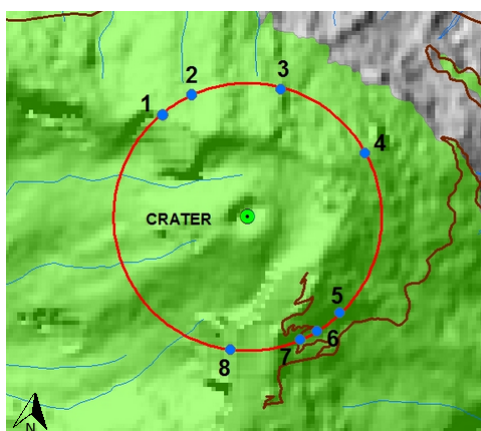


Figura proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

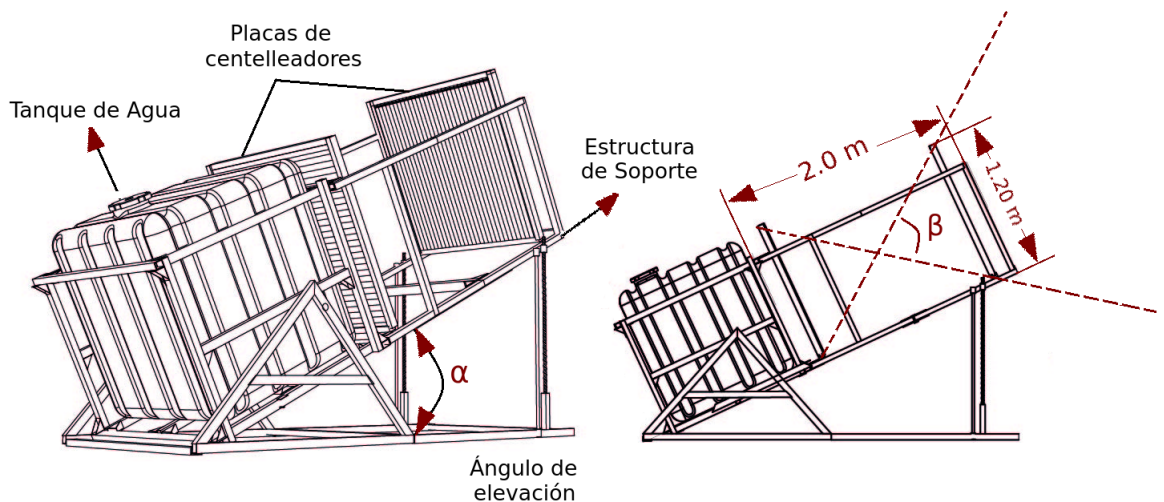
En la figura anterior, los puntos entre 5-8 resultan ser de fácil acceso, debido a la cercanía de estos a la vía, mientras que los puntos entre 1-4 requieren un transporte adicional de la estructura del telescopio, para su instalación. Por otra parte, la zona occidental del volcán no sólo es una región de difícil acceso, sino que también representa mayor riesgo en caso de una posible erupción, por lo tanto no se tuvo en cuenta para la ubicación del detector.

Ahora bien, los puntos más convenientes⁴ para la disposición del telescopio de muones se seleccionaron a partir de los sitios sugeridos por el SGC, la distancia límite de penetración para los muones en roca estándar y aspectos tales como la diferencia de altitud y distancia entre cada uno de los puntos y el cráter volcánico. A continuación se muestran las coordenadas geográficas y la altitud para el cráter del Galeras y los dos puntos seleccionados (nombrados A y B) sobre los cuales se realizará la estimación del flujo de muones esperado.

- Cráter volcánico: 1.220618° N, -77.359006° O, 4074 m.
- Punto A: 1.223786° N, -77.362778° O, 3964 m.
- Punto B: 1.216328° N, -77.358964° O, 3893 m.

2.2.1 Consideraciones del telescopio La ubicación más conveniente para un detector de astropartículas, depende de algunos aspectos como la topografía o las dimensiones de la cámara, éstas últimas determinan el ángulo de apertura del telescopio hacia la estructura geológica y también otros factores como la resolución angular, que varía según la geometría del detector. En el marco del proyecto MuTe, los cálculos presentados en este trabajo se realizaron para un detector con dos placas centelleadoras cuadradas de lado 1.2 m y separadas una distancia $D = 2.0$ m. Adicionalmente, cada placa posee un total de 30 x 30 pixeles.

FIGURA 2.4: Telescopio de muones diseñado para el proyecto MuTe. Gracias a su geometría, se tiene un ángulo de apertura total de $\beta = 61.93^\circ$ y la estructura que lo soporta permite inclinar la cámara un determinado ángulo.

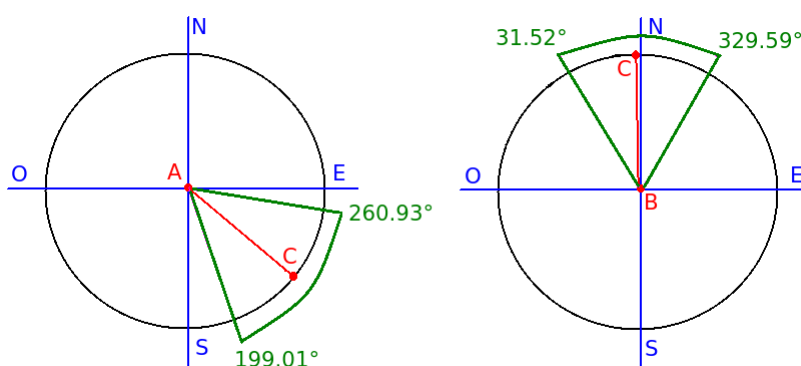


⁴Ver Anexo 4.

Figura obtenida de fuente⁵.

De esta forma, el rango angular azimutal de incidencia de muones se determinó con base en la apertura angular total dada por la geometría del detector (figura 2.4) y las coordenadas geográficas de los dos puntos seleccionados. A continuación, en la figura 2.5 se muestra este rango angular azimutal respecto al norte magnético y la respectiva ubicación del cráter volcánico, para los dos puntos tomados en consideración.

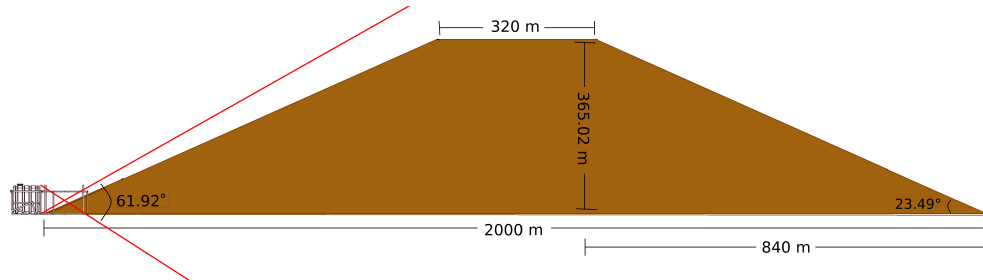
FIGURA 2.5: Filtrado azimutal para los puntos A y B. Se tiene un ángulo de apertura de 61.93° , el ángulo azimutal es medido respecto al norte magnético terrestre y el punto C representa la ubicación del cráter volcánico.



Adicionalmente, a partir de la apertura angular del telescopio, se determinó el ángulo de inclinación adecuado para la cámara, en la dirección que apunta hacia el volcán Galeras. Como una primera estimación, se consideró un volcán cónico, sobre el cual se dispuso el telescopio, para encontrar el ángulo de inclinación que proporciona una mayor cantidad de direcciones incidentes a través de la zona de interés de la estructura volcánica. Este cono cuenta con una base de 20 km, una altura de 4276 m y un diámetro para el cráter de 320 m. A partir de estas especificaciones, se ubicó el punto con un diámetro de 2000 m y se prosiguió a ubicar el telescopio de muones a la correspondiente altitud, como se muestra en la figura 2.6.

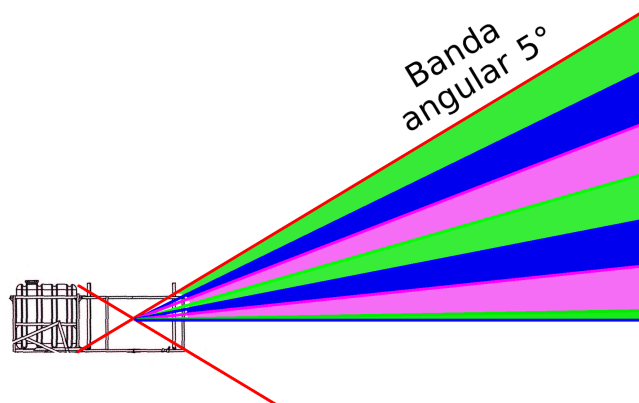
⁵Imagen obtenida de: <http://halley.uis.edu.co/fuego/el-proyecto/el-telescopio-de-muones/estructura-del-telescopio/>

FIGURA 2.6: Esquema de la apertura angular total del telescopio sobre el volcán Galeras, para un ángulo de inclinación de 0° . Puede notarse que la mitad del ángulo de apertura del telescopio, se encuentra dirigido hacia la parte inferior del volcán, donde el diámetro supera los 2 Km. También se observa que incluso con un ángulo de inclinación de 0° , parte de la apertura angular se dirige hacia el cielo, proporcionando cierto ruido a la medición.



Con base en el esquema anterior, se infiere que el ángulo de inclinación más conveniente para la toma de datos con el detector de muones diseñado para el proyecto MuTe, corresponde a cero grados. De esta forma, el flujo de muones que incide inicialmente sobre los dos puntos seleccionados para el volcán Galeras, se estima teniendo en cuenta este factor. Para ello, se considera la apertura angular del telescopio respecto a la horizontal (correspondiente a 30.96°) y posteriormente se divide en bandas angulares de 5° como se ejemplifica en el esquema de la figura 2.7.

FIGURA 2.7: División angular en bandas de 5° para la mitad del ángulo de apertura total del telescopio de muones. Esto permite discretizar las direcciones de incidencia de los muones sobre el detector y las posibles trayectorias a través de la estructura geológica, con el fin de observar la variación del flujo de muones respecto al ángulo cenital.

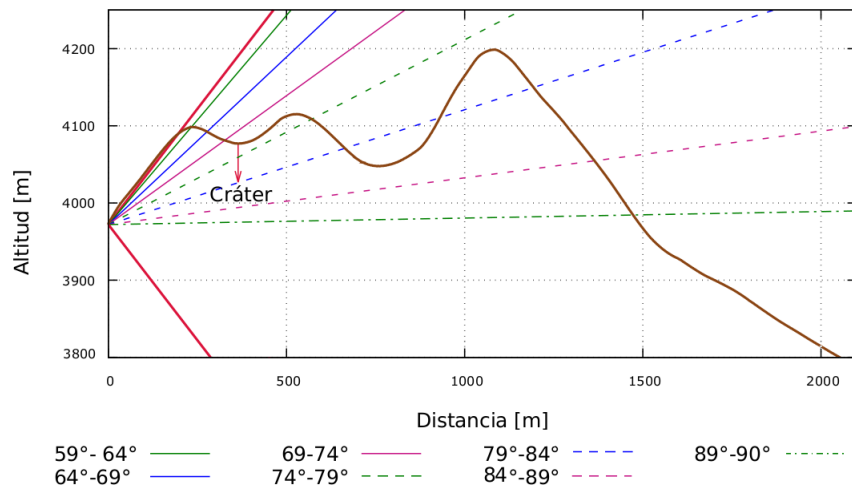


2.2.2 Ubicación de la cámara

La ubicación del detector es un aspecto de gran importancia a la hora de aplicar muongrafía sobre cuerpos geológicos, puesto que

la distancia que recorren los muones a través de la estructura, depende de la topografía del lugar y la localización de la zona de interés. De esta forma, un punto adecuado se caracteriza por menor distancia a lo largo de las trayectorias trazadas por los muones y mayor acceso a la zona que contiene información sobre la chimenea volcánica. Ahora bien, tomando en cuenta los rangos angulares azimutales y el filtrado cenital por bandas para los puntos A y B, se prosigue a reconocer las direcciones de incidencia en los perfiles de elevación y a realizar el filtrado correspondiente sobre los datos de muones incidentes obtenidos por simulación. En las figuras 2.8 y 2.9 se esquematizan las direcciones de incidencia de muones a través de los perfiles de elevación para los puntos A y B. Estas direcciones incidentes corresponden a la trayectorias dadas para el ángulo cenital medio entre cada una de las bandas angulares consideradas en la figura 2.7. Adicionalmente se muestra el rango de la banda angular correspondiente para cada dirección de incidencia trazada.

FIGURA 2.8: Perfil de elevación para el punto A obtenido a partir de la topografía del volcán Galeras y dirección de incidencia de muones sobre el punto, para las bandas angulares tomadas en consideración.

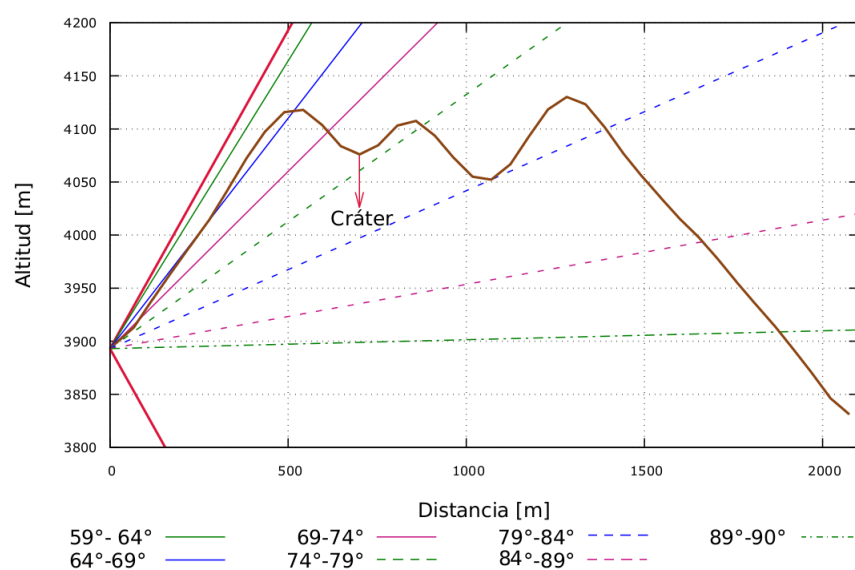


En los perfiles de elevación mostrados, puede notarse que las trayectorias que pasan a través de la zona de interés (chimenea) en la estructura volcánica, se encuentran a ángulos cenitales superiores a los 74°. Ahora bien, aunque los secundarios que arriban por ángulos cenitales grandes son más energéticos, también se tiene que el flujo disminuye a medida que aumenta el ángulo cenital. Esto se debe a que a mayores ángulos cenitales, aumenta la profundidad atmosférica⁶ que deben atravesar estas partículas para arribar al punto de

⁶Profundidad atmosférica: Masa de aire por unidad de área que atraviesa una partícula a lo largo de la atmósfera, desde el infinito hasta cierta posición [5].

observación. Por esta razón, se prosigue a determinar el flujo de muones que arriba a cada uno de estos puntos y analizar la capacidad que tienen los muones de ángulos superiores a 74° para penetrar distancias de un par de kilómetros en roca estándar.

FIGURA 2.9: Perfil de elevación para el punto B (cercano a la vía de acceso) obtenido a partir de la topografía del volcán Galeras y dirección de incidencia de muones sobre el punto, para las bandas angulares tomadas en consideración.



2.3 FLUJO DIFERENCIAL DE MUONES COMO FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN DE ARRIBO

El flujo diferencial de muones sobre los puntos A y B como función de la dirección de arribo, ha sido obtenido de dos maneras. En la primera de ellas se han filtrado los muones incidentes obtenidos por simulación, mediante un rango de incidencia angular azimutal dado por el esquema de la figura 2.5 y cenital de varias bandas angulares mostradas en la figura 2.7. De esta forma, puede analizarse la variación del flujo de muones en función del ángulo cenital y considerar cual banda angular resulta de mayor interés respecto a la información que nos brinda cierta trayectoria al interior de la chimenea volcánica. A continuación, se muestra en las figuras 2.10 y 2.11, el flujo de muones que arriba al punto A y B respectivamente, para las diferentes bandas angulares cenitales consideradas.

FIGURA 2.10: Flujo de muones obtenido por simulación, que arriba al punto A en función del momentum (superior) y la distancia en roca estándar que pueden atravesar los muones (inferior). Las curvas trazadas en las gráficas, representan el flujo incidente para las bandas angulares cenitales consideradas en las convenciones.

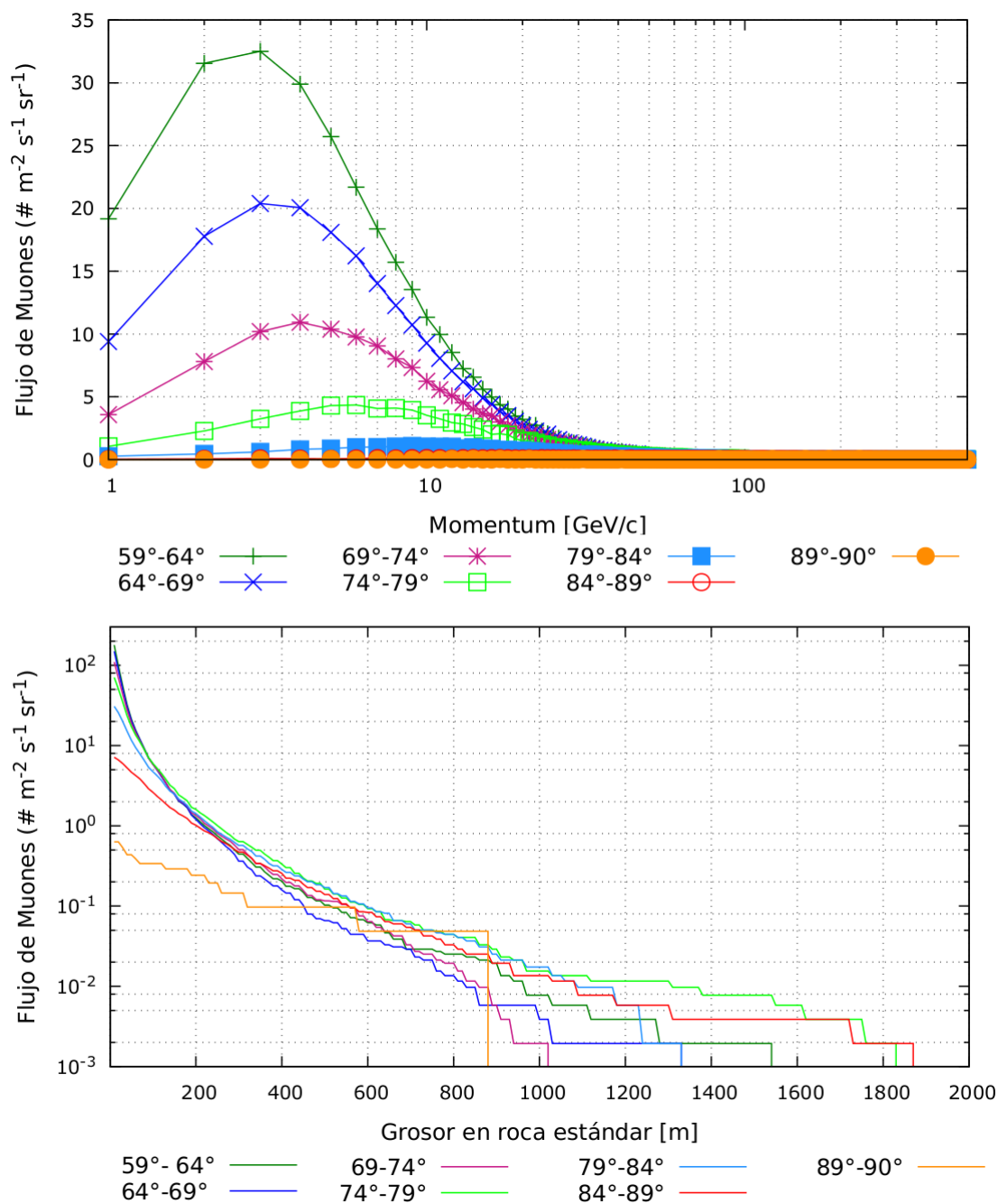
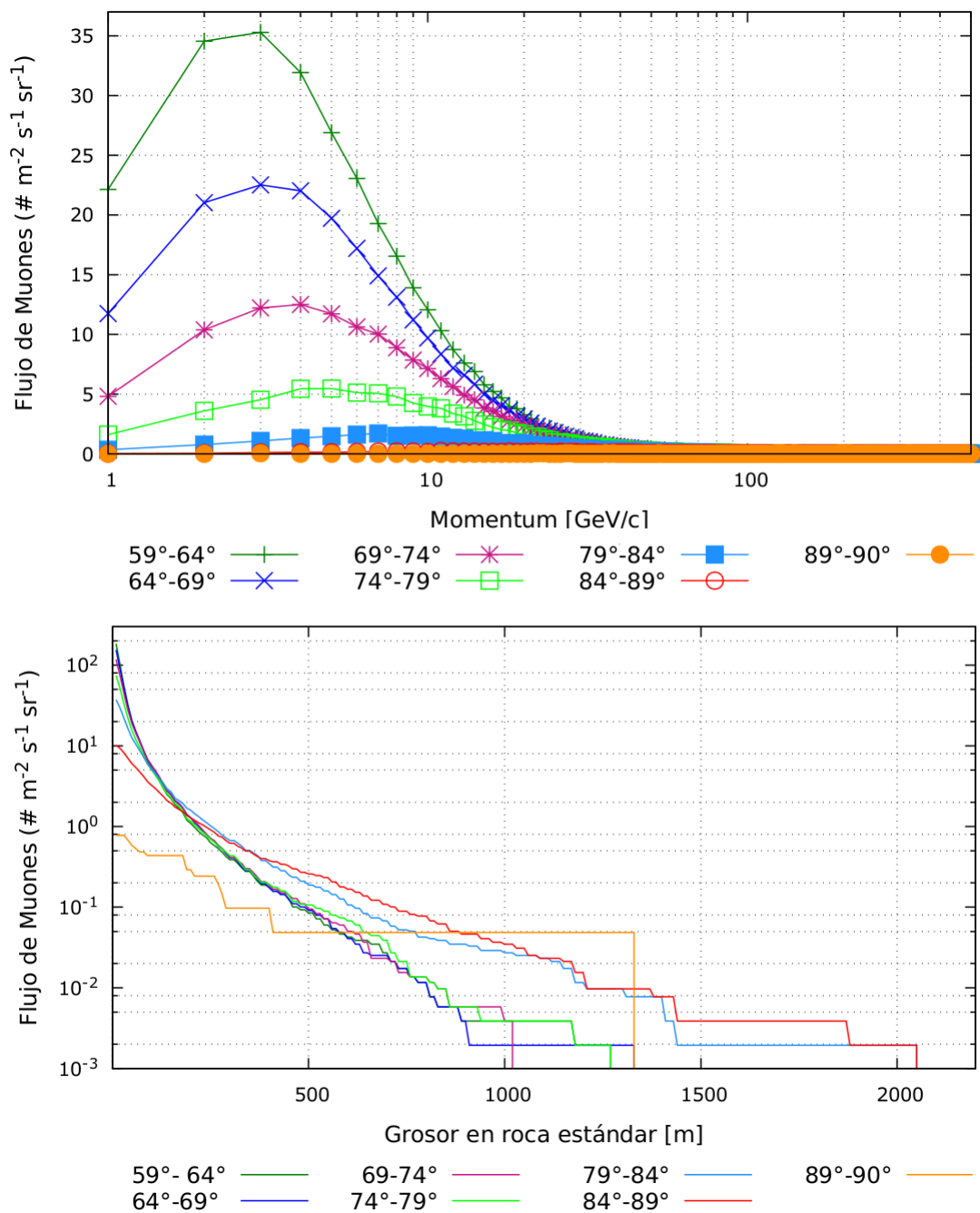


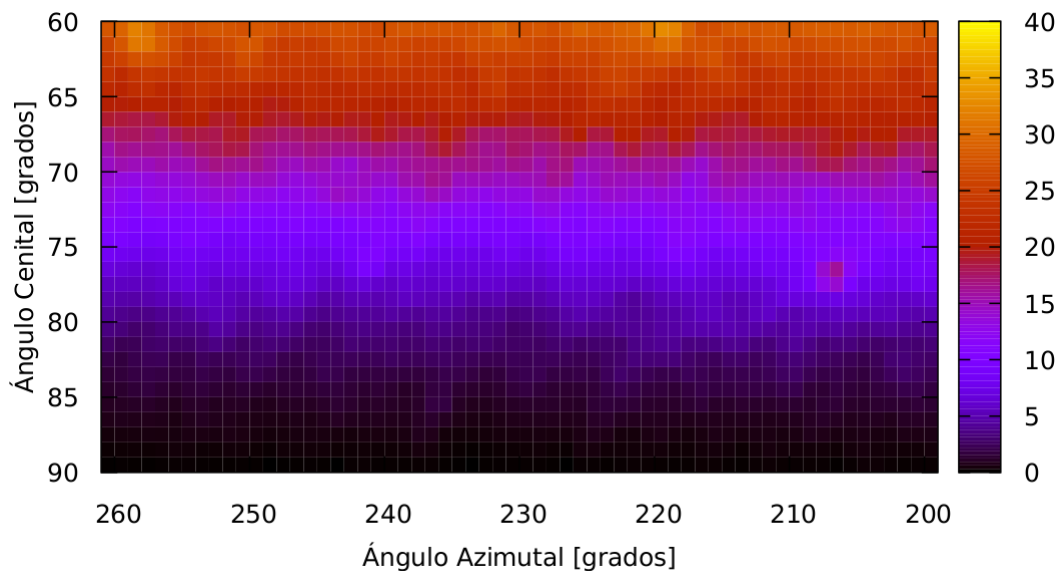
FIGURA 2.11: Flujo de muones obtenido por simulación, que arriba al punto B en función del momentum (superior) y la distancia en roca estándar que pueden atravesar los muones (inferior). Las curvas trazadas en las gráficas, representan el flujo incidente para las bandas angulares cenitales consideradas en las convenciones.



En las gráficas de momentum puede observarse el comportamiento descrito anteriormente, en el cual el pico de máximo flujo de muones se desplaza hacia cantidades de momentum mayores a medida que crece el ángulo cenital y el flujo disminuye hasta volverse casi nulo para ángulos muy cercanos a 90° . Por otro lado, en las gráficas que se muestran para el flujo de muones en función del grosor en roca estándar, puede apreciarse que las bandas angulares entre 74° y 89° poseen muones incidentes con el momentum necesario para atravesar distancias máximas aproximadas de 1500 y 2000 metros, para los perfiles A y B respectivamente. Por lo tanto, podemos definir estas tres bandas angulares como ángulos de interés, con base en el momentum de los muones que arriban y la zona que atraviesan en la estructura volcánica, al incidir con estos ángulos cenitales.

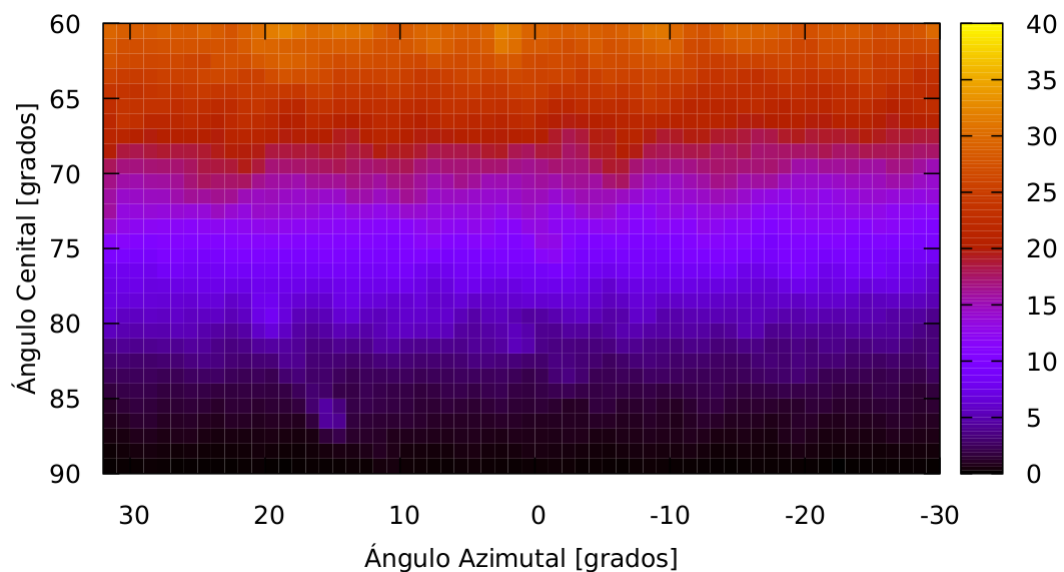
En segunda instancia, se realizó un filtrado teniendo en cuenta el rango angular azimutal mostrado en la figura 2.5 y un rango cenital entre 60° y 90° , correspondiente a la apertura angular aproximada del telescopio con respecto a la horizontal (ver figura 2.7). Sin embargo, a diferencia del filtrado anterior, la división de las bandas angulares cenitales y azimutales se realizó en pasos de un grado, para los dos rangos angulares considerados. De esta manera, teniendo en cuenta todos los muones incidentes obtenidos por simulación (incluyendo aquellos con bajo momentum que sólo logran atravesar un par de metros en roca estándar), se crearon los mapas de incidencia angular mostrados en las figuras 2.12 y 2.13.

FIGURA 2.12: Flujo muónico de fondo que arriba al punto A en función de la dirección de incidencia dada por los ángulos azimutal y cenital. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$



De esta forma, el segundo filtrado angular realizado sobre el flujo de muones total resultado de la simulación de lluvias atmosféricas extendidas, nos facilita una mejor visualización de la variación del flujo muónico incidente en función del ángulo cenital y azimutal. En las dos gráficas puede notarse la disminución del flujo de muones a medida que aumenta el ángulo cenital y se observa que el flujo muónico de fondo para las bandas angulares de interés corresponde a un máximo aproximado de $15 \text{ Muones } m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$ y disminuye paulatinamente hasta volverse casi nulo por encima de los 85° .

FIGURA 2.13: Flujo muónico de fondo que arriba al punto B en función de la dirección de incidencia dada por los ángulos azimutal y cenital. El código de color representa valores de $[Muones m^{-2} s^{-1} sr^{-1}]$



Con base en este flujo muónico de fondo y las pérdidas de energía de los muones en roca estándar⁷, se obtuvo la distancia máxima que recorren los muones incidentes en el material seleccionado. Posteriormente se estimó la distancia de cada una de las trayectorias a través de la topografía del volcán Galeras, dadas por los ángulos de incidencia azimutal y cenital. Finalmente, en el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos tras realizar un filtrado sobre el flujo de muones de fondo, mediante la comparación entre las dos distancias mencionadas, para estimar el flujo de muones que atraviesa el volcán Galeras e incide sobre los puntos A y B en función de la dirección de arribo.

⁷Ver Capítulo 3: Propagación de muones en roca estándar.

Capítulo 3

ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE MUONES A TRAVÉS DEL GALERAS

3.1 PROPAGACIÓN DE MUONES EN ROCA ESTÁNDAR

Al propagarse en algún material, los muones pierden energía por ionización, Bremsstrahlung y producción de pares (e^+e^-). Esta pérdida energética puede expresarse por la ecuación 1.6 y depende principalmente de las propiedades del material y la trayectoria seguida por los muones. En este trabajo, se ha seleccionado la roca estándar como material principal para la estimación del flujo de muones que atraviesa el volcán Galeras. De esta forma, se manejan las especificaciones de roca estándar dadas por el PDG y a partir de estas, se consideran dos densidades base: La primera se refiere a la densidad conocida para la roca estándar 2.650 g/cm^3 y la segunda corresponde a 0.7 g/cm^3 . En el modelo volcánico, estas densidades conformarán el material del edificio y la chimenea volcánica, respectivamente.

Ahora bien, considerando las pérdidas de energía de los muones en la materia [21], se ha construido un código que propaga un muón con un rango de momentum inicial entre $5 \text{ GeV}/c$ y $10^4 \text{ GeV}/c$ y calcula la distancia máxima que recorre en el material seleccionado. Así, el código estima las pérdidas de energía del muón al propagarse en pasos de 1 cm en roca estándar y disminuye consecutivamente su energía inicial hasta alcanzar la energía límite que impide su propagación. El código desarrollado ha sido implementado con los datos proporcionados por el PDG para el poder de frenado de muones en roca estándar y se han tomado en cuenta los dos valores de densidad mencionados. La figura 3.1 muestra una parte del archivo de datos proporcionado por el PDG para la estimación de las pérdidas energéticas de los muones al propagarse en roca estándar.

A partir de los datos mostrados en la tabla proporcionada por el PDG, se obtuvo el momentum mínimo que requiere un muón para atravesar cierta distancia en roca estándar. Para ejemplificar, se tiene que un muón con momentum inicial de $5 \text{ GeV}/c$ atraviesa una distancia de 9.73 metros en roca estándar y para $\approx 10^4 \text{ GeV}/c$ la distancia máxima corresponde a 2603.56 metros. A continuación, en la figura 3.2, se esquematiza el momentum inicial que requiere un muón para atravesar un determinado grosor en roca estándar. Puede observarse que para una densidad de 0.7 g/cm^3 los muones logran atravesar más del triple de la distancia en roca estándar, que para una densidad de 2.650 g/cm^3 .

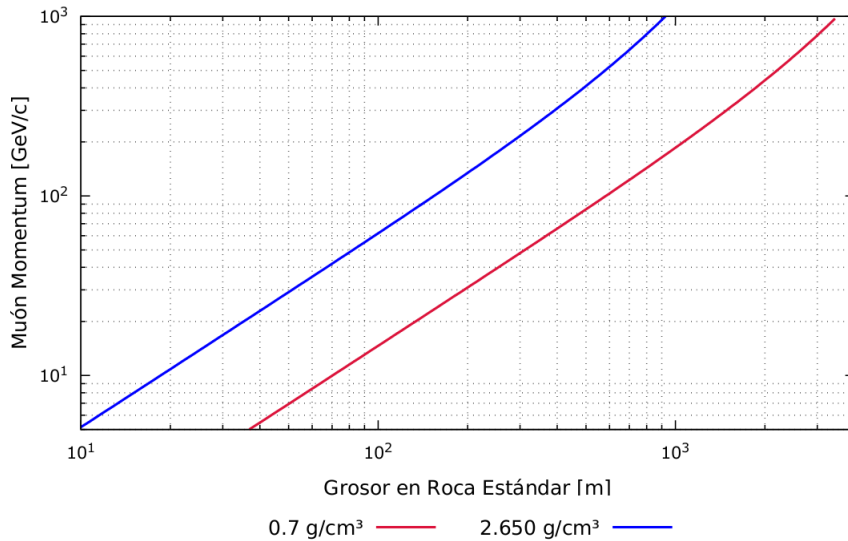
FIGURA 3.1: Tabla de las pérdidas de energía de los muones al propagarse en roca estándar (2.650 g/cm^3). La tercera columna corresponde a la función A y la cuarta y quinta columna a la función B de la ecuación 1.6. El código desarrollado emplea la primera y la octava columna para estimar la máxima distancia que recorre un muón en roca estándar al incidir con un momentum inicial dado.

```

Index = 281: standard rock
Absorber with <Z/A> = 0.50000, density = 2.650
  T      p      Ionization  brems  pair  photonuc  Radloss  dE/dx  CSDA Range  dlterm  dE/dx|_R
[MeV]  [MeV/c]  -----[MeV cm^2/g]-----[g/cm^2] --[MeV cm^2/g]--
1.000E+00 1.457E+01 2.643E+00 0.000E+00 0.000E+00 4.771E-05 4.771E-05 5.286E+00 2.311E-03 0.0000 4.060E+01
1.200E+00 1.597E+01 3.517E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.780E-05 4.780E-05 3.517E+01 7.619E-03 0.0000 3.517E+01
1.400E+00 1.726E+01 3.112E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.789E-05 4.789E-05 3.112E+01 1.368E-02 0.0000 3.112E+01
1.700E+00 1.903E+01 2.667E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.802E-05 4.802E-05 2.667E+01 2.413E-02 0.0000 2.667E+01
2.000E+00 2.066E+01 2.342E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.816E-05 4.816E-05 2.342E+01 3.616E-02 0.0000 2.342E+01
2.500E+00 2.312E+01 1.960E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.838E-05 4.838E-05 1.960E+01 5.961E-02 0.0000 1.960E+01
3.000E+00 2.536E+01 1.694E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.860E-05 4.860E-05 1.694E+01 8.713E-02 0.0000 1.673E+01
3.500E+00 2.742E+01 1.498E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.883E-05 4.883E-05 1.498E+01 1.186E-01 0.0000 1.462E+01
4.000E+00 2.935E+01 1.347E+01 0.000E+00 0.000E+00 4.905E-05 4.905E-05 1.347E+01 1.539E-01 0.0000 1.302E+01
    
```

Figura obtenida de la página del PDG¹.

FIGURA 3.2: Momentum mínimo necesario para que un muón atravesase cierta distancia en roca estándar. Se han considerado dos valores de densidad, correspondientes a 2.650 g/cm^3 (línea azul) y 0.7 g/cm^3 (línea roja).

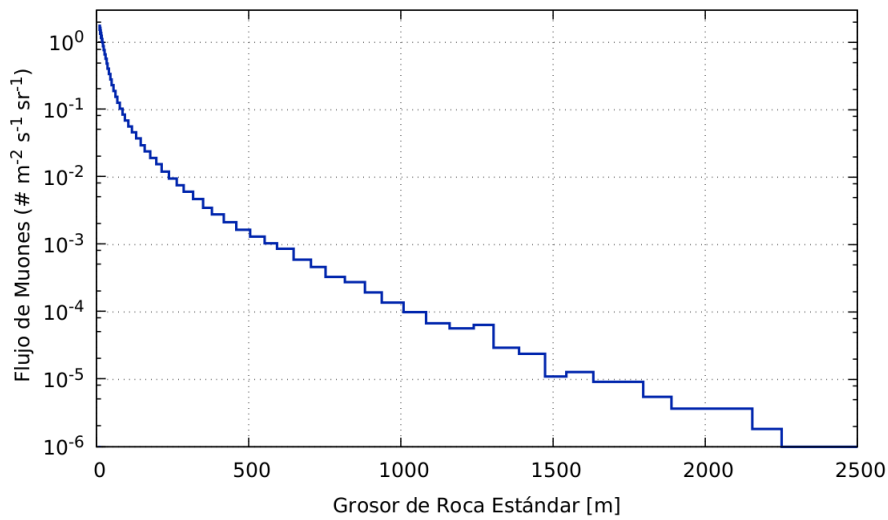


La figura anterior ha sido comparada con aquella obtenida en Lesparre et al. (2010) [21] como solución a la ecuación 1.8 en función del grosor en roca estándar. De esta forma, los resultados obtenidos son consistentes con la descripción de las pérdidas de energía de los muones en la materia, dada por la ecuación 1.6, para las dos densidades seleccionadas. Posteriormente, a partir de los resultados de la figura 3.2 y de la energía con la cual arriban

¹Datos obtenidos de: <http://pdg.lbl.gov/2011/AtomicNuclearProperties/>

los muones obtenidos por simulación, se determinó el flujo de muones que logra atravesar el modelo del volcán Galeras para las diferentes direcciones de incidencia de los puntos A y B. Adicionalmente, se estimó la distancia máxima en roca estándar que logran atravesar los muones de EAS simuladas con CORSIKA. La figura 3.3 muestra el flujo de muones que arriba al punto de observación para todas las direcciones de incidencia existentes, en función de la distancia en roca estándar.

FIGURA 3.3: Flujo de muones que arriba al punto de observación para el volcán Galeras y distancia en roca que atraviesa, debido a la energía de los muones incidentes.



Así pues, se establece el límite de penetración en roca estándar de los muones de EAS, dado por una distancia máxima aproximada de 2000 metros. Sin embargo, el flujo de muones que alcanza esta distancia corresponde a $\approx 4 * 10^{-6} \text{ Muones } m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$ y al ser consideradas todas las direcciones de incidencia, debe estimarse qué parte de este flujo incide realmente sobre los puntos A y B tras realizar un filtrado por ángulo azimutal (ver figura 2.5) y cenital (ver figura 2.7).

3.2 FLUJO DE MUONES QUE ATRAVIESA EL VOLCÁN GALERAS

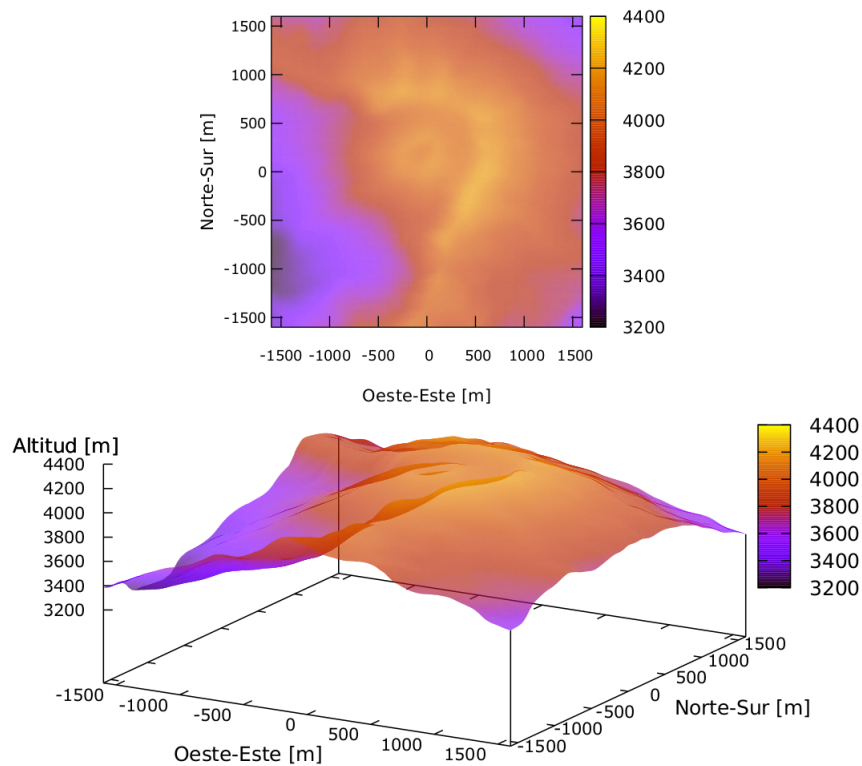
Teniendo en cuenta los datos² topográficos para las coordenadas geográficas del volcán Galeras, se realizó una interpolación³ con el fin de obtener una mayor resolución en los

²Datos obtenidos de: <https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2.1/SRTM3/>

³Interpolación realizada con los códigos en: <https://github.com/asoreyh/srtm3>

datos y a partir de estos, estimar de la distancia que atraviesan los muones en la estructura del volcán Galeras para cada dirección de incidencia. Con base en los resultados obtenidos, se esquematizó la topografía de la figura 3.4 y se construyeron tres modelos para la estructura volcánica. El primero de ellos consiste en un volcán homogéneo de roca estándar (2.650 g/cm^3), el segundo considera adicionalmente la chimenea volcánica, que viene representada por un cilindro de radio 80 m conformado por roca estándar de menor densidad (0.7 g/cm^3) y el tercero es un modelo de prueba similar al modelo #2, pero la chimenea volcánica está compuesta de aire. La figura 3.5 muestra un esquema de los tres modelos implementados.

FIGURA 3.4: Topografía (inferior) y vista superior (superior) del volcán Galeras. Valores obtenidos mediante interpolación sobre los datos topográficos para las coordenadas geográficas del volcán Galeras.



Con base en estos modelos, se desarrolló un código que calcula la distancia en roca a través de la topografía, para cada una de las diferentes direcciones angulares dadas por los rangos azimutal (ver figura 2.5) y cenital (entre 60° - 90°) de los puntos A y B. Para ejemplificar, se tiene en el punto A a un ángulo azimutal de 230° , una distancia de 266.76 m y 1321.55 m para ángulos cenital de 60° y 85° respectivamente. Enseguida se realizó una

comparación entre esta distancia y aquel grosor máximo en roca estándar que recorren los muones obtenidos por simulación, filtrando así, los muones que llegan al punto A y B por cada dirección de incidencia. A continuación en la figura 3.6, se muestra el flujo de muones que arriba al punto B en función de la dirección de incidencia.

FIGURA 3.5: Modelos contruidos para la estructura del volcán Galeras. Se presenta el modelo #1 como un modelo homogéneo (izquierda), el modelo #2 con una chimenea cilíndrica de menor densidad (centro) y el modelo 3 como modelo de prueba (derecha).

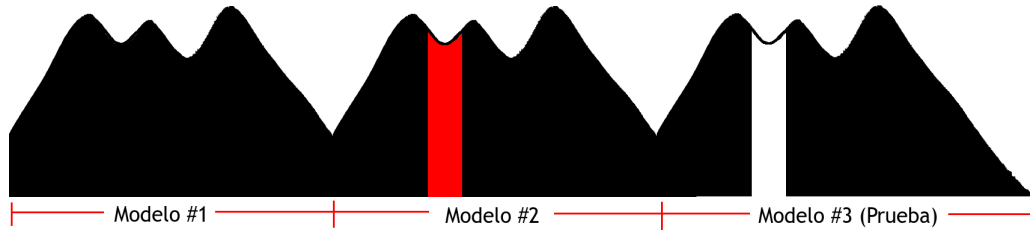
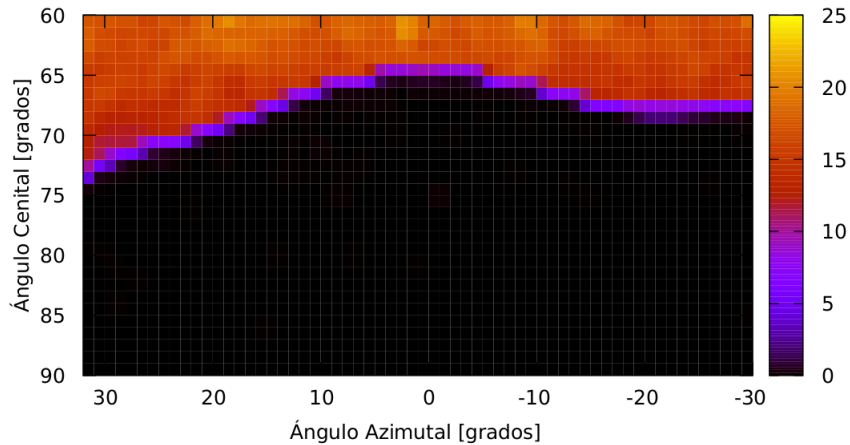
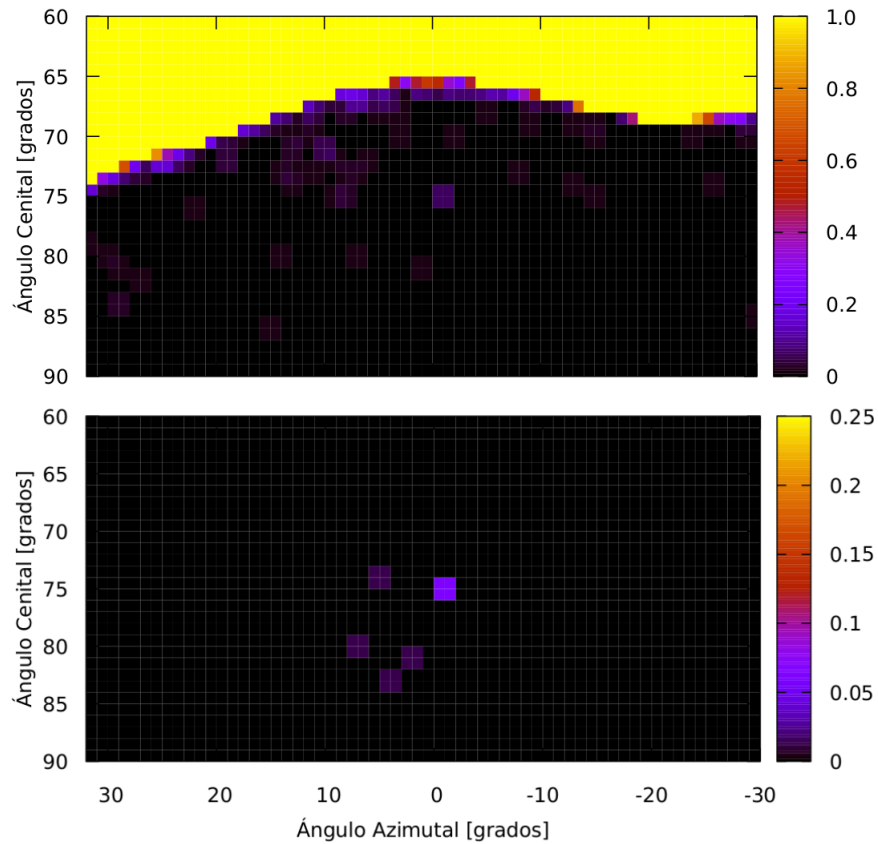


FIGURA 3.6: Flujo de muones que atraviesa el modelo #1 del volcán Galeras y arriba al punto B en función de la dirección de incidencia. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$.



Como se observa en la figura 2.9, el punto B presenta direcciones de incidencia por las cuales arriban muones que no atraviesan roca estándar. Por esta razón, el contraste que se presenta en el flujo muónico de la figura anterior, permite notar claramente la topografía del cono volcánico. Sin embargo, no se pueden apreciar las direcciones incidentes a través de la estructura geológica. Con la intención de tener una mejor visualización de este aumento, se ha reducido el código de color de la figura 3.6 como se muestra a continuación (ver figura 3.7):

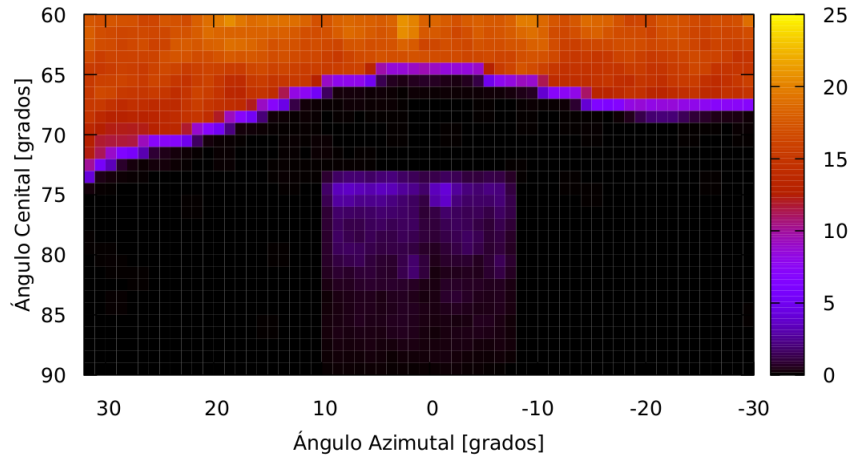
FIGURA 3.7: Flujo de muones que atraviesa el modelo del volcán Galeras y arriba al punto B en función de la dirección de incidencia. Volcán de modelo #1 (superior), con código de color reducido y resta entre flujo obtenido para modelo #2 - modelo #1 (inferior). El código de color representa valores de [$Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$].



En la gráfica superior de la figura anterior, pueden observarse las direcciones de incidencia a través de la estructura volcánica y en la gráfica inferior se esquematizan las direcciones de incidencia en las cuales el flujo presentó un aumento al cambiar del modelo #1 al modelo #2. En el modelo #2 del punto B, el cilindro que representa la chimenea volcánica se encuentra ubicado entre los 74° - 90° , por esta razón en la gráfica inferior de la figura 3.7 se nota un aumento en el flujo muónico para cinco direcciones incidentes de muones que pasan a través de la zona en la cual se encuentra el conducto cilíndrico, conformado por roca estándar de menor densidad. Este aumento en el flujo es consecuencia de la disminución en la opacidad para las direcciones de arriba que atraviesan la zona de la chimenea volcánica introducida.

En adición a este resultado se presenta la figura 3.8, que esquematiza el flujo de muones que atraviesa el modelo #3 e incide sobre el punto B. Éste modelo fué implementado con el fin de corroborar el buen funcionamiento de los códigos desarrollados. Al tener una chimenea volcánica conformada por aire, el flujo que atraviesa la estructura del volcán Galeras en la zona del cilindro es máximo respecto a las direcciones de incidencia que atraviesan roca estándar. De esta forma, el resultado presentado nos muestra que los códigos desarrollados no sólo facilitan la construcción de un modelo (introducción de estructura cilíndrica para la chimenea) para la estructura geológica seleccionada, a partir de su topografía, sino que también permiten realizar de forma exitosa, un filtrado sobre el flujo de muones de fondo, para obtener el flujo muónico que arriba al punto escogido para la disposición de un telescopio de muones.

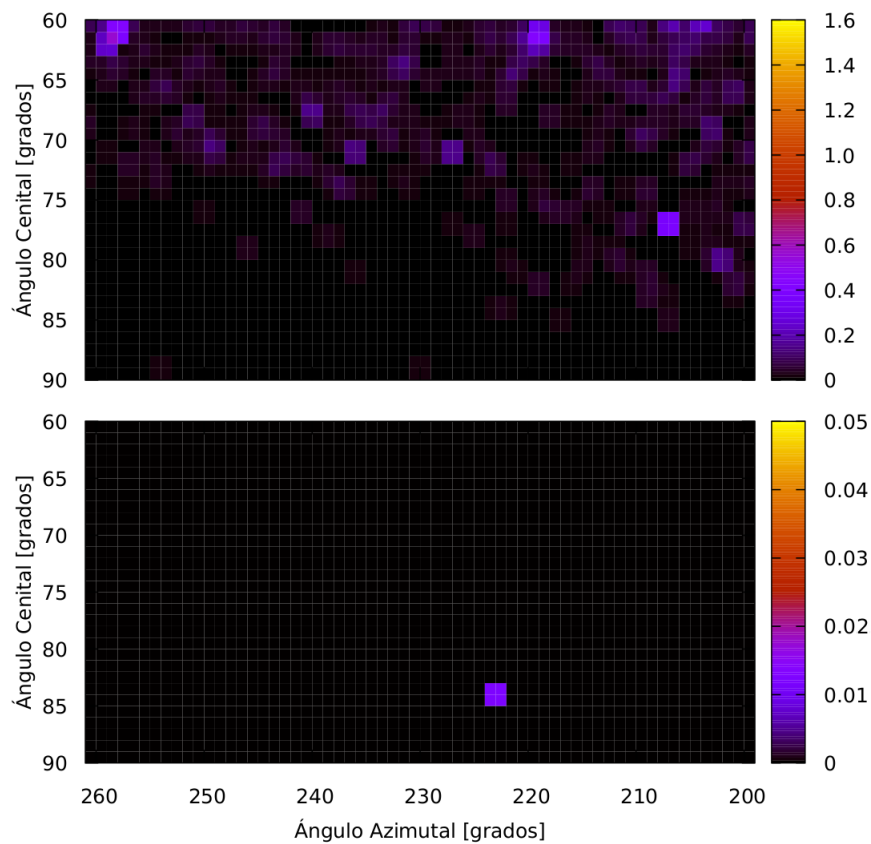
FIGURA 3.8: Flujo de muones que atraviesa el modelo #3 del volcán Galeras y arriba al punto B en función de la dirección de incidencia. El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$.



Sin embargo, para resolver variaciones en la densidad media a lo largo de la trayectoria trazada por los muones incidentes, deben tenerse en cuenta aspectos como el flujo de muones (en 86400 s), la topografía del volcán y los ángulos cenitales a los cuales el flujo muónico es bajo. Previamente, en el capítulo 2, se determinó que por encima de los 85° cenitales el flujo de muones de fondo es bajo respecto a ángulos cenitales menores. Adicionalmente, la distancia en roca estándar que deben atravesar los muones en la topografía del volcán, aumenta con el ángulo cenital. Para ilustrar, las direcciones azimutales por encima de los 85° cenitales, superan en promedio los 1092.55 m y 1462.40 m para el punto A y B respectivamente. Debido a estos dos factores, para el volcán Galeras, resulta conveniente ubicar el telescopio de muones en un punto en el cual la zona de interés se encuentre en

una dirección superior a los 85° de cenit. Ahora bien, la figura 3.9 esquematiza el flujo de muones que atraviesa la estructura del volcán Galeras e incide sobre el punto A.

FIGURA 3.9: Flujo de muones que atraviesa el modelo del volcán Galeras y arriba al punto A en función de la dirección de incidencia. Volcán de modelo #1 (superior) y resta entre el flujo obtenido para el modelo #2 - modelo #1 (inferior). El código de color representa valores de $[Muones\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}]$.



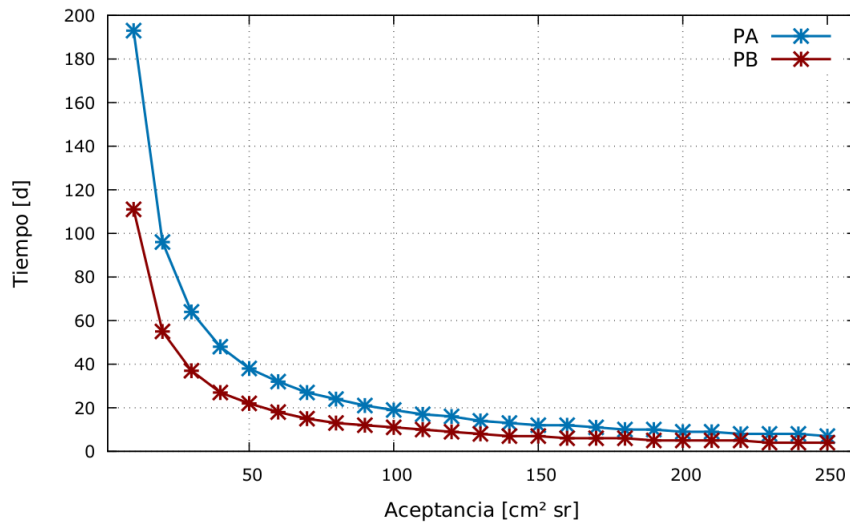
A diferencia del punto B, todos los muones en el rango cenital considerado que arriban al punto A, atraviesan la estructura del volcán Galeras conformada por roca estándar, como puede observarse en la figura 2.8. Por esta razón, la figura anterior no muestra explícitamente la topografía del cono volcánico. Adicionalmente, la distancia y la diferencia de altitudes entre el cráter y el punto A es de 547.66 m y 110 m respectivamente, con lo cual el cilindro que representa la chimenea volcánica se ubica entre los 78° - 90° , zona en la cual el flujo es bajo para el punto A y sólo se presenta aumento en el flujo para una dirección de incidencia, como se observa en la figura 3.9.

Finalmente, a partir de la comparación entre las imágenes obtenidas para los dos modelos considerados del volcán Galeras y teniendo en cuenta los resultados de la figura 3.2 para las dos densidades del modelo, se puede inferir que el flujo de muones de lluvias atmosféricas extendidas que incide sobre un punto de observación cercano al volcán Galeras para un tiempo de simulación de 1 día (86400 s), resulta favorable sobre el punto B. Se conoce que valores superiores en el flujo muónico que atraviesa el cuerpo geológico, permiten una mejor visualización de las variaciones de densidad en la estructura interna del volcán, por lo cual convendría considerar un flujo incidente del orden de semanas o meses sobre los puntos A y B para efecto de comparación y análisis de la importancia del punto A.

3.3 TIEMPO DE EXPOSICIÓN

En adición a los objetivos propuestos para el presente trabajo, se ha realizado una estimación del tiempo de exposición que se requiere para resolver diferencias de opacidad con densidades $\rho = 2.650 \text{ g/cm}^3$ y $\rho = 0.7 \text{ g/cm}^3$, con base en el flujo de muones que atraviesa la estructura del volcán Galeras e incide sobre los puntos A y B. Teniendo en cuenta la condición de factibilidad obtenida en Lesparre et al. (2010) [21], se prosigue a calcular el tiempo de exposición en función de la aceptación del telescopio y se esquematiza en la figura 3.10 para los puntos A y B.

FIGURA 3.10: Tiempo de exposición en función de la aceptación del telescopio de muones. Puede observarse que el punto B presenta menores tiempos de exposición que el punto A.



En la figura anterior puede notarse que por debajo de $\approx 25 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ el tiempo de exposición se encuentra por encima de un mes para los dos puntos y alcanza valores de hasta 6 meses.

Sin embargo si se construye un telescopio con una aceptación superior a $50 \text{ cm}^2 \text{sr}$, el tiempo de exposición se reduce a valores menores a un mes, lo cual resulta favorable para la aplicación de la técnica de muongrafía sobre volcanes en Colombia, para el proyecto MuTe. Se recomienda realizar un aumento en el tiempo de simulación para futuras aplicaciones del método desarrollado, con el fin de reducir las direcciones de incidencia que poseen un flujo nulo y obtener una mejor estimación del tiempo de exposición para los puntos a analizar, en las cercanías de estructuras geológicas.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un método que permite estimar el flujo de muones que atraviesa una estructura geológica arbitraria e incide sobre un punto de observación cercano a la misma. Con base en parámetros iniciales como los datos topográficos de la estructura geológica, las coordenadas geográficas del punto de observación, la densidad del material que conforma el modelo de la estructura y la geometría del detector, el método facilita la estimación del flujo muónico de fondo, la distancia máxima que recorren los muones incidentes en el material que conforma la estructura, la distancia que deben atravesar los muones en la topografía, para cada dirección de incidencia dada por ángulos azimutal y cenital en los rangos establecidos por la apertura del detector y finalmente, el flujo de muones que atraviesa la estructura e incide sobre el punto de observación.

Teniendo en cuenta el método desarrollado, se aplicó sobre el volcán Galeras y se hallaron los dos puntos (Punto A y Punto B) de mayor conveniencia para la ubicación de un telescopio de muones que pueda ser empleado en aplicaciones de muografía volcánica. El análisis se realizó con base en la distancia recorrida por los muones de lluvias atmosféricas extendidas a través de la estructura del Galeras y la accesibilidad de las diferentes zonas del volcán¹.

A partir de la apertura angular del detector diseñado para el proyecto MuTe, un modelo homogéneo de densidad de roca estándar para el volcán Galeras y el flujo muónico de fondo obtenido por simulación, se aplicaron los códigos² desarrollados que permitieron estimar el flujo de muones que atraviesa el volcán por cada dirección de incidencia y arriba a los puntos seleccionados para la ubicación del telescopio.

Adicionalmente, se realizó una estimación del tiempo de exposición requerido para resolver diferencias de opacidad con densidades de $\rho = 2.650 \text{ g/cm}^3$ y $\rho = 0.7 \text{ g/cm}^3$, en función de la aceptación del telescopio. De esta forma, teniendo en consideración la condición de factibilidad mostrada en Lesparre et al. (2010) [21], se facilita la aceptación que requiere

¹Ver capítulo 2 y Anexo 4.

²Los códigos pueden encontrarse en Bitbucket, en el siguiente enlace: https://bitbucket.org/lagocolombia/flujo_muones, para todos los miembros adjuntos a la colaboración.

el diseño de un telescopio de muones que se desee ubicar sobre el volcán Galeras, para aplicaciones de muongrafía volcánica.

Finalmente, el método desarrollado permite seleccionar los puntos más convenientes para la ubicación de un telescopio de muones en las cercanías de algún volcán, mediante la estimación del flujo de muones que incide sobre los diferentes puntos alrededor de la estructura. De esta forma, el método puede ser implementado sobre varios volcanes en Colombia para determinar cual de estas estructuras geológicas resulta más apropiada para la aplicación de la técnica de muongrafía volcánica.

DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Los avances realizados en el desarrollo de este trabajo fueron presentados como contribuciones a los siguientes eventos:

- Asorey, H., Núñez, L.A., Sarmiento-Cano, C., Suárez-Durán, M., Valencia-Otero, M. (Junio, 2015). Simulación de la Componente Muónica en Cascadas de Rayos Cósmicos - Estimando el flujo sobre estructuras geológicas. 1 Simposio Andino de Astrofísica Relativista. Congreso llevado a cabo en Bucaramanga, Colombia.
- Asorey, H., Núñez, L.A., Sarmiento-Cano, C., Suárez-Durán, M., Valencia-Otero, M. (Julio, 2015). Simulación de la Componente Muónica en Cascadas de Rayos Cósmicos para el Proyecto MuTe. 2 Workshop de Astronomía en los Andes. Congreso llevado a cabo en Bogotá, Colombia.
- Asorey, H., Núñez, L.A., Sarmiento-Cano, C., Suárez-Durán, M., Valencia-Otero, M. (Noviembre, 2015). Simulation of the Muon Component of Extensive Air Showers for MuTe Project. 1 Colombia-ICRANet Julio Garavito Armero Meeting on Relativistic Astrophysics. Congreso llevado a cabo en Bucaramanga, Colombia.

REFERENCIAS

- [1] M. Suárez-Durán. *Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [2] V. F. Hess. Observations in low level radiation during seven free balloon flights. *Phys. Zeit.*, 13:1084–1091, 1912.
- [3] J. Blümer, R. Engel, and J. R. Hörandel. Cosmic rays from the knee to the highest energies. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 63(2):293–338, 2009.
- [4] W. F. Hanlon. *The Energy Spectrum of Ultra High Energy Cosmic Rays Measured by the High Resolution Fly’s Eye Observatory in Stereoscopic Mode*. ProQuest, 2008.
- [5] 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 Energía Atómica, Argentina, 2012.
- [6] C. D. Anderson and S. H. Neddermeyer. Note on the nature of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.*, 51:884, 1937.
- [7] D. Heck, J. Knapp, J. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. *A Monte-Carlo code to simulate extensive air showers-report FZKA 6019*. 1998.
- [8] B. Rossi. *Cosmic Rays*. McGraw-Hill, 1964.
- [9] T. K. Gaisser. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1990.
- [10] E. P. George. Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonwealth Engineer*, 455, 1955.
- [11] L.W. Alvarez, J.A. Anderson, F. El Bedwei, M. Sharkawi, and L. Yazolino. Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, 167(3919):832–839, 1970.

- [12] M. Furlan, A. Rigoni, S. Vanini, G. Zumerle, P. Checchia, L. Cossutta, G. Bettella, P. Zanuttigh, P. Calvini, and L. Dassa. Application of muon tomography to detect radioactive sources hidden in scrap metal containers. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 61(4):2204–2209, 2014.
- [13] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Meleg, G. Surányi, and D. Varga. Ccc-based muon telescope for examination of natural caves. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions*, 2(2):781–800, 2012.
- [14] K. Gnanvo, L. V. Grasso, M. Hohlmann, J. B. Locke, A. Quintero, and D. Mitra. Imaging of high-z material for nuclear contraband detection with a minimal prototype of a muon tomography station based on gem detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 652(1):16–20, 2011.
- [15] M. Hohlmann, P. Ford, K. Gnanvo, J. Helsby, D. Pena, R. Hoch, and D. Mitra. Geant4 simulation of a cosmic ray muon tomography system with micro-pattern gas detectors for the detection of high-materials. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 56(3):1356–1363, 2009.
- [16] H. Fujii, K. Hara, S. Hashimoto, F. Ito, H. Kakuno, S. H. Kim, M. Kochiyama, K. Nagamine, A. Suzuki, and Y. Takada. Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2013(7):073C01, 2013.
- [17] H. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, M. Takeo, J. Oikawa, T. Ohminato, Y. Aoki, E. Koyama, and H. Tsuji. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of mt. asama, japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(1):104–113, 2007.
- [18] H. Tanaka, T. Kusagaya, and H. Shinohara. Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nature communications*, 5, 2014.
- [19] E. V. Bugaev, Yu D. Kotov, and I. L. Rozental. Kosmicheskie myuony i neutrino.(cosmic muons and neutrinos). 1970.
- [20] T. Hebbeker and C. Timmermans. A compilation of high energy atmospheric muon data at sea level. *Astroparticle Physics*, 18(1):107–127, 2002.
- [21] N. Lesparre, D. Gibert, J. Marteau, Y. Déclais, D. Carbone, and E. Galichet. Geophysical muon imaging: feasibility and limits. *Geophysical Journal International*, 183(3):1348–1361, 2010.

- [22] H. Tanaka, T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara, and H. Taira. Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of satsuma-iwojima volcano, japan. *Geophysical Research Letters*, 36(1), 2009.
- [23] N. Lesparre, D. Gibert, J. Marteau, J.C. Komorowski, F. Nicollin, and O. Coutant. Density muon radiography of la soufrière of guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geophysical Journal International*, 190(2):1008–1019, 2012.
- [24] D. Carbone, D. Gibert, J. Marteau, M. Diament, L. Zuccarello, and E. Galichet. An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy). *Geophysical Journal International*, 196(2):633–643, 2014.
- [25] W.R. Nelson, H. Hirayama, and D.W.O. Rogers. Report slac 265 (1985), 2010.
- [26] J.N. Capdevielle. A monte carlo generator for cosmic-ray collisions. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 15(6):909, 1989.
- [27] P.K.F. Grieder. Report ins-j125 (1970), Inst. for Nuclear Studies, Univ. of Tokyo;. In *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf*, 1979.
- [28] M. Nagano, D. Heck, K. Shinozaki, N. Inoue, and J. Knapp. Comparison of agasa data with corsika simulation. *Astroparticle Physics*, 13(4):277–294, 2000.
- [29] J. Knapp, D. Heck, and G. Schatz. *Comparison of hadronic interaction models used in air shower simulations and of their influence on shower development and observables*, volume 5828. FZKA, 1996.
- [30] T. Antoni, W.D. Apel, K. Bekk, K. Bernlöhr, E. Bollmann, K. Daumiller, P. Doll, J. Engler, F. Fessler, and H.J. Gils. Test of high-energy interaction models using the hadronic core of eas. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 25(10):2161, 1999.
- [31] S. Macmillan and C. Finlay. The international geomagnetic reference field. *Geomagnetic Observations and Models*, 5:265, 2010.
- [32] L. Desorgher. Magnetocomics soft-ware user manual, 2004.

BIBLIOGRAFÍA

- ASOREY, Hernán. Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación. Tesis de Doctorado en Física. Argentina: Instituto Balseiro. Universidad Nacional de Cuyo. Comisión Nacional de Energía Atómica, 2012.
- DESORGHER, Laurent. Magnetocomics Soft-ware User Manual. 2004.
- GAISSER, Thomas K. Cosmic rays and particle physics. Cambridge University Press, 1990
- HECK, D., et al. A Monte-Carlo code to simulate extensive air showers-report FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- LESPARRE, Nolwenn, et al. Density muon radiography of La Soufriere of Guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. Geophysical Journal International, 2012, vol. 190, no 2, p. 1008-1019.
- LESPARRE, Nolwenn., et al. Geophysical muon imaging: feasibility and limits. Geophysical Journal International, 2010, vol. 183, no 3, p. 1348-1361.
- ROSSI, Bruno Benedetto. Cosmic Rays. McGraw-Hill, 1964.
- TANAKA, Hiroyuki KM, et al. Cosmicray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of SatsumaIwojima Volcano, Japan. Geophysical Research Letters, 2009, vol. 36, no 1.
- TANAKA, Hiroyuki KM, et al. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. En: Earth and Planetary Science Letters, 2007, vol. 263, no 1, p. 104-113.
- TANAKA, Hiroyuki KM; KUSAGAYA, Taro; SHINOHARA, Hiroshi. Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. En: Nature communications, 2014, vol. 5.

SELECCIÓN DE PUNTOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE MUONES SOBRE EL VOLCÁN GALERAS

A partir de los puntos sugeridos por el SGC³, se obtuvieron los perfiles de elevación entre cada uno de estos y el cráter volcánico. A continuación, en la figura 1 se muestran los 8 puntos y su respectivo perfil de elevación. Con base en estos perfiles, se tuvieron en cuenta aspectos como la distancia horizontal y la diferencia de altitudes entre el punto y el cráter y se realizó una comparación con la distancia límite de penetración para muones en roca estándar. Además se tuvo en cuenta la presencia de estructuras cercanas como el anfiteatro, el cual rodea el cono volcánico y no representa una mayor fuente de información de la zona de interés. Considerando estos aspectos, se eligen los puntos 1, 5 y 8, y se extraen los datos de los perfiles de elevación correspondientes, para un posterior análisis de la selección del punto más conveniente para la disposición del telescopio.

³ver figura 2.3

FIGURA 1: Perfiles de elevación obtenidos con Google Earth, para los diferentes puntos sugeridos por el SGC. Las líneas negras representan la ubicación de cada punto, mientras que las líneas rojas muestran el punto en el cual se encuentra el cráter para cada perfil de elevación.

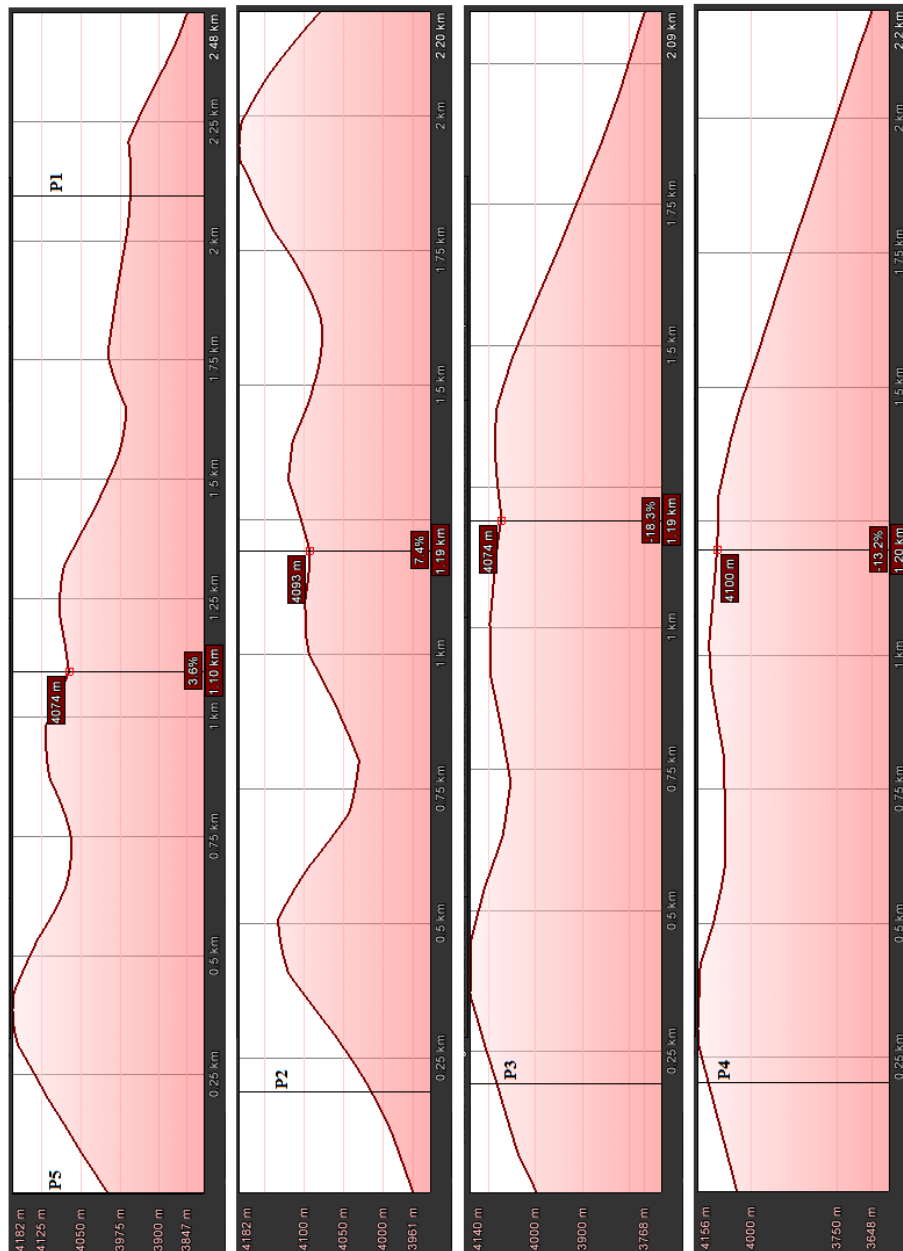


Figura obtenida de Google Earth⁴.

⁴Perfiles de elevación obtenidos con *Google Earth*: <http://www.google.com/earth/>

FIGURA 2: Figura 1:(Continuación)

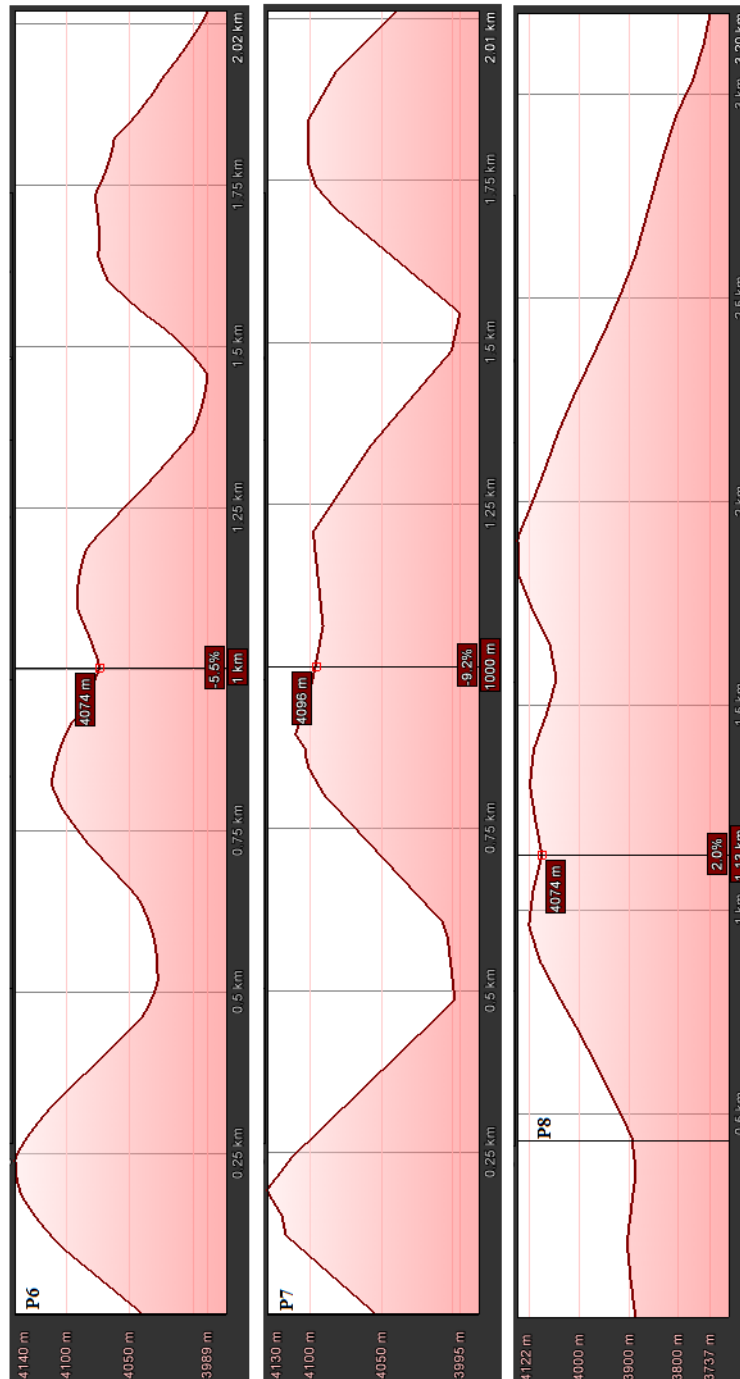


Figura obtenida de Google Earth⁵.

⁵Perfiles de elevación obtenidos con *Google Earth*: <http://www.google.com/earth/>

FIGURA 3: Perfil del volcán Galeras obtenido con Google Earth desde el punto 1 (0,3964) al punto 5 (2000, 4064), con el cráter volcánico ubicado entre los dos puntos (1000, 4074).

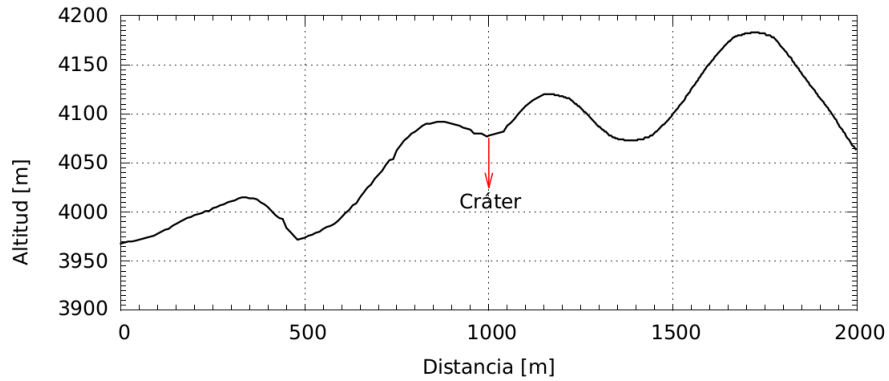
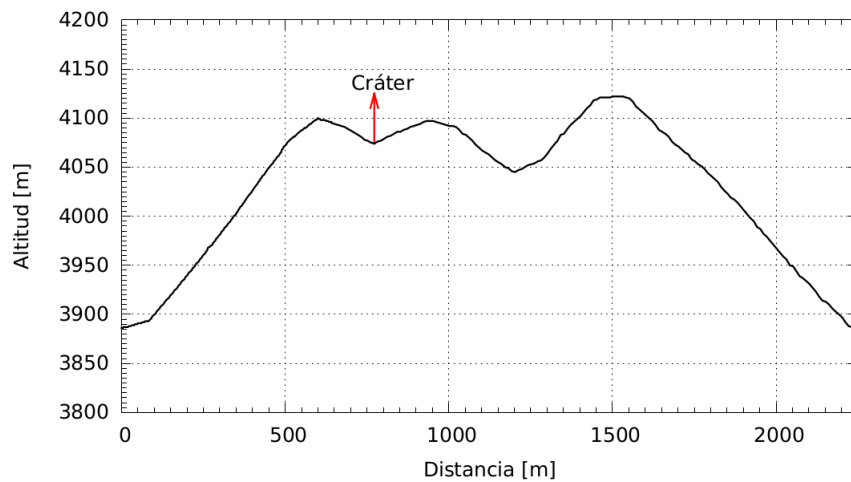


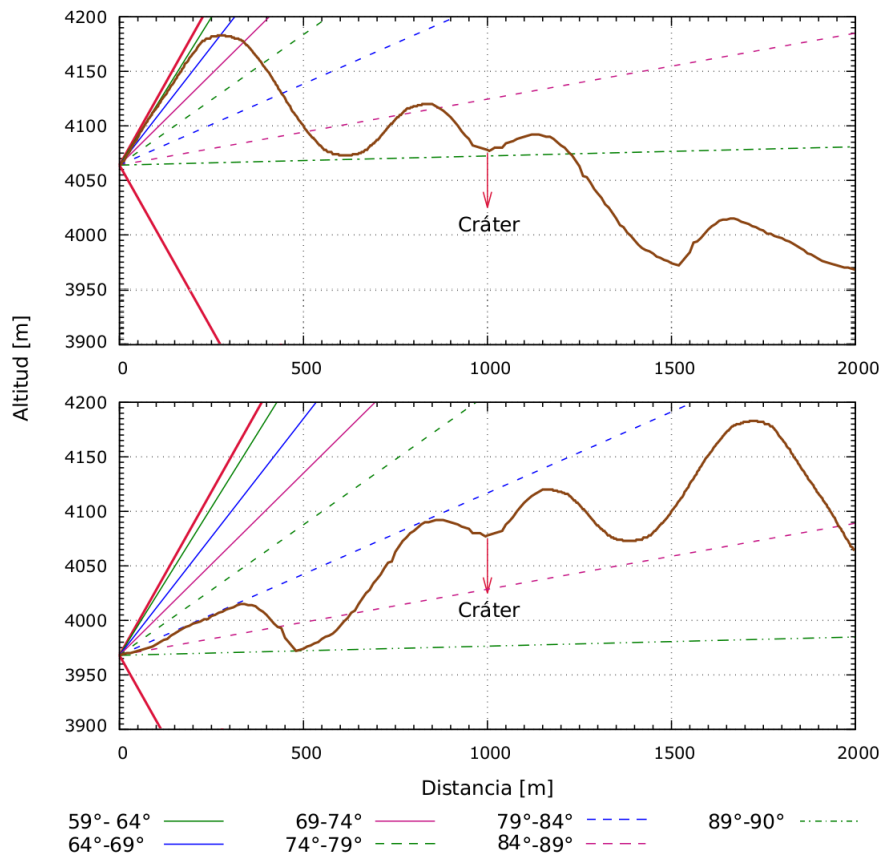
FIGURA 4: Perfil del volcán Galeras obtenido con Google Earth para el punto 8 (0,3893), con el cráter volcánico en el punto señalado (772, 4074).



En el perfil mostrado en la figura 3 se tiene que, los puntos extremos representan las zonas en las cuales se ha considerado ubicar la cámara y entre estos dos, el punto de mayor altitud corresponde a aquel de fácil acceso. Adicionalmente, el cráter volcánico se encuentra ubicado a mitad de camino entre los dos puntos y pueden observarse dos regiones de menor altitud que separan el anfiteatro del cono volcánico. Por otra parte, en la figura 4, el punto 8 se encuentra ubicado a cero metros en el eje x y no sólo puede notarse una de las regiones de menor altitud mencionadas, sino que también se observa una distancia horizontal poco mayor a 2000 metros, distancia máxima aproximada recorrida por los muones en roca estándar.

De acuerdo al perfil del volcán Galeras obtenido para los puntos 1, 5 y 8, se prosigue a ubicar el telescopio de muones en estas tres posiciones. La figura 5 y 6 muestran como inciden los muones de cascadas atmosféricas a través del volcán, para las diferentes bandas angulares tomadas en consideración en la figura 2.7.

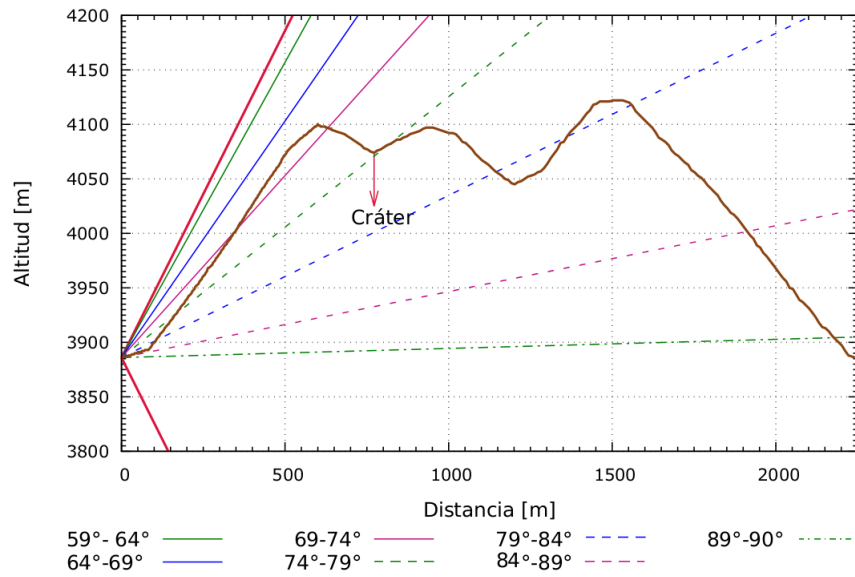
FIGURA 5: Direcciones de incidencia de muones sobre el telescopio ubicado en el punto 1 (inferior) y 5 (superior), para las bandas angulares consideradas. A diferencia del punto 1, el punto 5 se encuentra en la zona de fácil acceso, debido a la cercanía con la carretera. Cada una de las líneas de incidencia, representa la línea trazada para el ángulo medio de cada una de las bandas angulares de la figura 2.7.



Así pues, ubicar el telescopio de muones en el punto 5 nos brinda muy poca profundidad en la estructura interna del cráter del volcán y adicionalmente, la mayor parte del flujo incidente se encontraría atravesando el anfiteatro, el cual no proporciona información valiosa para la construcción de un modelo adecuado de la chimenea volcánica. Por otra parte, el punto 1 nos facilita el acceso a unos 100 m de profundidad en la estructura de la chimenea, por lo cual resulta ser la opción más adecuada.

Sin embargo, desplazar unos cuantos metros la ubicación del detector hacia el espacio vacío que se encuentra entre la estructura del anfiteatro y el cono activo, aumenta el número de trayectorias de muones que pasan a través de la chimenea y llegan a la cámara (ver figura 7).

FIGURA 6: Direcciones de incidencia de muones sobre el telescopio ubicado en el punto 8 (cercano a la vía de acceso), para las bandas angulares consideradas. Cada una de las líneas de incidencia, representa la línea trazada para el ángulo medio de cada una de las bandas angulares de la figura 2.7.



Finalmente, ubicar el telescopio en el punto 8 permite el acceso a aproximadamente 180 metros de profundidad en la estructura de la chimenea volcánica y se tiene una distancia horizontal de un poco más de 2000 metros. A partir de estos resultados, en el presente trabajo se considerarán el punto cercano al punto 1 (punto 1a) y el punto 8, como ideales para la disposición del telescopio de muones en las cercanías del volcán Galeras. A lo largo de los capítulos en el presente texto, los puntos 1a y 8 serán referenciados como punto A y B respectivamente.

FIGURA 7: Dirección de incidencia de muones sobre el telescopio, para las bandas angulares tomadas en consideración en un punto cercano al punto 1. Cada una de las líneas de incidencia, representa la línea trazada para el ángulo medio de cada una de las bandas angulares de la figura 2.7. Puede notarse que más de la mitad de las líneas de incidencia pasan a través de la estructura volcánica.

