

# **Discriminación del ruido de fondo en muografía usando técnicas de machine learning**

## **Propuesta de Investigación - Plan de trabajo**

Alejandro Ramírez Muñoz  
David Villabona Ardila

### **Director:**

Jesús Peña Rodríguez

### **Codirector:**

Fabio Martínez Carrillo  
Luis Alberto Núñez

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática  
Bucaramanga  
2020

# Contenido

## 1 Planteamiento del Problema

## 2 Justificación

## 3 Estado del arte

- 3.1 Rayos cósmicos . . . . .
- 3.2 Muografía . . . . .
- 3.3 Fuentes de ruido en muografía . . . . .
  - 3.3.1 Dispersión de mounes de baja energía . . . . .
  - 3.3.2 Muones de albedo . . . . .
  - 3.3.3 Componente electromagnética (EM) de EAS . . . . .
- 3.4 Eliminación de ruido en muografía . . . . .
  - 3.4.1 Medición del tiempo de vuelo . . . . .
  - 3.4.2 Eliminación de ruido mediante placas de absorción . . . . .

## 4 Objetivos

- 4.1 Objetivo general. . . . .
- 4.2 Objetivos Específicos. . . . .

## 5 Metodología

- 5.1 Análisis y extracción de características por medio de la distribución de los datos . . . . .
- 5.2 Ajuste de características para desarrollar clasificadores supervisados que discriminan entre mounes, EM y multipartícula . . . . .
- 5.3 Implementación de clasificador no supervisado para discriminar los mounes de bajo momentum . . . . .
- 5.4 Comparación y validación de todos los datos obtenidos a lo largo del proyecto de investigación . . . . .

## 6 Cronograma

## 7 Presupuesto

# 1 Planteamiento del Problema

La muografía se basa en la medición de las diferencias de densidad al interior de un objeto, por medio la atenuación del flujo de muones que cruza una estructura en diferentes direcciones a través de un detector de muones<sup>1</sup> [1]. Esta técnica tiene aplicaciones en muchos campos tales como: mediciones subterráneas [2–6], arqueología [7–9], seguridad, reactores y residuos nucleares [10].

El estudio del interior de grandes estructuras, en especial las geológicas, puede ser realizado a través de muones atmosféricos producidos por rayos cósmicos. El flujo de muones a nivel del mar es  $\approx 1$  muón/cm<sup>2</sup> min y es capaz de penetrar varios kilómetros de roca [11]. Actualmente esta técnica se ve afectada por una subestimación de la densidad del objeto, producto del ruido de fondo (falsos-positivos) que se pueden clasificar en: partículas cargadas procedentes de lluvias aéreas extendidas (EAS) [12, 13], los muones horizontales que inciden desde la parte trasera del detector y los muones de baja energía que son dispersados por la superficie del volcán [14].

Para la eliminación del ruido se han desarrollado algunas técnicas como la instalación de paneles absorbentes para filtrar los muones de baja energía y el aumento de la cantidad de paneles sensibles para disminuir la probabilidad de detectar eventos generados por EAS, aunque estos repercuten en el aumento de la complejidad del detector [6], y como mejor opción en la actualidad se plantea la eliminación del ruido de fondo con los sistemas ToF y de identificación de partículas para eliminar los muones de albedo<sup>2</sup> [15, 16]. Actualmente, los telescopios MuRay y DIAPHANE trabajan con estos sistemas (ToF) [15, 16], pero no es suficiente para discriminar los muones y electrones de baja energía ( $< 1\text{GeV}$ ).

En el transcurso del trabajo propuesto se desarrollará un clasificador de aprendizaje automatizado que disminuya las principales fuentes de ruido que pueden afectar la muografía, basados en los datos del detector Mute [17]. El proyecto se va a dividir en 2 partes:

- En la primera instancia se desarrollará un clasificador de aprendizaje supervisado para separar la componente electromagnética de la componente muónica.
- En la segunda parte se va a desarrollar un clasificador de aprendizaje no-supervisado donde se va a discriminar, teniendo en cuenta la etapa anteriormente mencionada, los muones de bajo momentum  $< 1\text{ GeV}/c$ .

---

<sup>1</sup> Instrumento que mide la trayectoria de partículas, haciendo uso de dos o mas planos de detención.

<sup>2</sup> muones que impactan en el detector por la parte de posterior.

## 2 Justificación

Uno de los retos de la muografía es ayudar en el estudio de los volcanes y los fenómenos relacionados, se han creado proyectos en diferentes lugares, como el proyecto DIAPHANE [18], con el volcán La Soufrière, prestando especial atención a las posibles variaciones del contenido interno de líquido/vapor que pueden estar relacionados con la dinámica del sistema hidrotermal. [19] Desde el punto de vista del monitoreo de volcanes, el fin principal es detectar movimientos de material en cámaras y ductos magmáticos, por lo cual la resolución espacial de las imágenes es importante debido a que la estructura interna de los volcanes es altamente heterogénea [20], además es importante imponer restricciones a los modelos de sistemas de ductos magmáticos basadas en datos observacionales. El flujo de mounes que atraviesan una estructura geológica varía en función longitudinal de la densidad, es decir, a mayor densidad menor flujo [21].

Debido a que el flujo de mounes de alta energía usados en muografía es bajo, los niveles de ruido de fondo pueden generar una sobre estimación del flujo penetrante y como consecuencia una subestimación de la densidad del objeto estudiado [22]. Los principales actores del ruido de fondo son los componentes electromagnéticos (electrones, positrones y rayos gama) de las EAS, mounes de bajo momentum ( $< 1 \text{ GeV}/c$ ) que desvían su trayectoria inicial por interacción con objetos externos y mounes que ingresan desde la parte posterior del detector [14].

Durante el desarrollo de este proyecto se propone una solución para la eliminación del ruido en muografía usando técnicas de aprendizaje automatizado de forma sistemática, usando los datos del proyecto Mute [17]. Por medio de un algoritmo de clasificación se abordará el problema desde el análisis de los datos, haciendo en primera instancia un clasificador de aprendizaje supervisado para separar la componente electromagnética de la muónica, guiados por las distribuciones obtenidas por el detector WCD Mute [17], que describen su comportamiento. En la segunda parte se va a desarrollar un clasificador de aprendizaje no-supervisado donde se va a separar, los mounes de bajo momentum ( $< 1 \text{ GeV}/c$ ) contra los mounes que tienen baja probabilidad de desviación.

## 3 Estado del arte

### 3.1. Rayos cósmicos

El origen de los rayos cósmicos (CR) se descubrió de manera concluyente en 1912 por Víctor Hess. Los CR son partículas subatómicas que se originan desde fuera de nuestro planeta, este flujo está compuesto por aproximadamente 90 % de protones y 9 % de partículas alfa, el resto son básicamente electrones y otras pequeñas fracciones de iones más pesados [23]. Cuando estas partículas llegan a la Tierra, colisionan con los núcleos en la atmósfera, produciendo nuevas partículas secundarias, posteriormente chocan con otros núcleos en la atmósfera, creando una nueva generación de partículas que continúan el proceso. La cascada de partículas resultante, llamada lluvia aérea extendida (EAS por sus siglas en inglés), llega al nivel del suelo extendiéndose sobre grandes áreas ( $\approx \text{km}^2$ ).

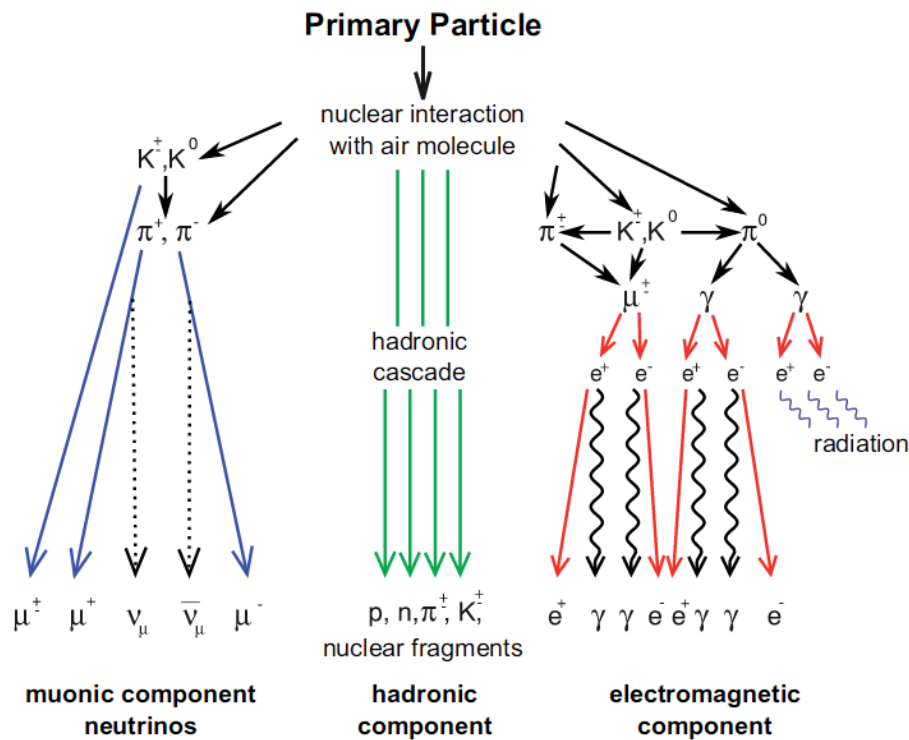


Figura 3.1: Componentes de la lluvia aérea extendida (EAS): hadrónica (verde), electromagnética (roja) y muónica (azul) [24].

Las colisiones de alta energía en la atmósfera producen cascadas de partículas más li-

geras como los piones ( $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ ) y kaones ( $K^+, K^0, K^-$ ) los cuales se descomponen principalmente en mounes [25]. Los mounes, en comparación con otras partículas inestables, pueden desplazarse grandes distancias en la atmósfera sin decaer. Los mounes conforman más de la mitad de la radiación cósmica al nivel del mar, siendo el resto principalmente electrones, positrones y fotones provenientes de las EAS. Las EAS estan conformadas por tres componentes: la **electromagnética**, la **hadrónica** y la componente **muónica** como se muestra en la Fig.3.1.

## 3.2. Muografía

El estudio de grandes estructuras mediante **muografía** se basa en el principio de la **radiografía**, es decir, la radiación a la que se expone un objeto es absorbida parcialmente dependiendo de su densidad. La muografía utiliza como fuente de radiación los mounes atmosféricos creados por la interacción de los rayos cósmicos con los átomos que componen la atmósfera terrestre. Los mounes interactúan con los átomos de la materia que chocan, lo que resulta en una pérdida de energía y un cambio de dirección por dispersión múltiple [23].

La primera aparición práctica de muografía se remonta a la década de 1950, cuando George estudió la viabilidad de emplear un telescopio Geiger para inferir el espesor del hielo sobre un túnel en una mina australiana [26].

Todas las aplicaciones de la muografía se basan en la atenuación del flujo de mounes al atravesar el objetivo, explotando el abundante flujo natural de mounes producido por las interacciones de los rayos cósmicos en la atmósfera [27]. Hoy en día, la vulcanología es una de las áreas de investigación más implementadas de la muografía, ya nos proporcionan información útil del comportamiento dinámico de dichas formaciones geológicas.

## 3.3. Fuentes de ruido en muografía

La muografía tiene principalmente tres fuentes de ruido: los mounes de baja energía dispersados por la superficie de la estructura escaneada, otro son los mounes que ingresan por la parte posterior del detector (mounes de albedo) y la componente electromagnética de las EAS. Si el ruido de fondo es dominante en la observación, la densidad estimada será menor que la densidad real.

### 3.3.1. Dispersión de mounes de baja energía

El flujo de mounes a grandes ángulos cenitales es bajo y los mounes dispersados en la estructura escaneada pueden volverse fácilmente dominantes, siendo esta la mayor fuente de ruido que contamina la técnica de muografía [14]. En este caso, la dirección del muón incidente no es la misma que su dirección original [27]. Estos mounes causan un desenfoque de la imagen final de densidad, con la consiguiente pérdida de detalles.

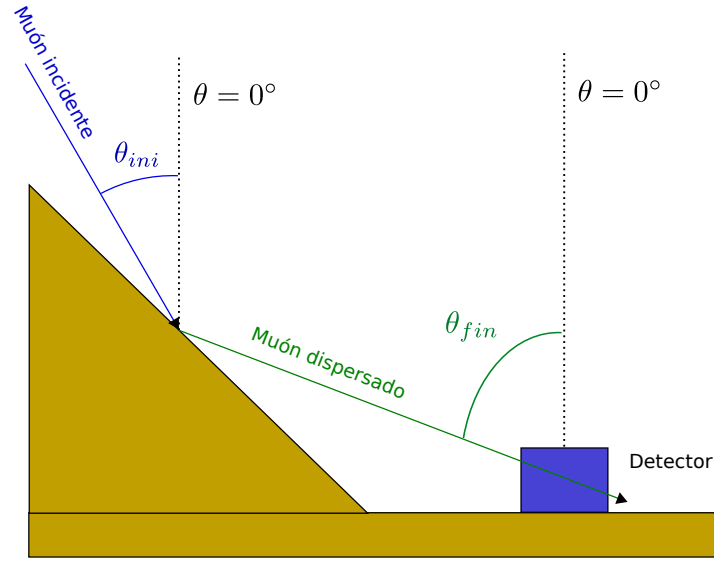


Figura 3.2: Dispersión de los mounes incidentes de baja energía sobre la superficie. El ángulo de incidencia del muón  $\theta_{ini}$  varía debido a su interacción con el material que compone la estructura resultando en un ángulo dispersado  $\theta_{fin}$  [13].

### 3.3.2. Muones de albedo

Otra fuente de contaminación en la muografía son los mounes cuasi-horizontales ( $\theta \geq 75^\circ$ ) que impactan en el detector desde la parte posterior, con un momentum promedio  $\approx 10 \text{ GeV}/c$  [12], creando trayectorias similares a los mounes provenientes desde la estructura escaneada. Ver Fig. 3.3.

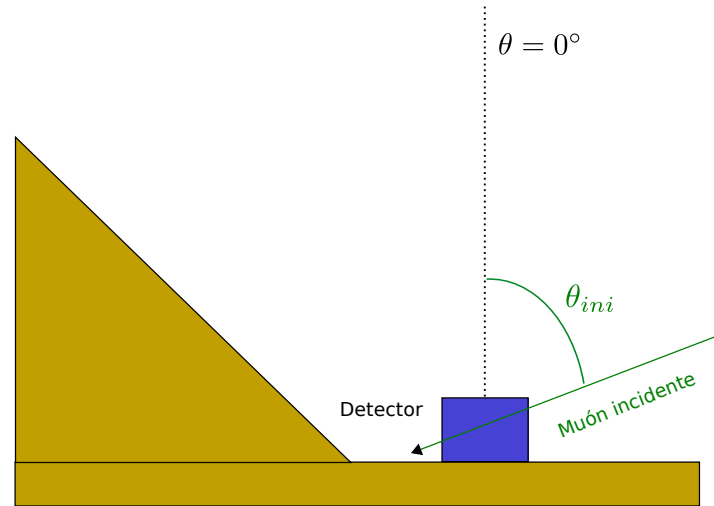


Figura 3.3: Evento falso debido a un muón que incide por la parte posterior del detector.

Esta fuente de ruido puede aumentar drásticamente si el detector se encuentra ubicado en un sitio donde no esté protegido en su parte posterior.

### 3.3.3. Componente electromagnética (EM) de EAS

Otra fuente de contaminación en la muografía ocurre a las partículas secundarias (PS) generadas por EAS entre la estructura y el detector. El flujo de PS a nivel del suelo está conformado principalmente por  $\mu^\pm$ ,  $e^\pm$  y  $\gamma$ .

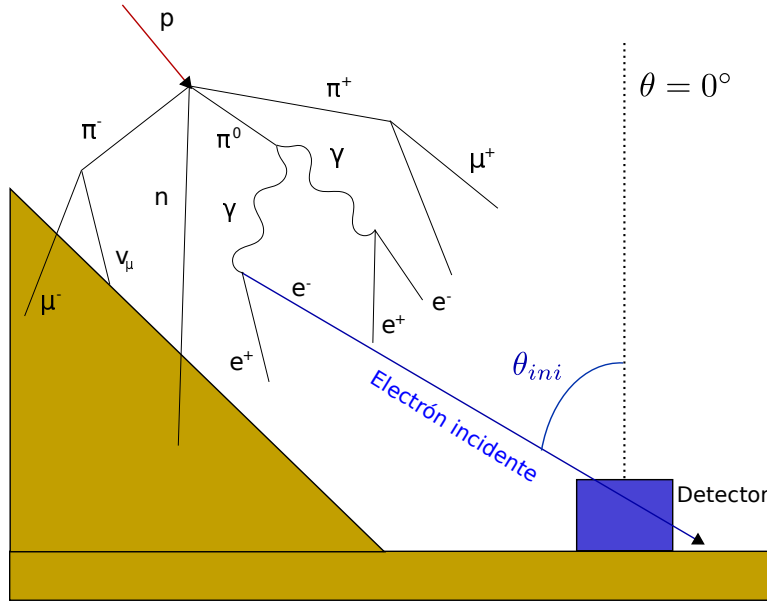


Figura 3.4: Detección de un evento falso debido a la incidencia de un  $e^-$  generado en una EAS entre el objeto escaneado y el detector.

Las PS generan falsa información de dos maneras:

- Mediante la coincidencia accidental de dos o más partículas incidentes en el detector lo cual mimetiza una trayectoria generada por un muón [28].
- Una partícula individual con energía suficiente para atravesar todo el detector.

Teniendo en cuenta que la muografía calcula la distribución densidad interna de la estructura dependiendo del flujo diferencial de los mounes que la atraviesan, un aumento en el flujo registrado debido a los eventos falsos repercute en la medición de la densidad de la estructura. [12].

## 3.4. Eliminación de ruido en muografía

Como se vio anteriormente los tipos de ruido que son preocupantes para la mayoría de usos y aplicaciones en la muografía son: mounes de albedo, mounes de momentun bajo y partículas de la componente EM.



### 3.4 Eliminación de ruido en muografía

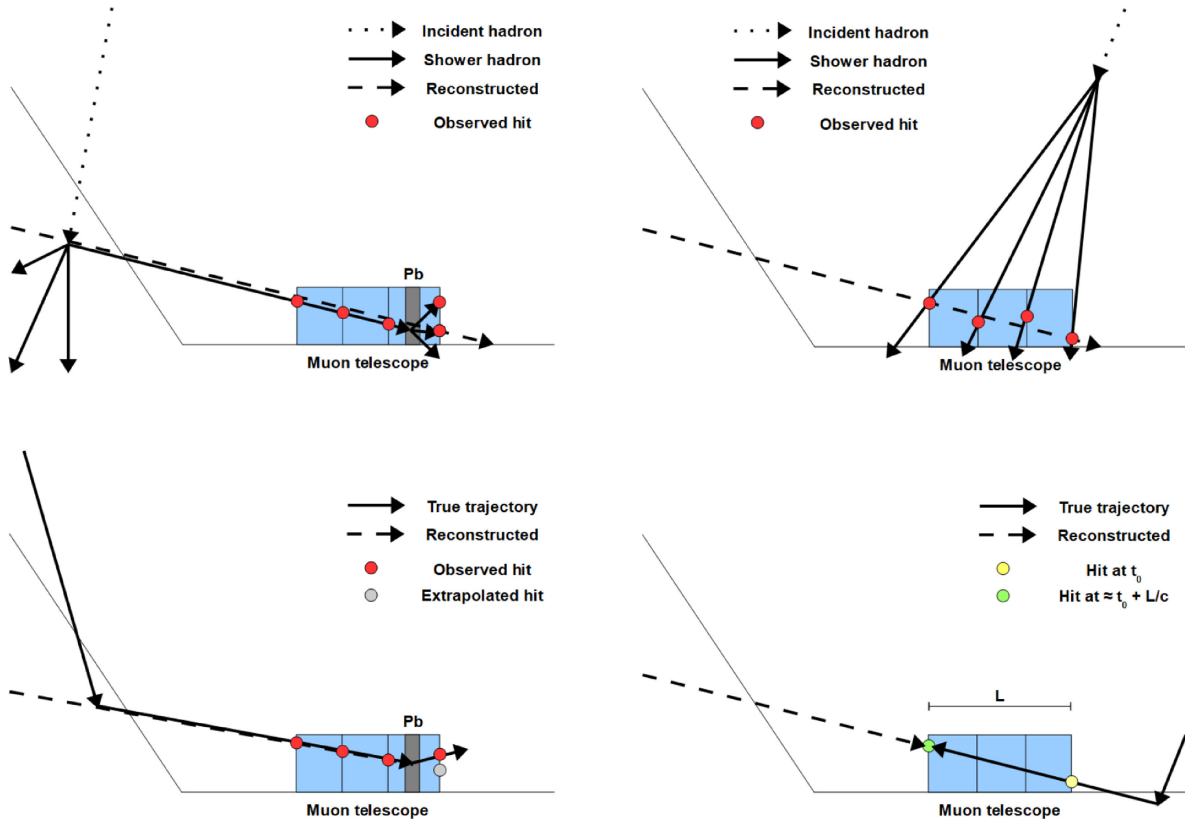


Figura 3.5: (Arriba a la izquierda) Muón falso. (Arriba a la derecha) Ruido combinatorio. (Abajo a la izquierda) Muón de bajo momentum. (Abajo a la derecha) Muón de albedo [27]

Existen actualmente varias maneras de eliminar el ruido en la muografía dentro de los cuales están técnicas pasivas y activas.

#### 3.4.1. Medición del tiempo de vuelo

El análisis de datos discutido por Jourde et. al. [29], demuestra la existencia de un flujo de mounes ascendentes cuyas trayectorias podrían confundirse con las de los mounes descendentes que cruzan el volcán.

Los flujos ascendentes se detectan solo cuando la parte posterior del telescopio está expuesta a un amplio volumen de atmósfera ubicado por debajo del nivel de medición. Esto favorece la existencia de procesos como la fotoproducción de piones o pares de mounes a baja altitud, cerca del nivel del suelo. Los sistemas de reloj de alta resolución son obligatorios para separar los flujos ascendentes y descendentes [29].

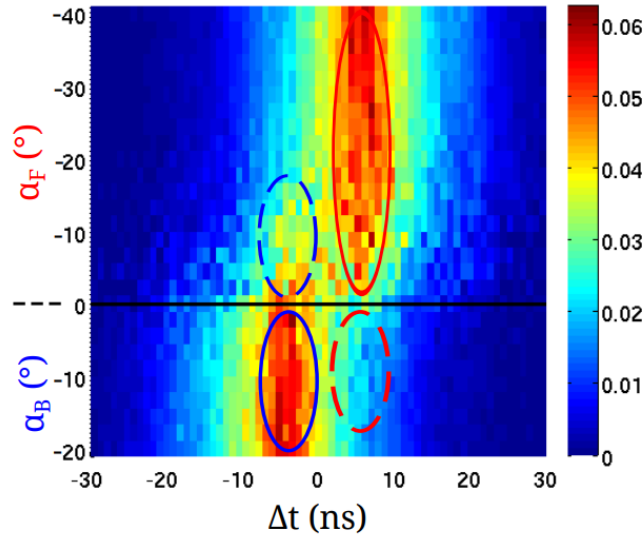


Figura 3.6: Distribución de ToF para el conjunto de datos SMTOMO que se muestra como histogramas normalizados en función del ángulo cenital. El horizonte está representado por la línea discontinua. Las elipses sólidas azul y roja muestran respectivamente los eventos hacia atrás ( $\alpha_B < 0$  y  $\Delta t < 0$ ) y hacia adelante ( $\alpha_F < 0$  y  $\Delta t > 0$ ) correspondientes a los flujos descendentes. Las elipses discontinuas muestran eventos correspondientes a mounes ascendentes desde adelante (elipse roja,  $\alpha_B < 0$  y  $\Delta t > 0$ ) y hacia atrás (elipse azul,  $\alpha_F < 0$  y  $\Delta t < 0$ ) [21]

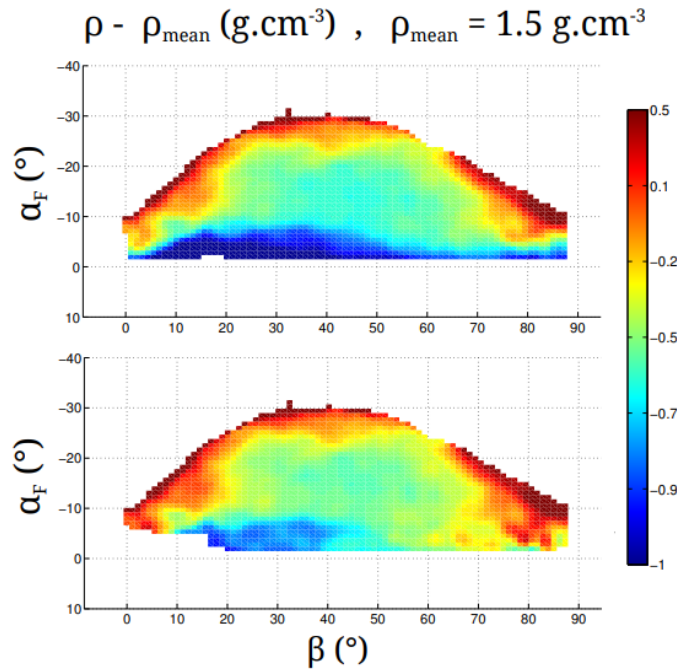


Figura 3.7: Resultado de la tomografía de alta definición de la adquisición SMTOMO sin corrección de flujo ascendente (Arriba) y con corrección de flujo ascendente (Abajo). Densidad de roca en  $g.cm^{-3}$  [21].

En algunos casos, el flujo ascendente puede ser tan intenso como el flujo descendente buscado, lo que lleva a un sesgo importante en la opacidad reconstruida del volcán. Se puede aplicar un sesgo basado en consideraciones estadísticas para recuperar la opacidad correcta. Dichas correcciones son indispensables para realizar una tomografía 3D de densidad precisa de volcanes que necesitan combinar muografías adquiridas en diferentes ángulos de visión y sujetas a diferentes intensidades de flujo ascendente. [21, 29].

### 3.4.2. Eliminación de ruido mediante placas de absorción

Este estudio realizado por Nishiyama et. al. [12] confirma que una fuente de ruido en la radiografía de mounes son partículas cargadas con momentum  $< 2 \text{ GeVc}^{-1}$ . También demuestra que un detector que puede medir el momentum, como un detector ECC, que puede reducir la contaminación del ruido a niveles insignificantes. También discutieron los eventos falsos de mounes que surgen cuando varias partículas chocan accidentalmente con varios planos al mismo tiempo dentro de la resolución temporal del detector de mounes. [22]

El detector está compuesto por siete detectores tipo cámara proporcional de multi-hilo (MWPC) con un tamaño de  $(80 \times 80 \text{ cm}^2)$ , con cinco láminas de protección contra la radiación construidas de plomo, cada placa está oculta dentro de otra caja de acero inoxidable para protegerla mecánicamente y evitar la exposición a la toxicidad del plomo. La Fig.3.8 muestra el detector desde una vista lateral.

La resolución angular del detector fue de  $2,7 \text{ mrad}$ . Debido a la buena resolución espacial, la dispersión de partículas de baja energía en las placas de plomo se puede medir a lo largo de la trayectoria y, por lo tanto, estas partículas de fondo ( $1 \text{ GeV}$ ) se pueden eliminar de los datos registrados.

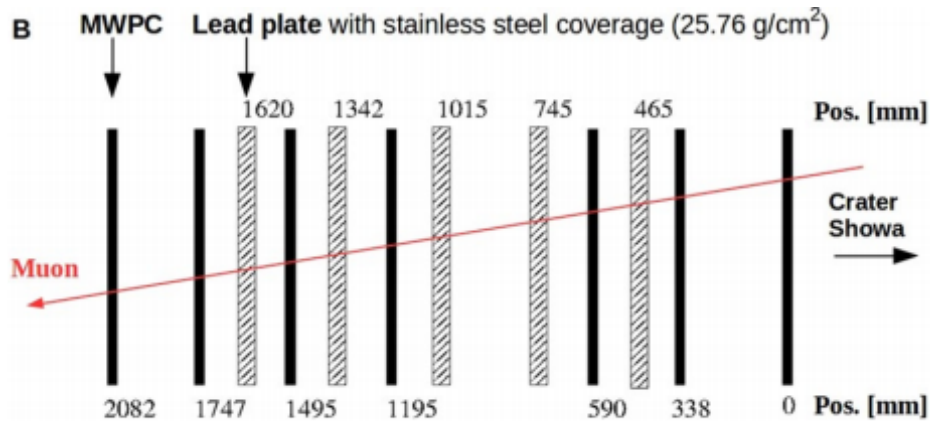


Figura 3.8: El sistema de observación muográfica basado en MWPC (mMOS). La vista esquemática de mMOS que consta de siete cámaras proporcionales multi-hilo y cinco placas de blindaje de plomo con un grosor de 2 cm cada una [30]

# 4 Objetivos

## 4.1. Objetivo general.

- Discriminar el ruido de fondo en la técnica de muografía usando herramientas de aprendizaje automatizado.

## 4.2. Objetivos Específicos.

- Extraer características discriminantes de los datos proporcionados por el Detector Cherenkov de Agua (WCD, por su siglas en inglés) de muón Telescope (MuTe) para separar la componente muónica de componente EM y multipartícula.
- Implementar un clasificador de aprendizaje supervisado que permita separar la componente muónica de componente EM y multipartícula.
- Explorar algoritmos de aprendizaje no supervisado para separar los mounes de bajo momentum.
- Validar la información recolectada con los clasificadores para analizar los resultados y concluir con certeza con qué método se extrajo mejor la información requerida.

## 5 Metodología

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se proponen las siguientes etapas, cada una está relacionada directamente con el cumplimiento de un objetivo específico mediante un esquema determinado de actividades.

### 5.1. Análisis y extracción de características por medio de la distribución de los datos

Se busca realizar una parametrización y análisis de los datos por medio de un histograma de carga, suministrado por el Detector Cherenkov de Agua (WCD, por su siglas en inglés) de Muón Telescope (MuTe), para visualizar el tipo y cantidad de datos que se busca para el problema establecido. A continuación se presentan las actividades correspondientes:

- Extraer los datos crudos del detector y posteriormente ordenarlos.
- Parametrizar los datos para ajustarlo a una distribución probabilística.
- Implementar un histograma de carga, para identificar y separar la componente muónica de la electromagnética y multipartícula.
- Encontrar características según los resultados de las variables de entrada de cada componente.

### 5.2. Ajuste de características para desarrollar clasificadores supervisados que discriminan entre mounes, EM y multipartícula

Se va a buscar características para ajustarlas a diferentes modelos de clasificación y etiquetarlas entre las componentes estudiadas en el proyecto. A continuación se presentan las actividades correspondientes:

- Definir una función de probabilidad optimizando los valores que ajusten a la curva de la distribución seleccionada.
- A partir de los valores ajustados con la función de densidad de probabilidad (PDF), analizar independientemente cada componente por medio de la distribución extraída del histograma de carga.

## 5 Metodología

- Evaluando las componentes independientes, se etiqueta cada tupla de datos con unos y ceros, mounes y EP respectivamente.
- Para el entrenamiento de los datos con el modelo a emplear, se usan características y etiquetas, de tal manera que se pueda evaluar el comportamiento del clasificador a usar [31].

### 5.3. Implementación de clasificador no supervisado para discriminar los mounes de bajo momentum

Se comprueban algoritmos no supervisados de clasificación usando previamente la discriminación de la componente electromagnética de la muónica, para separar ahora entre muón de alto y de bajo momentum ( $< 1 \text{ GeV}/c$ ). Este proceso se llevará a cabo después de comparar sus tiempos de vuelo como característica.

### 5.4. Comparación y validación de todos los datos obtenidos a lo largo del proyecto de investigación

Esta fase final divide en:

- Comparación de los clasificadores supervisados por métricas de precisión.
- Analizar los datos obtenidos por los clasificadores no-supervisados con métricas de precisión.
- Encontrar y diferenciar el mejor resultado de cada clasificador, optimizando el resultado.

## 6 Cronograma

Actividad	Semestre											
	2019-2					2020-1				2020-2		
	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisión bibliográfica												
Muografía												
Propuesta												
Extracción de caraceristicas.												
Extración datos crudos												
Parametrización												
Indentificación de componentes												
Análisis resultados												
Aprendizaje supervisado												
Función de probabilidad optimizada												
Componentes independientes												
Etiquetado de características												
Entrenamiento del modelo												
Aprendizaje no supervisado												
Estimación tiempo de vuelo												
Discriminar muón de bajo momentum												
Validación de la informaión												
Validación de resultados												
Escritura del libro y resultados												

Cuadro 6.1: **Ejecución continua**; Para ejecutar ; **Ejecutado**; **En ejecución**

## 7 Presupuesto

Ajustar de acuerdo al proyecto que esta planteando

Concepto	Descripcion	Tipo de contrapartida UIS	Valor de referencia	Cantidad	Precio Estimado
Director	Estudiante Doctorado	Especie	\$100,000.00	16h/mes por 10 meses	\$16,000,000
Codirector	Profesor planta	Especie	\$400,000.00	8h/mes por 10 meses	\$32,000,000
Autores	Estudiante Pregrado	Efectivo (financiación estudiantil)	\$2.000.000 por mes	10 meses	\$2,000,000
Bases de datos bibliograficos	Consulta Investigativa	Especie	\$10.000.000	1 año	\$1,000,000
Detector Cherenkov de Agua (WCD)	Recolector de Datos	Especie	50% del valor comercial	1	\$40.000.000
Insumos	Papeleria	A cargo del autor	-	-	\$500,000.00
TRasporte	Traslados Academicos	A cargo del autor	-	-	\$200,000.00
Eventos academicos nacionales e internacionales	Divulgación Resultados Obtenidos	Especie	-	2	\$10.000.000
				Total	\$149,700,000

---

\* Valores tomados de los rubros presupuestales estipulados por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.



# Bibliografía

- [1] S. Béné, P. Boivin, E. Busato, C. Cârloganu, C. Combaret, P. Dupieux, F. Fehr, P. Gay, P. Labazuy, I. Laktineh *et al.*, “Air shower simulation for background estimation in muon tomography of volcanoes,” 2013.
- [2] K. Nagamine, H. K. Tanaka, S. N. Nakamura, K. Ishida, M. Hashimoto, A. Shinotake, M. Naito, and A. Hatanaka, “Probing the inner structure of blast furnaces by cosmic-ray muon radiography,” *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 81, no. 7, pp. 257–260, 2005.
- [3] H. K. Tanaka, T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara, and H. Taira, “Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of satsuma-iwojima volcano, japan,” *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 1, jan 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/2008gl036451>
- [4] N. Lesparre, D. Gibert, J. Marteau, Y. Déclais, D. Carbone, and E. Galichet, “Geophysical muon imaging: feasibility and limits,” *Geophysical Journal International*, vol. 183, no. 3, pp. 1348–1361, oct 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2010.04790.x>
- [5] N. Lesparre, D. Gibert, and J. Marteau, “Bayesian dual inversion of experimental telescope acceptance and integrated flux for geophysical muon tomography,” *Geophysical Journal International*, vol. 188, no. 2, pp. 490–497, nov 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05268.x>
- [6] 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*, vol. 1, no. 1, pp. 33–42, apr 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/gi-1-33-2012>
- [7] K. Morishima *et al.*, “Discovery of a big void in khufu’s pyramid by observation of cosmic-ray muons,” *Nature*, vol. 552, no. 7685, pp. 386–390, nov 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nature24647>
- [8] H. Gómez, C. Carloganu, D. Gibert, J. Jacquemier, Y. Karyotakis, J. Marteau, V. Niess, S. Katsanevas, and A. Tonazzo, “Studies on muon tomography for archaeological internal structures scanning,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 718, p. 052016, may 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/718/5/052016>
- [9] L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. E. Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. H. Moussa, M. Sharkawi, and L. Yazolino, “Search for hidden chambers in the pyramids,” *Science*, vol. 167, no. 3919, pp. 832–839, feb 1970. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832>

## Bibliografía

- [10] H. Fujii, K. Hara, S. Hashimoto, F. Ito, H. Kakuno, S. Kim, M. Kochiyama, K. Nagamine, A. Suzuki, Y. Takada, Y. Takahashi, F. Takasaki, and S. Yamashita, “Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant,” *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2013, no. 7, jul 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptt046>
- [11] A. Ariga, T. Ariga, A. Ereditato, S. Käser, A. Lechmann, D. Mair, R. Nishiyama, C. Pistillo, P. Scampori, F. Schlunegger, and M. Vladymyrov, “A nuclear emulsion detector for the muon radiography of a glacier structure,” *Instruments*, vol. 2, no. 2, p. 7, apr 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/instruments2020007>
- [12] R. Nishiyama, S. Miyamoto, and N. Naganawa, “Experimental study of source of background noise in muon radiography using emulsion film detectors,” *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 29–39, apr 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/gi-3-29-2014>
- [13] H. Gómez, D. Gibert, C. Goy, K. Jourde, Y. Karyotakis, S. Katsanevas, J. Marteau, M. Rosas-Carbajal, and A. Tonazzo, “Forward scattering effects on muon imaging,” *Journal of Instrumentation*, vol. 12, no. 12, pp. P12018–P12018, dec 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/p12018>
- [14] R. Nishiyama, S. Miyamoto, and N. Naganawa, “Experimental study of source of background noise in muon radiography using emulsion film detectors,” *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 29–39, 2014.
- [15] J. Marteau, J. B. d’Ars, D. Gibert, K. Jourde, S. Gardien, C. Girerd, and J. C. Ianigro, “Implementation of sub-nanosecond time-to-digital convertor in field-programmable gate array: applications to time-of-flight analysis in muon radiography,” *Measurement Science and Technology*, vol. 25, no. 3, p. 035101, feb 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/3/035101>
- [16] L. Cimmino, F. Ambrosino, L. Bonechi, R. Ciaranfi, R. D’Alessandro, V. Masone, N. Mori, P. Noli, G. Saracino, and P. Strolin, “The muraves telescope front-end electronics and data acquisition,” *Annals of Geophysics*, vol. 60, no. 1, Feb 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.4401/ag-7379>
- [17] J. Peña, A. Vásquez-Ramírez, J. D. Sanabria Gomez, L. Nunez, D. Sierra Porta, H. Aso-rey, and U. Madison, “Calibration and first measurements of mute: a hybrid muon telescope for geological structures,” 09 2019.
- [18] J. Marteau, J. de Bremond d’Ars, D. Gibert, K. Jourde, J.-C. Ianigro, and B. Carlus, “Diaphane: muon tomography applied to volcanoes, civil engineering, archaeology,” *Journal of Instrumentation*, vol. 12, no. 02, p. C02008, 2017.
- [19] H. Gómez, D. Gibert, C. Goy, K. Jourde, Y. Karyotakis, S. Katsanevas, J. Marteau, M. Rosas-Carbajal, and A. Tonazzo, “Forward scattering effects on muon imaging,” *Journal of Instrumentation*, vol. 12, no. 12, p. P12018, 2017.
- [20] R. Nishiyama, A. Taketa, S. Miyamoto, and K. Kasahara, “Monte carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons,” *Geophysical Journal International*, vol. 206, no. 2, pp. 1039–1050, 2016.

- [21] K. Jourde, D. Gibert, J. Marteau, J. D'ars, S. Gardien, C. Girerd, J.-C. Ianigro, and D. Carbone, "Effects of upward-going cosmic muons on density radiography of volcanoes," *arXiv preprint arXiv:1307.6758*, 2013.
- [22] T. Kusagaya and H. K. Tanaka, "Muographic imaging with a multi-layered telescope and its application to the study of the subsurface structure of a volcano," *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 91, no. 9, pp. 501–510, 2015.
- [23] S. Procureur, "Muon imaging: Principles, technologies and applications," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 878, pp. 169–179, 2018.
- [24] A. Haungs *et al.*, "Kcdc — the kascade cosmic-ray data centre," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 632, no. 1, p. 012011, 2015. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1742-6596/632/i=1/a=012011>
- [25] M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa, K. Nakamura, Y. Sumino, F. Takahashi, J. Tanaka, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler *et al.*, "Review of particle physics," *Physical Review D*, vol. 98, no. 3, p. 030001, 2018.
- [26] E. George, "Cosmic rays measure overburden of tunnel," *Commonwealth Engineer*, vol. 455, 1955.
- [27] L. Bonechi, R. D'Alessandro, and A. Giammanco, "Atmospheric muons as an imaging tool," *Reviews in Physics*, p. 100038, 2020.
- [28] T. Kusagaya and H. K. Tanaka, "Muographic imaging with a multi-layered telescope and its application to the study of the subsurface structure of a volcano," *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 91, no. 9, pp. 501–510, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2183/pjab.91.501>
- [29] K. Jourde, D. Gibert, J. Marteau, J. de Bremond d'Ars, S. Gardien, C. Girerd, J.-C. Ianigro, and D. Carbone, "Experimental detection of upward going cosmic particles and consequences for correction of density radiography of volcanoes," *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 24, pp. 6334–6339, 2013.
- [30] L. Oláh, H. K. Tanaka, T. Ohminato, and D. Varga, "High-definition and low-noise muography of the sakurajima volcano with gaseous tracking detectors," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, feb 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21423-9>
- [31] A. Pérez, P. Larranaga, and I. Inza, "Modelos gráficos probabilísticos para la clasificación supervisada empleando la estimación basada en kernels gaussianos esféricos," *III Taller Nacional de Minería de Datos y Aprendizaje*, pp. 125–134, 2005.