

Desarrollo de una herramienta de simulación para el estudio de estructuras geológicas mediante muografía

Jorge Alfredo Jaimes Teherán

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática
Bucaramanga
2023

**Desarrollo de una herramienta de simulación para
el estudio de estructuras geológicas mediante
muografía**

Jorge Alfredo Jaimes Teherán

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Sistemas
e Informática**

Director:

Jesús Peña Rodríguez, Ph.D

Codirectores:

Lola X. Bautista, Ph.D

Luis A. Núñez, Ph.D

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática
Bucaramanga
2023

Agradecimientos

Dedico estas palabras a quienes han sido pilares fundamentales en mi formación y en la realización de este trabajo:

A **mi madre**, Claudia Teherán, quien con su inagotable amor, sacrificio y tenacidad ha sido mi guía y mi mayor inspiración. Su fortaleza y constante apoyo me han impulsado en cada paso de este camino, recordándome siempre la importancia de la perseverancia y la pasión. Gracias, mamá, por ser el faro que le da luz a mi vida.

A **María Fernanda**, por su amor incondicional y constante apoyo en cada etapa de este proceso. A pesar de las circunstancias y los roles que hemos desempeñado en nuestras vidas, su presencia y aliento han sido fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por estar a mi lado, guiándome y creyendo en mí.

Mi director, Jesus Peña, por su invaluable orientación, paciencia y expertise. Su guía ha sido fundamental en la formación de este trabajo y en mi desarrollo profesional.

A mis **co-directores**, Luis Nuñez y Lola Bautista, por acompañarme en mi crecimiento académico y ser partícipes esenciales de este logro.

Contenido

Agradecimientos

Introducción	2
1. Introducción	3
1.1. Problema de Investigación	5
2. Objetivos	6
2.1. Objetivo General	6
2.2. Objetivos Específicos	6
3. Muografía	7
3.1. Cascadas de rayos cósmicos	7
3.2. Muones	8
3.2.1. Técnicas de detección	9
3.3. ¿Qué es la muografía?	10
3.3.1. Aplicaciones de la muografía	10
3.4. Simulaciones en muografía	12
3.4.1. Modelos semi-empíricos	12
4. MUographY Simulation Code (MUYSC)	19
4.1. MUYSC: software modular	20
4.2. Topografía	21
4.3. Trazado de rayos	25
4.4. Muografía	30
4.4.1. Corrección de altura	30
4.4.2. Pérdida de energía del muón	31
4.4.3. Estimación de la energía	33
4.4.4. Flujo integrado	34
4.4.5. Caracterización Muográfica de Estructuras Geológicas	37
4.4.6. Evaluación Puy Dôme	39
4.5. Parámetros del telescopio	39
5. Conclusiones	47
.1. Apéndices	54
.1.1. Apéndice A: Documentación MUographY Simulation Code (MUYSC)	54

Índice de figuras

3.1.	La cascada atmosférica presenta tres componentes: electromagnética, muónica y hadrónica. La electromagnética, predominante, puede originarse de las otras dos. Mientras la muónica se mantiene constante, la hadrónica domina la región central de la cascada [58].	7
3.2.	Representación esquemática de la cadena de simulación Muraves: En el primer paso, se muestra la generación de muones desplegada por CRY; en el segundo paso, se transportan los muones en la estructura utilizando PUMAS. Finalmente, se emplea GEANT4 para simular la detección de los muones y se aplican algoritmos basados en umbrales para la digitalización [22].	16
3.3.	El diagrama ilustra el flujo de trabajo de Meiga, el cual conecta objetos externos (color azul) con objetos de Meiga (color verde). Meiga se apoya de GEANT4, para facilitar la construcción y simulación de detectores de diversas configuraciones y posiciones en el evento que simule el usuario [54].	17
3.4.	ARTI emplea CORSIKA, MAGCOS y GEANT4 en todo el marco de simulación, para calcular con exactitud la señal en el detector del flujo integrado de muones, según la acumulación integrada de radiación cósmica [24].	18
4.1.	MUYSC se compone de cuatro modulos; el primer modulo se encarga de la adquisición de datos interactuando con un servidor de la NASA; el segundo modulo calcula las distancias recorridas por los muones en el objeto de estudio; el tercer modulo despliega la muografía y el cuarto modulo ajusta las parámetros del telescopio.	21
4.2.	El usuario envía una petición a través de la app para obtener los datos topográficos del objeto de interés, los cuales son solicitados al servidor.	22
4.3.	Estructura geológica del Cerro Machín, ubicado en Colombia.	23
4.4.	Estructura geológica del Monte Fuji, ubicado en Japón.	23
4.5.	Estructura geológica del Monte Vesubio, ubicado en Italia.	23
4.6.	Estructura geológica del volcán Cotopoxi, ubicado en Ecuador.	23
4.7.	La gráfica muestra la topografía del cerro Machín. Se destacan dos ubicaciones de interés, cuyo formato de coordenadas se presenta en forma de tuplas (latitud, longitud): el telescopio, representado por un punto rojo, tiene coordenadas (4.491984, -75.380085) el punto de referencia del telescopio, indicado con un punto negro, tiene coordenadas (4.487717, -75.387880).	25

Índice de figuras

4.8. Trayectoria central de las partículas sobre el cerro Machín.	26
4.9. La figura de la izquierda representa el barrido sobre ángulos azimutales, rango $(-60^0, 60^0)$. La imagen de la derecha representa el barrido sobre ángulos cenitales, rango $(-10^0, 80^0)$. La elevación es representada en metros y las líneas negras definen el cono angular de observación.	27
4.10. Corte del cerro Machín; el eje principal de observación del telescopio abarca altitudes de la montaña que oscilan entre los 2500 y 2550 metros sobre el nivel del mar.	28
4.11. La figura ilustra el proceso de elaboración del mapa de distancias. Cada píxel corresponde a un cálculo de la longitud de una sección transversal de la montaña. El panel izquierdo exhibe las secciones transversales de la montaña, mientras que el panel derecho muestra la matriz de distancias, representando la trayectoria que el muón recorre dentro de la estructura geológica.	29
4.12. Mapa de distancias del cerro Machín, la barra de colores indica las distancias de cada píxel, máxima distancia que tendrá que recorrer el muón ≈ 1281 metros.	29
4.13. Flujo de muones, calculado mediante el modelo Gaisser/Tang a 0 metros sobre el nivel del mar y 4000 metros sobre el nivel del mar.	31
4.14. La figura muestra el modelo de la pérdida de energía del muón (línea solida) respecto a los datos de Groom (puntos azules) para energía en rangos de 10^{-2} GeV a 10^3 GeV y el error en porcentaje del ajuste del modelo a los datos experimentales.	32
4.15. Energía mínima que un muón necesita para atravesar 100 m de roca estándar.	34
4.16. Flujo integrado para una distancia de 100 metros de roca estándar, con un ángulo de incidencia de 20°	35
4.17. Representación simulada del flujo de muones correspondiente al cerro Machín bajo condiciones de cielo despejado, situada en las coordenadas geográficas $(4,491984, -75,380085)$	36
4.18. Muograma obtenido de la estructura geológica el cerro Machín.	36
4.19. Simulación de la opacidad del Cerro Machín	37
4.20. Simulación de la tramitancia del Cerro Machín	38
4.21. Simulación de la densidad del Cerro Machín	38
4.23. El rastreo de los muones que atraviesan el hodoscopio de muones es esencial para determinar su trayectoria. En este proceso, los píxeles $m(i, j)$ y $n(k, l)$ definen una trayectoria $r_{m,n}$ que se extiende entre las capas del hodoscopio. Importante mencionar que la longitud de esta trayectoria está condicionada tanto por la separación entre las capas del hodoscopio, denominada D , como por la distancia relativa E entre los píxeles en cuestión [57].	39

4.22. Comparación entre datos (superior) y MUYSC (medio) del flujo de muones sobre el Puy Dôme. El ratio de simulación/datos (inferior) evaluando la eficiencia de MUYSC. El promedio del ratio muestra que MUYSC sobre estima el flujo de muones porque asume la eficiencia del detector como 100%.	40
4.24. Parametrización del telescopio MuTe (Muon Telescope) para $N_x = N_y = 30$, lado del píxel $d = 4cm$ y separación de las barras $D = 250cm$. La detección máxima del área de MuTe es $\approx 14,4cm^2$, el ángulo solido para trayectorias perpendiculares alcanza $\approx 1,02x10^{-3}sr$ y la aceptación máxima es de $\approx 3,6cm^2sr$ para $r_{0,0}$	42
4.25. En la figura, se presenta una comparativa de resultados. A la izquierda, se muestran los resultados derivados de MUYSC. Por contraste, a la derecha, se exhiben los hallazgos reportados por Gibert et al. [27]. Es importante destacar que ambos conjuntos de datos trabajan con una aceptación máxima de $64 cm^2 sr$ y una apertura angular de $\pm 57^\circ$. . .	43
4.26. En la ilustración proporcionada, a la izquierda se despliegan los hallazgos obtenidos mediante MUYSC, en contraposición a los resultados reportados por Gibert et al. [11] que se visualizan a la derecha. Ambas representaciones operan bajo una aceptación máxima de $5,54 cm^2 sr$. .	44
4.27. A la izquierda los resultados obtenidos por MUYSC, mientras que a la derecha se encuentran los resultados de Lesparre et al. [39]. Tiene una aceptación máxima de $12,1 cm^2 sr$	44
4.28. A la izquierda la representación de la resolución angular y aceptación de MUYSC y a la derecha de Lesparre et al [38]. Aceptancia máxima en $r_{0,0}$ de $25 cm^2 sr$ y un ángulo sólido máximo de $15,6 \times 10^{-3} sr$	45
4.29. Aceptancia de Uchida máxima de $34,57 cm^2 sr$, aceptación máxima de Presti $1,04 cm^2 sr$	46

Índice de cuadros

3.1. Parámetros del modelo Bugaev para espectros de energía de muones a nivel del mar.	14
--	----

Resumen

Título: Desarrollo de una herramienta de simulación para el estudio de estructuras geológicas mediante muografía *

Autor: Jorge Alfredo Jaimes Teherán**

Palabras Clave: muografía, framework, simulación, opacidad, volcán Cerro Machín.

Descripción: La muografía es una técnica de imagen no invasiva que utiliza muones, partículas derivadas de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre. Estas partículas poseen propiedades similares a los electrones, pero con una masa 200 veces superior. La muografía ha encontrado diversas aplicaciones en campos como la geología, la ingeniería civil, la detección de residuos nucleares, entre otros.

Las simulaciones desempeñan un papel crucial en el estudio muográfico de diversas estructuras geológicas, ya que evitan gastos innecesarios al transportar equipos sin un análisis preliminar. Sin embargo, en la actualidad, llevar a cabo simulaciones de muografía puede ser una tarea compleja. No existe un software que cubra todo el proceso de simulación de principio a fin. Los marcos de simulación existentes requieren el uso de diferentes softwares, con distintos lenguajes de programación e instalaciones complicadas, lo que dificulta la labor del investigador. Además, estos marcos de simulación a menudo conllevan una complejidad computacional considerable.

En este contexto, proponemos MUYSC, un marco de simulación integral desarrollado en Python. Este framework de código abierto minimiza la complejidad computacional, permitiendo crear un muograma de cualquier estructura geológica en el mundo en cuestión de minutos. MUYSC proporciona al investigador información crucial, como el flujo integrado de muones, la opacidad del material, la densidad y simulaciones de los parámetros del telescopio. Por tanto, MUYSC es una herramienta poderosa y accesible para la comunidad científica, facilitando la realización de investigaciones muográficas a un ritmo más rápido y con un costo significativamente menor.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Jesús Peña Rodríguez, Doctor en Física Codirectores: Luis A. Nuñez, Doctor en Ciencias Naturales. Lola Xiomara Bautista, Doctora en Ingeniería de Sistemas y Computación.

Abstract

Title: Development of a simulation tool for the study of geological structures by means of muography. *

Author: Jorge Alfredo Jaimes Teherán **

Keywords: muography, framework, simulation, opacity, Cerro Machín volcano.

Description: Muonography is a non-invasive imaging technique that uses muons, particles derived from the interaction of cosmic rays with the earth's atmosphere. These particles possess properties similar to electrons, but with a mass 200 times higher. Muonography has found diverse applications in fields such as geology, civil engineering, nuclear waste detection, among others.

Simulations play a crucial role in the muographic study of various geological structures, as they avoid unnecessary expenses when transporting equipment without a preliminary analysis. However, at present, carrying out muography simulations can be a complex task. There is no software that covers the entire simulation process from start to finish. Existing simulation frameworks require the use of different software, with different programming languages and complicated installations, which makes the researcher's work difficult. Moreover, these simulation frameworks often involve considerable computational complexity.

In this context, we propose MUYSC, a comprehensive simulation framework developed in Python. This open source framework minimizes computational complexity, allowing to create a muogram of any geological structure in the world in a matter of minutes. MUYSC provides the researcher with crucial information such as integrated muon flux, material opacity, density and telescope parameter simulations. Thus, MUYSC is a powerful and accessible tool for the scientific community, facilitating the conduct of muon research at a faster pace and at a significantly lower cost.

*Bachelor thesis

**Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Advisor: Jesús Peña Rodríguez, PhD. in Physics. Co-advisors: Luis A. Nuñez, PhD. in Natural Science. Lola Xiomara Bautista, PhD. in Computer and Systems Engineering.

1 Introducción

Los muones son partículas subatómicas que pertenecen a la familia de los leptones. Estas partículas son similares a los electrones, pero tienen una masa 200 veces mayor. Los muones son producidos en la atmósfera terrestre como resultado de la interacción de los rayos cósmicos con los átomos de la atmósfera[50]. A medida que los muones viajan a través de la atmósfera, pierden energía y finalmente llegan a la superficie terrestre. A diferencia de las otras partículas (excepto los neutrinos), los muones pueden atravesar estructuras con grandes densidades y longitudes sin ser absorbidos, lo que los hace ideales para aplicaciones en la investigación científica y en la industria[56].

Desde hace varias décadas, los muones han sido objeto de numerosos estudios debido a su importancia en la física de altas energías y en la astrofísica. Los muones también han sido utilizados en aplicaciones prácticas, como la detección de explosivos y la medición de la densidad del suelo [31, 60]. Una de las aplicaciones más recientes de los muones es la muografía, una técnica no invasiva que permite obtener la distribución de densidad interna de un objeto mediante la medida de absorción de los muones que lo atraviesa. Esta técnica facilita el estudio de estructuras como volcanes los cuales pueden causar grandes devastaciones.

Hoy en día la muografía se emplea, para escanear grandes estructuras como pirámides, volcanes, montañas y cavernas[19, 42, 44, 48]. El uso de la muografía proporciona información de la estructura interna del objeto de estudio mediante la medición del flujo de muones que lo cruza, reduciendo costos y riesgos en exploraciones geológicas directas. Para la adquisición de los datos se hace mediante un telescopio de muones. Estos se construyen con tecnologías instrumentales propias de la física de partículas acarreado una complejidad y costo considerable [55].

Un paso importante de un estudio muográfico es el empleo de simulaciones, las cuales nos permiten obtener información importante del desempeño del detector como: la mejor ubicación para el telescopio, el tiempo de registro de datos y los parámetros óptimos de diseño del telescopio para lograr una resolución y aceptación ideal. Existen varios marcos de simulación compuestos por códigos específicos como: CORSIKA, GEANT4, FLUKA, MAGCOS, entre otros [1, 18, 21, 23]. Estos permiten estimar el flujo de muones en un sitio de observación y simular el paso de muones a través del material del objeto de estudio.

Este trabajo presenta Muography Simulation Code, un framework de simulación de muografía que permite el estudio de cualquier estructura geológica en el mundo, usando datos topográficos de la NASA del Shuttle Radar Topography Mission (STRM), obtenemos la topografía para calcular las distancias y densidades que recorrerían los

Introducción

muones a través de ella y obtener el flujo atenuado de las partículas en una imagen digital que revela la densidad interna de la estructura.

1.1. Problema de Investigación

El proceso de muografía implica varias etapas, como la simulación del flujo de muones en una determinada ubicación, la propagación de estos muones a través del material de estudio y el procesamiento y visualización de los datos obtenidos. Actualmente, existen varios softwares disponibles para llevar a cabo cada una de estas etapas, pero ninguno abarca todas las etapas de forma integral [19, 44]. Esta metodología requiere que el usuario tenga conocimiento en varios lenguajes de programación, realizar tareas técnicas de compilación/instalación para poder llevar a cabo un estudio de muografía. Además, los tiempos típicos para obtener una imagen muográfica mediante este enfoque son del orden de horas a días.

Cada una de estas etapas requiere de un software específico, lo que dificulta la implementación de la técnica. Por ejemplo, para estimar el flujo de muones se puede usar el software CORSIKA, mientras que para simular el paso de los muones a través del material se puede usar GEANT4. Además, para procesar y visualizar los datos es necesario contar con otros softwares específicos.

El uso de diferentes softwares para cada paso de la simulación de muografía tiene varias debilidades. En primer lugar, requiere un alto nivel de conocimiento técnico para poder manejar y configurar cada software. En segundo lugar, el proceso de instalación y configuración de cada software es muy técnico y requiere gran esfuerzo. En tercer lugar, la integración de diferentes softwares es difícil, lo que hace que sea difícil obtener resultados consistentes y comparables. En cuarto lugar, las simulaciones pueden demorar varias horas por muograma, escalando a días si se requiere estudiar varios puntos de observación o hacer una reconstrucción tridimensional de densidad.

Para superar estas debilidades, es necesario desarrollar un marco de simulación que abarque todos los pasos de la muografía y sea amigable con el usuario. Un marco de simulación que integre todos los pasos de la muografía permitiría realizar simulaciones de manera rápida y sencilla, y permitiría obtener resultados comparables y consistentes.

En este trabajo se presenta una herramienta de simulación de código abierto (MUYSC) que busca facilitar este proceso, cubriendo todas las etapas necesarias para llevar a cabo un estudio de muografía: desde la generación de la estructura geológica hasta la simulación de los flujos de muones y el cálculo de las características del detector.

2 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Desarrollar una herramienta de simulación para muografía que determine la densidad de la estructura geológica, el tiempo de observación y las características intrínsecas del detector.

2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un algoritmo basado en modelos semiempíricos para el flujo de muones a través de estructuras geológicas.
- Desarrollar el ambiente de visualización de la simulación del flujo de muones sobre estructuras geológicas.
- Diseñar e implementar un algoritmo de simulación de imágenes muográficas según la configuración del telescopio que mide el flujo de muones emergentes de la estructura geológica.
- Validar la confiabilidad de los algoritmos mediante comparaciones con otros softwares de simulación implementados en el campo de la muografía.
- Despliegue de la librería en la pagina oficial de Python con su respectiva documentación y un repositorio en GitHub.

3 Muografía

3.1. Cascadas de rayos cósmicos

Las cascadas de rayos cósmicos, también conocidas como lluvias aéreas extendidas (EAS, por sus siglas en inglés), se producen cuando un rayo cósmico primario (un protón de alta energía que generalmente se origina fuera del Sistema Solar) entra en la atmósfera terrestre y choca con un núcleo atómico en el aire. Esta colisión genera una serie de reacciones en cadena que resultan en la creación de muchas partículas secundarias, dando lugar a lo que se conoce como una cascada de partículas.

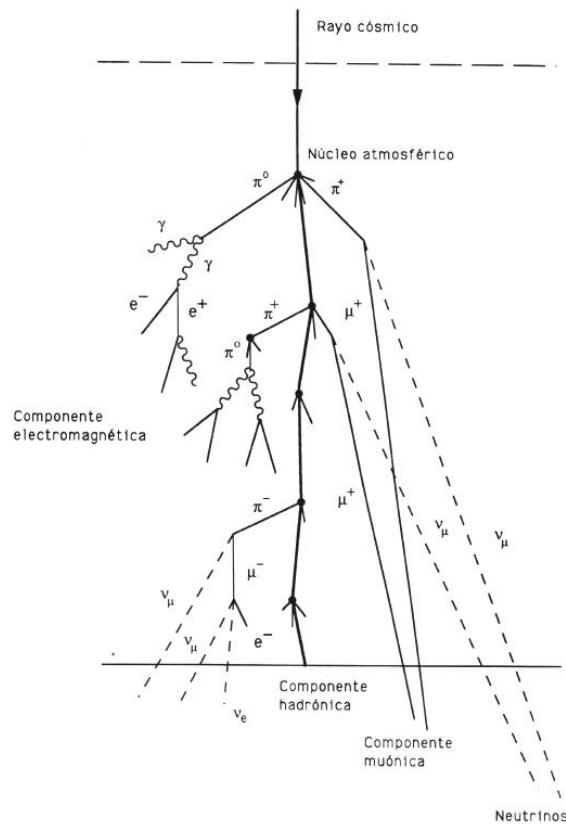


Figura 3.1: La cascada atmosférica presenta tres componentes: electromagnética, muónica y hadrónica. La electromagnética, predominante, puede originarse de las otras dos. Mientras la muónica se mantiene constante, la hadrónica domina la región central de la cascada [58].

Las partículas que se generan en una cascada de rayos cósmicos se dividen en tres

categorías principales:

Componente electromagnética: Está compuesta por electrones, positrones y fotones. Los fotones producidos en la colisión inicial pueden generar pares de electrones y positrones a través del proceso conocido como producción de pares. Estas partículas, a su vez, pueden producir más fotones a través de la radiación de frenado o bremsstrahlung. Este proceso de producción de pares y bremsstrahlung puede repetirse muchas veces, formando la parte electromagnética de la cascada.

Componente muónica: Los muones en la cascada son producidos principalmente por el decaimiento de piones y kaones cargados, que son mesones generados en la cascada hadrónica. Son partículas que tienen una masa mayor que los electrones, poseen una alta capacidad de penetración en la materia y casi no interactúan, por lo que pueden llegar al suelo antes de decaer.

Componente hadrónica: Esta componente está compuesta por partículas pertenecientes a la familia de los hadrones, entre las que se incluyen protones, neutrones y piones. Estas partículas se generan directamente durante la colisión inicial, siguiendo el eje de la lluvia. Este fenómeno produce el efecto conocido como "leading particle". Además, se generan en colisiones subsecuentes entre los hadrones y los núcleos atmosféricos.

3.2. Muones

Los muones fueron descubiertos en 1936 por Carl David Anderson y Seth Neddermeyer en el California Institute of Technology [3]. Estaban estudiando partículas cósmicas en la atmósfera terrestre utilizando cámaras de niebla, un dispositivo que permite visualizar y registrar el paso de partículas cargadas a través de una cámara llena de vapor sobrefrío [4]. Durante sus investigaciones, observaron trazas de partículas que parecían más penetrantes y masivas que los electrones pero menos masivas que los protones. Inicialmente, estas partículas fueron llamadas mesotrones, pero más tarde se les cambió el nombre a muones[51].

La producción de muones en la atmósfera comienza con la interacción de los rayos cósmicos, con los núcleos de los átomos en la atmósfera [26]. Esta interacción genera una cascada de partículas secundarias, incluidos los piones, que son partículas mesónicas. Los piones, a su vez, decaen rápidamente en muones y neutrinos [41]. Los muones pueden ser de dos tipos, positivos y negativos, dependiendo de su carga eléctrica.

Una vez que los muones se producen en la atmósfera, se propagan hacia la superficie terrestre, atravesando varias capas de la atmósfera. La propagación de los muones se ve afectada por una serie de factores, como la densidad de la atmósfera y la altitud [32]. A medida que los muones viajan a través de la atmósfera, interactúan con la materia, perdiendo energía principalmente a través de la ionización y la producción de radiación de frenado (bremsstrahlung) [29]. A pesar de esto, los muones tienen una capacidad de penetración significativa debido a su alta masa y energía relativamente baja.

El flujo de muones en la atmósfera varía con la altitud, con una mayor intensidad de muones en altitudes más altas. Esto se debe a que los muones tienen más probabilidades de interactuar y decaer a medida que viajan a través de la atmósfera [63]. Además, el flujo de muones también está influenciado por la actividad solar y el campo magnético terrestre, que pueden afectar la intensidad y la dirección de los rayos cósmicos primarios [6].

3.2.1. Técnicas de detección

A lo largo de los años, los avances en la física de partículas han llevado al desarrollo de diversas técnicas y tecnologías para la detección de muones. Estos detectores han sido fundamentales en la investigación de los muones y sus propiedades, así como en el estudio de los rayos cósmicos y la física de partículas en general.

- Una de las primeras técnicas utilizadas para la detección de muones fue la cámara de niebla, que fue desarrollada por Charles Thomas Rees Wilson en 1911 [69]. La cámara de niebla es un dispositivo que permite visualizar y registrar el paso de partículas cargadas a través de una cámara llena de vapor sobrefrío. Fue con una cámara de niebla que Carl David Anderson y Seth Neddermeyer descubrieron los muones en 1936 [4]. Aunque las cámaras de niebla fueron fundamentales en los primeros estudios de los muones, han sido en gran medida reemplazadas por detectores más modernos y eficientes.
- Los detectores de emulsión nuclear son otro tipo de detector de muones que ha sido utilizado desde la década de 1940. Estos detectores consisten en emulsiones fotográficas sensibles a las partículas cargadas, que dejan trazas visibles en la emulsión cuando pasan a través de ella [49]. Los detectores de emulsión nuclear son altamente sensibles y tienen una excelente resolución espacial, pero requieren un proceso de desarrollo y análisis manual laborioso y lento.
- Los detectores Cherenkov, desarrollados en la década de 1950, se basan en la emisión de radiación Cherenkov por partículas cargadas que se desplazan a través de un medio con una velocidad mayor que la velocidad de la luz en dicho medio [13]. Estos detectores pueden medir la dirección, energía y velocidad de las partículas y son especialmente útiles en experimentos de física de altas energías.
- Los detectores de centelleo son otro tipo común de detector de muones, que se basan en la emisión de luz por ciertos materiales cuando son atravesados por partículas cargadas [7]. Los detectores de centelleo suelen ser rápidos, sensibles y fáciles de construir. Sin embargo, tienen una resolución espacial limitada en comparación con otras técnicas de detección.
- En las últimas décadas, los detectores de trazas gaseosas, como las cámaras proporcionales multi-hilo (MWPC) y los tubos de deriva, han sido ampliamente utilizados en experimentos de física de partículas [17]. Estos detectores utilizan gases ionizables y campos eléctricos para registrar el paso de partículas cargadas y ofrecen una buena resolución espacial y temporal.

3.3. ¿Qué es la muografía?

La muografía es una técnica científica avanzada que utiliza los muones, para investigar la estructura interna y la composición de objetos y materiales. Dado que estas partículas tienen una capacidad de penetración significativa en materiales densos, la muografía se ha convertido en una herramienta poderosa y no invasiva en una amplia variedad de aplicaciones científicas y tecnológicas.

El principio básico detrás de la muografía es la medición del flujo de muones que atraviesan un objeto de interés. A medida que los muones pasan a través de la materia, su flujo se atenúa en función de la densidad del material y la distancia que recorren. Al medir el flujo de muones antes y después de atravesar el objeto, los científicos pueden obtener información sobre la estructura interna y la composición del mismo. Esta información puede ser utilizada para generar imágenes en 3D y mapas de densidad, lo que permite a los investigadores examinar el objeto sin tener que recurrir a métodos invasivos o destructivos.

3.3.1. Aplicaciones de la muografía

La muografía es una técnica emergente y prometedora, que ha encontrado diversas aplicaciones en una amplia gama de campos. Aprovechando la capacidad de los muones para penetrar materiales densos, la muografía ha demostrado ser una herramienta valiosa en áreas como la arqueología, geología, y la seguridad nuclear.

Arqueología y patrimonio cultural

Una de las aplicaciones más conocidas de la muografía es en el campo de la arqueología y el patrimonio cultural, donde ha permitido el estudio no invasivo de estructuras y sitios históricos [5]. Por ejemplo, la técnica ha sido utilizada para explorar las pirámides de Egipto, donde los muones han revelado cámaras ocultas y pasajes desconocidos [46]. La muografía también ha sido aplicada en la investigación de estructuras subterráneas en Pompeya [30], en la exploración de edificios antiguos en Japón [45], y en el estudio de monumentos históricos como la basílica de Santa Sofía en Estambul[16].

Además, la muografía ha demostrado ser una herramienta valiosa para la conservación del patrimonio cultural, ya que permite a los investigadores analizar y monitorear el estado estructural de los monumentos sin dañarlos ni alterarlos. Esto es especialmente útil en sitios arqueológicos que son difíciles de acceder o donde la excavación podría poner en peligro la integridad de las estructuras[52].

Geología y exploración de recursos naturales

La muografía ha encontrado aplicaciones en la geología, en particular, en el estudio de la estructura interna de los volcanes [64]. La técnica ha permitido a los científicos mapear la densidad de la roca en el interior de los volcanes y proporcionar información valiosa sobre la actividad volcánica y los riesgos asociados [34]. El mapeo detallado de la estructura interna de los volcanes ha llevado a una mejor comprensión de la dinámica de los procesos magmáticos y la evolución de los sistemas volcánicos [40].

3.3. ¿QUÉ ES LA MUOGRAFÍA?

Además, la muografía ha sido utilizada en la exploración de recursos naturales, como la identificación de depósitos minerales y reservorios de petróleo y gas [2]. Al proporcionar imágenes de alta resolución de la distribución de densidad de la roca en el subsuelo, la muografía ha demostrado ser una herramienta valiosa para identificar anomalías de densidad asociadas con la presencia de recursos naturales [37]. Esto ha llevado a la aplicación de la muografía en la exploración de minerales y en la caracterización de reservorios de hidrocarburos, contribuyendo al desarrollo de modelos geológicos más precisos y a la toma de decisiones más informada en la industria de la exploración de recursos [9].

Seguridad y control nuclear

La muografía se ha establecido como una herramienta valiosa en el ámbito de la seguridad y el control nuclear. Por ejemplo, la técnica ha sido empleada en la inspección no invasiva de contenedores de carga en busca de material nuclear y otros materiales peligrosos, permitiendo la detección de posibles amenazas sin necesidad de abrir los contenedores y exponerse a riesgos [47]. En este sentido, la muografía ha demostrado ser efectiva en la identificación de materiales densos, como el uranio y el plutonio, que podrían ser utilizados en la fabricación de armas nucleares.

Además, la muografía ha sido utilizada para monitorear el estado de reactores nucleares dañados, como en el caso del desastre de Fukushima en Japón [14]. Tras el accidente nuclear, la técnica ha permitido a los investigadores obtener imágenes detalladas del interior del reactor y evaluar el estado de las barras de combustible y otros componentes críticos, sin necesidad de ingresar al lugar altamente radiactivo. Esto ha proporcionado información crucial para la planificación y ejecución de las operaciones de desmantelamiento y limpieza del sitio.

La muografía también ha sido explorada como una herramienta de monitoreo en tiempo real para la detección temprana de posibles fallos en reactores nucleares en funcionamiento. Estos desarrollos subrayan el potencial de la técnica para contribuir significativamente a la seguridad nuclear y la prevención de accidentes en el futuro.

Ingeniería civil y monitoreo de infraestructura

La capacidad de los muones para penetrar materiales densos ha sido aprovechada en la ingeniería civil y el monitoreo de infraestructuras. La muografía ha sido utilizada para evaluar la integridad estructural de túneles, puentes y represas [8]. La técnica ha permitido a los ingenieros obtener imágenes detalladas del interior de estas estructuras, identificando posibles debilidades y áreas de preocupación que podrían requerir mantenimiento o reparación.

Además, la muografía ha sido aplicada en la inspección de la calidad del hormigón en estructuras de construcción y en la detección de defectos y daños [15]. La técnica puede identificar áreas donde el hormigón puede haber sido mal mezclado o compactado, lo que resulta en una disminución de la resistencia y durabilidad de la estructura. También puede revelar la presencia de fisuras o cavidades internas que podrían comprometer la integridad del material.

La muografía también ha sido utilizada en el monitoreo de la estabilidad de taludes y laderas, proporcionando información valiosa sobre la densidad y distribución de los materiales en el subsuelo [34, 53]. Esta información es esencial para evaluar el riesgo de deslizamientos de tierra y la seguridad de infraestructuras ubicadas en zonas propensas a este tipo de fenómenos.

3.4. Simulaciones en muografía

3.4.1. Modelos semi-empíricos

La implementación de modelos semiempíricos se ha establecido como una herramienta esencial, especialmente en el ámbito del análisis de espectros muónicos.

Las ventajas de adoptar un enfoque semiempírico son multifacéticas. Una de las más notables es la reducción en la complejidad computacional. A diferencia de los modelos puramente teóricos, que requieren soluciones analíticas complejas o extensivas simulaciones numéricas, los modelos semiempíricos derivan su precisión y aplicabilidad a partir de datos experimentales existentes. Su naturaleza intrínseca se basa en curvas parametrizadas ajustadas a estos datos, lo que facilita la rapidez y eficiencia en los cálculos, sin sacrificar significativamente la precisión. Dentro del vasto repertorio de modelos semiempíricos disponibles, algunos se destacan por su robustez, precisión y aplicabilidad en distintos escenarios. A continuación, se enumerarán y discutirán brevemente los más destacados.

Gaisser

El modelo de parametrización de Gaisser describe el flujo diferencial de muones en unidades de $\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{GeV}^{-1}$. Este modelo fue propuesto originalmente por Gaisser en 1990 [26]. La fórmula que describe este modelo es la siguiente:

$$\Phi_G(E_0, \theta) = A_G \cdot E_0^{-\gamma} \left(\frac{1}{1 + \frac{\hat{E}_0 \cos \theta}{E_{0,\pi}}} + \frac{B_G}{1 + \frac{\hat{E}_0 \cos \theta}{E_{0,k}}} + r_c \right), \quad (3.1)$$

* en la ecuación 3.1, los símbolos se definen de la siguiente manera: $A_G = 0,14$ representa

*Las simulaciones de Monte Carlo son una técnica estadística utilizada para entender el comportamiento de diferentes sistemas físicos o matemáticos. Se utiliza a menudo en física de partículas para modelar los procesos que suceden en un detector de partículas, como la detección de muones.

Para simular la detección de muones, un programa de simulación de Monte Carlo podría modelar el proceso de cómo los muones son producidos, cómo viajan a través de la atmósfera, cómo interactúan con el detector y cómo el detector mide esas interacciones. El programa haría esto muchas veces (a veces millones de veces) para construir una imagen estadística de cómo se espera que funcione el detector.

GEANT4 es un paquete de software de código abierto que se utiliza ampliamente en la física de partículas para simular el paso de partículas a través de la materia [23]. Se puede usar para modelar la detección de muones, así como otros procesos en la física de partículas.

Otro ejemplo es el paquete de software CORSIKA, que se utiliza específicamente para simular cascadas de rayos cósmicos en la atmósfera [21]. Puede modelar la producción de muones a partir de

3.4. SIMULACIONES EN MUOGRAFÍA

un factor de escala, mientras que $\gamma = 2,70$ denota el índice de potencia. Por otro lado, $B_G = 0,054$ es un factor que mantiene un equilibrio, el cual está determinado por la proporción entre los muones que se generan a partir de los piones y los kaones. Adicionalmente, $r_c = 0$ refiere a la proporción de muones generados de manera rápida por el proceso de desintegración de partículas encantadas. El símbolo θ se utiliza para representar el ángulo de incidencia cenital del muón.

En relación a la energía de los muones, E_0 es la energía a nivel del mar y \hat{E}_0 es la energía en la cima de la atmósfera, donde se cumple que E_0 se aproxima a \hat{E}_0 . Por último, los términos $E_{0,\pi} = 115/1,1$ y $E_{0,k} = 850/1,1$ se interpretan como las energías críticas para los piones y kaones respectivamente cuando la incidencia es vertical, esto es, cuando $\theta = 0^\circ$.

El modelo de parametrización de Gaisser es ampliamente utilizado debido a su precisión y aplicabilidad en diversas situaciones de investigación, haciendo que sea una herramienta valiosa para el estudio del flujo de muones.

Gaisser-Tang

En 2006, Tang et al. propusieron una versión modificada del modelo original de Gaisser [65]. Esta modificación se implementó para tener en cuenta una sobreestimación en el flujo de muones incidentes a bajas energías ($E_0 < 100 \cos \theta$, GeV). La versión modificada del modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Phi_T(E_0, \theta) = A_T E_0^{-\gamma_0} \left(\frac{1}{1 + \frac{\hat{E}_0 \cos \theta^*}{E_{0,\pi}}} + \frac{B_G}{1 + \frac{\hat{E}_0 \cos \theta^*}{E_{0,k}}} + r_c \right), \quad (3.2)$$

donde $\cos \theta^*$ se define como:

$$\cos \theta^* = \sqrt{1 - \frac{1 - \cos^2 \theta}{\left(1 + \frac{\text{Hatm}}{R_{\text{Earth}}}\right)^2}}, \quad (3.3)$$

aquí, $R_{\text{Earth}} = 6370$, km representa el radio de la Tierra y $\text{Hatm} = 32$, km es la altitud en la que se producen los muones con trayectorias de gran ángulo [40].

La energía del muón se determina por:

$$\hat{E}_0 = E_0 + \Delta E_0, \quad (3.4)$$

donde

$$\Delta E_0 = 0,00206 \left(\frac{1030}{\cos \theta^*} - 120 \right), \quad (3.5)$$

rayos cósmicos y cómo estos muones se propagan a través de la atmósfera.

y

$$A_T = A_G \left(\frac{120 \cos \theta^*}{1030} \right)^{\frac{1,04}{(E_0 + \Delta E_0/2) \cos \theta^*}}. \quad (3.6)$$

El modelo Gaisser-Tang ha demostrado ser una herramienta útil para el análisis del flujo de muones incidentes, proporcionando una representación más precisa a bajas energías. Una versión de este espectro modificado, con $r_c = 10^{-4}$, es utilizada por MUSIC [36].

Bugaev

A lo largo de los años, varios investigadores han contribuido a la construcción de un modelo empírico basado en mediciones precisas del flujo de muones a nivel del mar. Este modelo ha sido informado y refinado por varias publicaciones importantes en el campo [10, 20, 39].

La propuesta de este modelo empírico está fundamentada en una fórmula de ajuste que expresa la relación entre el flujo de muones Φ_B y el momento del muón p en términos de una ley de potencias. Esta relación se describe matemáticamente como:

$$\Phi_B(p) = A_B \cdot p^{-(a_3 y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0)}, \quad (3.7)$$

donde y es el logaritmo en base 10 del momento del muón, es decir, $y = \log_{10} p$. Es imperativo señalar que el momento del muón p se expresa en unidades de $\text{GeV } c^{-1}$. Adicionalmente, la relación entre el momento del muón p , la energía del muón E_0 , y la masa del muón m_μ se establece como:

$$p^2 c^2 = E_0^2 - m_\mu^2 c^4. \quad (3.8)$$

Este modelo empírico, basado en mediciones precisas y soportado por múltiples investigaciones, permite una representación adecuada del flujo de muones a nivel del mar y ofrece un marco sólido para estudios futuros en este campo.

p range ($\text{GeV } c^{-1}$)	AB ($\text{cm}^2 \text{ sr s GeV}^{-1}$)	a_0	a_1	a_2	a_3
1 - 930	$2,950 \times 10^{-3}$	0.3061	1.2743	-0.263	0.0252
930 - 1590	$1,781 \times 10^{-2}$	1.791	0.304	0	0
1590 - $4,2 \times 10^5$	$1,435 \times 10^1$	3.672	0	0	0
$> 4,2 \times 10^5$	10^3	4.0	0	0	0

Cuadro 3.1: Parámetros del modelo Bugaev para espectros de energía de muones a nivel del mar.

Reyna-Bugaev

El modelo de Bugaev presenta una limitación en que es independiente del ángulo cenital. Esta limitación fue abordada a través de la introducción de una modificación a la

3.4. SIMULACIONES EN MUOGRAFÍA

ecuación principal del modelo [59]. Esta modificación se expresa en la siguiente forma:

$$\Phi_R(p, \theta) = A_R \cdot \hat{p}^{-(a_3 y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0)} \cos^3 \theta, \quad (3.9)$$

aquí, y es una función del momento del muón transformado \hat{p} , que a su vez se define como el producto del momento del muón p y el coseno del ángulo cenital θ . Específicamente, estas relaciones se describen como:

$$\begin{aligned} y &= \log_{10} \hat{p}, \\ \hat{p} &= p \cos \theta. \end{aligned}$$

La ecuación se ha ampliado para incorporar un nuevo conjunto de parámetros de ajuste que modulan la dependencia del momento del muón en la ecuación. Estos parámetros de ajuste son $A_R = 0,00253$, $a_0 = 0,2455$, $a_1 = 1,288$, $a_2 = -0,2555$ y $a_3 = 0,0209$. Estos parámetros son cruciales para refinar la precisión del modelo y para permitir una representación más exacta de los datos experimentales.

Reyna-Hebbeker

Hebbeker & Timmermans introdujeron un modelo empírico que tiene similitud con el modelo propuesto por Bugaev [33]. Este modelo sigue una ley de potencias que es dependiente del momento del muón, se puede describir con las siguientes ecuaciones:

$$\Phi_H(p) = A_H 10^{H(y)}, \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} H(y) &= h_1 \frac{y^3 - 5y^2 + 6y}{2} + h_2 \frac{-2y^3 + 9y^2 - 10y + 3}{3} \\ &+ h_3 \frac{y^3 - 3y^2 + 2y}{6} + \frac{s_2 y^3 - 6y^2 + 11y - 6}{3}, \end{aligned} \quad (13)$$

donde $y = \log_{10} p$ y p está definido por la ecuación (3.7). Los parámetros del ajuste son $A_H = 0,86$, $h_1 = 0,133$, $h_2 = -2,521$, $h_3 = -5,78$ y $s_2 = -2,11$ [20].

Lesparre et al [39], introducen una dependencia adicional en el ángulo cenital en el modelo, que se puede describir por:

$$\Phi_{RH}(p, \theta) = A_H 10^{H(\hat{y})} \cos^3 \theta, \quad (3.11)$$

donde $\hat{y} = \log_{10}(p \cos \theta)$.

Marcos de simulación

Los marcos de simulación permiten modelar y predecir con precisión el comportamiento de los muones al atravesar distintos objetos y medios. Al hacerlo, se puede obtener información crucial sobre estructuras y características que podrían permanecer ocultas o ser inaccesibles para otras modalidades de imagen convencionales. Dicha capacidad de revelar lo oculto otorga a las simulaciones de muones una relevancia singular en diversos campos de investigación. En las siguientes secciones, se presentarán detalladamente algunos de estos marcos de simulación y sus aplicaciones específicas.

Muraves

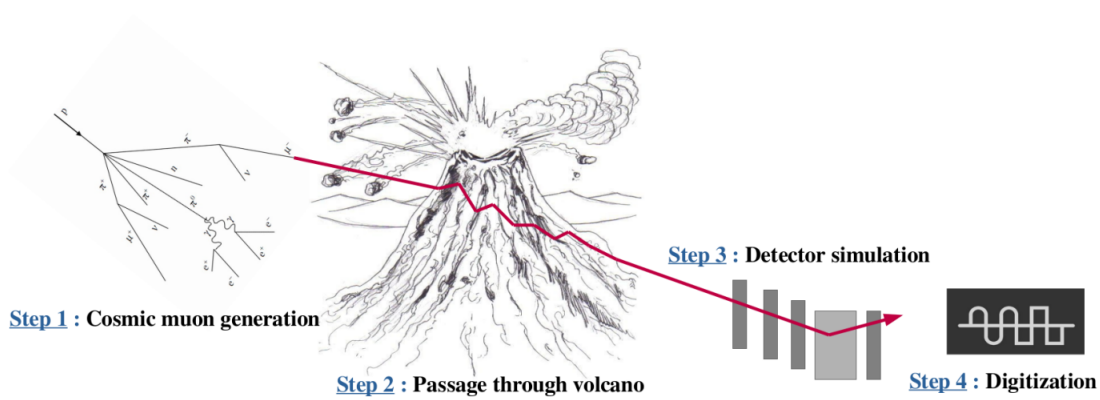


Figura 3.2: Representación esquemática de la cadena de simulación Muraves: En el primer paso, se muestra la generación de muones desplegada por CRY; en el segundo paso, se transportan los muones en la estructura utilizando PUMAS. Finalmente, se emplea GEANT4 para simular la detección de los muones y se aplican algoritmos basados en umbrales para la digitalización [22].

Muraves es un marco de simulación desarrollado para estudiar la estructura interna del volcán Vesubio, ubicado en Italia. Este volcán es activo y peligroso, por lo que el objetivo principal del marco de simulación es obtener una imagen de la densidad interna del volcán mediante el flujo atenuado de muones. Esta información será combinada con datos de gravimetría y sismología para inferir posibles escenarios de erupción del volcán [22].

Para lograr esto, el marco de simulación utiliza una cadena de procesos que incluyen la generación de rayos cósmicos, la simulación del paso de los muones a través del volcán, la simulación de la interacción de los muones con el detector y la digitalización de los resultados. La primera etapa de la cadena de simulación es la generación de rayos cósmicos, para la cual se compararon diferentes programas como CRY, EcoMug y CORSIKA. Finalmente, se optó por usar CRY debido a que superaba a los demás en el tiempo de ejecución, baja complejidad y parametrizaciones completas de las partículas.

Muografía

ARTI es un conjunto de códigos de programación escritos en lenguajes como C++, Fortran, Bash, Perl y Python [24], que busca integrar diferentes ambientes de simulación, como CORSIKA, GEANT4, FLUKA, MAGCOS y modelos del campo magnético de la Tierra. Estos ambientes de simulación requieren entradas y generan salidas distintas, por lo que ARTI busca reemplazar el trabajo manual de conectar los diferentes ambientes mediante una simulación semi-automatizada que integre las entradas y salidas de los diferentes softwares.

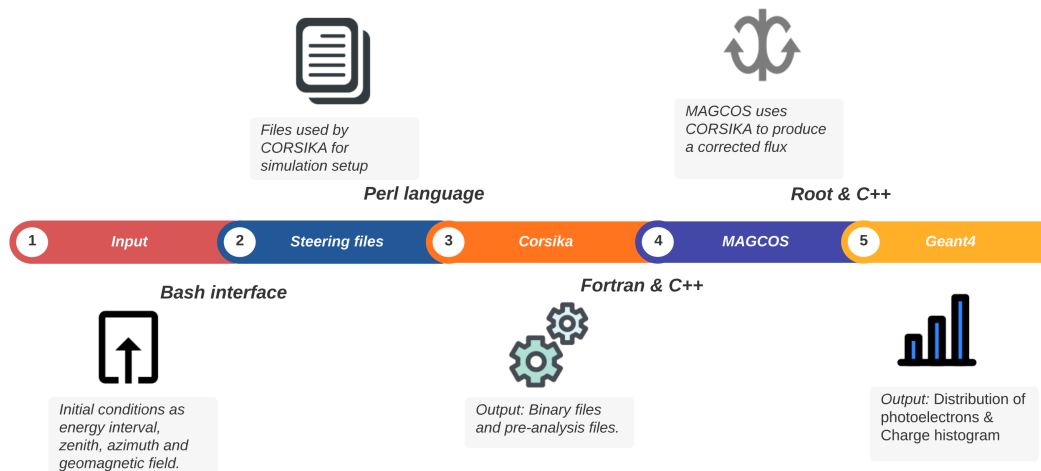


Figura 3.4: ARTI emplea CORSIKA, MAGCOS y GEANT4 en todo el marco de simulación, para calcular con exactitud la señal en el detector del flujo integrado de muones, según la acumulación integrada de radiación cósmica [24].

4 MUographY Simulation Code (MUYSC)

La idea de la creación de un marco de simulación en muografía parte desde el proyecto MuTe [55], el cual obtuvo como resultado el diseño y construcción de un telescopio de muones híbrido para el estudio de estructuras volcánicas. En el proyecto se realizó un estudio para identificar entre 13 volcanes activos en Colombia, cuál de estos es prioritario para un estudio físico con el telescopio de muones [25]. Para obtener un estudio más detallado antes del desplazamiento del telescopio, se realizaron simulaciones del flujo de muones usando CORSIKA y de la atenuación del flujo mediante MUSIC y GEANT4 [61, 67, 68].

El marco de simulación propuesto en este trabajo permite realizar una muografía de cualquier estructura geológica en el mundo en cuestión de minutos, dejando de lado las cadenas de simulación multi-software de alta complejidad. En los estudios muográficos se puede evidenciar la importancia de las simulaciones computacionales. Creando cada vez más marcos de simulación, sin embargo, todos siguen siendo cadenas compuestas y poco amigables con el usuario.

Para alcanzar nuestro objetivo, recurrimos al concepto de "simulaciones rápidas". Estas hacen alusión a técnicas y métodos diseñados para acortar los tiempos de simulación sin comprometer de manera significativa la precisión de los resultados. Se utilizan en múltiples campos de estudio, consolidándose como una herramienta valiosa en las ciencias computacionales. La meta principal de estas técnicas es optimizar las simulaciones para producir resultados en un lapso razonable. Esto se logra a través de aproximaciones geométricas, modelos aproximados, técnicas estocásticas o modelos paramétricos. En MUYSC, optamos por este último enfoque, permitiéndonos optimizar nuestra simulación y obtener resultados precisos en un tiempo reducido.

Con el propósito de ofrecer una herramienta adicional para el proceso de simulación en el campo de la muografía. Este marco de trabajo proporciona una plataforma integral para realizar simulaciones de principio a fin en el estudio de cualquier estructura geológica en el planeta mediante la muografía. MUYSC facilita la modelización y el análisis de cómo los muones interactúan con diversas estructuras geológicas, permitiendo a los científicos e investigadores obtener información detallada sobre el interior de dichas estructuras sin recurrir a métodos invasivos. Al proporcionar un enfoque de simulación completo, MUYSC mejora la eficiencia y la precisión del proceso de muografía, permitiendo una mejor comprensión de fenómenos geológicos.

Las simulaciones desempeñan un papel fundamental en diversas áreas de investigación

CAPÍTULO 4. MUOGRAPHY SIMULATION CODE (MUYSC)

científica, incluyendo la física y, en particular, la muografía. Apoyarse en las simulaciones antes de realizar estudios experimentales ofrece múltiples beneficios, ya que permite obtener una comprensión inicial de los resultados esperados, reducir riesgos y minimizar costos asociados con exploraciones geológicas. En primer lugar, las simulaciones en muografía permiten a los investigadores anticipar el comportamiento de los muones al atravesar diferentes tipos de materiales y densidades en estructuras geológicas. Esto es esencial para desarrollar un enfoque más informado en la planificación de estudios experimentales y para establecer expectativas realistas de los resultados. Al utilizar simulaciones, los científicos pueden identificar posibles desafíos y limitaciones en la adquisición y el análisis de datos, lo que a su vez ayuda a optimizar los métodos y técnicas empleados en el estudio.

Además, las simulaciones pueden contribuir significativamente a la reducción de riesgos asociados con exploraciones geológicas. Al proporcionar una primera aproximación de lo que se espera encontrar, los investigadores pueden determinar la viabilidad y seguridad de una expedición antes de emprenderla. Esto es especialmente importante en la muografía, donde las condiciones de estudio pueden ser extremas o peligrosas, como en el caso de la exploración de volcanes activos o áreas de difícil acceso. Por último, las simulaciones también pueden ayudar a minimizar los costos en investigaciones de muografía. Al permitir a los científicos evaluar y optimizar el diseño y la configuración de los detectores de muones, garantizan que los recursos se utilicen de manera eficiente y se eviten gastos innecesarios en equipos y tecnologías inadecuadas. Además, al proporcionar una idea preliminar de los resultados esperados, las simulaciones pueden ayudar a evitar expediciones costosas e innecesarias.

4.1. MUYSC: software modular

MUYSC, como un software de simulación para estudios de muografía, se beneficia significativamente de un enfoque modular en su diseño y construcción. Uno de los principales motivos para construir MUYSC como un software modular, es la flexibilidad que esto ofrece en el desarrollo y la adaptación a las necesidades cambiantes de la investigación en muografía. Dado que el campo de la muografía abarca una amplia variedad de aplicaciones y contextos, desde la vulcanología hasta la arqueología, un diseño modular permite agregar, modificar o eliminar funciones específicas sin tener que rediseñar todo el sistema. Además, al separar las diferentes etapas del proceso de muografía en módulos independientes, MUYSC puede adaptarse fácilmente a distintos escenarios y requerimientos de investigación, lo que maximiza su utilidad y aplicabilidad en el campo de la muografía.

Otra razón importante para construir MUYSC como un software modular es la posibilidad de mejorar y expandir sus capacidades de manera más eficiente. En un sistema modular, los desarrolladores pueden trabajar en diferentes módulos simultáneamente sin interferir entre sí, lo que acelera el proceso de desarrollo y mejora la colaboración dentro del equipo. Además, un diseño modular facilita la reutilización de componentes y algoritmos en diferentes proyectos o aplicaciones, lo que ahorra tiempo y recursos en el

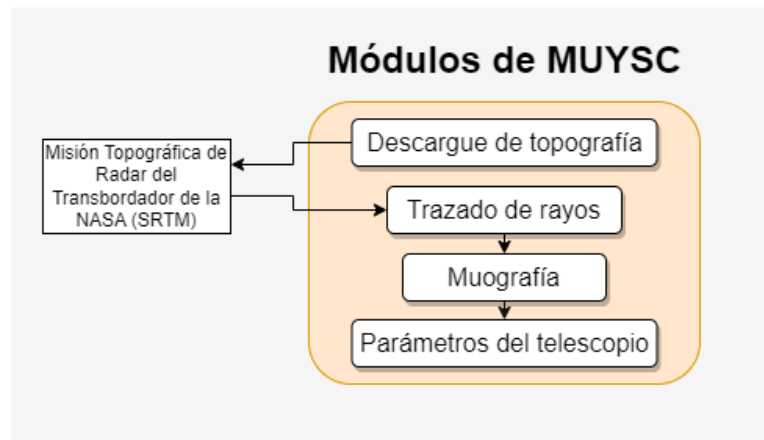


Figura 4.1: MUYSC se compone de cuatro módulos; el primer módulo se encarga de la adquisición de datos interactuando con un servidor de la NASA; el segundo módulo calcula las distancias recorridas por los muones en el objeto de estudio; el tercer módulo despliega la muografía y el cuarto módulo ajusta las parámetros del telescopio.

desarrollo del software. En el caso de MUYSC, esto significa que los módulos específicos desarrollados para abordar desafíos particulares en muografía, como la interacción de muones con materiales geológicos o el diseño de detectores, pueden ser reutilizados y adaptados para otros estudios similares en el futuro.

4.2. Topografía

El primer módulo de MUYSC es fundamental en el proceso y es el único que interactúa con un servicio externo al código fuente. El primer paso para realizar una muografía de cualquier estructura geológica u objeto de estudio específico consiste en obtener la forma del objeto, en nuestro caso, la topografía. Para adquirir estos datos, hemos desarrollado un código que permite transformar las coordenadas geográficas del objeto en el nombre del archivo a descargar. Los datos utilizados están en formato .hgt, extraídos de la información recopilada por el satélite de la NASA conocido como Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), estos datos contienen una resolución de 1 arco segundo (30 metros)[35].

Este módulo facilita la adquisición de datos topográficos precisos y confiables para cualquier objeto de estudio en muografía. Al automatizar la conversión de coordenadas geográficas en nombres de archivos y acceder directamente a los datos del SRTM, este módulo agiliza el proceso de obtención de la información necesaria para modelar la estructura geológica u objeto de interés. Esto, a su vez, permite que los investigadores se enfoquen en el análisis y la interpretación de los resultados de la muografía, en lugar de dedicar tiempo y recursos a la obtención manual de datos topográficos.

Almacenar todos los datos del satélite en nuestra biblioteca no sería la opción más

CAPÍTULO 4. MUOGRAPHY SIMULATION CODE (MUYSC)

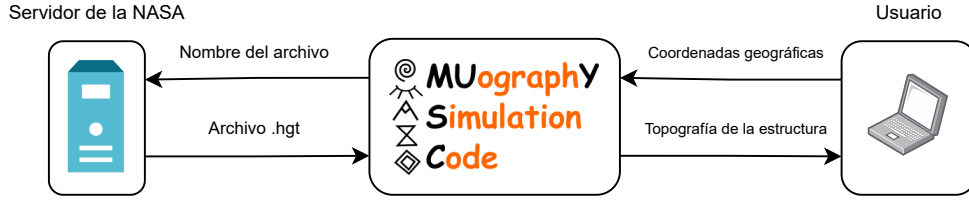


Figura 4.2: El usuario envía una petición a través de la app para obtener los datos topográficos del objeto de interés, los cuales son solicitados al servidor.

eficiente, ya que acumularíamos una gran cantidad de información que podría ralentizar nuestro objetivo y el del investigador, con datos que quizás no sean necesarios. Por este motivo, se propone una metodología que permite obtener de manera selectiva los datos de las estructuras geológicas de interés.

Este enfoque optimizado garantiza que sólo se descarguen y procesen los datos relevantes para el objeto de estudio en cuestión, lo que agiliza el proceso de investigación y ahorra tiempo y recursos tanto para el equipo de desarrollo como para el investigador. Además, al evitar la acumulación innecesaria de datos, se mantiene la eficiencia y el rendimiento del software, permitiendo un análisis más rápido y preciso de los resultados de la muografía.

El módulo de MUYSC permite obtener y representar en 3D cualquier estructura geográfica solo ingresando las coordenadas geográficas del objeto de estudio

$$(Long_{\max}, Long_{\min}, Lat_{\max}, Lat_{\min})$$

permitiéndole a su vez al usuario ubicar el telescopio en una coordenada real, lo que proporciona una ventaja sobre otros softwares de muografía al ofrecer visualizaciones realistas del objeto de estudio.

MUYSC convierte las coordenadas globales (Latitud, Longitud) en coordenadas cartesianas (x,y) usando la siguiente formula:

$$x = C_e * (Long_0 - Long_i) * \frac{\pi \cos(Lat_0 + Lat_i) * 360}{180}, \quad (4.1)$$

$$y = C_e * \frac{Lat_0 - Lat_i}{360}, \quad (4.2)$$

donde $(Long_0, Lat_0)$ son (logitud, latitud) del punto de referencia y C_e es la circunferencia de la tierra.

Las representaciones topográficas de cuatro prominentes estructuras geológicas, incluyendo el Cerro Machín (Figura 4.3), Monte Fuji (Figura 4.4), Monte Vesubio (Figura 4.5), y el volcán Cotopaxi (Figura 4.6), evidencian la eficacia del primer módulo al ilustrar estructuras distribuidas alrededor del globo.

4.2. TOPOGRAFÍA

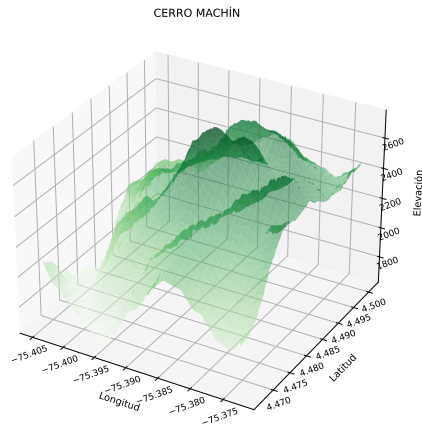


Figura 4.3: Estructura geológica del Cerro Machín, ubicado en Colombia.

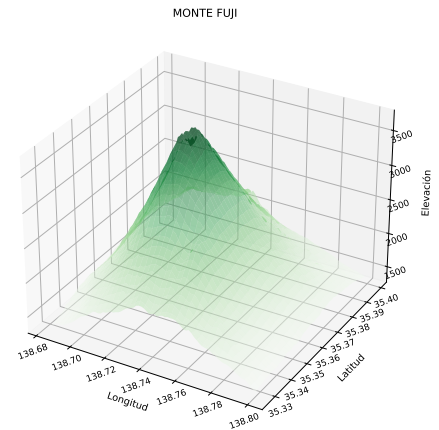


Figura 4.4: Estructura geológica del Monte Fuji, ubicado en Japón.

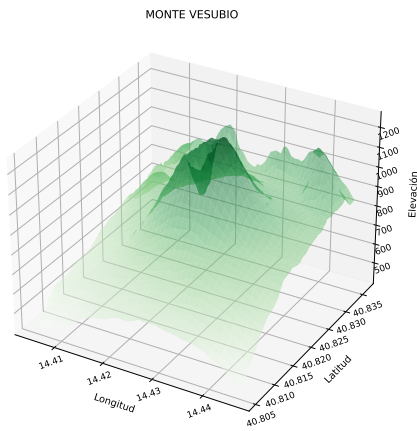


Figura 4.5: Estructura geológica del Monte Vesubio, ubicado en Italia.

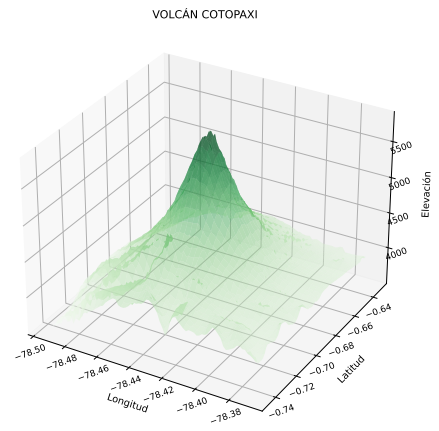


Figura 4.6: Estructura geológica del volcán Cotopaxi, ubicado en Ecuador.

CAPÍTULO 4. MUOGRAPHY SIMULATION CODE (MUYSC)

Gracias a esta característica, MUYSC se distingue de otros programas similares, ya que permite obtener representaciones tridimensionales detalladas de estructuras geológicas en diversas partes del planeta. Esto proporciona a los investigadores una herramienta valiosa para llevar a cabo investigaciones de muografía de alta calidad y precisión en diferentes contextos y localizaciones geográficas, mejorando así la efectividad y el alcance de sus estudios en el campo de la muografía.

4.3. Trazado de rayos

El siguiente módulo en MUYSC se centra en calcular las trayectorias y distancias que los muones recorrerán dentro de la estructura geológica de interés. Este módulo brinda al investigador gran flexibilidad y control en la configuración del experimento de muografía. Para lograr esto, el investigador puede seleccionar dos puntos específicos los cuales proporcionará mediante coordenadas geográficas: uno donde se ubicará el telescopio de muones (x_{op}, y_{op}, z_{op}) y otro hacia el cual estará dirigido el telescopio (x_{pr}, y_{pr}, z_{pr}) , donde op es punto de observación y pr punto de referencia.

Ubicación del telescopio sobre el CERRO MACHÍN

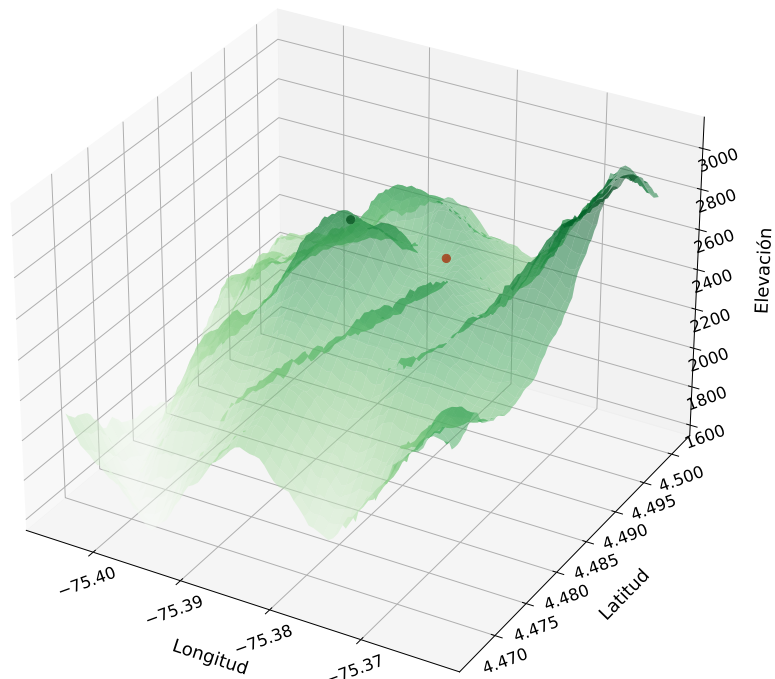


Figura 4.7: La gráfica muestra la topografía del cerro Machín. Se destacan dos ubicaciones de interés, cuyo formato de coordenadas se presenta en forma de tuplas (latitud, longitud): el telescopio, representado por un punto rojo, tiene coordenadas $(4.491984, -75.380085)$ el punto de referencia del telescopio, indicado con un punto negro, tiene coordenadas $(4.487717, -75.387880)$.

En la figura 4.7, ambos puntos se sitúan en la estructura geológica para proporcionar una representación visual clara de la ubicación y orientación del telescopio. Al permitir a los investigadores elegir y visualizar fácilmente estos puntos clave en la configura-

CAPÍTULO 4. MUOGRAPHY SIMULATION CODE (MUYSYC)

ción experimental, el módulo mejora la precisión y la eficiencia en la planificación y realización de estudios de muografía, al tiempo que ofrece un mayor control sobre los parámetros del experimento.

A partir de los dos puntos seleccionados, ubicación del telescopio y dirección hacia la que apunta, el módulo genera una línea de proyección central, representada en color rojo mostrada en la figura 4.8. Esta línea central sirve como base para construir las demás trayectorias de las partículas y representa el camino que un muón seguirá desde el punto de interacción en la estructura geológica hasta el telescopio.

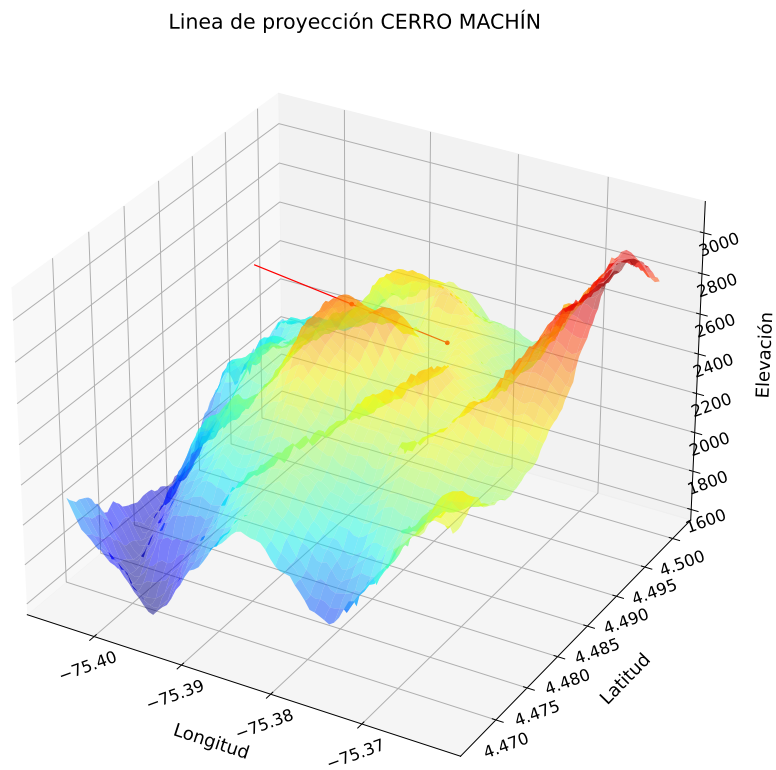


Figura 4.8: Trayectoria central de las partículas sobre el cerro Machín.

El trazado de esta línea de proyección central es crucial para comprender la relación entre la ubicación del telescopio, la dirección de observación y la interacción de los muones con la estructura geológica. Permite a los investigadores visualizar y analizar las posibles trayectorias de los muones, lo que facilita la interpretación y el análisis de los datos de muografía.

Además, el módulo permite al investigador especificar el rango de visión del telescopio

4.3. TRAZADO DE RAYOS

mediante la definición de rangos azimutales y cenitales, en la figura 4.9 se observa dos configuraciones distintas del barrido de ángulos acimutales y cenitales. Esto brinda a los usuarios la posibilidad de ajustar la configuración del telescopio según las necesidades específicas de su estudio y maximizar la precisión y la calidad de los datos de muografía obtenidos.

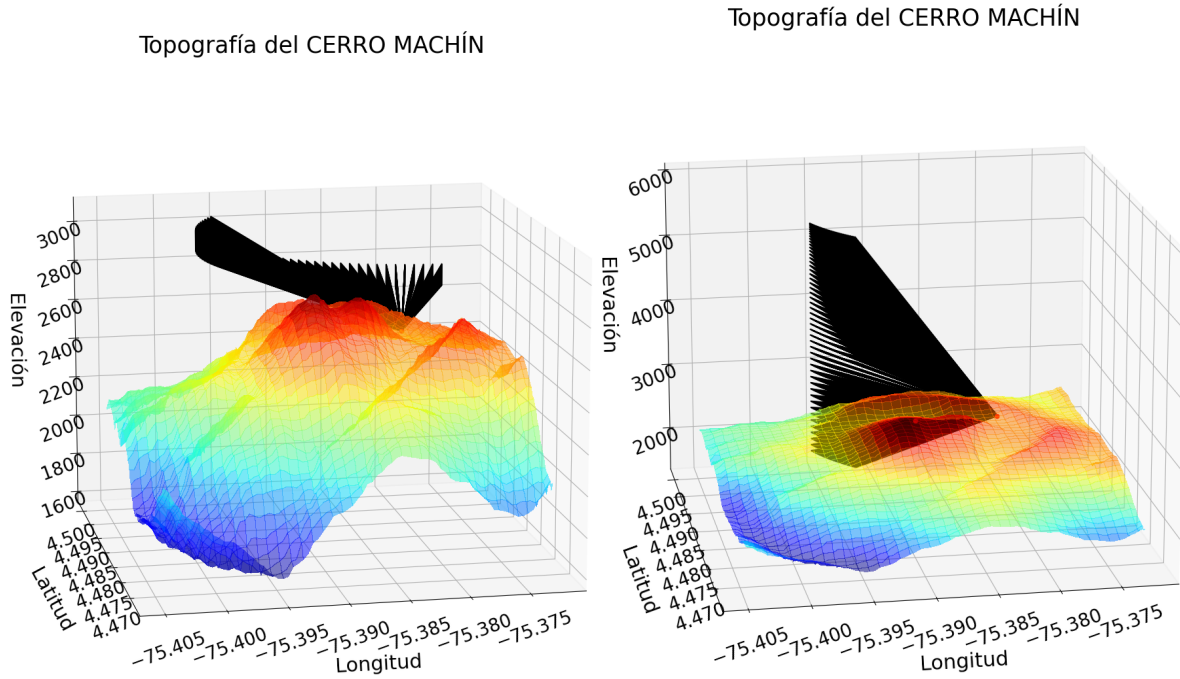


Figura 4.9: La figura de la izquierda representa el barrido sobre ángulos azimutales, rango $(-60^{\circ}, 60^{\circ})$. La imagen de la derecha representa el barrido sobre ángulos cenitales, rango $(-10^{\circ}, 80^{\circ})$. La elevación es representada en metros y las líneas negras definen el cono angular de observación.

Al ofrecer un control detallado sobre la configuración del telescopio y las trayectorias de los muones, este módulo de MUYSC permite a los investigadores adaptar sus experimentos a diferentes escenarios y estructuras geológicas, lo que facilita la obtención de resultados precisos y relevantes en diversos contextos de investigación. Además, al permitir que los usuarios ajusten los parámetros del telescopio, se pueden explorar diferentes enfoques y configuraciones para optimizar aún más la calidad de los datos obtenidos y mejorar el entendimiento de las estructuras geológicas estudiadas a través de la muografía.

Para calcular la distancia recorrida por los muones en la imagen del detector, se evalúa la distancia de roca que atraviesa cada línea de proyección. Para lograr esto, se realiza una transformación de la representación tridimensional de la topografía de la estructura geológica a representaciones bidimensionales correspondientes a cada trayectoria de muones.

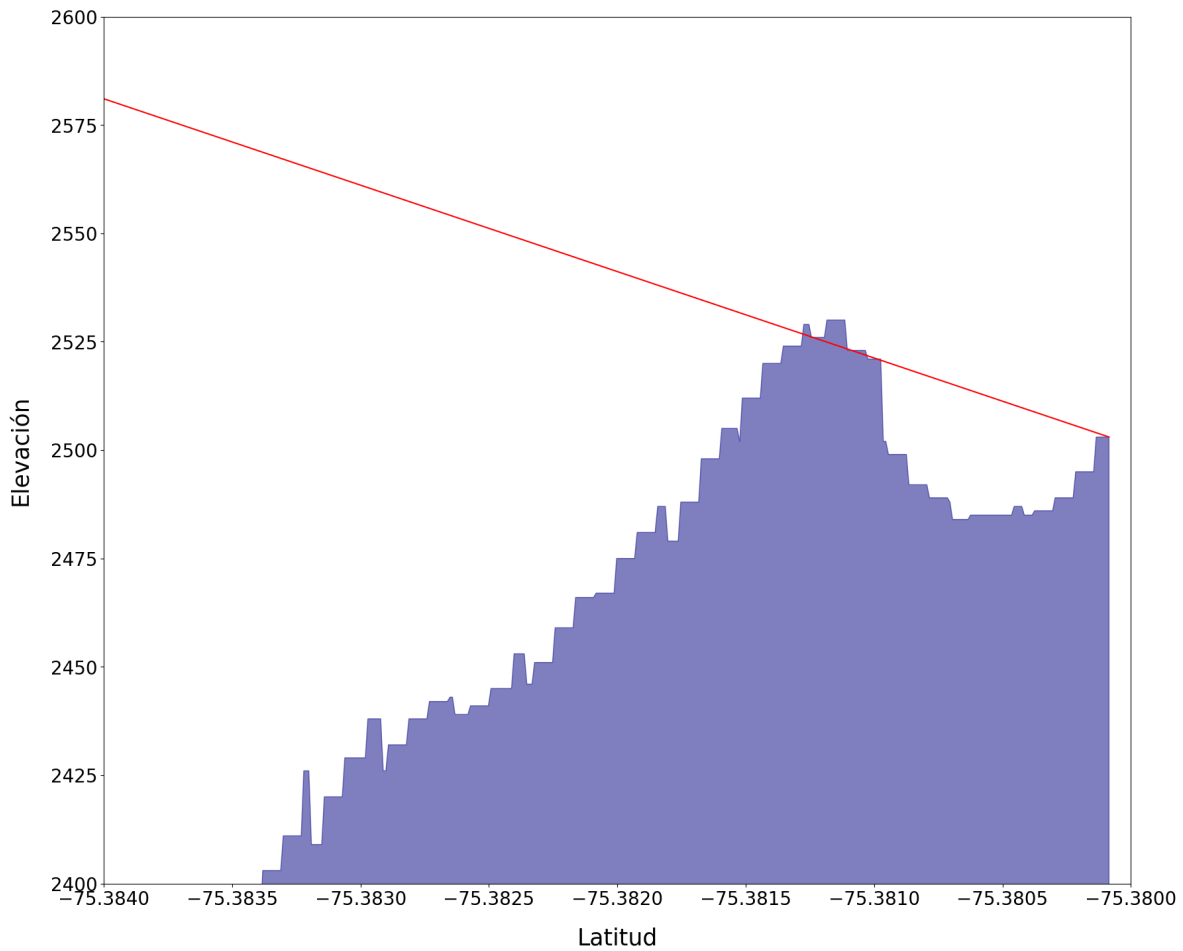


Figura 4.10: Corte del cerro Machín; el eje principal de observación del telescopio abarca altitudes de la montaña que oscilan entre los 2500 y 2550 metros sobre el nivel del mar.

Este proceso consiste en seccionar la estructura geológica de tal manera que cada sección represente la longitud recorrida por un muón a través de la roca en una trayectoria específica como se muestra en la figura 4.10. Al dividir la estructura en secciones bidimensionales, se facilita la visualización y análisis de las distancias que los muones recorren en diferentes puntos de la estructura geológica.

Cada trayectoria trazada desde el punto del telescopio nos proporciona una sección transversal de la montaña o de la estructura geológica bajo estudio. A partir de cada sección, se obtiene una distancia correspondiente a la trayectoria del muón. De esta manera, se construye un mapa de distancias de la estructura geológica, en el cual cada píxel representa la longitud recorrida por un muón como se muestra en la figura 4.11.

4.3. TRAZADO DE RAYOS

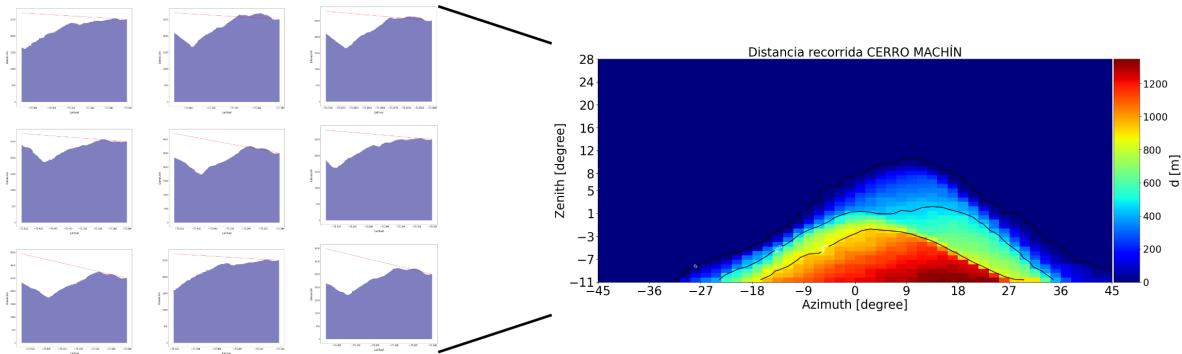


Figura 4.11: La figura ilustra el proceso de elaboración del mapa de distancias. Cada píxel corresponde a un cálculo de la longitud de una sección transversal de la montaña. El panel izquierdo exhibe las secciones transversales de la montaña, mientras que el panel derecho muestra la matriz de distancias, representando la trayectoria que el muón recorre dentro de la estructura geológica.

Obteniendo así el mapa de distancias del cerro Machín.

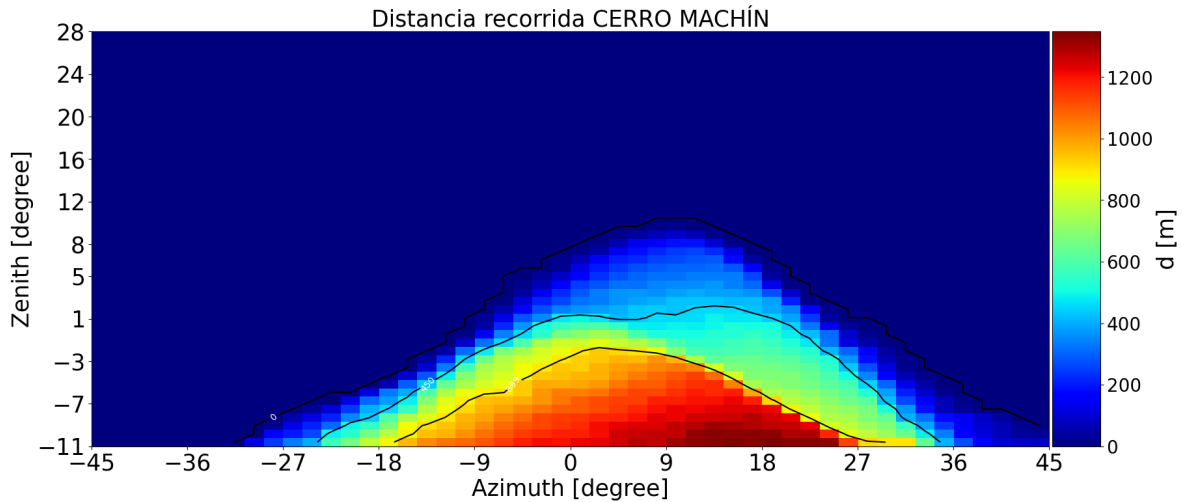


Figura 4.12: Mapa de distancias del cerro Machín, la barra de colores indica las distancias de cada píxel, máxima distancia que tendrá que recorrer el muón ≈ 1281 metros.

Los resultados de la figura 4.12 son los esperados, en las regiones más bajas de una montaña o estructura geológica, los muones tendrán que atravesar mayores distancias de material, dado que entran en la estructura desde ángulos más bajos. Esto implica que las trayectorias de los muones en estas regiones serán más extensas en comparación con las trayectorias cercanas a la cima o cúspide de la estructura geológica. En la cima, la cantidad de material que los muones tienen que atravesar es menor debido a la menor longitud de trayectoria y ángulos de incidencia más elevados.

Al comprender estas variaciones en las distancias recorridas por los muones en función de su posición en la estructura geológica, los investigadores pueden obtener información valiosa sobre las características internas y la densidad de la estructura bajo estudio. Esta información es esencial para la interpretación y análisis de los datos de muografía, permitiendo a los investigadores ajustar y optimizar sus experimentos para obtener resultados más precisos y confiables en el estudio de diversas estructuras geológicas.

4.4. Muografía

Una vez procesado el mapa de distancias, el procedimiento subsiguiente consiste en estimar el flujo integrado de muones para cada píxel, permitiendo así la construcción de la muografía a partir de esta herramienta. Inicialmente, se debe realizar una corrección del flujo diferencial de muones con base en la altitud del telescopio. Posteriormente, se calcula la energía mínima requerida por un muón para transitar a través de un determinado espesor de roca. A partir de esta energía mínima, se lleva a cabo la integración con el objetivo de determinar el flujo de muones en cada punto específico, resultando en la muografía final.

4.4.1. Corrección de altura

Los modelos semi-empíricos desempeñan un papel crucial en la estimación del flujo de muones a nivel del mar. Dentro del conjunto de herramientas proporcionadas por MUYSK, existe un módulo específicamente diseñado para ajustar el flujo estimado basándose en la variación altitudinal del telescopio. La corrección se lleva a cabo mediante la aplicación de la ecuación:

$$\frac{\phi(h)}{\phi(h=0)} = \exp(h/h_0), \quad (4.3)$$

en esta relación, h representa la altitud expresada en metros sobre el nivel del mar, que en este contexto, es la altitud a la cual se posicionará el telescopio. El término $h_0 = 4900 + 750p$ es un parámetro empíricamente derivado de observaciones previas [33]. Aquí, p denota el momento del muón.

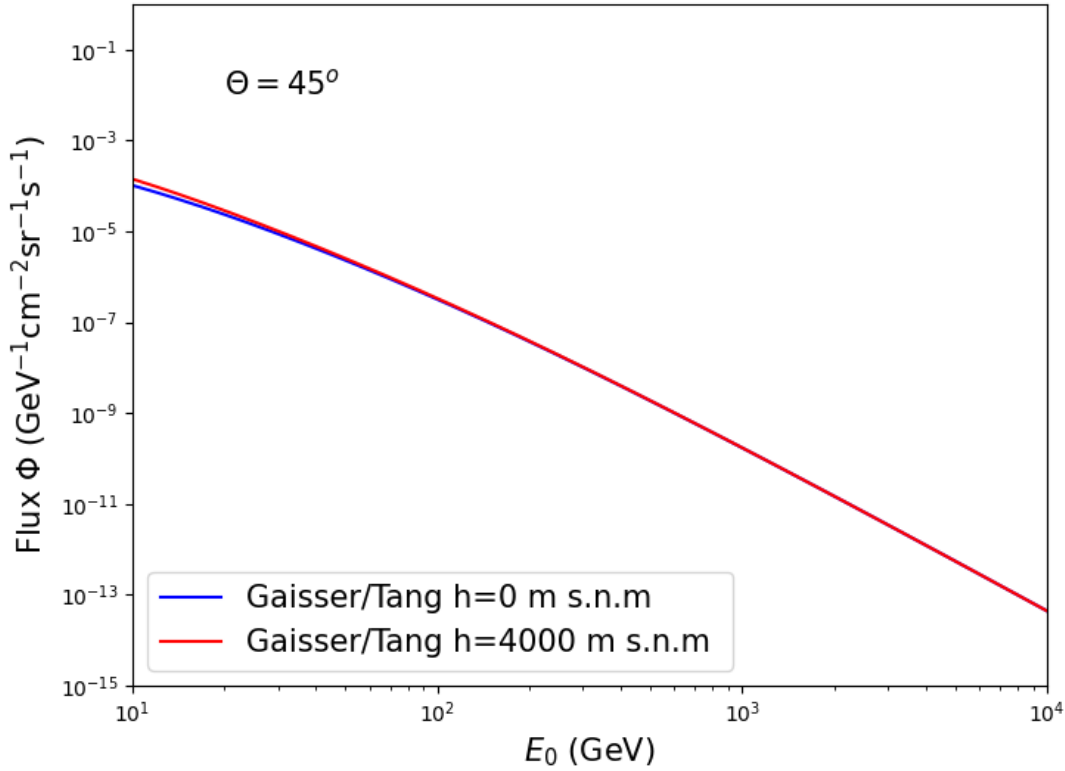


Figura 4.13: Flujo de muones, calculado mediante el modelo Gaisser/Tang a 0 metros sobre el nivel del mar y 4000 metros sobre el nivel del mar.

La figura 4.13 ilustra la dependencia del flujo de muones con respecto a la altitud del telescopio. Es evidente que, a mayores altitudes, el flujo de muones experimenta un incremento significativo teniendo un valor máximo de $1,42 \cdot 10^{-4} (\text{GeV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1})$. Por el contrario, a nivel del mar se observa el valor máximo como $1,03 \cdot 10^{-4} (\text{GeV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1})$

4.4.2. Pérdida de energía del muón

En la física de partículas, especialmente en el contexto de la interacción del muón con materiales específicos, es esencial entender y modelar con precisión la pérdida de energía que experimenta dicha partícula. Esta pérdida de energía se puede describir matemáticamente mediante la expresión:

$$\frac{-dE}{d\varrho} = a(E) + b(E)E, \quad (4.4)$$

aquí a y b son funciones parametrizadas que reflejan el comportamiento energético del muón en función de las características intrínsecas del material en cuestión. Estas

CAPÍTULO 4. MUOGRAPHY SIMULATION CODE (MUYSC)

funciones son sensibles a factores como la composición química, estructura cristalina, y otras propiedades físicas del material. Por otro lado, el término $\rho(L)$ representa la densidad de dicho material a lo largo de la trayectoria definida.

Es pertinente señalar que el sistema MUYSC implementa el modelo teórico propuesto por Lesparre [39], un modelo que realiza un ajuste polinómico basado en los datos empíricos presentados por Groom, específicamente centrados en la interacción del muón con rocas de referencia estándar [28], mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{-dE}{d\rho} = -10^{l_4 x^4 + l_3 x^3 + l_2 x^2 + l_1 x + l_0}, \quad (4.5)$$

donde $x = \log(E)$, y E es la energía del muón en GeV, $l_4 = 0,0154$, $l_3 = -0,0461$, $l_2 = 0,0368$, $l_1 = 0,0801$ y $l_0 = 0,2549$.

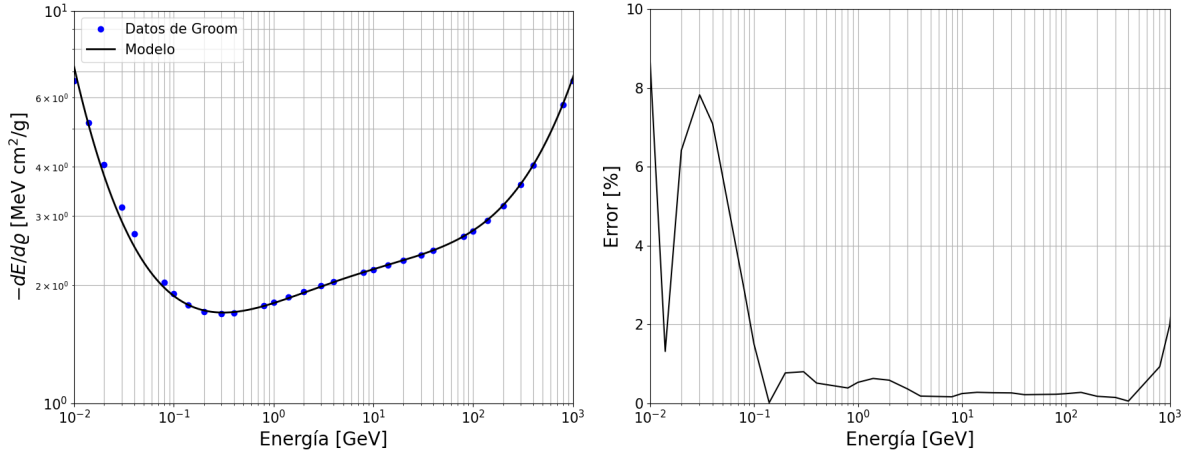


Figura 4.14: La figura muestra el modelo de la pérdida de energía del muón (línea solida) respecto a los datos de Groom (puntos azules) para energía en rangos de 10⁻² GeV a 10³ GeV y el error en porcentaje del ajuste del modelo a los datos experimentales.

En la parte izquierda de la figura 4.14 se visualiza como se ajusta el modelo a los datos experimentales y en la parte derecha el error del modelo respecto a los datos, el cual es de 8% para valores menores 10⁻¹ GeV, mientras que el error promedio es de 2% para energías mayores a 10⁻¹ GeV.

4.4.3. Estimación de la energía

El cálculo de la energía mínima del muón es esencial para determinar la energía requerida por una partícula para transitar a través de un determinado espesor de material sin ser absorbida. Este valor representa la energía vital para que el muón alcance el detector después de atravesar el objeto de interés, ya sea geológico o de otro tipo. Esta relación se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$E_{\min} = \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho} d\varrho + E_{\mu}, \quad (4.6)$$

aquí, E_{μ} denota la masa del muón y ϱ representa la opacidad del material, la cual se integra a través de la densidad a lo largo de todo el espesor de la roca.

MUYSC facilita el cálculo de la energía mínima requerida, representada como $E_{\min} = E(a)$. Este cálculo se efectúa mediante la resolución del siguiente problema de optimización:

$$a = \arg \min \left(\hat{\varrho} - \frac{E}{dE/d\varrho} \right)^2, \quad (4.7)$$

donde $\hat{\varrho} = \bar{\rho}L$ se define como la opacidad del objeto, con $\bar{\rho} = 2,65 \text{ g cm}^{-3}$ representando la densidad promedio de la roca a lo largo del trayecto del muón, denotado como L . La relación $\frac{E}{dE/d\varrho}$ se obtiene del modelo de ajuste 4.5.

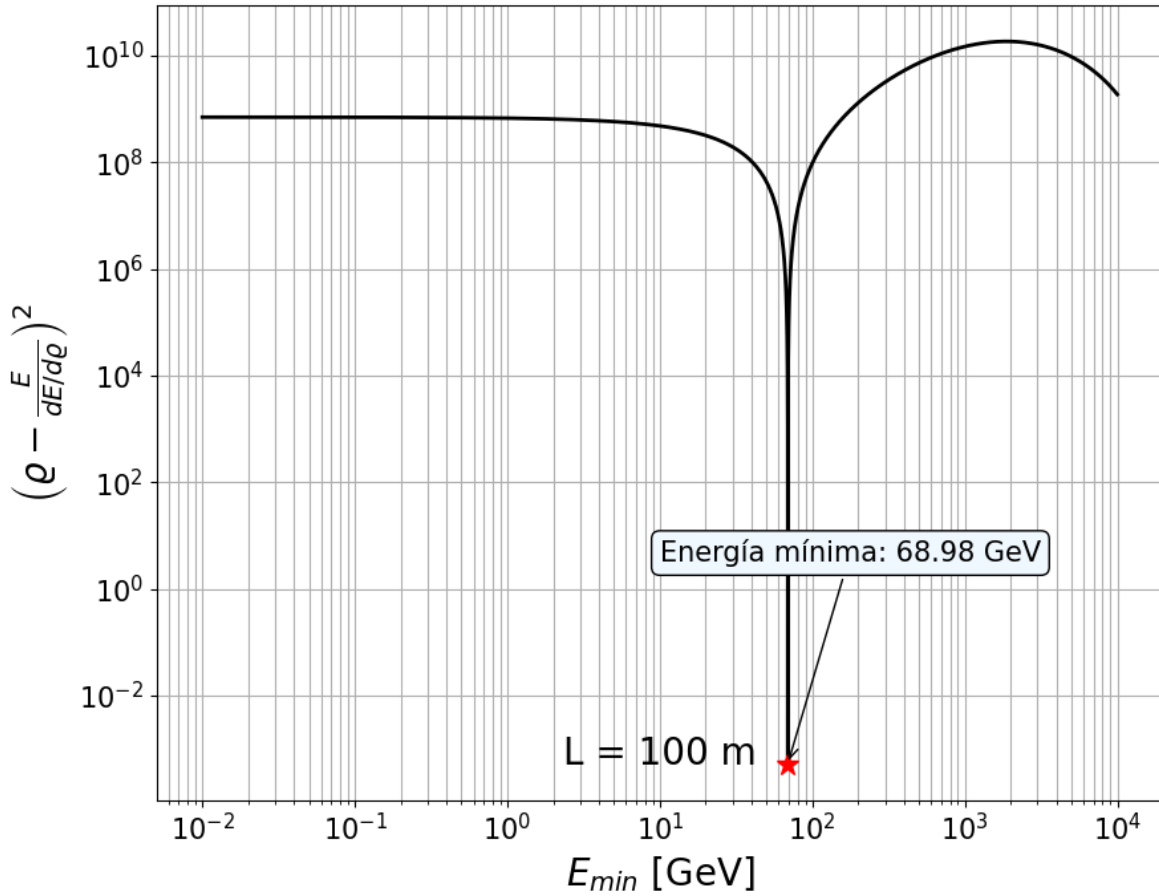


Figura 4.15: Energía mínima que un muón necesita para atravesar 100 m de roca estándar.

En la figura 4.15 se observa que la energía mínima que necesita un muón para atravesar 100 metros de roca es de 68.98 GeV.

4.4.4. Flujo integrado

Inicialmente es necesario calcular el flujo de muones, como parámetro principal será el ángulo cenital θ con el que llega el muón al punto de captación, esto está representado por la siguiente ecuación:

$$I[\rho, \theta] = \int_{E_{min}}^{\infty} \Phi(E_0, \theta) dE_0 \quad [cm^{-2}sr^{-1}s^{-1}], \quad (4.8)$$

y la versión discreta:

$$I(\rho, \theta) = \sum_{E_{min}}^{\infty} \Phi(E_0, \theta) \Delta E_0 \quad [cm^{-2}sr^{-1}s^{-1}]. \quad (4.9)$$

El flujo de muones integrado $I(\varrho, \theta)$ depende del flujo de muones diferencial $\Phi(E_0, \theta)$, la opacidad del objetivo y la energía mínima del muón calculada en 4.4.3, para obtener este flujo diferencial hacemos uso de los modelos semi-empíricos mencionados en la sección 3.4.1, MUYSC le permite al usuario elegir con que modelo desea simular el flujo de muones, entre Gaisser/Tang, Reyna/Bugaev y Reyna/Hebbeker.

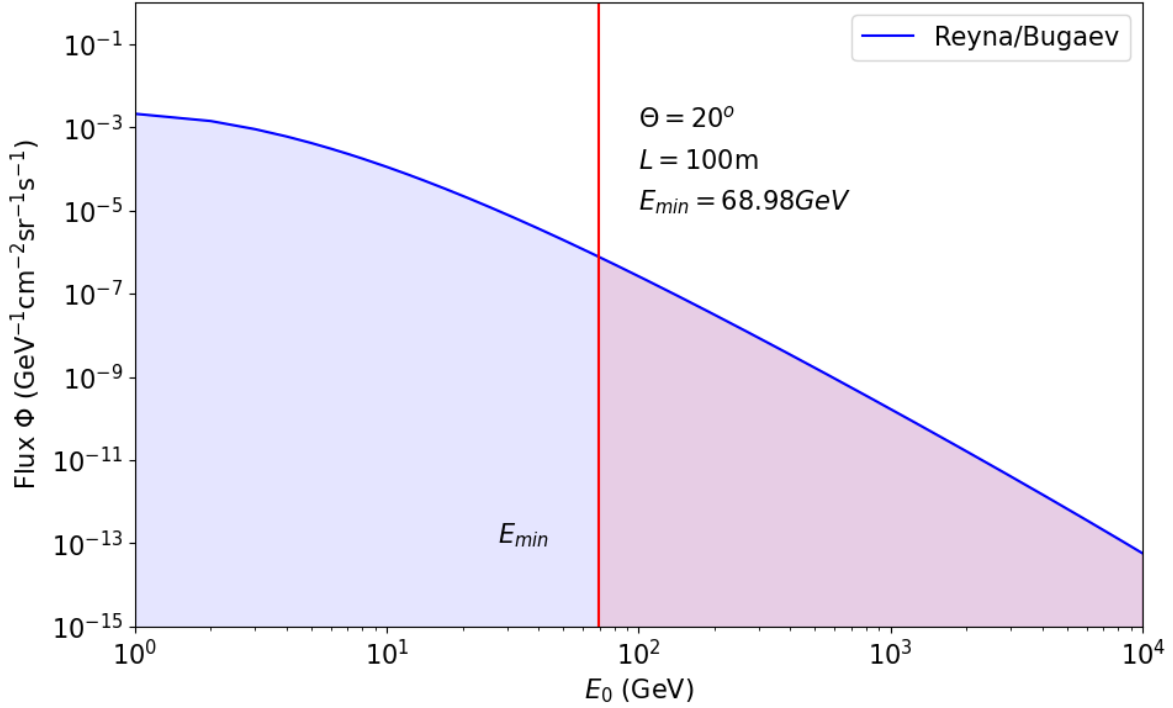


Figura 4.16: Flujo integrado para una distancia de 100 metros de roca estándar, con un ángulo de incidencia de 20° .

La Figura 4.16 muestra la región de integración del flujo diferencial (azul claro) para un espesor de roca de $L = 100 \text{ m}$ y un ángulo cenital de la incidencia del muón de 20° .

Flujo a cielo abierto

Después de llevar a cabo los procedimientos descritos anteriormente, el siguiente paso crucial en nuestra metodología es simular el flujo de muones en condiciones de cielo abierto. Esta simulación permite establecer un punto de referencia con el cual contrastar el flujo de muones al atravesar diversas estructuras geológicas.

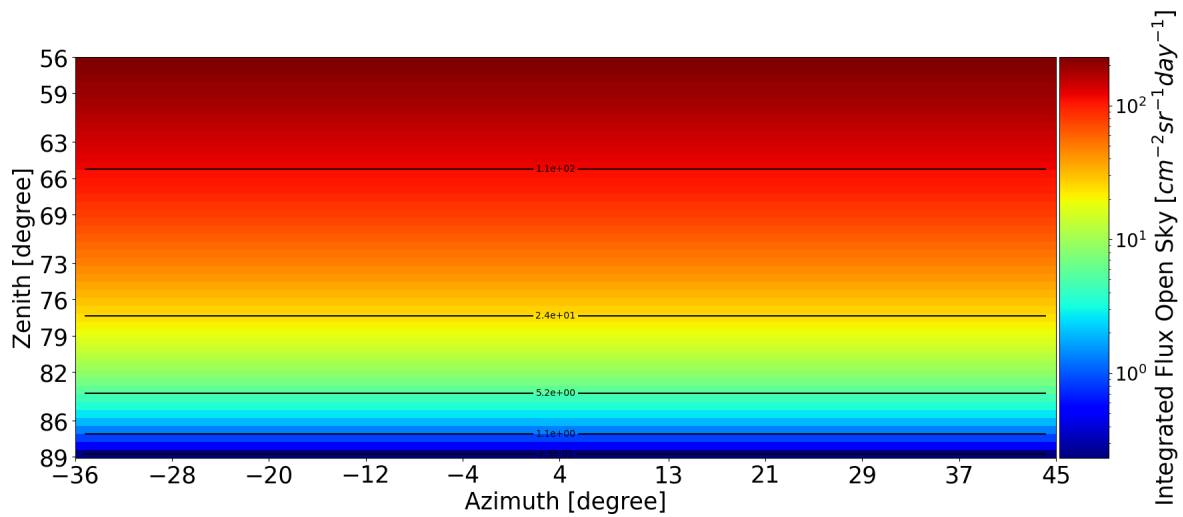


Figura 4.17: Representación simulada del flujo de muones correspondiente al cerro Machín bajo condiciones de cielo despejado, situada en las coordenadas geográficas (4,491984, -75,380085).

Muografía

El proceso de muografía implica la aplicación del flujo discreto, como se detalla en la Ecuación 4.9, a cada píxel del mapa de distancias. Como resultado, se obtiene el muograma, que es una representación de la montaña basada en la cantidad de muones que la atraviesan.

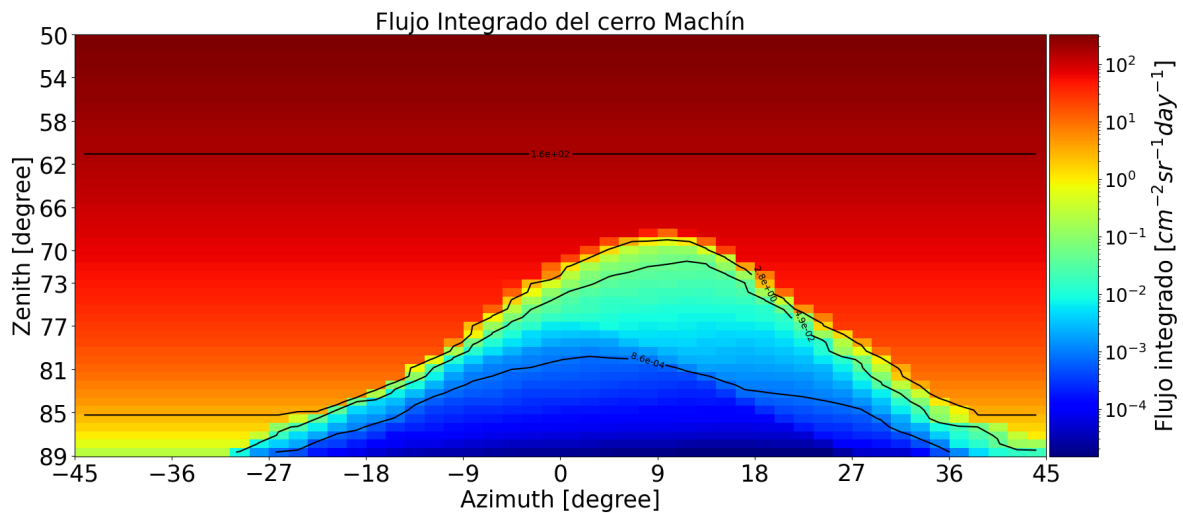


Figura 4.18: Muograma obtenido de la estructura geológica el cerro Machín.

En el muograma del volcán Cerro Machín, ilustrado en la Figura 4.18, se distinguen patrones claros que se correlacionan con la estructura geológica intrínseca del volcán. El flujo de muones alcanza un valor máximo de 326,68, un mínimo de $1,49 \cdot 10^5$, con un promedio de $69,77(\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{day}^{-1})$. Notablemente, el valor máximo del flujo se identifica

a un ángulo cenital de aproximadamente $50,07^\circ$. En la región superior del muograma, se registra una concentración elevada de muones, lo cual sugiere una menor obstrucción en esta zona. En contraposición, la región inferior muestra una reducción significativa del flujo de muones, reflejando la interacción de las partículas con la densidad y profundidad del material montañoso. Estos patrones subrayan el potencial de la muografía para diferenciar y visualizar variaciones en la composición interna de formaciones geológicas.

4.4.5. Caracterización Muográfica de Estructuras Geológicas

La muografía, al analizar la interacción de los muones con estructuras geológicas, posibilita la obtención de parámetros cruciales que caracterizan dichas estructuras. Entre estos parámetros se encuentran la opacidad, la densidad y la transmitancia del objeto en cuestión.

La densidad integrada, denotada como ρ , a lo largo de la trayectoria seguida por el muón, L , permite derivar la opacidad ϱ de la estructura de acuerdo a la relación [57]:

$$\varrho = \int_L \rho dl = -\frac{1}{\kappa} \ln T \quad [gcm^{-2}], \quad (4.10)$$

donde κ es el coeficiente de atenuación de masa y T es la transmitancia del muón.

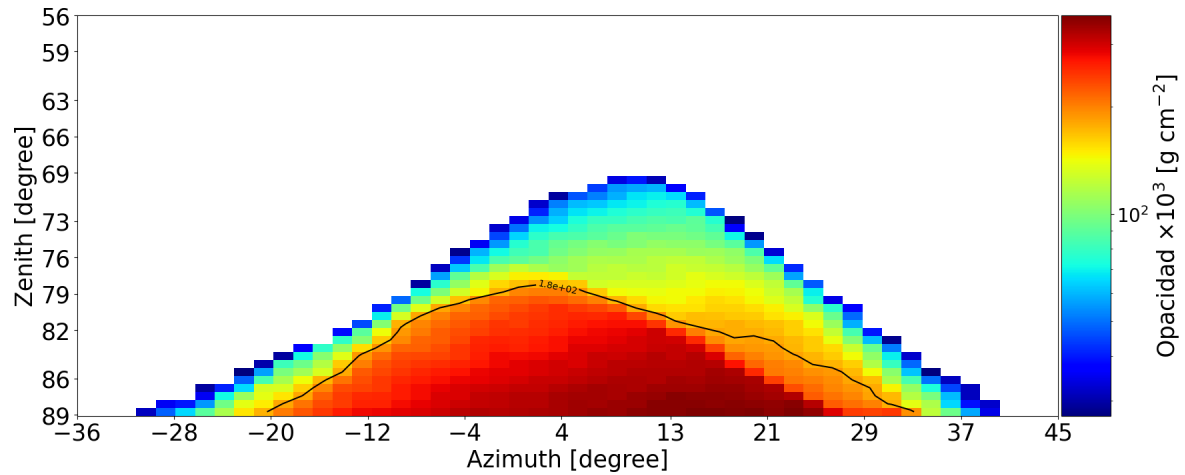


Figura 4.19: Simulación de la opacidad del Cerro Machín

Es fundamental subrayar que la transmitancia del muón, T , se define en función del flujo de muones que atraviesa la estructura, I , y el flujo de muones en condiciones de cielo abierto, I_0 [57]:

$$T = \frac{I}{I_0}. \quad (4.11)$$

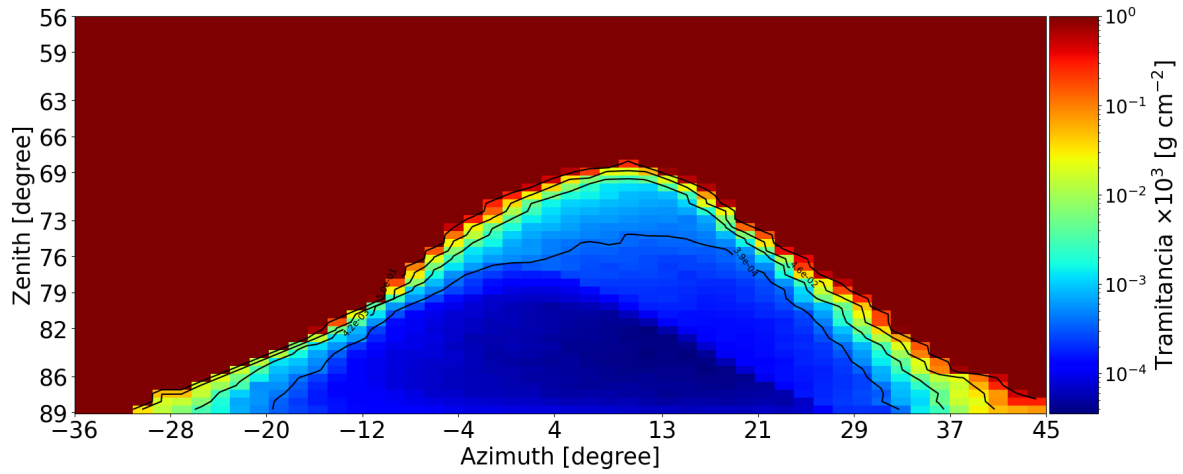


Figura 4.20: Simulación de la tramitancia del Cerro Machín

Finalmente, es posible deducir la densidad promedio de la estructura, $\bar{\rho}$, asumiendo una densidad homogénea a lo largo de la trayectoria del muón:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{L}. \quad (4.12)$$

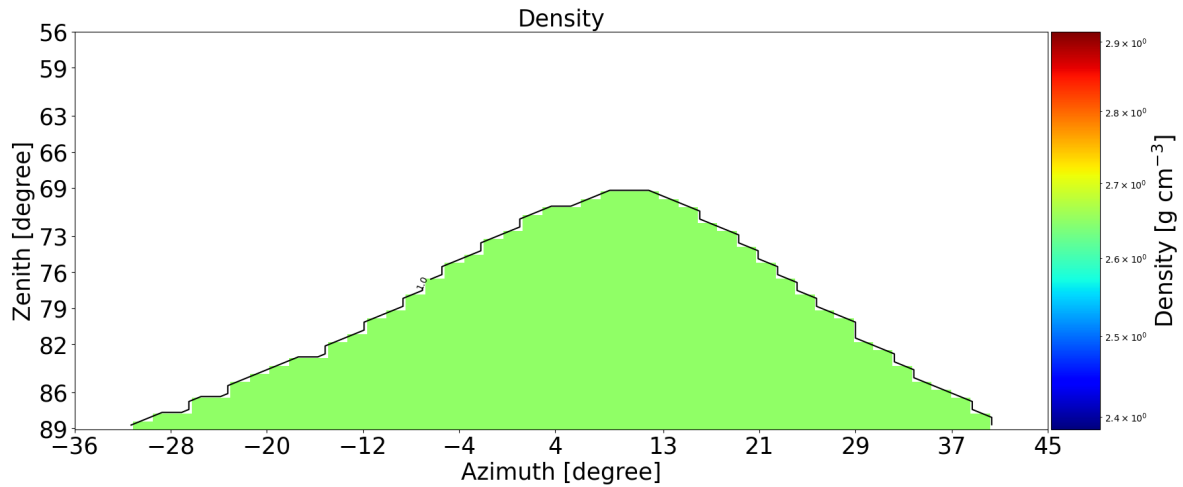


Figura 4.21: Simulación de la densidad del Cerro Machín

La capacidad de determinar estos parámetros a través de la muografía proporciona herramientas esenciales para la caracterización detallada y la interpretación de estructuras geológicas, facilitando la comprensión de sus propiedades internas y su composición.

4.4.6. Evaluación Puy Dôme

Para determinar la precisión de MUYSC, se comparó con datos observados en el Puy Dôme, Francia [12]. La Figura 4.22 muestra en su parte superior los datos experimentales, seguidos por los resultados simulados con MUYSC en la sección intermedia. La sección inferior ilustra el cociente entre MUYSC y los datos experimentales. Es notable que MUYSC sobreestima el flujo de muones en un factor de 1.37. Esta discrepancia podría deberse a la ausencia de correcciones en los datos del detector de Puy Dôme y a la suposición por parte de MUYSC de una eficiencia de detección del 100 %.

4.5. Parámetros del telescopio

El módulo de parametrización del detector tiene la tarea de calcular la resolución angular y la aceptación para cualquier telescopio de muones. Esto se realiza al proporcionar el área de cada píxel, el número total de píxeles en cada matriz sensible y la separación entre estos píxeles. La aceptación del telescopio, que se denota como $\mathcal{T}(r_{m,n})$, es una función del área de detección, $S(r_{m,n})$, y el ángulo sólido, $\delta\Omega(r_{m,n})$ [39]. Su relación se describe de la siguiente manera:

$$\mathcal{T}(r_{m,n}) = S(r_{m,n}) \times \delta\Omega(r_{m,n}), \quad (4.13)$$

en esta ecuación, $\delta\Omega = 4A/r_{m,n}^2$, donde $A = d^2$ representa el área de cada píxel, d es la longitud de un lado del píxel, y $r_{m,n}$ es la trayectoria entre los píxeles m y n . Esta trayectoria depende de D , la distancia entre los paneles de detección, y de E , la distancia relativa entre los píxeles m y n , tal como se ilustra en la figura 4.23.

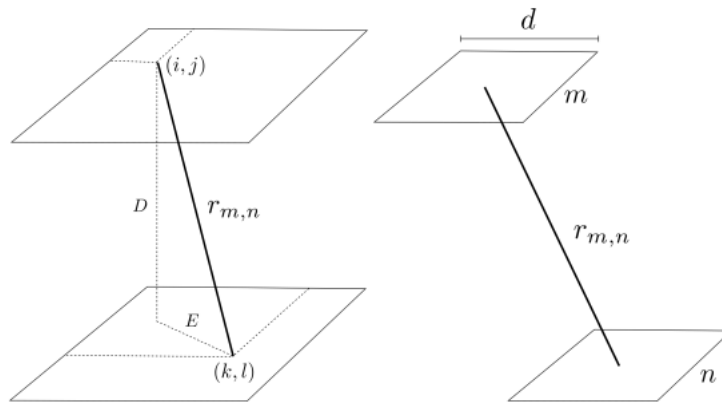


Figura 4.23: El rastreo de los muones que atraviesan el hodoscopio de muones es esencial para determinar su trayectoria. En este proceso, los píxeles $m(i, j)$ y $n(k, l)$ definen una trayectoria $r_{m,n}$ que se extiende entre las capas del hodoscopio. Importante mencionar que la longitud de esta trayectoria está condicionada tanto por la separación entre las capas del hodoscopio, denominada D , como por la distancia relativa E entre los píxeles en cuestión [57].

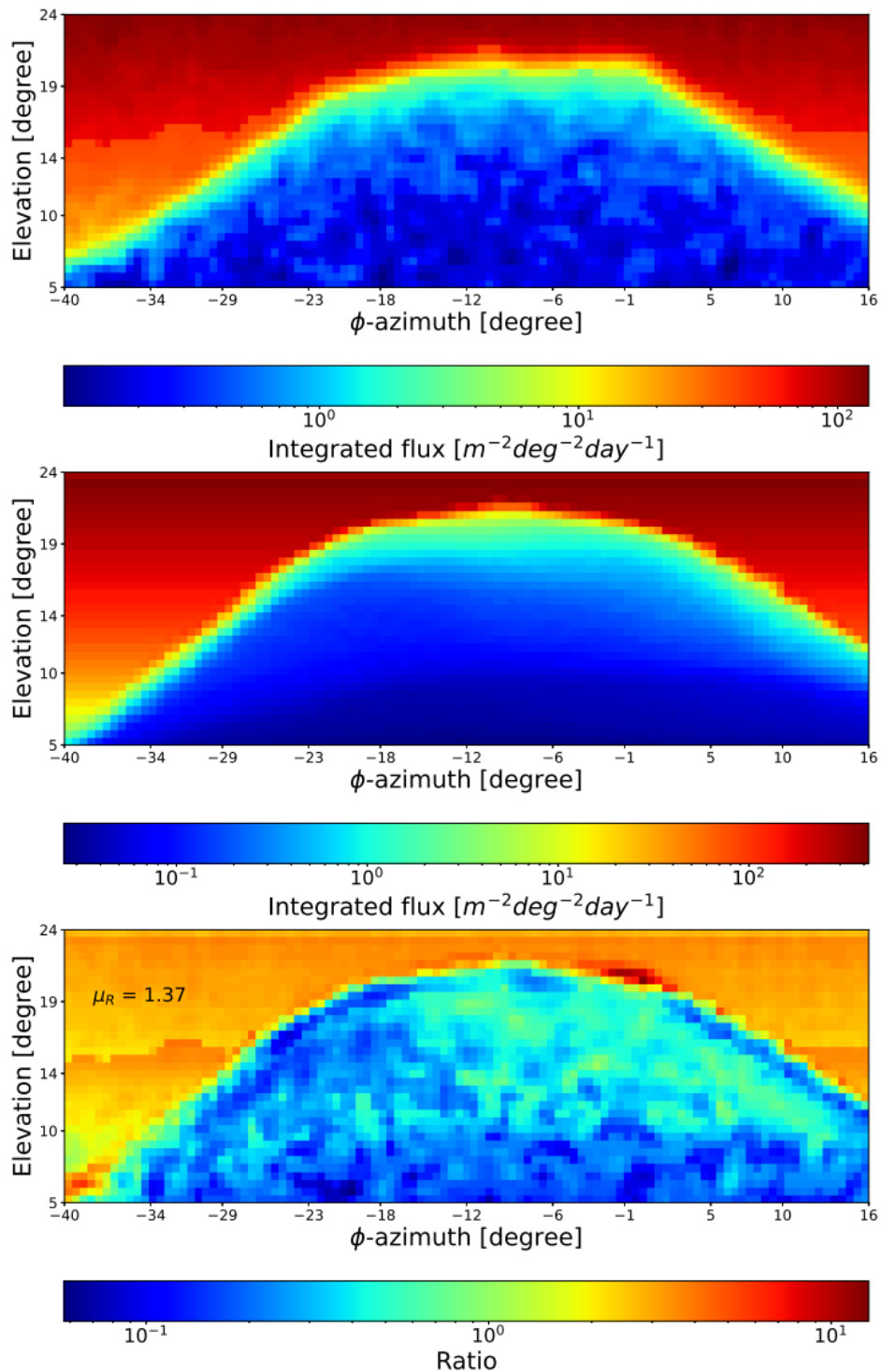


Figura 4.22: Comparación entre datos (superior) y MUYSC (medio) del flujo de muones sobre el Puy Dôme. El ratio de simulación/datos (inferior) evaluando la eficiencia de MUYSC. El promedio del ratio muestra que MUYSC sobre estima el flujo de muones porque asume la eficiencia del detector como 100 %.

4.5. PARÁMETROS DEL TELESCOPIO

La distancia $r_{m,n}$ se puede calcular como:

$$r_{m,n} = \sqrt{D^2 + E^2} \Leftrightarrow E = \sqrt{(|k - i|d)^2 + (|l - j|d)^2}, \quad (4.14)$$

donde i, j representan las coordenadas del píxel m en el panel frontal, mientras que k, l son las coordenadas del píxel n en el panel trasero.

El área de detección se determina por el número de píxeles activados por panel, N_P , por trayectoria, $r_{m,n}$, y el área del píxel, A . Esto se puede expresar como:

$$S(r_{m,n}) = N_P \cdot A. \quad (4.15)$$

El hodoscopio de muones es capaz de reconstruir $2N_i - 1 \times 2N_j - 1$ trayectorias, donde N_i es el número de barras en la dirección i y N_j es el número de barras en la dirección j .

Finalmente, el flujo que atraviesa I se define como:

$$I(r_{m,n}) = \frac{N(r_{m,n})}{\Delta T \times \mathcal{T}(r_{m,n})}, \quad (4.16)$$

en donde $N(r_{m,n})$ es el número de partículas detectadas y ΔT es el tiempo de detección.

Este módulo calcula varios parámetros del telescopio, incluyendo el área de detección, la resolución angular, el ángulo sólido y la aceptación. La figura 4.24 presenta estos parámetros para el Telescopio de Muones (MuTe), que consta de $N_x = N_y = 30$ tiras de centelleo, un tamaño de píxel de $d = 4$ cm, y una separación entre los paneles de $D = 250$ cm [55]. El área de detección máxima de MuTe es de aproximadamente $14,4$ cm². Para trayectorias perpendiculares, el ángulo sólido alcanza $\sim 1,02 \times 10^{-3}$ sr, y la aceptación máxima es de $\sim 3,6$ cm² sr para $r_{0,0}$ [55].

La Figura 4.25 muestra los resultados obtenidos por Gibert et al. [27] y la herramienta MUYSC presentan un hodoscopio de centelleo compuesto por dos matrices con $N_x = N_y = 32$ tiras, un tamaño de píxel de $d = 5$ cm y una separación de $D = 100$ cm. Este telescopio tiene una aceptación máxima de 64 cm² sr en $r_{0,0}$ y una apertura angular de $\pm 57^\circ$.

En la figura 4.26 Carbone et al. [11] describen un telescopio con $N_x = N_y = 16$ tiras, un tamaño de píxel de $d = 5$ cm y una separación de $D = 170$ cm. La aceptación máxima en $r_{0,0}$ para este telescopio es de $5,54$ cm² sr.

Lesparre et al. [39] en la figura 4.27 describen un telescopio con $N_x = N_y = 80$ tiras, un tamaño de píxel de $d = 5$ cm, y una separación de $D = 115$ cm. Este telescopio tiene una aceptación máxima en $r_{0,0}$ de $12,1$ cm² sr, una apertura angular de $\pm 34^\circ$ y un ángulo sólido máximo de $7,56 \times 10^{-3}$ sr.

Luego dos años más tarde realizan el mismo telescopio pero con una modificación de

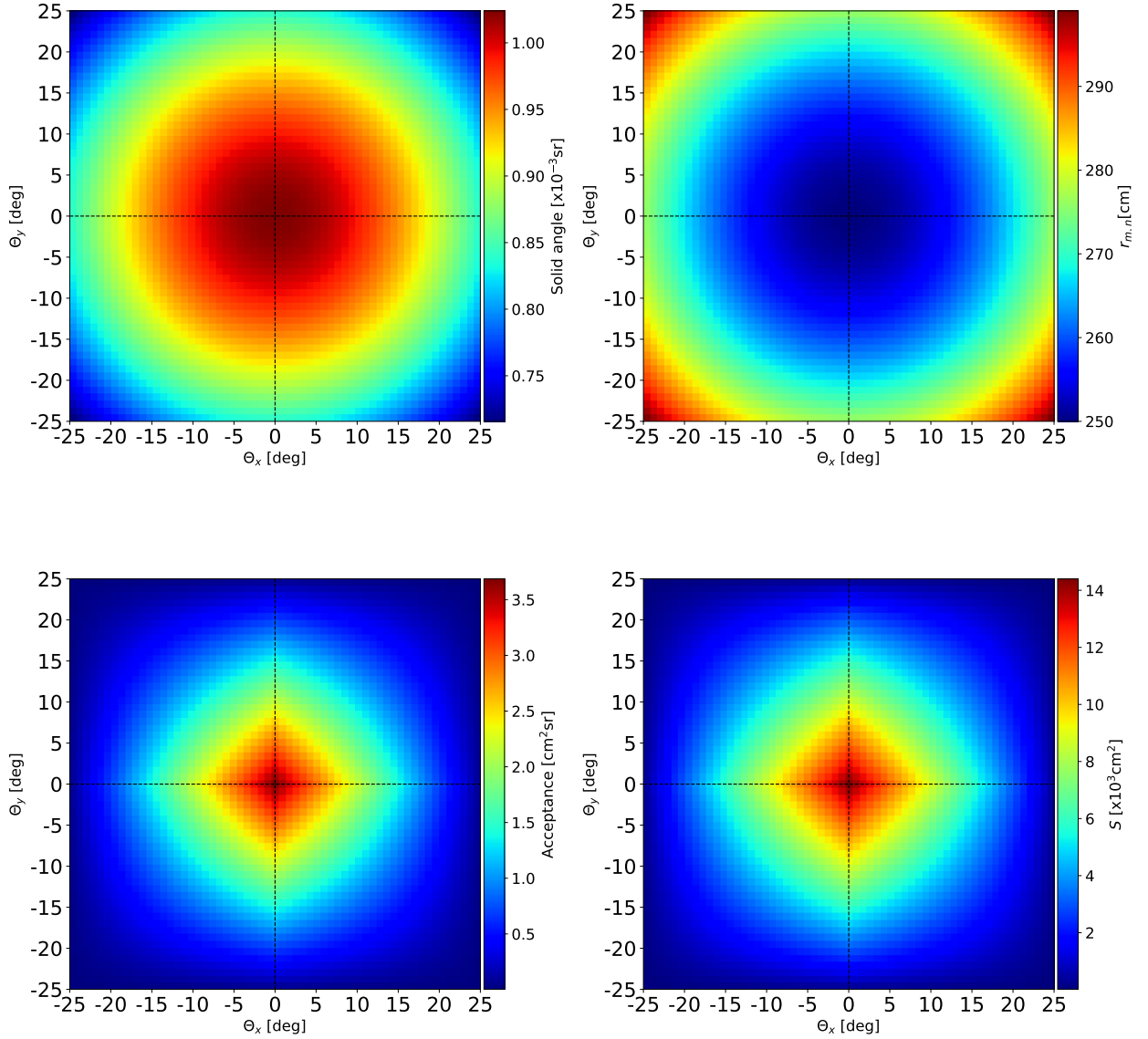


Figura 4.24: Parametrización del telescopio MuTe (Muon Telescope) para $N_x = N_y = 30$, lado del pixel $d = 4\text{cm}$ y separación de las barras $D = 250\text{cm}$. La detección máxima del área de MuTe es $\approx 14,4\text{cm}^2$, el ángulo solido para trayectorias perpendiculares alcanza $\approx 1,02 \times 10^{-3}\text{sr}$ y la aceptación máxima es de $\approx 3,6\text{cm}^2\text{sr}$ para $r_{0,0}$.

4.5. PARÁMETROS DEL TELESCOPIO

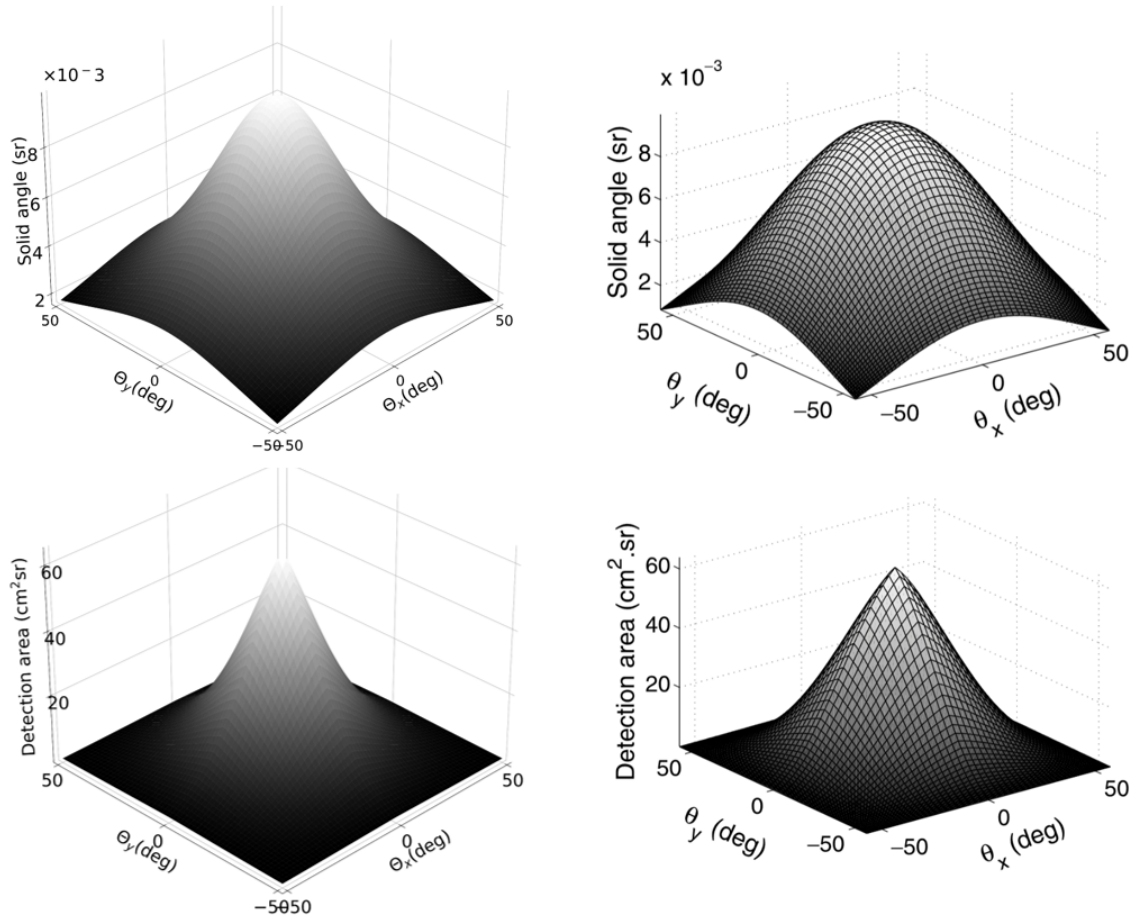


Figura 4.25: En la figura, se presenta una comparativa de resultados. A la izquierda, se muestran los resultados derivados de MUYSC. Por contraste, a la derecha, se exhiben los hallazgos reportados por Gibert et al. [27]. Es importante destacar que ambos conjuntos de datos trabajan con una aceptación máxima de $64 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ y una apertura angular de $\pm 57^\circ$

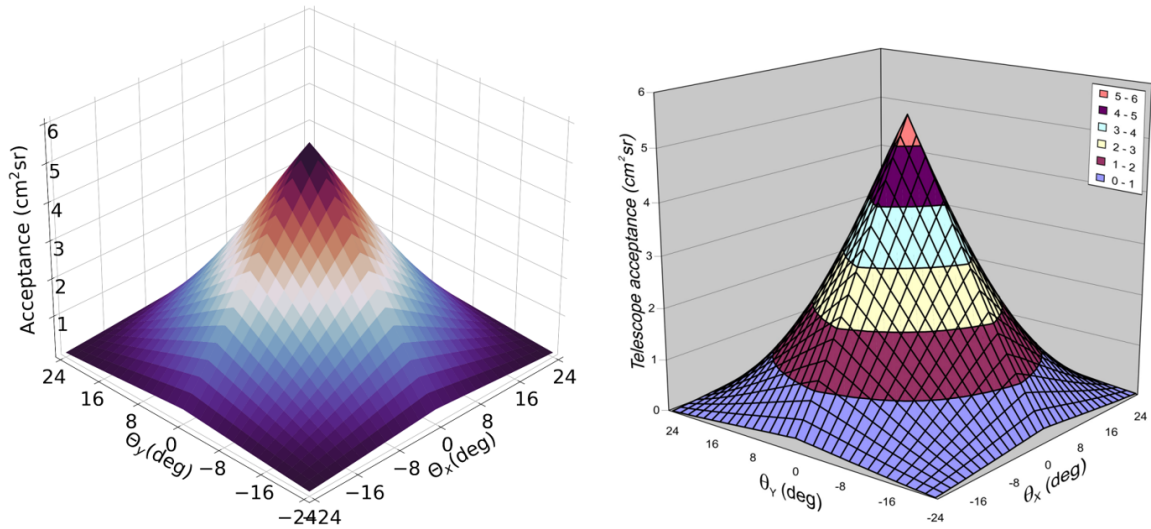


Figura 4.26: En la ilustración proporcionada, a la izquierda se despliegan los hallazgos obtenidos mediante MUYSC, en contraposición a los resultados reportados por Gibert et al. [11] que se visualizan a la derecha. Ambas representaciones operan bajo una aceptación máxima de $5,54 \text{ cm}^2 \text{ sr}$.

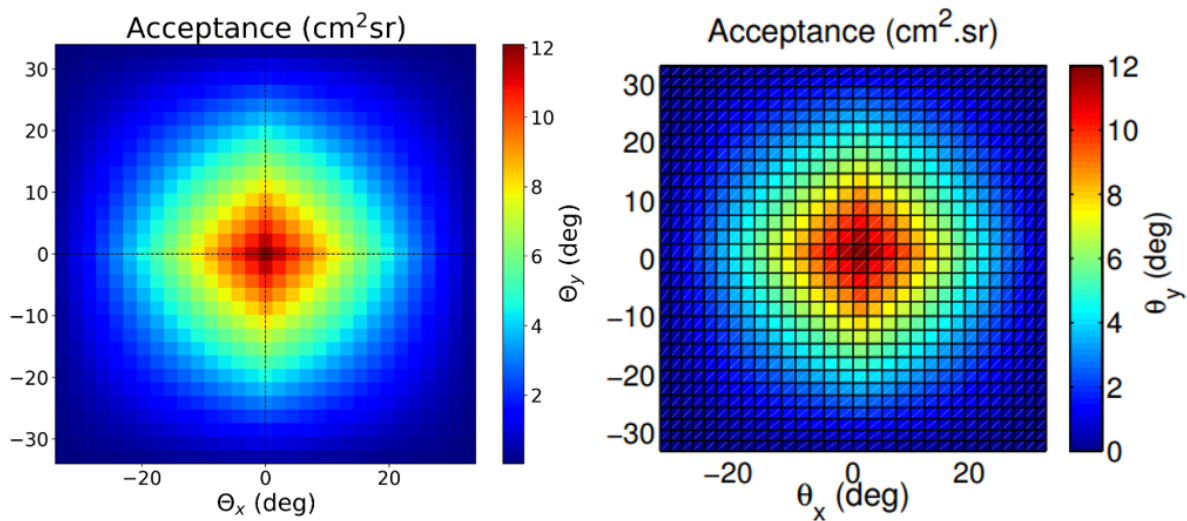


Figura 4.27: A la izquierda los resultados obtenidos por MUYSC, mientras que a la derecha se encuentran los resultados de Lesparre et al. [39]. Tiene una aceptación máxima de $12,1 \text{ cm}^2 \text{ sr}$.

4.5. PARÁMETROS DEL TELESCOPIO

$D = 80$ cm [38] presentando en 4.28. Este telescopio en cambio tiene una aceptación máxima en $r_{0,0}$ de $25 \text{ cm}^2 \text{ sr}$, una apertura angular de $\pm 45^\circ$ y un ángulo sólido máximo de $15,6 \times 10^{-3} \text{ sr}$.

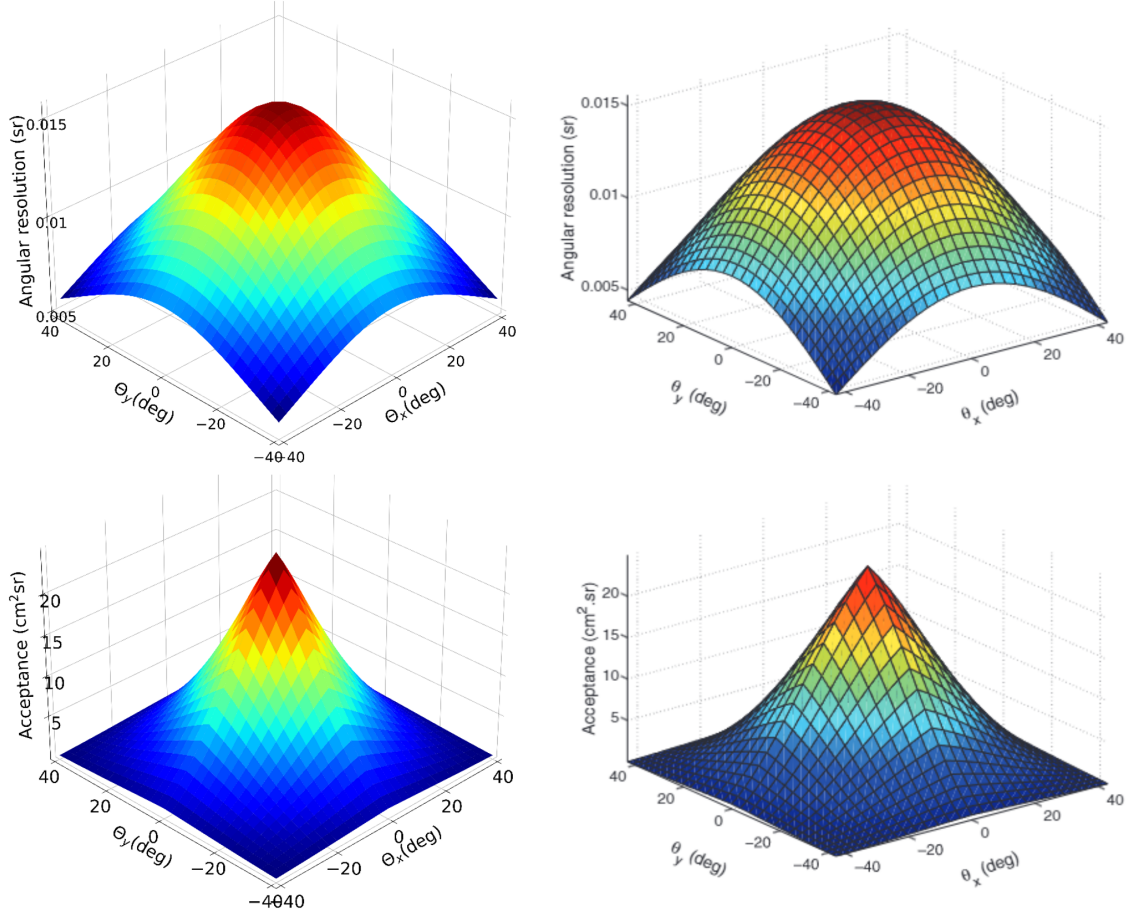


Figura 4.28: A la izquierda la representación de la resolución angular y aceptación de MUYSC y a la derecha de Lesparre et al [38]. Aceptancia máxima en $r_{0,0}$ de $25 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ y un ángulo sólido máximo de $15,6 \times 10^{-3} \text{ sr}$.

Lo Presti et al. [43] describen un detector de seguimiento de muones compuesto por dos capas de barras de centelleo de plástico extruido con $N_x = N_y = 99$, un tamaño de píxel de $d = 1$ cm y una separación de $D = 97$ cm. Este detector tiene una apertura angular de aproximadamente $\pm 45^\circ$, una resolución angular máxima de $4,25 \times 10^{-4} \text{ sr}$ y una aceptación máxima en $r_{0,0}$ de $1,04 \text{ cm}^2 \text{ sr}$.

Finalmente, Uchida et al. [66] describen un telescopio con $N_x = N_y = 12$ tiras, un tamaño de píxel de $d = 7$ cm, y una separación de $D = 100$ cm. Este telescopio tiene una apertura angular de aproximadamente $\pm 40^\circ$, una resolución angular máxima de $19,6 \times 10^{-3} \text{ sr}$ y una aceptación máxima en $r_{0,0}$ de $34,57 \text{ cm}^2 \text{ sr}$.

Los parámetros y características modelados por la clase `telescopeParams` pueden usarse para realizar un análisis detallado de las capacidades de un telescopio dadas ciertas especificaciones y parámetros. Este tipo de análisis puede ser útil en diversas situaciones,

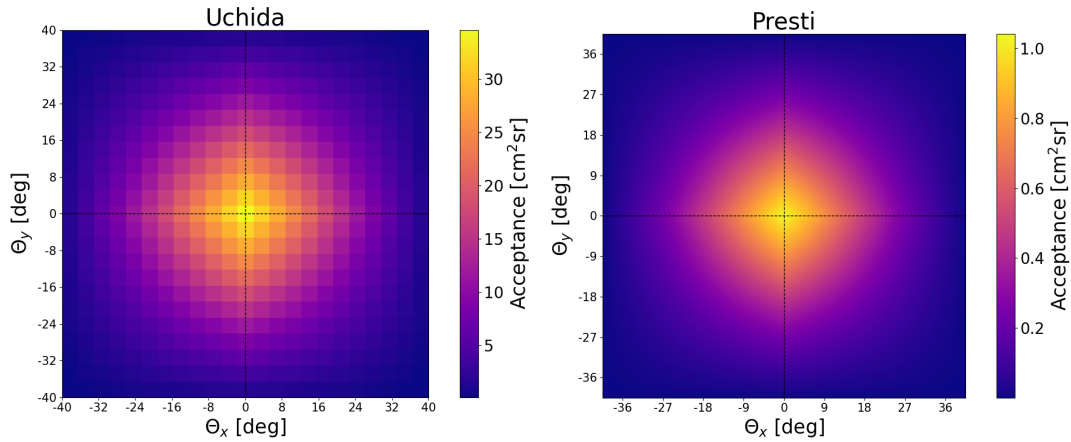


Figura 4.29: Aceptancia de Uchida máxima de $34,57 \text{ cm}^2 \text{ sr}$, aceptación máxima de Presti $1,04 \text{ cm}^2 \text{ sr}$.

desde la planificación de observaciones astronómicas hasta el diseño y la optimización de nuevos telescopios. Al entender cómo el diseño del telescopio afecta su rendimiento y utilidad para diferentes tareas de observación, se puede mejorar la eficiencia y eficacia de las observaciones astronómicas.

La clase `telescopeParams` ha sido diseñada para modelar y encapsular una variedad de parámetros y características inherentes a los telescopios. A través de las variables y funciones definidas dentro de esta clase, es posible llevar a cabo un examen meticuloso y profundo de las capacidades funcionales de un telescopio, considerando un conjunto predefinido de especificaciones y parámetros técnicos.

El análisis que puede derivarse de esta modelización posee aplicaciones vastas y cruciales en el ámbito de la astronomía. Por un lado, permite a los astrónomos y observatorios planificar sesiones de observación con una mayor precisión y confiabilidad, garantizando la obtención de datos de calidad y minimizando los márgenes de error. Por otro lado, este tipo de análisis es instrumental durante las fases de diseño, prototipado y optimización de nuevos telescopios, ya que proporciona información clave sobre cómo determinadas características del diseño pueden influir en el rendimiento general del instrumento.

Adicionalmente, tener una comprensión detallada y sistemática de cómo ciertos parámetros y aspectos del diseño del telescopio afectan directamente su rendimiento en diferentes escenarios y tareas de observación no solo aumenta la eficiencia operativa, sino que también potencia la eficacia de las investigaciones astronómicas. Esta información, a su vez, sienta las bases para futuras innovaciones en la tecnología de telescopios y en las metodologías de observación.

5 Conclusiones

MUYSC destaca por su eficiencia computacional, ofreciendo tiempos de ejecución reducidos de alrededor de 2 minutos. Esta característica permite un avance significativo en investigaciones, reduciendo las barreras asociadas a la complejidad y la espera en procesos de simulación.

MUYSC proporciona una versatilidad notable al permitir una elección flexible tanto del punto de observación como de la apertura angular. Además, está diseñado para considerar la estructura geológica real de la región de estudio y se complementa con la inclusión de diferentes modelos para la generación de muones y herramientas que permiten corrección de altura, asegurando resultados precisos y ajustados a las condiciones reales del terreno.

Uno de los objetivos primordiales de MUYSC es acelerar las fases iniciales del proceso de investigación y desarrollo. Mediante el uso de simulaciones rápidas, una vez identificado el punto de observación óptimo, es posible proceder a simulaciones más detalladas y precisas utilizando herramientas de mayor complejidad, como CORSIKA o GEANT4. Esta estrategia optimiza los recursos, dirigiendo esfuerzos computacionales intensivos solo cuando son estrictamente necesarios.

Con la ayuda de MUYSC, el usuario tiene la capacidad de determinar los parámetros esenciales que un telescopio debe poseer, tales como resolución, tamaño y distancia al objetivo, para llevar a cabo un estudio específico de manera efectiva.

La precisión de MUYSC fue evaluada al compararla con datos de muografía y parámetros de telescopios actuales. Esta comparativa mostró que MUYSC es un marco de trabajo robusto y de alta precisión. Además, es capaz de replicar diferentes estudios recientes sin la necesidad de establecer un entorno de simulación específico para cada proyecto.

MUYSC destaca por ser una herramienta de código abierto. Esta cualidad no sólo asegura su accesibilidad y capacidad de reproducción, sino que también valida su robustez y precisión al contrastar sus resultados con los derivados de herramientas de simulación consolidadas en la comunidad científica. Así, MUYSC se posiciona como una alternativa sólida para expertos en el ámbito de la muografía.

Referencias

- [1] A. Fasso et al. A. Ferrari, P. Sala. Fluka: A multi- particle transport code. *Stanford Linear Accelerator Cen- ter (SLAC)*, 2005.
- [2] F Ambrosino, A Anastasio, A Bross, L Bonechi, L Cimmino, G De Lellis, and P Strolin. Joint measurement of the atmospheric muon flux through the puy de dôme volcano with plastic scintillators and resistive plate chambers detectors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24):2013JD020106, 2014.
- [3] Carl D Anderson and Seth H Neddermeyer. Cloud chamber observations of cosmic rays at 4300 meters elevation and near sea-level. *Physical Review*, 50(4):263, 1937.
- [4] Carl D Anderson and Seth H Neddermeyer. Nature of penetrating particles in cosmic radiation. *Nature*, 140:517–518, 1937.
- [5] James BR Battat, E Daw, A Dorofeev, A Egorov, TM Harrison, VA Kudryavtsev, A Maevskaya, PA Morris, SM Paling, and NJC Spooner. Muon tomography for cultural heritage: a simulated application to a specific case. *Journal of Cultural Heritage*, 25:161–169, 2017.
- [6] J. W. Bieber, J. Clem, P. Evenson, D. Hall, J. E. Humble, and M. Duldig. Solar modulation of galactic cosmic rays on the space shuttle: Instrumentation and first results. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A1), 2004.
- [7] J. B. Birks. *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. Pergamon Press, 1964.
- [8] Lorenzo Bonechi, Alberto Bacci, and Greta Castellini. Muon radiography for geophysical applications: Volcanoes and archaeological sites. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 878:218–222, 2018.
- [9] Alain Bonneville, Loïc Chevallier, and Antoine Aouizerate. Muon tomography for oil and gas exploration. In *Society of Exploration Geophysicists Technical Program Expanded Abstracts*, volume 34, pages 1–5. Society of Exploration Geophysicists, 2015.
- [10] E. V. Bugaev, A. Misaki, V. A. Naumov, T. S. Sinegovskaya, S. I. Sinegovsky, and N. Takahashi. Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater. *Phys. Rev. D*, 58:054001, Jul 1998.
- [11] Daniele Carbone, Dominique Gibert, Jacques Marteau, Michel Diament, Luciano

- Zuccarello, and Emmanuelle Galichet. An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy). *Geophysical Journal International*, 196(2):633–643, 10 2013.
- [12] C. Carloganu et al. Towards a muon radiography of the puy de dome. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2(1):55–60, 2013.
- [13] P. A. Cherenkov. *Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light*, volume 82. American Physical Society, 1959.
- [14] F. Chevrier and Y. Le Moullec. Muon tomography: Principles, technologies and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 878:200–217, 2018.
- [15] Michel Chouteau, Nolwenn Lesparre, Dominique Gibert, Jacques Marteau, Jerome Hugon, Fabrice Dufour, and Christophe Nussbaum. Muon tomography: Plans for observations in the mont terri underground rock laboratory. *Journal of Applied Geophysics*, 76:6–16, 2011.
- [16] L Cimmino, G De Lellis, M Orazi, C Sirignano, and P Strolin. Muography of the main dome of hagia sophia. *Journal of Cultural Heritage*, 40:1–8, 2019.
- [17] Boris Shwartz Claus Grupen. *Particle detectors*. Cambridge University Press, 2008.
- [18] L. Desorgher. Magnetoscsmics. *Physikalisches Institut, University of Bern, Bern, Germany*, 2003.
- [19] A. Samalan et al. End-to-end simulations of the MUon RAdiography of VESuvius experiment. *Journal of Instrumentation*, 2022.
- [20] Alessandro Lechmann et al. Muon tomography in geoscientific research – a guide to best practice. *Earth-Science Reviews*.
- [21] Heck et al. Corsika: An air shower simulation program. *Astrophysics Source Code Library*, pages 02006–, 02 2012.
- [22] Moussawi et al. The simulations chain of the muraves experiment. 2022.
- [23] S. Agostinelli et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003.
- [24] Sarmiento-Cano et al. The arti framework: Cosmic rays atmospheric background simulations. 2020.
- [25] Vesga Ramirez et al. Muon tomography sites for colombian volcanoes. *Annals of Geophysics*, 63, 2020.
- [26] Thomas K. Gaisser. Cosmic rays and particle physics. *Cambridge University Press*, 1990.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- [27] D. Gibert, F. Beauducel, Y. Déclais, et al. Muon tomography: Plans for observations in the lesser antilles. *Earth, Planets and Space*, 62:153–165, 2010.
- [28] D. E. Groom et al. Muon stopping power and range tables 10 mev–100 tev. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78(2):183–356, 2001.
- [29] C. Grupen and I. Buvat. *Extensive air showers*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [30] E Guardincerri, C Morris, C Rowe, A Pritchard, M Burns, F Ambrosino, A Boiano, L Bonechi, G Bonomi, L Cimmino, et al. Imaging the subsurface of the region of the villa dei papiri in herculaneum using 3d muography. *Scientific Reports*, 8(1):1–10, 2018.
- [31] H. Gómez. Muon tomography using micromegas detectors: From archaeology to nuclear safety applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019.
- [32] T. Hebbeker et al. Cosmic-ray air shower measurements with the karlsruhe shower core and array detector. *Astroparticle Physics*, 15(1):1–11, 2001.
- [33] Thomas Hebbeker and Charles Timmermans. A compilation of high energy atmospheric muon data at sea level. *Astroparticle Physics*, 18(1):107–127, 2002.
- [34] Kevin Jourde, Dominique Gibert, Jacques Marteau, Jean-Christophe Komorowski, and Sebastien Deroussi. Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the la soufrière of guadeloupe volcano. *Scientific Reports*, 6(1):33406, 2016.
- [35] NASA JPL. Nasa shuttle radar topography mission global 1 arc second, 2013. The DOI landing page provides citations in APA and Chicago styles.
- [36] V.A. Kudryavtsev. Muon simulation codes music and musun for underground physics. *Computer Physics Communications*.
- [37] VA Kudryavtsev. Muon tomography for geosciences and archaeology. *Instruments and Experimental Techniques*, 56(2):132–142, 2013.
- [38] N. Lesparre, J. Marteau, Y. Déclais, D. Gibert, B. Carlus, F. Nicollin, and B. Kergosien. Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 1(1):33–42, 2012.
- [39] Nolwenn Lesparre, Dominique Gibert, J. Marteau, Y. Déclais, Daniele Carbone, and E. Galichet. Geophysical muon imaging: Feasibility and limits. *Geophysical Journal International*.
- [40] Nolwenn Lesparre, Dominique Gibert, Jacques Marteau, and Jean-Christophe Komorowski. Density muon radiography of la soufrière of guadeloupe volcano: com-

- parison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geophysical Journal International*, 190(2):1008–1019, 2012.
- [41] Paolo Lipari. Lepton spectra in the earth’s atmosphere. *Astroparticle Physics*, 1(2):195–227, 1993.
- [42] D. Lo Presti and F. Riggi. Muographic monitoring of the volcano-tectonic evolution of mount etna. *Scientific Reports*, 10(1), 2020.
- [43] D. Lo Presti, F. Riggi, C. Ferlito, et al. Muographic monitoring of the volcano-tectonic evolution of mount etna. *Scientific Reports*, 10:11351, 2020.
- [44] Benoit Marini. Real time muography simulator for scanpyramids mission. 2018.
- [45] Haruo Miyadera, Konstantin N Borozdin, Steve J Greene, Zarija Lukic, Koji Masuda, Edward C Milner, Christopher L Morris, and John O Perry. Imaging fukushima daiichi reactors with muons. *AIP Advances*, 3(5):052133, 2013.
- [46] Kunihiro Morishima, Mitsuaki Kuno, Akira Nishio, Nobuko Kitagawa, Yuta Manabe, Masaki Moto, Fumihiko Takasaki, Hirofumi Fujii, Kotaro Satoh, Hideyo Kodama, et al. Discovery of a big void in khufu’s pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552(7685):386–390, 2017.
- [47] C. L. Morris, J. Bacon, K. Borozdin, H. Miyadera, J. Perry, and S. Watson. Imaging cargo containers using muon tomography. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1553, pages 161–165. AIP, 2013.
- [48] S. Nagahara and S. Miyamoto. Feasibility of three-dimensional density tomography using dozens of muon radiographies and filtered back projection for volcanos. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(4):307–316, 2018.
- [49] K. Nagashima. *Cosmic Ray Physics: The Study of Cosmic Ray Composition and Energy Spectrum by Balloon-Borne Experiments*. World Scientific, 2018.
- [50] Seth H. Neddermeyer and Carl D. Anderson. Note on the nature of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.*, 51:884–886, May 1937.
- [51] Seth H Neddermeyer and Carl D Anderson. Note on the nature of cosmic-ray particles. *Physical Review*, 51(10):884, 1937.
- [52] R Nishiyama and G Saracino. Muography as a new tool for archaeology. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 295, page 012014. IOP Publishing, 2017.
- [53] Ryuichi Nishiyama, Taro Kusagaya, and Marina Rosas-Carbajal. Density muon radiography of la soufrière of guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 3(1):29–37, 2014.
- [54] D. Pagano and G. Bonomi. Ecomug: An efficient cosmic muon generator for cosmic-ray muon applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- [55] J. Peña-Rodríguez and J. Pisco-Guabave et al. Design and construction of mute: a hybrid muon telescope to study colombian volcanoes. *Journal of Instrumentation*, 2020.
- [56] J. Peña-Rodríguez, P. A. Salgado-Meza, H. Asorey, L. A. Núñez, A. Núñez-Castiñeyra, C. Sarmiento-Cano, and M. Suárez-Durán. Racimo@bucaramanga: A citizen science project on data science and climate awareness, 2022.
- [57] Jesús Peña Rodríguez. *Diseño y calibración de un telescopio de muones híbrido para estudios vulcanológicos*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, 2021.
- [58] Jose Prada, Misael Rosales, and Carlos Guada. *Montaje y calibración de un detector de Ioduro de Sodio-NaI(Tl), para medir la componente electromagnética de baja energía en una cascada de partículas de radiación cósmica. [La Hechicera, estado Mérida, 1893 msnm, 800 gr/cm²]*. PhD thesis, 12 2020.
- [59] D Reyna. A simple parameterization of the cosmic-ray muon momentum spectra at the surface as a function of zenith angle. *arXiv preprint hep-ph/0604145*, 2006.
- [60] G. Saracino and F. Ambrosino. Applications of muon absorption radiography to the fields of archaeology and civil engineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2137):20180057, 2018.
- [61] Mauricio Suárez Durán. *Variaciones del flujo de radiación cósmica en distintos escenarios geofísicos y de clima especial*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, 2020.
- [62] A. Taboada. Meiga, a dedicated framework used for muography applications. *JOURNAL FOR ADVANCED INSTRUMENTATION IN SCIENCE*, 2022.
- [63] H. K. Tanaka, T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara, and Y. Tameda. Development of an imaging method for detecting nuclear reactors using cosmic-ray muons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 602(2):337–340, 2009.
- [64] Hiroyuki K Tanaka, Tomohisa Uchida, Manabu Tanaka, Hiroshi Shinohara, and Hiroaki Taira. Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath showa-shinzan lava dome, japan. *Geophysical Research Letters*, 36(5):L05304, 2009.
- [65] Alfred Tang, Glenn Horton-Smith, Vitaly A. Kudryavtsev, and Alessandra Tonazzo. Muon simulations for super-kamiokande, kamland, and chooz. *Phys. Rev. D*, 74:053007, Sep 2006.
- [66] Tomohisa Uchida, Hiroyuki Tanaka, and Manobu Tanaka. Space saving and power efficient readout system for cosmic-ray muon radiography. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56, 05 2009.

- [67] Martha Liliana Valencia Otero. *Estudio de las componentes de secundarios en cascadas originadas por rayos cósmicos para aplicaciones sobre estructuras geológicas*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [68] María Alejandra Vesga Ramirez. *Inversión Geofísica a partir de datos de Muonografía Volcánica para proyecto MUTE*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [69] C. T. R. Wilson. Condensation of water vapour in the presence of dust-free air and other gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 211:325–349, 1911.

.1. Apéndices

.1.1. Apéndice A: Documentación MUographY Simulation Code (MUYSC)

MUYSC es un marco de simulación de muografía capaz de estimar rápidamente muogramas aproximados de cualquier estructura geológica en el mundo. MUYSC genera el flujo de muones en el lugar de observación, transporta los muones a lo largo del objetivo geológico y determina el flujo integrado de muones detectado por el telescopio. Además, MUYSC calcula los parámetros del detector de muones (aceptancia, ángulo sólido y resolución angular) y reconstruye la distribución de densidad tridimensional del objetivo. MUYSC nació del proyecto mute para proporcionar una primera aproximación para un estudio real de muografía.

Módulos

- Descarga de datos topográficos de la estructura geológica.
- Distancias recorridas en la sección de muones.
- Cálculo del flujo integrado de muones.
- Parámetros del telescopio.

Requisitos

- Python 3.7 o superior
- NumPy
- Matplotlib
- SRTM

Instalación

Ve a tu terminal e introduce el siguiente comando:

```
$ git clone https://github.com/Jhosgun/MUYSC.git
```

Consulta la documentación y ejemplos incluidos en este repositorio para obtener información sobre cómo usar MUYSC en tus propias aplicaciones de muografía.

Documentación

Para conocer toda la documentación, visitar el [repositorio](#).

Contribución

Las contribuciones al proyecto MUYSC son bienvenidas. Por favor, sigue las siguientes pautas para contribuir:

- Haz un fork de este repositorio y realiza tus cambios en una rama separada.
- Asegúrate de que tu código cumpla con los estándares de estilo y calidad del proyecto.
- Escribe pruebas y documentación adecuadas para tus cambios.
- Envía una solicitud de extracción detallando tus cambios y por qué son necesarios.