

Telescopio de Muones para Muografía de Ofiolitas en la búsqueda de Hidrógeno Blanco MUTE-WHOM

Muon Telescope for White Hydrogen Ophiolite Muography

Duración: 18 meses

Palabras claves: Rayos Cósmicos, Muografía, Hidrógeno Blanco, Ofiolitas

Areas OCDE:

- **Ciencias Naturales:** 1.02 Ciencias Físicas; 1.05 Ciencias de la Tierra y Medioambientales
- **Ingeniería y Tecnología:** 2.03 Ingeniería Electrónica, Eléctrica e Ingeniería de Sistemas.
- **Ciencias Sociales:** 5.07 Ciencias de la Información y la Comunicación

Lugar de ejecución: Departamento de Santander (70%) Universidad Industrial de Santander y Universidad Autónoma de Bucaramanga. Departamento de Bolívar, Universidad Tecnológica de Bolívar (20%). El otro 10% del tiempo dependerá del mejor sitio seleccionado para la validación del instrumento que emergerá del estudio a realizar.

Línea temática 5 Innovación, desarrollo y utilización de nuevas tecnologías para el desarrollo de fuentes no convencionales de energía (FNCE) delegadas a la ANH tales como el análisis de datos, inteligencia artificial y/o machine learning entre otras.

Temáticas de investigación:

- Uso de nuevas tecnologías para la adquisición y/o análisis de datos geocientíficos necesarios en la caracterización de los modelos geológicos o geofísicos para la exploración y/o estimación de los recursos provenientes de Fuentes No Convencionales de energía, FNCE, en las áreas de interés propuestas por la Agencia, y que puedan ser de utilidad para la construcción de una política pública de FNCE.
- Uso de gemelos digitales para la evaluación del potencial de aprovechamiento de FNCE.

Resumen ejecutivo y carácter novedoso del proyecto	3
Investigador principal, equipo humano y metodología de trabajo	4
Trayectoria del Equipo de trabajo	5
Antecedentes y trayectoria del equipo de investigación	7
Planteamiento del problema y pregunta de investigación	9
Estado del arte y marco conceptual	9
Los muones atmosféricos	9
La muografia	10
Ofiolitas en Colombia	11
Ofiolitas e hidrógeno blanco	12
Muografia y afloramiento de ofiolitas	13
El telescopio de muones de esta propuesta muógrafo digital, MuTe D-Twin	15
Integración de Información Geofísica con la Muografia.	17
Estrategia de transferencia de los resultados del proyecto	18
Objetivos	20
Objetivo General	20
Objetivos específicos	20
Metodología	21
Resultados esperados:	28
Productos esperados	29
Productos obligatorios:	29
Productos esperados adicionales a los obligatorios:	29
Resultados de actividades de apropiación social del conocimiento.	29
Productos y resultados de formación de recursos humanos.	29
Cronograma de actividades:	30
Efectos sobre el medio ambiente y la salud humana	32
Impactos potenciales:	33
Bibliografía	33

Resumen ejecutivo y carácter novedoso del proyecto

El proyecto MuTe-WHOM tiene como objetivo desarrollar un telescopio de muones portátil y autónomo, junto con su gemelo digital. Este conjunto físico y digital permitirá realizar estudios de muografía en afloramientos de ofiolitas en Colombia para la búsqueda de posibles yacimientos de hidrógeno blanco. Además, el proyecto contempla el uso de inteligencia artificial para interpretar estructuras geológicas utilizando datos de diversas técnicas geofísicas, así como la construcción de modelos de tomografía de muones a partir de un número limitado de puntos de observación.

La muografía es una técnica innovadora que emplea muones cósmicos para crear mapas detallados de las características internas de estructuras naturales y artificiales. Esta técnica ofrece una mayor resolución espacial y capacidad de penetración en comparación con los métodos geofísicos tradicionales. Se ha aplicado con éxito en el estudio de volcanes, la prospección de minerales y el análisis de grandes estructuras construidas por el hombre, como represas, túneles y puentes. En Colombia, la Universidad Industrial de Santander es pionera en el uso de la muografía para el estudio de volcanes, especialmente del volcán Cerro Machín. Ahora, el proyecto MuTe-WHOM tiene el potencial de posicionar a Colombia como líder en la exploración de hidrógeno blanco mediante tecnologías derivadas de la física de partículas.

La colaboración entre la comunidad científica, las instituciones académicas y las comunidades locales será crucial para el éxito y la sostenibilidad del proyecto. Nuestro objetivo es fomentar la apropiación social de la muografía, tanto en las comunidades cercanas al área de estudio como en las universidades locales.

En consecuencia, se espera que este proyecto fortalezca la capacidad técnica y científica del país en el uso de la muografía para estudios geofísicos y contribuya a la identificación de posibles yacimientos de hidrógeno blanco en Colombia. Además, el programa de apropiación social busca involucrar a las comunidades locales y académicas en el proceso, promoviendo la colaboración y el entendimiento mutuo sobre los beneficios y aplicaciones de esta tecnología.

Este proyecto propone

1. Construir y calibrar de un telescopio de muones portátil de tercera generación, basado en un hodoscopio de paneles centelladores. El telescopio será diseñado para operar en condiciones ambientales extremas, incluyendo variaciones de temperatura, humedad y falta de suministro eléctrico constante.
2. Crear entornos de procesamiento de datos mediante algoritmos de inteligencia artificial, facilitando el análisis integrado de datos de muografía y otras fuentes geofísicas.
3. Desarrollar un gemelo digital del hodoscopio que permita interactuar con el instrumento físico, garantizando su óptima operación generando confianza en las mediciones.
4. Realizar pruebas en el campo del instrumento en un área geológica seleccionada con presencia de ofiolitas. Además, registrar datos geofísicos complementarios a la muografía, como gravimetría, sísmica, resistividad 2D e imágenes multiespectrales.
5. Proponer una estrategia de inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos, incluyendo muografía, gravimetría y resistividad eléctrica 2D.
6. Promover la apropiación social y tecnológica-científica de la Muografía en dos niveles. Para el público general, a partir de folletos y campañas en redes sociales que divulguen

los alcances y limitaciones de esta técnica. Para público especializado (estudiantes graduados e investigadores), mediante un cursillo de 16h a 20h de duración que promueva el uso de herramientas de simulación.

Investigador principal, equipo humano y metodología de trabajo

Luis A. Núñez, es investigador Senior de MinCiencias. Profesor Titular en la Universidad Industrial de Santander, Colombia, es Licenciado en Física (1979) y Doctor en Ciencias (1988). Sus intereses abarcan Astrofísica Relativista, Astropartículas y Ciencias de la Información. *Función en el proyecto:* Será el investigador principal del proyecto. Gestiona el grupo de investigación, supervisa el desarrollo del muógrafo y coordina adquisiciones. Dedicación: 6 horas semanales.

José David Sanabria Gómez es investigador Senior de MinCiencias. Licenciado en Física y Matemáticas (1993) y doctor en Física (2001). Es profesor titular de la Escuela de Física. Su área de investigación es sismología y astropartículas. *Función en el proyecto:* Responsable la integración de la información geofísica y de muografía, apoyará el desarrollo o adaptación del sistema para realizar la inversión conjunta y el modelo 3D de densidad y apoyará las labores de apropiación social del conocimiento. Dedicación: 4h semanales.

Ysabel Briceño Romero es profesora titular en la Universidad Autónoma de Bucaramanga, experta en comunicación y medios digitales. Tiene un pregrado Comunicación Social (1995), una maestría en Ciencias Políticas (2004) y un doctorado en Humanidades (2014). Su investigación se centra en el impacto social de los medios digitales y la e-investigación en ciencias sociales. Participa en proyectos internacionales que integran comunicación digital, ciencia y tecnología. *Función en el proyecto:* será la responsable de conceptualización y ejecución de las labores de apropiación social del conocimiento. Dedicación: 6h semanales.

Carlos Jaime Barrios Hernández es Profesor Asociado en la Universidad Industrial de Santander, y dirige Supercomputación y Cálculo Científico. Es investigador Asociado MinCiencias y sus áreas de investigación incluyen computación avanzada, inteligencia artificial, simulaciones y computación cuántica. Es ingeniero de sistemas (2002), tiene un doctorado en Informática (2010) y una maestría en Matemáticas Aplicadas e Informática (2006). *Función en el proyecto:* Será responsable de implementar algoritmos en la plataforma de computación de alto rendimiento para el entrenamiento de machine learning. Dedicación: 4h semanales.

Fabio Martínez Carrillo, profesor Asociado de la Universidad Industrial de Santander e investigador Asociado MinCiencias. Dirige el Laboratorio de Imágenes, Visión y Aprendizaje Biomédicos. Ingeniero mecatrónico (2006) y doctor en Ingeniería Informática y de Sistemas (2015). Su investigación se centra en el aprendizaje automático, el análisis de imágenes médicas y la visión por ordenador. *Función en el proyecto:* Será el responsable de la implementación de algoritmos de *machine learning* en la fusión de datos geofísicos y muográficos. Igualmente supervisará el desarrollo de los algoritmos de tomografía muónica con pocos puntos. Dedicación: 4h semanales.

Julián Rodríguez-Ferreira, es profesor asociado de la Universidad Industrial de Santander, obtuvo su título en ingeniería electrónica (2006), tiene una especialización en instrumentación científica (2007), maestría en ingeniería espacial (2010), maestría en astrofísica (2009) y un doctorado en Astrofísica (2015). Ha trabajado en importantes proyectos aeroespaciales de la Agencia Espacial

Europea, como la sonda SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*), la misión BepiColombo para el estudio del planeta mercurio y el telescopio espacial Euclid para el estudio del "Universo Oscuro". Representante de la Academia Colombiana en el Consejo Espacial del Gobierno Colombiano, también es científico antártico. *Función en el proyecto:* Será el responsable del análisis multiespectral de los datos recolectados por el drone y supervisará la instrumentación del muógrafo. Dedicación: 2h semanales.

David Sierra-Porta es profesor asociado en la Universidad Tecnológica de Bolívar, responsable de la Maestría en Ciencia de Datos. Es investigador Junior de MinCiencias. Tiene un pregrado en Matemáticas y Física (2001), una maestría en Física (2004) y un doctorado en Física Fundamental (2016). Experiencias posdoctorales en Muografía y análisis de datos astrofísicos. Sus intereses de investigación incluyen ciencia de datos, astropartículas, rayos cósmicos y heliofísica. *Función en el proyecto:* será el responsable del desarrollo del gemelo digital del muógrafo. Dedicación: 4h semanales.

A este grupo de expertos se les unirán un equipo de profesionales conformado por: postdoc en Física, tres ingenieros (uno electrónico y dos de computación), un geofísico, un profesional en trabajo social, un profesional en comunicación social, un profesional de administración y tres jóvenes investigadores. El proyecto se estructurará en cinco equipos de trabajo: Geofísica, muógrafo, Gemelo digital, Inteligencia Artificial y Apropiación Social del conocimiento. Se tienen tres equipos de trabajo específicos (muógrafo, Gemelo Digital e Inteligencia Artificial) y dos transversales (Geofísica y Apropiación Social). El equipo del Gemelo Digital interactúa de forma independiente con el del muógrafo y el de Inteligencia Artificial. Mientras que los equipos transversales apoyan la operación de los tres equipos específicos.

Para el desarrollo de este proyecto utilizaremos la plataforma MiLAB¹ y las metodologías ágiles para la gestión de proyectos (*Agile Project Management Metodologies*). Las metodologías ágiles mejoran significativamente el trabajo en equipo al fomentar la colaboración, la flexibilidad y el progreso iterativo (Conforto & Amaral 2010, Serrador & Pinto 2015). Esta propuesta comprende múltiples fases, desde los estudios de simulación y el diseño del telescopio de muones hasta la integración de los datos muográficos y geofísicos. Mediante el uso de estas metodologías, el equipo garantizará que cada fase se complete de manera eficiente, con revisiones y ajustes periódicos basados en la retroalimentación, para que se alcancen los objetivos propuestos en el lapso previsto de 18 meses.

Trayectoria del Equipo de trabajo

Esta propuesta tiene un eje técnico y otro de apropiación social. El eje técnico involucra el diseño y la construcción de la tercera generación de muógrafos basada en un hodoscopio tripanel de barras centelladoras. Este modelo estará vinculado a un gemelo digital (*digital twin*) que permitirá supervisar y ajustar, en tiempo real, la operación en campo del instrumento. El segundo elemento del área técnica contempla el diseño e implementación de una estrategia de

¹ MiLAB es una plataforma de Ciencia Abierta para gestión de grupo de I+D+I desarrollado por algunos de los miembros de este equipo de trabajo <https://milab.redclara.net/>. Esta plataforma impulsa la reproducibilidad de la ciencias y permite hacer el seguimiento de proyectos de I+D+I. Está compuesta por una herramienta de mensajería instantánea (ChatLAB), un repositorio de datos (dataLAB), un repositorio de códigos y documentos (G-LAB), una conexión a sistemas de cómputo avanzado (compLAB). En este proyecto la ANH y MinCiencias podrán comprobar los avances del proyecto accediendo a esta plataforma.

inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos y muograficos. El área de apropiación social del conocimiento tiene como objetivo diseñar e implementar una estrategia de comunicación para difundir el desarrollo, avances y resultados del proyecto. Los productos esperados incluyen el diseño de un plan de comunicación con las comunidades locales, la creación de cartillas y material audiovisual. Además, se desarrollarán contenidos digitales para web y redes sociales, repositorios de datos y códigos computacionales, así como talleres para estudiantes de colegios y cursos cortos para investigadores interesados en la aplicación de la muografía.

Para garantizar el logro de los objetivos del proyecto hemos constituido un equipo multidisciplinar con expertos en las áreas de muografía, instrumentación científica, computación y apropiación social & contenidos digitales. Contamos también con aliados internacionales quienes nos han acompañado en el desarrollo de esta tecnología en Colombia.

En el área de gestión de proyectos de muografía contaremos con la experiencia y pericia de *José David Sanabria-Gómez y Luis A. Núñez*. Ellos son pioneros en muografía en América Latina, tanto en el desarrollo de ambientes de simulación computacional, como en el diseño e implementación de instrumentación científica (Asorey et al. 2018A; Asorey et al. 2018B; Peña-Rodríguez et al 2020; Vasquez-Ramirez et al. 2020; Vesga-Ramirez et al. 2020; de Leon-Barrios et al 2021 Peña-Rodríguez et al 2021A; Peña-Rodríguez et al 2021B; Peña-Rodríguez et al 2021C; Vesga-Ramirez et al. 2021; Peña-Rodríguez et al 2022; Sarmiento-Cano et al 2022; Peña-Rodríguez et al 2023; Peña-Rodríguez et al 2024). Han desarrollado con éxito proyectos pioneros en muografía: MuTe (por su acrónimo inglés de *Muon Telescope*) es un proyecto financiado por Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (ColCiencias, Convocatoria No. 658 de 2014). Recientemente, desarrollan otro (MinCiencias Convocatoria 890 del 2020), que involucra la integración de la muografía con métodos geofísicos estándar para la construcción de un modelo 3D de densidad. Este proyecto está en desarrollo e involucra aplicación al Volcán Cerro Machín². Luis A. Núñez, será el investigador principal del proyecto, mientras que Jose David Sanabria-Gómez liderará el equipo de Geofísica, responsable de la interpretación de la fusión de datos geofísicos y muograficos, así como también coordinará las campañas de adquisición de datos geofísicos.

Para el área de instrumentación y desarrollo del gemelo digital tendremos a *Julían Rodríguez-Ferreira y David Sierra-Porta*. Julián Rodríguez-Ferreira será el responsable de la supervisión de la instrumentación del muógrafo gracias a su experiencia en instrumentación científica en sistemas autónomos de varias misiones satelitales de la agencia espacial europea (Poulet et al 2015; Salazar et al 2022; MoralesNorato et al 2023). David Sierra-Porta, tienen una sólida experiencia en muografía (Asorey et al. 2018A; Asorey et al. 2018B; Peña-Rodríguez et al 2020; Vasquez-Ramirez et al. 2020; Vesga-Ramirez et al. 2020; Vesga-Ramirez et al. 2021) y, recientemente en desarrollos que involucran inteligencia artificial (SierraPorta 2022; SierraPorta et al 2023) y en tratamiento de datos astronómicos (Sierra-Porta 2022, Hahn et al 2023 Sierra-Porta 2024). Por ello es el indicado para supervisar la implementación y operación del gemelo digital del MuTe-WHOM.

²Para detalles de la divulgación de los proyectos de muografía en la Universidad Industrial de Santander pueden consultar <https://halley.uis.edu.co/fuego/>

Los expertos en ciencias de la computación son *Fabio Martínez-Carrillo y Carlos J. Barrios-Hernandez*. Fabio Martínez Carrillo tiene una extensa experiencia en el desarrollo de técnicas y herramientas de *machine learning* y deep learning aplicado en ciencias de la salud (Guayacán & Martínez 2021; Guayacán et al 2022; Archila et al 2022). Por su parte Carlos J. Barrios Hernández se especializa en generar códigos eficientes para que puedan ser implementados en arquitecturas computacionales avanzadas (Navaux et al 2022; Puentes et al 2022; CanosaReyes et al 2022) por ello es una persona clave para garantizar la eficiencia de las simulaciones detalladas de rayos cósmicos y la operación del gemelo digital.

Para la apropiación social del conocimiento contamos con *Ysabel C. Briceño Romero* tiene contribuciones importantes en la apropiación social de la ciencia (Briceño 2013; Briceño 2014; Briceño-Romero et al 2019; Briceño-Romero et al 2024) y su impacto en la opinión en redes sociales. Es consultora de proyectos internacionales como LA-CoNGA physics³, un proyecto Erasmus de la Unión Europea que impulsa el desarrollo de una maestría en Física en ocho universidades de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela.

Alianzas internacionales. En el terreno de alianzas internacionales, contamos con *Hernan Asorey* e *Ivan Sildénik* de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina y el Centro Atómico Bariloche-Argentina, respectivamente. Hernán Asorey es experto en aplicaciones de Astropartículas con una dilatada experiencia en muografía. Es un activo colaborador del grupo GIRG y ha mantenido una relación académica muy productiva favoreciendo el intercambio de estudiantes e investigadores entre Colombia y Argentina. Su función será de consultor en la interpretación de simulaciones del flujo de rayos cósmicos. Ivan Sildénik es el jefe del departamento de Física de Neutrinos, experto en el desarrollo de instrumental para la detección de interacciones de rayos cósmicos con la materia. Función: consultor en el diseño y construcción del hodoscopio para aplicaciones de muografía.

Antecedentes y trayectoria del equipo de investigación

El *Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación* (GIRG, COL0010279) dependiente de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander, está reconocido con categoría A1 por Colciencias. Está conformado actualmente por 7 investigadores con formación doctoral. Durante su trayectoria, el GIRG han ejecutado 52 proyectos de investigación, los cuales han contado con financiación por parte de entidades nacionales e internacionales, así como con financiación interna por parte de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS. También han realizado su trabajo de grado 185 estudiantes, entre trabajos de grado de pregrado, Maestría en Física, Maestría en Matemática Aplicada, Maestría en Geofísica, y Doctorado en Física. Igualmente, se han publicado 291 artículos de investigación en revistas homologadas e indexadas por Colciencias. El GIRG participó activamente en la creación del Programa de Maestría en Geofísica de la UIS, estando además bajo su responsabilidad las líneas de investigación en sismología y muografía del programa.

El Grupo de Investigación de *Cómputo Avanzado y a Gran Escala* (CAGE código de MINCIENCIAS COL0154744 y clasificación A1), soporta científicamente el Centro de Supercomputación y Cálculo Científico de la Universidad Industrial de Santander, teniendo como principal objetivo

³ <https://laconga.redclara.net/>

fortalecer las capacidades de investigación, desarrollo e innovación en computación de alto rendimiento y cálculo científico de la Universidad Industrial de Santander. Igualmente, lidera en el país las actividades de I+D+i articulando la relación con la empresa privada y el Estado, de acuerdo a las necesidades y perspectivas tanto científicas, como productivas. Finalmente, contribuye y participa en el desarrollo de proyectos internacionales que involucren el uso del supercómputo, el cálculo de alto rendimiento, las arquitecturas escalables y la computación científica. Mas informacion en www.sc3.uis.edu.co y <https://uis.edu.co/ffm-gruinvcage-es/>

El grupo de investigación BIVL2ab (*Biomedical Imaging, Vision and Learning Laboratory*, COL0009269) de la Universidad Industrial de Santander, se especializa en procesamiento de imágenes biomédicas, visión por computador y aprendizaje automático. Sus investigaciones incluyen inteligencia artificial, análisis de imágenes médicas y modelos de movimiento. Colabora con instituciones internacionales y desarrolla tecnologías avanzadas para mejorar diagnósticos médicos. Proyectos destacados incluyen segmentación de accidentes cerebrovasculares y cuantificación de nódulos pulmonares. Además, ofrece cursos y datasets públicos para investigación. El laboratorio está ubicado en el Edificio Laboratorios Pesados de la UIS y promueve la innovación y la excelencia en investigación. Más información <https://bivl2ab.uis.edu.co/contacto>.

El grupo de investigación CEMOS (Centro de Estudios en Modelado y Simulación, COL0009609, Categoría A1) de la Universidad Industrial de Santander se enfoca en la investigación avanzada en modelado y simulación aplicados a la ciencia y la ingeniería, utilizando un enfoque sistémico. El grupo es reconocido por su capacidad para integrar diferentes disciplinas y tecnologías, lo que les permite abordar problemas complejos desde múltiples perspectivas. Su trabajo no solo contribuye al avance científico y tecnológico, sino que también apoya el desarrollo de soluciones prácticas para problemas reales en sectores como la educación, la industria y el medio ambiente.

El Grupo de Investigación Física Aplicada y Procesamiento de Imágenes y Señales, FAPIS COL0127999, de la Universidad Tecnológica de Bolívar se dedica a aplicar métodos matemáticos avanzados para abordar problemas fundamentales en física e ingeniería. Este grupo trabaja en la intersección de matemáticas y física, aplicando estas disciplinas para resolver problemas concretos, contribuyendo así al avance del conocimiento y la innovación en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas. Proyectos destacados del grupo incluyen el análisis del flujo de potencia mediante métodos de homotopía, multigrid y clustering, y estudios estadísticos de Clima espacial, el uso de Análisis Topológico de Datos para la comprensión de patrones y comportamientos no lineales en el tratamiento señales y también para el análisis y tratamiento de imágenes digitales. Además, se especializa en el uso de las tecnologías de machine learning y deep learning para el desarrollo de modelos precisos y adecuados para problemas de regresión y clasificación en diferentes áreas de la ciencia, tecnología y sociedad.

El Grupo Transdisciplinariedad, Cultura y Política, COL0026181, de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Este grupo se destaca por su enfoque en integrar diversas disciplinas para abordar problemáticas culturales y políticas complejas. Fundado con el objetivo de fomentar investigaciones transdisciplinarias, ha establecido una base teórica sólida y ha desarrollado proyectos sobre identidad cultural, patrimonio, memoria histórica, participación política y movimientos sociales. También han investigado el impacto de las políticas públicas y métodos educativos interdisciplinarios.

Planteamiento del problema y pregunta de investigación

La búsqueda de fuentes de energías alternativas y sostenibles es una prioridad global para enfrentar los desafíos del cambio climático y la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, el hidrógeno blanco, una forma pura de hidrógeno encontrada en formaciones geológicas, se perfila como una prometedora fuente de energía limpia. Sin embargo, la identificación y caracterización de yacimientos de hidrógeno blanco en Colombia es limitada debido a la falta de técnicas eficientes e innovadoras para la exploración de estructuras subterráneas en áreas geológicamente complejas como los afloramientos de ofiolitas.

Las actuales soluciones tecnológicas en problemas geofísicos presentan limitaciones y desventajas, además de una dependencia tecnológica que establece una brecha significativa en la aplicación de soluciones sostenibles, eficientes y amigables con el medio ambiente. Por ello, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible incorporar la muografía como técnica de prospección geofísica viable para identificar posibles yacimientos de hidrógeno blanco en Colombia?

Nos planteamos continuar el desarrollo tecnológico de la muografía, mediante la construcción de un telescopio de muones portátil de tercera generación, autónomo y capaz de operar en condiciones ambientales extremas, junto con la implementación de un gemelo digital del instrumento y el uso de herramientas de inteligencia artificial para el procesamiento de los datos. Estos desarrollos serán articulados para identificar, de manera eficiente y precisa, posibles yacimientos de hidrógeno blanco en afloramientos de ofiolitas en Colombia.

Estado del arte y marco conceptual

Los muones atmosféricos

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía ($E > 1 \text{ TeV}$) que provienen del espacio exterior y al alcanzar la parte superior de la atmósfera, colisionan generando cientos de miles de sub-partículas o partículas secundarias que se dispersan a lo largo de ella. Estas partículas pueden clasificarse en tres categorías: hadrónica, electromagnética y muónica. Nos centraremos en la componente muónica, la cual está compuesta principalmente por muones, que tienen una masa 207 veces mayor que la del electrón. Estos no interactúan a través de las interacciones fuertes, lo que les confiere una notable capacidad de penetración de la materia.

Cuando los muones interactúan con la materia, pierden energía a través de varios mecanismos, como la producción de pares, la radiación de frenado, las colisiones inelásticas con núcleos y la ionización (Groom et al., 2001). La pérdida de energía de una partícula cargada al atravesar un material con una opacidad X (definida como el producto de la distancia recorrida, en cm, por la densidad media del material, en g/cm^3) está determinada por la siguiente relación, medida en TeV: $dE/dX = a(E) + b(E) E$, siendo $a(E)$ y $b(E)$ dos funciones que dependen de la energía de la partícula.

Esta característica permite que el flujo de los muones se modifique al atravesar una estructura, posibilitando la creación de un muograma. Esta imagen muestra la distribución de densidades dentro de la estructura, de manera análoga a cómo los rayos X atraviesan el cuerpo humano y producen una imagen que revela las formaciones internas como huesos u órganos en una

radiografía. En este sentido, la muografía utiliza muones para obtener imágenes de la densidad interna de formaciones geológicas o estructuras civiles como puentes o represas.

La muografía

La muografía es una técnica no invasiva que utiliza el flujo de rayos cósmicos como fuente para generar mapas de densidad en estructuras naturales y artificiales. Sus aplicaciones abarcan desde la detección de materiales radiactivos en pasos fronterizos hasta la inspección de grandes obras como represas y plantas nucleares (Kaiser, 2019a; Oláh et al., 2022; Holma et al., 2022). Esta técnica se destaca por ofrecer una resolución espacial superior y una mayor capacidad de penetración en comparación con métodos geofísicos tradicionales como la sismología y la gravimetría, que tienen una resolución espacial limitada (Rosas-Carbajal et al., 2017; Lesparre et al., 2012; Nishiyama et al., 2017).

Recientemente varios autores (Yang et al 2019; Bonechi et al. 2019; Zhang et al 2020), han presentado una revisión de las técnicas de muografía, apuntando que existen dos esquemas de uso de los flujos de muones atmosféricos para construir imágenes del interior de estructuras masivas: (i) imágenes por absorción de muones basadas en atenuación del flujo (ver por ejemplo Lesparre et al. 2010), y (ii) imágenes por múltiple dispersión de muones basadas en ancho de la distribución de los ángulos de dispersión de los muones (ver por ejemplo Gómez et al. 2017). En este proyecto se empleará el primer enfoque.

Empresas como *CMR Geotomography Technologies Inc*⁴, muestra productos para la detección de minerales como zinc, plata, cobre, oro y uranio mediante hodoscopios (Schouten, 2019). Por otro lado, empresas como *Lynkeos Technology Ltd*⁵, se centran principalmente en el análisis de depósitos de residuos nucleares. En un estudio dirigido por Lee Thompson y su equipo en Sheffield, se aplicó con éxito la técnica para evaluar la integridad de un túnel ferroviario en Inglaterra utilizando hodoscopios de material centellador de diferentes dimensiones y distancias (Thompson, L. F. et al 2020). Estos ejemplos ilustran cómo la muografía, como técnica pasiva, eficiente y segura, permite detectar diferencias de densidad en las estructuras estudiadas, lo que puede reducir costos de exploración o monitoreo de las ofiolitas y proporcionar información con una mejor resolución espacial. La versatilidad de la técnica se evidencia claramente, y se destaca la posibilidad de mejorar su eficacia mediante el uso de telescopios, autónomos y de dimensiones reducidas.

En Colombia la muografía ha florecido impulsada por los grupos GIRG de la UIS y Física de altas energías de UniAndes, con algunas iniciativas muy preliminares de simulación de escenarios de muografía en UniNariño (Tapia et al 2016, Guerrero et al 2019). Los desarrollos de instrumental se han dado en el grupo de Física de Altas Energías de UniAndes, quienes implementaron un prototipo de muógrafo (Useche & Avila-Bernal 2019). Sin la menor duda los avances más significativos, tanto de instrumentación como de ambientes de simulación, se han dado en el GIRG. Este grupo de investigación ha desarrollado dos generaciones de muógrafos y varios esquemas de simulación para el estudio de muografía de volcanes en Colombia (Asorey et al. 2018A; Asorey et al. 2018B; Peña-Rodríguez et al 2020; Vasquez-Ramirez et al. 2020; Vesga-Ramirez et al. 2020; de Leon-Barrios et al 2021 Peña-Rodríguez et al 2021A; Peña-Rodríguez et al 2021B; Peña-Rodríguez et al 2021C; Vesga-Ramirez et al. 2021;

⁴ <https://ideon.ai/>

⁵ <https://www.lynceos.co.uk/>

Peña-Rodríguez et al 2022; Sarmiento-Cano et al 2022; Peña-Rodríguez et al 2023; Peña-Rodríguez et al 2024).

Ofiolitas en Colombia

En Colombia destacan algunas formaciones ofiolíticas significativas, que son valiosas como posibles sitios de producción de hidrógeno blanco. Los afloramientos de ofiolitas en Colombia se encuentran principalmente en las siguientes regiones (Álvarez 1989; Agudelo 1995; Ortiz 2004, Lewis et al 2006; Carrillo-Ramírez et al 2023):

Cordillera Central:

- Complejo Ofiolítico de Aburrá: Incluye la conocida "Dunita de Medellín," que consiste en dunita y harzburgita. Estas rocas están asociadas con entornos de zona de supra-subducción y datan del período Pérmico-Triásico.
- Serpentinitas de Ituango: Es un cuerpo delgado y alargado ubicado dentro de la Cordillera Central, que mide aproximadamente 40 km de longitud y 4 km de ancho.
- El Complejo Ofiolítico de Anorí se encuentra en la región norte de la Cordillera Central de Colombia. Esta zona es conocida por la presencia de rocas ultramáficas y máficas que forman parte de la litósfera oceánica que ha sido emplazada en el margen continental.
- Municipios como Aranzazu, Salamina y Pácora en el departamento de Caldas. En el municipio de Aranzazu, las serpentinitas presentan megacristales de piroxeno y granate grosularia. En Salamina, los gabros forman cuerpos estructurales importantes que muestran texturas de grano medio a grueso. Estos basaltos ofiolíticos de esta región se encuentran en la carretera a Castilla y muestran un aspecto macizo. Los gabros de Pácora forman cuerpos de hasta 3 km de ancho y 7 km de longitud. Estos afloramientos se encuentran en las carreteras hacia Castilla y Buenos Aires, y en quebradas como Peñoles, Hermita y San Pablo.
- Los afloramientos de ofiolitas en los municipios de Sevilla y Caicedonia, ubicados en el departamento del Valle del Cauca, son parte del Complejo geológico conocido como el Cinturón Ofiolítico Romeral. Este cinturón se extiende a lo largo del flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia y es una zona de paleosutura que afecta los terrenos ofiolíticos.

Cordillera Occidental: Los afloramientos de ofiolitas en la Cordillera Occidental de Colombia forman parte de dos principales cinturones:

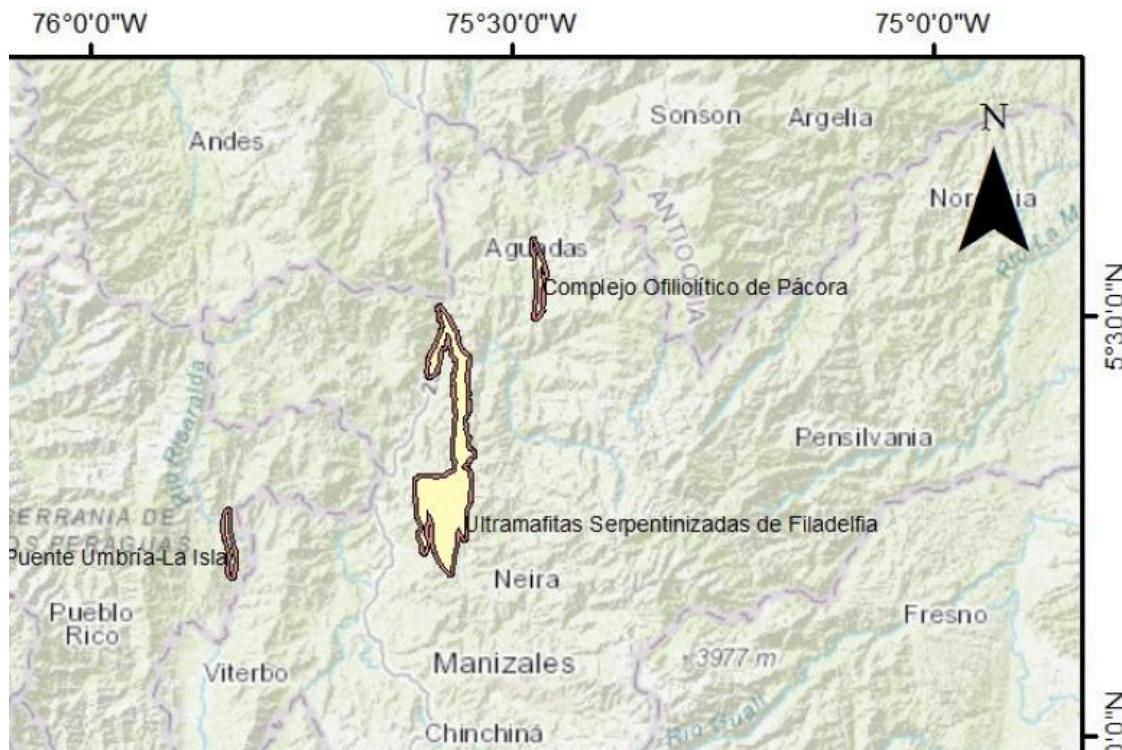
- el Cinturón Ofiolítico Romeral se extiende aproximadamente 800 km a lo largo del flanco occidental de la Cordillera Central y la Cordillera Occidental, en asociación con Falla de Romeral.
- el Cinturón Ultramáfico Atrato se encuentra en el flanco occidental de la Cordillera Occidental y está asociado principalmente con la zona del río Atrato. Este cinturón es una zona de paleosutura que afecta terrenos ofiolíticos y está compuesto por rocas ultramáficas y máficas.

Serranía de Baudó: Ubicada a lo largo de la costa del Pacífico, esta región también contiene complejos ofiolíticos que contribuyen a la diversidad geológica de Colombia.

Sierra Nevada de Santa Marta: Los afloramientos de ofiolitas en esta región están distribuidos principalmente en las estribaciones y áreas elevadas de la Sierra Nevada. Se encuentran pequeños cuerpos de rocas ultramáficas serpentinizadas, a menudo asociadas con gneises y esquistos máficos del Paleozoico tardío.

Ofiolitas e hidrógeno blanco

Las ofiolitas son complejos geológicos que se componen principalmente de rocas ultramáficas y máficas, y representan secciones de la corteza oceánica y el manto superior que han sido obductadas (empujadas) sobre la corteza continental (Condie and Stern 2023; Dilek and Furnes 2014). Estas formaciones son importantes en la geología porque proporcionan evidencia directa de la estructura y composición de la corteza oceánica y del manto terrestre.



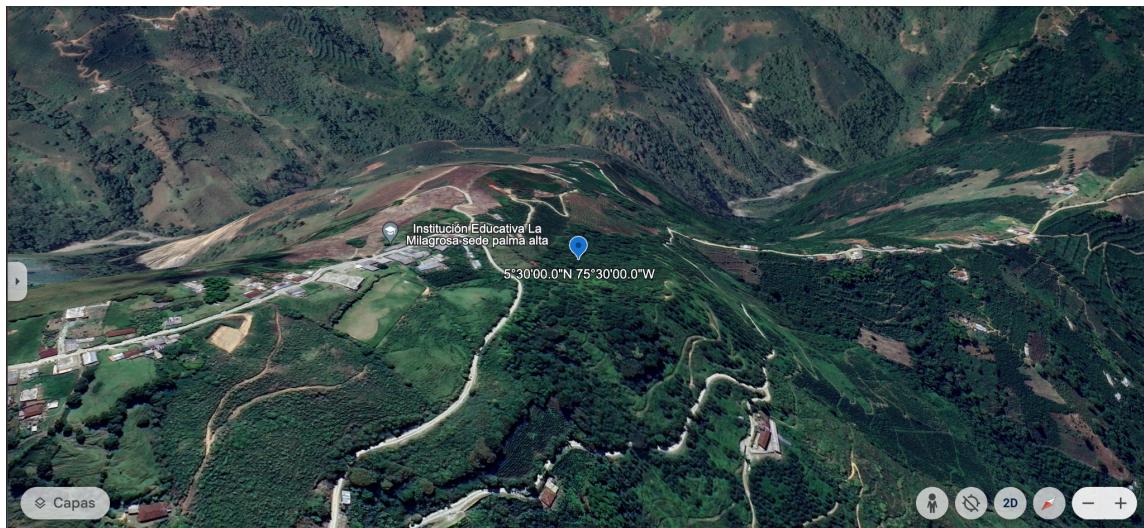


Figura 1 Complejo ofiolítico de Pácora (Caldas), visto desde google Earth (abajo), muestra colinas que son susceptibles de ser analizadas por la muografía.

Las ofiolitas, que contienen rocas ultramáficas como peridotitas, son capaces de producir hidrógeno blanco (hidrógeno molecular, H_2) a través de un proceso geológico llamado serpentinización. Durante este proceso, las rocas ultramáficas ricas en olivino reaccionan con el agua, transformándose en minerales de serpentina, magnetita y generando hidrógeno molecular como subproducto.

El hidrógeno blanco, o hidrógeno natural, puede generarse mediante diversos procesos geológicos en rocas ultramáficas, como las ofiolitas, que son secciones de la corteza oceánica y el manto superior expuestas en la superficie. La serpentinización, donde el olivino y los piroxenos reaccionan con agua, es un proceso clave que genera hidrógeno molecular (H_2). Ejemplos en Japón (Mineoka), Noruega (Leka) y Albania (Bulqizë) demuestran la generación de hidrógeno en estos entornos. Estudios en Omán y Colombia han confirmado la presencia de hidrógeno en complejos ofiolíticos, sugiriendo depósitos económicamente viables (Katayama et al., 2010; Daae et al., 2013; Carrillo Ramírez et al., 2023).

La serpentinización en rocas ultramáficas, como las peridotitas, genera hidrógeno mediante reacciones a baja temperatura. Este proceso puede crear entornos reductores que sustentan vida microbiana, subrayando su importancia biológica y geológica (Katayama et al., 2010). En Colombia, la presencia de coberturas sedimentarias sobre complejos ofiolíticos en el Valle del Cauca-Patía podría formar reservorios de hidrógeno, destacando el potencial de estos entornos para la exploración energética (Carrillo Ramírez et al., 2023).

Muografía y afloramiento de ofiolitas

La muografía es una técnica geofísica innovadora utilizada para explorar y visualizar las estructuras internas de formaciones geológicas, incluidos los afloramientos de ofiolitas. Esta técnica detecta los muones cósmicos que atraviesan la formación, creando una imagen con mapas de densidades de la estructura geológica. En el caso particular de la aplicación de este proyecto, la muografía, utilizando telescopios de muones, puede ser una herramienta efectiva

para mapear la densidad de estas estructuras geológicas y ayudar a identificar las áreas donde la serpentización es más probable que esté ocurriendo.

Una de las principales ventajas de la muografía es su capacidad para detectar los contrastes de densidad. Ayuda a cartografiar las variaciones de densidad dentro de los complejos ofiolíticos, lo cual es especialmente útil para comprender las zonas de transición entre corteza y el manto, o incluso discrimina tipos de roca como es el caso de contrastes corticales debido a sus variaciones de densidad. Por ejemplo, recientemente la ofiolita de Samail, en Omán, se está estudiando mediante muografía para entender la estratificación de la densidad desde la corteza oceánica hasta el manto, proporcionando una mejor comprensión de la estructura geológica de la litosfera oceánica. Específicamente los yacimientos de Wadi Jizi, Fizh y Hilti son objeto de estudios muográficos para comprender la densidad y las variaciones geológicas a lo largo de diferentes segmentos de la ofiolita. Los datos muográficos se integran con datos sísmicos y geológicos para comprender el subsuelo de forma exhaustiva. Por ejemplo, se analizará la ofiolita de Samail y los datos sísmicos de la placa del Pacífico para deducir la estructura y la litología locales (Oláh et al 2024).

Los sondeos muográficos en la Ofiolita de Samail se llevan a cabo con sistemas basados en MWPC (por sus siglas en inglés de *Multiwire Proportional Chamber*), conocidos por su eficacia en la detección de muones y su capacidad para operar en entornos hostiles. Estos sistemas pueden desplegarse en lugares remotos funcionando con energía solar. La adquisición de datos muográficos suele durar varios meses para garantizar una penetración y resolución suficientes. Seguidamente los datos adquiridos se modelan para reconstruir los perfiles de densidad de las estructuras del subsuelo, lo que proporciona una comprensión exhaustiva de la composición interna del ofiolito. En nuestro caso en esta propuesta planteamos realizar un estudio similar en el cual se mezcle la muografía con otras técnicas geofísicas para estudiar los afloramientos de ofiolitas en el territorio Colombiano.

La muografía permite visualizar la discontinuidad de Mohorovičić (Moho) y otras zonas de transición dentro de las ofiolitas, fundamentales para comprender la formación y evolución de la corteza oceánica. A diferencia de la perforación, la muografía es un método no invasivo que no requiere la penetración física de la superficie terrestre, lo que la hace menos perturbadora y más respetuosa con el medio ambiente. Además, proporciona imágenes de alta resolución de las estructuras del subsuelo, revelando a menudo detalles que otros métodos geofísicos podrían pasar por alto, incluyendo la identificación de rasgos a pequeña escala dentro del complejo ofiolítico

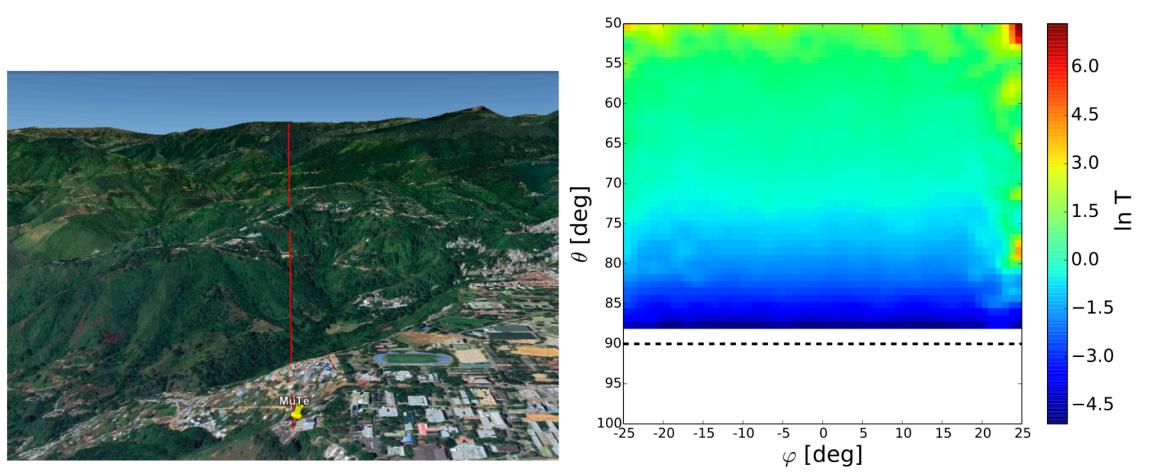


Figura 2. Primera muografía de las montañas aledañas a Bucaramanga, Santander, analizadas con un muograma de MuTe desde la Universidad Industrial de Santander. Imágenes tomadas de Peña-Rodríguez et al 2020

El telescopio de muones de esta propuesta

En este proyecto se propone construir un telescopio de muones portátil y autónomo, basado en un hodoscopio de tres paneles. El diseño estará basado en la tecnología de paneles centelladores que permita medir el flujo de muones en condiciones operativas difíciles, tales como la ausencia de suministro eléctrico constante, grandes variaciones de temperatura y humedad relativa, exposición a fuertes vientos, y la capacidad de operar tanto en espacios abiertos como en espacios reducidos o confinados.

Actualmente, el grupo de investigación ha construido dos generaciones de telescopio de muones. La primera generación, MuTe1.0, fue un telescopio híbrido con dos paneles centelladores (150 cm x 150 cm x 500 cm, y 900 píxeles por panel) y un detector Cherenkov de agua (Peña-Rodríguez et al 2020). La segunda generación, está constituida por un hodoscopio de dos paneles (60cm x 60cm x 300cm, con 225 píxeles por panel). La presente propuesta apunta a construir la tercera generación de hodoscopio. Este nuevo modelo tendrá tres paneles similares al anterior (60cm x 60cm x 300cm, con 225 píxeles por panel) y podrá ser operado remotamente interactuando con su gemelo digital. La incorporación de un tercer panel mejorará significativamente la precisión del instrumento al proporcionar una definición más precisa de las trayectorias de los muones que atraviesan la estructura geológica. Además, permitirá la generación simultánea de dos muogramas con diferentes niveles de resolución espacial, lo que aumentará la confiabilidad de las observaciones.

Se anticipan varios retos técnicos en el diseño y construcción del nuevo telescopio. Estos incluyen la adaptación de una electrónica de bajo consumo energético, la construcción y optimización de los paneles del hodoscopio, el filtrado del ruido de flujo muones parásito y el perfeccionamiento de los acoplos entre el material centellador y los fotomultiplicadores. Además, el sistema debe ser capaz de operar en ambientes extremos, manteniendo alta eficiencia de detección incluso en condiciones adversas.

Inspirado en el uso exitoso de la muografía en la exploración geológica de formaciones complejas, como la ofiolita de Samail en Omán, donde se ha demostrado su eficacia para mapear la estratificación de densidad y las transiciones entre la corteza y el manto (Oláh 2024),

nuestro proyecto busca aplicar estos avances tecnológicos para expandir las capacidades de detección en nuevos escenarios y aplicaciones. En este caso en particular se busca aplicar de manera experimental la muografia para conocer de manera más detallada, la geometría, disposición orientación y continuidad lateral de los cuerpos ofiolíticos por medio del grado de detalle que pueden proporcionar los contrastes de densidad de estas rocas con las adyacentes. Este enfoque no solo mejorará la comprensión de estructuras geológicas complejas, sino que también proporcionará un método más versátil y accesible para estudios de muografía en diversas condiciones de campo, en especial en la coyuntura actual de búsqueda de fuentes no convencionales de energía y nuevos paradigmas exploratorios.

muógrafo digital, MuTe D-Twin

Desarrollar un gemelo digital (*digital twin* o *D-Twin*) de un telescopio de muones implica crear un modelo virtual muy detallado que replique el instrumento físico y su comportamiento en tiempo real. Un gemelo digital de un instrumento es una representación virtual que refleja los atributos físicos, el comportamiento y el rendimiento del instrumento real. Este modelo integra diversas tecnologías, como sensores, análisis de datos e inteligencia artificial. Este modelo digital está conectado a su homólogo físico a través de datos recogidos de sensores y diversas fuentes de datos, lo que permite la supervisión, el análisis y la simulación en tiempo real. El gemelo digital de un instrumento ofrece importantes ventajas, como el mantenimiento predictivo, la mejora del diseño y la optimización, la supervisión en tiempo real, la toma de decisiones basada en datos y la mejora de la seguridad de la operación del instrumento. Estas ventajas hacen de los gemelos digitales una herramienta valiosa en diversas industrias, mejorando el rendimiento, la confiabilidad y la longevidad de los instrumentos (para mas detalles pueden consultar Liu et al 2020; Errandonea et al 2020; Singh et al 2022 y las referencias allí citadas).

Desarrollar un gemelo digital para un telescopio de muones representa un avance significativo en la exploración de afloramientos de ofiolitas y de hidrógeno blanco. El gemelo digital mejora la eficiencia, precisión y confiabilidad de las actividades de exploración al aprovechar la integración de datos en tiempo real, análisis predictivo y capacidades de simulación (Errandonea et al., 2020). Un gemelo digital de un telescopio de muones puede simular las operaciones del instrumento, predecir su rendimiento bajo diferentes condiciones y analizar datos en tiempo real (Madni et al., 2019). Permite el monitoreo continuo del rendimiento del telescopio de muones, identificando posibles problemas antes de que se conviertan en fallos. Esta capacidad de mantenimiento predictivo aumenta el tiempo de actividad y reduce los costos de mantenimiento, asegurando que el telescopio opere de manera óptima (Singh et al., 2021).

Simular el rendimiento del telescopio de muones bajo diversas condiciones ambientales ayuda a mitigar los riesgos asociados con las operaciones de campo. Los investigadores pueden prever desafíos y adaptar sus estrategias en consecuencia, mejorando la seguridad y la fiabilidad de las actividades de exploración (Errandonea et al., 2020). Un gemelo digital permite la monitorización y el control remoto del telescopio de muones, facilitando la colaboración entre equipos geográficamente distribuidos. Esto es particularmente beneficioso para proyectos de investigación internacionales y para el despliegue del telescopio en ubicaciones remotas o desafiantes (Singh et al., 2022).

El gemelo digital puede procesar grandes cantidades de datos para generar imágenes precisas y detalladas de estructuras subterráneas, mejorando la identificación de depósitos de hidrógeno blanco (Adjei & Montasari, 2020). Ayuda a optimizar la configuración del telescopio y las estrategias de recopilación de datos al simular diferentes escenarios operativos. Esto conduce a

procesos de exploración más eficientes, reduciendo el tiempo y el costo de identificar y caracterizar posibles reservorios de hidrógeno blanco (Madni et al., 2019).

Es importante señalar la incorporación de elementos de realidad aumentada en la interacción con el gemelo digital de nuestro muógrafo. Actualmente se carece de literatura que haga referencia a la integración de la realidad virtual y aumentada en la creación de gemelos digitales para instrumentación científica proporciona ventajas significativas en la visualización, interacción y gestión de datos. Mayoritariamente está siendo utilizada en ambientes industriales de manufactura (Watkins et al 2021 y Ribeiro de Oliveira et al 2021), aunque hay algunos ejemplos interesantes en la industria petrolera (Wang et al 2022) y aeroespacial (Ward, et al 2023). Estas tecnologías no solo mejoran las capacidades para monitorear, diseñar y simular sistemas complejos, sino que también ofrecen entornos inmersivos e interactivos que incrementan la eficiencia y precisión en múltiples aplicaciones. La exploración de estas herramientas en diversos campos ha demostrado su potencial para revolucionar el manejo y análisis de datos, facilitando el diseño y funcionamiento optimizado de sistemas avanzados.

Integración de Información Geofísica con la Muografía.

La integración de datos de muografía, gravimetría, resistividad eléctrica 2D e información magnetotelúrica ofrece una oportunidad prometedora para mejorar la precisión y resolución de los estudios geofísicos. Sin embargo, también plantea desafíos significativos que deben abordarse con metodologías de inversión avanzadas y datos geofísicos robustos (Holma et al 2022).

En un estudio realizado en el volcán Puy de Dôme se compararon los resultados obtenidos mediante tomografía de resistividad eléctrica 2D, gravimetría y muografía. Los resultados mostraron que los datos de gravimetría y tomografía de resistividad eléctrica están pobremente correlacionados, mientras que la correlación entre los datos de gravimetría y muografía es significativamente mejor (Portal et al. 2013). Asimismo, investigaciones realizadas por Davis & Oldenburg 2012, muestran los resultados de la inversión simultáneamente de datos de muografía sintéticos y gravimetría en una mina, utilizando un formalismo de inversión conjunta basado en Tikhonov. Este estudio concluye que la muografía también puede ser aplicada a la prospección de minerales, demostrando su potencial en la identificación de estructuras subsuperficiales.

En otro estudio, se llevó a cabo una inversión conjunta de datos de gravimetría y muografía utilizando datos reales y sintéticos en el volcán Puy de Dôme, Francia. La inversión se realizó mediante el método de Gauss-Newton, incorporando una función de compensación "offset" para ajustar las diferencias de sensibilidad a las densidades relativas entre ambos tipos de datos. Los resultados mostraron la necesidad de emplear múltiples métodos de inversión y disponer de información previa robusta para obtener conclusiones más precisas. Por ejemplo, en el volcán La Soufrière en Guadalupe, se observó una mejora en los resultados de la inversión conjunta en zonas más profundas, a pesar de que estas áreas no son accesibles para la muografía (Jourde et al., 2015; Rosas-Carbajal et al., 2017).

Adicionalmente, se han realizado aproximaciones computacionales para el análisis de datos de muografía (Oláh et al 2022). Entre estas aproximaciones, destacan las técnicas de aprendizaje profundo, particularmente, las redes neuronales convolucionales para identificar patrones en los datos.

Estos estudios muestran que la solución para inversión conjunta de datos geofísicos con muografía está lejos de ser resuelta. La información física obtenida de muestras de roca será crucial para restringir los parámetros físicos y mejorar el proceso de inversión. Un tema clave es determinar la mejor manera de integrar esta información en el esquema de inversión, ya sea mediante la determinación de matrices de peso para el método de mínimos cuadrados, el cálculo de la función “offset” en el caso del método de Gauss-Newton, o la determinación de un modelo inicial para inversiones utilizando *Simulated Annealing* o Algoritmos Genéticos. En esta dirección nuestro grupo ha avanzado en afinar algunas técnicas de inversión en muografía con muy buenos resultados, alcanzando a determinar variaciones hasta de un 10% en las distribuciones de densidad (Vesga-Ramirez et al. 2021).

Estrategia de transferencia de los resultados del proyecto

La estrategia de transferencia de resultados del proyecto MuTe-WHOM se basa en una comunicación efectiva y adaptada a las necesidades de cada grupo destinatario. Así, se definen dos capas comunicativas clave en este proceso de apropiación social del conocimiento:

1. la difusión científica, orientada a la comunidad especializada y actores tomadores de decisiones en la gestión pública. Por otra parte,
2. la divulgación científica como una estrategia de diálogo en las comunidades, con acciones que promuevan la transferencia del mensaje científico técnico a la apropiación de ideas con sentido local.

Se identifican como parte del tejido comunicativo a ser definido estratégicamente:

- La comunidad científica.
- Personal con funciones públicas.
- Comunidad educativa.
- Población infantil y juvenil, con énfasis en igualdad de género para las oportunidades de vocación científica y tecnológica.
- Líderes y lideresas naturales en las localidades.

La difusión científica se enfocará en presentaciones técnicas, informes detallados, talleres de capacitación y asesoría técnica, con las siguientes acciones:

1. Organizar presentaciones técnicas y seminarios para los funcionarios de la Agencia Nacional de Hidrocarburos y el Ministerio de Minas y Energía -ANH-, donde se expongan los resultados del proyecto, la metodología utilizada y las implicaciones para la exploración de hidrógeno blanco en Colombia.
2. Realizar talleres de capacitación para el personal de la ANH sobre el uso de tecnologías de muografía y análisis de datos geofísicos, facilitando la transferencia de conocimientos técnicos y operativos.
3. Ofrecer servicios de asesoría técnica al Ministerio para la implementación de políticas y proyectos relacionados con el hidrógeno blanco, asegurando que las decisiones estén basadas en datos científicos y técnicos.

4. Publicar artículos en revistas científicas y medios de comunicación especializados para compartir los resultados del proyecto con la comunidad científica y técnica a nivel nacional e internacional.
5. Organizar talleres y charlas en universidades y centros educativos para fortalecer capacidades en la comunicación de la ciencia y la transferencia del conocimiento especializado relacionado con la transición a energías limpias.

Dentro de la ruta de divulgación científica se tomará en cuenta las recomendaciones del Programa en beneficio de las comunidades -PBC- (PNUD & ANH, 2013), desde una perspectiva integral que tienda a reconocer la naturaleza de los actores locales y desarrollar estrategias de promoción del desarrollo sostenible y transición hacia energías limpias en Colombia. Atendiendo a las recomendaciones del PNUD & ANH (2013), se tomarán como premisas en este componente para las PBC: la capacitación en las comunidades, la información oportuna y los procesos transparentes. Y dentro de los sectores priorizados, el medio ambiente y el fortalecimiento comunitario.

En este sentido, se reconoce como lineamientos de este componente, lo sugerido para la realización de los PBC:

- La participación ciudadana en la definición del concepto sostenible y de protección de los recursos naturales.
- Caracterización integral del entorno social, cultural y económico del área que ocuparía la exploración del proyecto.
- Transparencia y respeto de los derechos humanos y de los derechos de las minorías étnicas.
- Comunicación clara y efectiva.

El proyecto prevé espacios de acercamiento con el liderazgo local que potencie la posibilidad de generar mensajes apropiados y pertinentes para alinear los objetivos del proyecto con las diversas capas de acción social en los entornos comunitarios.

Dentro de una metodología de investigación - acción se pretende un aprendizaje colectivo de la población potencialmente involucrada en el proyecto, con espacios de diálogo que permitan reconocer rutas posibles de transición energética, en donde la ciencia y la tecnología se fortalezca con sentido social.

Como acciones comunicativas se priorizará la divulgación científica con campañas de concientización, talleres y charlas, así como uso de plataformas digitales. Pensando en una estrategia integral para asegurar que los resultados del proyecto se utilicen de manera efectiva en la promoción del desarrollo sostenible y la transición hacia energías limpias en Colombia, se presentan algunas acciones orientadoras:

- Involucrar a las comunidades locales en el monitoreo y protección de los yacimientos de hidrógeno blanco, promoviendo su participación activa en proyectos de energías limpias.
- Organizar talleres de aprendizaje local sobre el desarrollo sostenible de la región.

- Desarrollar contenidos divulgativos sobre las fuentes de energías limpias y sostenibles (redes sociales, videos informativos y folletos).
- Desarrollar campañas de concienciación y educación dirigidas a la comunidad en general sobre la importancia del hidrógeno blanco como fuente de energía limpia y sostenible, tomando a la comunidad local como protagonista.

En la metodología desarrollaremos con más detalle algunos de los entregables del proyecto.

Objetivos

Objetivo General

Implementar la tecnología de muografía de tercera generación vinculada a un gemelo digital para investigar afloramientos de ofiolitas en Colombia, con el fin de detectar potenciales yacimientos de hidrógeno blanco. Se busca mitigar el riesgo exploratorio mediante una técnica innovadora, utilizando hodoscopios de barras centelladoras y un gemelo digital que permita el seguimiento de la operación del instrumento en tiempo real. Se propone desarrollar un piloto que pueda ser replicado y ampliamente aplicado a nivel nacional para la exploración de fuentes energéticas no convencionales.

Objetivos específicos

1. Identificar en Colombia los posibles sitios de afloramiento ofiolíticos que sean susceptibles de ser estudiados con muografía.
2. Construir, calibrar y validar en campo un telescopio de muones portátil y autónomo, basado en un hodoscopio.
3. Desarrollar un gemelo digital del telescopio de muones que permita interactuar con virtualmente con el instrumento físico, garantizando confiabilidad de la operación del instrumento
4. Realizar pruebas en campo del instrumento en un área geológica seleccionada con presencia de ofiolitas.
5. Proponer una estrategia de inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos, incluyendo muografía, gravimetría y resistividad eléctrica 2D.
6. Desarrollar un plan de apropiación social y tecnológica-científica para un modelo de transición energética sostenible, con énfasis en la exploración de hidrógeno blanco.

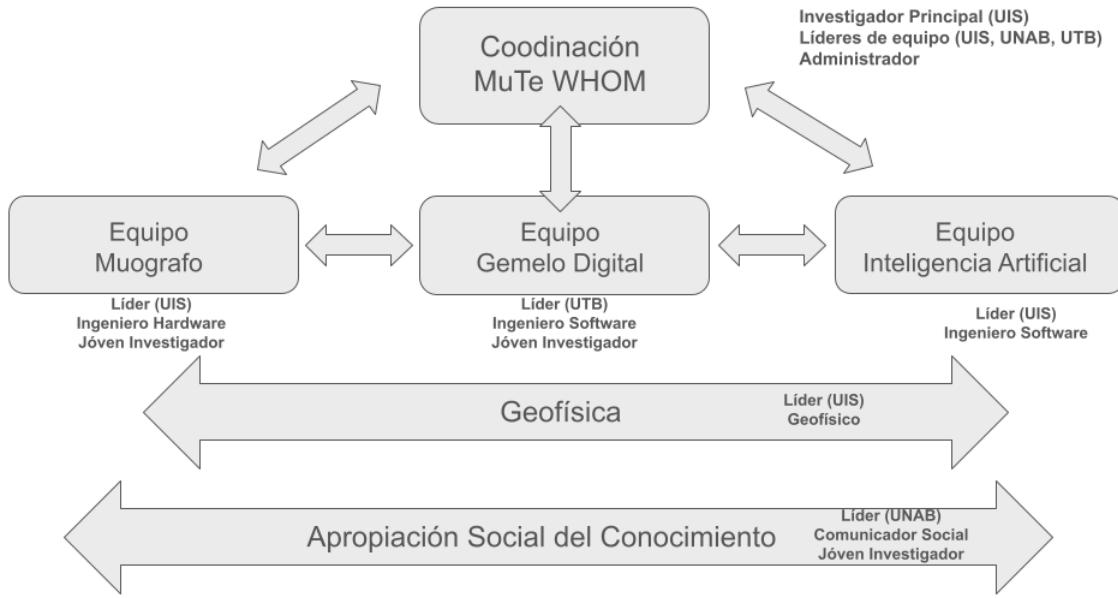


Figura 3. Organización y gobernanza de MuTe WHOM. Tendremos tres equipos de trabajo específicos (muógrafo, Gemelo Digital e Inteligencia Artificial) y dos transversales (Geofísica y Apropiación Social). El equipo del Gemelo Digital interactúa de forma independiente con el del muógrafo y el de Inteligencia Artificial. Mientras que los equipos transversales apoyan la operación de los tres equipos específicos. La Gobernanza del proyecto se realiza la instancia de coordinación donde, en reuniones semanales se atienden las cotidianidades del proyecto: ritmo de avance y dificultades en las actividades de cada uno de los equipos. Una vez al mes se realizan reuniones generales para informar los avances generales del proyecto.

Metodología

En la Figura 3 mostramos la organización y gobernanza que proponemos para el proyecto MuTe WHOM. El proyecto esta conformado por cinco equipos de trabajo, cada uno cuenta con un líder y profesionales de apoyo a la investigación. Como se puede apreciar en la figura, se tienen tres equipos de trabajo específicos (muógrafo, Gemelo Digital e Inteligencia Artificial) y dos transversales (Geofísica y Apropiación Social). El equipo del Gemelo Digital interactúa de forma independiente con el del muógrafo y el de Inteligencia Artificial. Mientras que los equipos transversales apoyan la operación de los tres equipos específicos.

La Gobernanza del proyecto se realiza la instancia de coordinación donde, en reuniones semanales se atienden las cotidianidades del proyecto: ritmo de avance y dificultades en las actividades de cada uno de los equipos. Una vez al mes se realizan reuniones generales para informar los avances generales del proyecto.

Cada equipo de trabajo implementa prácticas ágiles de gestión de proyectos. Estas reuniones, diarias, breves y focalizadas ayudan a los miembros del equipo a mantenerse alineados, compartir los progresos y abordar rápidamente cualquier obstáculo. En un proyecto de muografía, las reuniones diarias garantizan que todos los miembros del equipo estén al tanto de los últimos avances, coordinen sus esfuerzos y resuelvan los problemas en colaboración.

Las actividades que se deberán realizar para alcanzar los objetivos propuestos son

1. Para *Identificar los posibles sitios de afloramiento ofiolíticos susceptible de ser estudiados con muografía* se empleará la herramienta computacional MUYSC (Peña-Rodríguez 2024) y la metodología implementada para el análisis de los volcanes en Colombia mediante muografía (Vega-Ramirez et al. 2020).
 - a. Se identifica la ubicación geográfica de los afloramientos ofiolíticos reseñados en la literatura (Alvarez 1989; Agudelo 1995; Ortiz 2004; Carrillo-Ramirez 2023)
 - b. A partir de la ubicación geográfica MUYSC genera la topografía a partir del conjunto de datos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*⁶) de la NASA con una resolución de 1 segundo de arco (30 metros) (EROS 2017)).
 - c. Se identifican los posibles puntos de observación para la muografía, la aceptancia (dimensiones) del hodoscopio y los tiempos de exposición necesarios para obtener una resolución de variaciones de densidad entre un 15% y un 20%.
 - d. Se seleccionan los dos mejores posibles sitios y se rehacen las simulaciones mediante el ambiente ARTI (Sarmiento-Cano et al 2022.)⁷
2. Para *la construcción y calibración de un telescopio de muones portátil y autónomo, basado en un hodoscopio*. Se utilizará la plataforma MEIGA (Taboada 2022) que permitirá simular la imagen digital del instrumento. Las actividades se seguirán para alcanzar este objetivo son:
 - a. Simulación del instrumento y flujo de muones: Simulación del flujo de los muones a nivel del suelo en la ubicación geográfica específica. Simulación de la interacción de los muones con los paneles centelladores, traducida en un conteo de fotones en los elementos fotosensibles SiPM (*Silicon Photomultiplier* o fotomultiplicadores de Silicio). Estimación de la cantidad de fotoelectrones equivalentes utilizando la eficiencia cuántica de los SiPM (acrónimo de *Silicon Photo multiplier*, fotomultiplicador de silicio), y determinación de los umbrales de operación de la electrónica del instrumento.

⁶ <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>

⁷ La razón para realizar las simulaciones con ARTI de los mejores sitios identificados por MUYSC es la precisión. MUYSC es un simulador basado en modelos fenomenológicos del flujo de muones. ARTI es un esquema de alta precisión que permite detallar no solo el flujo de muones sino el de otras partículas, lo cual permite inferir el ruido que experimentará el muograma. Los tiempos de cómputo que requiere ARTI son un factor 10 a 100 de los que requiere el esquema fenomenológico MUYSC.

- b. Diseño de la estructura del telescopio: Diseño de una estructura liviana, portátil y desmontable con dimensiones menores a 0.6 m x 0.6 m x 3 m, capaz de mantener las piezas en su disposición final y soportar el telescopio completo. Simulación del comportamiento térmico de la estructura adaptada a las variaciones climáticas en los afloramientos ofiolíticos. Simulación del comportamiento mecánico de la estructura, considerando las variaciones climáticas y el comportamiento de los vientos en los afloramientos ofiolíticos en Colombia.
 - c. Construcción de los paneles detectores de centelleo: Construcción de los planos de centelleo anterior, posterior y central, cada uno menor a 0.6 m x 0.6 m con 200-400 píxeles. Creación de una guía de soporte de las fibras hacia cada SiPM.
 - d. Calibración del arreglo de SiPM y medición de los valores de *crosstalk*. Integración de la información de *crosstalk* en la electrónica de control de los planos.
 - e. Integración de dos módulos idénticos de electrónica rápida y de bajo consumo de 64 canales, basados en FPGA, para el control del arreglo de SiPM y determinación del umbral de disparo de cada plano de detección del hodoscopio.
 - f. Diseño del sistema de alimentación eléctrica del telescopio para permitir su funcionamiento autónomo en las condiciones de trabajo especificadas. Se incorporarán sensores que se conecten con el gemelo digital
 - g. Integración de una placa digitalizadora rápida y de bajo consumo para el control de los paneles, el tiempo GPS y todas las variables atmosféricas de interés.
 - h. Desarrollo del software de control, adquisición y preprocesamiento de datos en la SBC (*Single Board Computer*) de control de la estación. Integración del módulo de comunicación celular en la SBC para la transferencia de datos de telemetría, climáticos y prioritarios. Este software será diseñado y desarrollado por el equipo del gemelo digital. Obtendrá datos de un entramado de sensores de vibración, humedad y temperatura ubicados en sitios críticos (electrónica de control, paneles centelladores, sistema de alimentación de potencia) que permitan la conexión del instrumento con su gemelo digital.
 - i. Adaptación de rutinas de procesamiento de información: Adaptación de las rutinas desarrolladas por el grupo para el procesamiento de la información adquirida con el telescopio, con el fin de convertirla en diferencias de densidad e imágenes muográficas 2D.
 - j. Pruebas de integración y calibración: Realización de pruebas de integración, funcionamiento y calibración de todo el sistema en las instalaciones de la UIS.
3. Para el desarrollo un gemelo digital del hodoscopio (*MuTe-D-Twin*) que permita validar la confiabilidad de las mediciones del telescopio, se realizarán las siguientes actividades:

- a. Definir alcances del gemelo digital: tipos de datos, fuentes y necesidades de integración. Identificar los indicadores clave de rendimiento (KPI, i.e. *Key Performance Indicators*) como la temperatura, vibración y niveles de humedad. Establecer esquemas de realimentación entre el modelo digital y el real, donde los datos del gemelo digital se utilicen para mejorar el telescopio físico y viceversa.
- b. Crear un modelo 3D detallado y funcional para el telescopio de muones utilizando software CAD. Este debe incluir todos los componentes, como los paneles centelladores, SiPMs y elementos estructurales. Desarrollar el gemelo digital utilizando software de simulación que pueda replicar el comportamiento físico y las condiciones operativas del telescopio. Para ello se utilizarán las simulaciones y diseños CAD implementados en el desarrollo del telescopio. También se utilizarán las simulaciones de la interacción de los componentes de detección con el flujo de muones en los posibles puntos de observación.
- c. Diseño y calibración de la red de sensores en el telescopio físico para monitorear parámetros como temperatura, vibración y humedad. Configurar un sistema robusto de adquisición de datos para recopilar y transmitir datos en tiempo real desde los sensores al gemelo digital.
- d. Utilizar una plataforma IoT o una equivalente para conectar el telescopio físico con su gemelo digital. Esta plataforma permitirá la transmisión y procesamiento de datos en tiempo real. Implementar protocolos de comunicación (por ejemplo, MQTT, HTTP) para asegurar una transmisión de datos confiable y segura. Esta plataforma deberá interactuar con el software de control.
- e. Utilizar el gemelo digital para simular las operaciones del telescopio bajo diversas condiciones, como diferentes temperaturas, vibraciones y niveles de humedad. Aplicar algoritmos de aprendizaje automático para analizar datos y predecir posibles problemas antes de que ocurran, permitiendo un mantenimiento proactivo. Realizar pruebas virtuales para simular varios escenarios operativos y condiciones ambientales.
- f. Desarrollar tableros de control interactivos (*dashboards*) y ambientes de realidad virtual/aumentada para la visualización en tiempo real de datos y análisis. Se hará énfasis en la implementación y despliegue de visualización de datos sobre las plataformas de visualización extendida e inmersiva. Esto es superposición de elementos reales con entornos virtuales usando técnicas de realidad aumentada para la visualización de la información y la interacción con los datos. De este modo se podrá observar exactitud como la manipulación en tiempos de simulación de datos y confrontar resultados. Esto se hará utilizando el laboratorio de visualización e immersion avanzada de la UIS y ambientes de visualización remota como YAJE (Gélvez-Cortés et al 2020).
- g. Comparar los resultados de la operación del gemelo digital con puntos de referencia conocidos del telescopio físico para calibrar y validar el modelo. Realizar pruebas rigurosas para asegurar que el gemelo digital representa con precisión el rendimiento del telescopio físico bajo diversas condiciones.

4. Para la *realización de pruebas en campo del instrumento en un punto de afloramiento ofiolítico* se realizarán las siguientes actividades:

- a. Visita preliminar y logística. Realizar una visita al sitio del afloramiento antes de la llegada del instrumento para identificar los puntos de observación calculados por MUYSC y recalcados con ARTI. Es indispensable que estos puntos sean accesibles para la instalación del muógrafo y los otros equipos. Planificar la logística para el transporte y montaje de los equipos. Ruta, embalaje, necesidades especiales de los instrumentos. Inspeccionar y calibrar el muógrafo, así como los equipos de resistividad, y gravimetría antes de llevarlos al campo.
- b. Para la implementación de las otras técnicas geofísicas como gravimetría y resistividad eléctrica 2D, se realizarán las siguientes actividades. Configuración de los equipos de resistividad y gravimetría verificando sus calibraciones. Diseño de una malla de medición adecuada para cubrir el área de interés. Realización de medidas en los diferentes puntos de la malla. Registrar las lecturas y georreferenciarlas. Análisis de los datos obtenidos para identificar las variaciones en la resistividad del subsuelo. Aplicar correcciones necesarias a los datos gravimétricos, como correcciones de marea, altitud y efecto de terreno. Recolección de datos mediante la cámara multiespectral desde y dron.
- c. Instalación del muógrafo: Montaje de la estructura: Instalar la estructura del muógrafo según el diseño portátil y ajustable previamente desarrollado. Esto incluye adecuación del terreno que garantice la integridad y el correcto funcionamiento del instrumento. Instalación y configuración de la conectividad del sistema mediante conectividad *Star Link*.
- d. Calibración y alineación inicial: Realizar una calibración inicial del muógrafo en el sitio para asegurar que todos los componentes están funcionando correctamente.. Alinear el muógrafo correctamente en el campo utilizando herramientas de nivelación y orientación.
- e. Validación de la Operación del muógrafo: Pruebas de funcionalidad: Realizar pruebas de funcionamiento para verificar la detección y conteo de muones. Ajustar los umbrales y calibrar los componentes según sea necesario. Recolección de datos iniciales: Registrar un conjunto inicial de datos para evaluar el rendimiento y realizar ajustes si es necesario. Monitoreo continuo: Establecer un sistema de monitoreo continuo para asegurar que el muógrafo esté operando correctamente durante el periodo de medición.

5. Respecto a la propuesta de una estrategia de inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos, el conjunto de actividades a desarrollar son las siguientes:
- a. Recolección y preprocesamiento de datos geofísicos: Identificar y seleccionar fuentes de datos geofísicos de muografía, gravimetría, resistividad eléctrica 2D e información multiespectral. Recopilar y organizar los conjuntos de datos geofísicos en un formato estandarizado. Realizar un análisis exploratorio de los datos para eliminar valores atípicos, datos incompletos y errores de medición. Construir los de datos de entrenamiento y validación para los modelos generativos que serán implementados. Para esta etapa utilizaremos los datos geofísicos recolectados en la primera campaña y datos sintéticos de la muografía generados durante la construcción del inventarios de afloramientos ofiolíticos y puntos de observación de muografía.
 - b. Diseño y desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo. Seleccionar las arquitecturas de modelos generativos adecuados para el análisis y procesamiento de datos geofísicos a partir de una revisión en la literatura. Diseñar los modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis y procesamiento de los datos geofísicos que permitan estimar propiedades geofísicas del área de estudio tales como la densidad, resistividad eléctrica 2D e información multiespectral. Entrenar los modelos generativos de aprendizaje profundo seleccionados para el procesamiento de los datos geofísicos y la predicción de propiedades geofísicas del área de estudio tales como la densidad, la resistividad y características magnéticas. Evaluar el rendimiento de los modelos utilizando el conjunto de datos de prueba y validación a partir de una comparación con los métodos tradicionales y los datos de prueba.
 - c. Análisis de resultados de la estrategia de modelos generativos. Analizar los resultados obtenidos a partir de los conjuntos de datos seleccionados para identificar las fortalezas y debilidades de los modelos entrenados. Estimar las propiedades geofísicas del área de estudio tales como la densidad, la resistividad y características multiespectrales utilizando los modelos generativos entrenados. Implementar técnicas de validación cruzada y análisis de sensibilidad para garantizar que los modelos no estén sobre ajustados y que sean capaces de generalizar correctamente. Crear herramientas de visualización como *dashboards* interactivos que permitan a los usuarios explorar los datos y resultados de manera dinámica. Comparar los resultados obtenidos con datos geológicos y geofísicos conocidos para validar la precisión de la técnica y generar un modelo integrado de las rocas de interés como generadores de hidrógeno blanco.

- d. Utilizar los modelos entrenados para predecir y mapear las propiedades geofísicas del área de estudio, como la densidad y la resistividad. Establecer un *framework* para el análisis, manipulación y tratamiento de imágenes digitales que permita extracción de características espacio-temporales que puedan ser usados para alimentar modelos de inteligencia artificial. Analizar las correlaciones y análisis de causalidad entre los diferentes tipos de datos geofísicos para identificar patrones y relaciones subyacentes. Realizar análisis de sensibilidad para entender la influencia de cada tipo de dato geofísico en los resultados del modelo. Aquí utilizaremos los datos de la primera y segunda campaña de medición geofísica y los primeros datos transmitidos por el muógrafo.
6. Para la apropiación social del conocimiento, el proyecto definirá tres estrategias, alineadas con la política pública de Colombia (Bonilla et al 2021): Diseño y documentación del **proceso** de acercamiento al territorio que resulte favorable a la exploración. En segundo lugar, proponemos un reconocimiento del **espacio** territorial, desde una construcción dialógica con actores y aliados, así como un acercamiento de aprendizaje conjunto entre los códigos naturales locales y la comunidad científica. Finalmente, es indispensable el desarrollo de acciones que permitan fomentar **capacidades socio técnicas** para la comprensión de energías alternativas y potencialidades del hidrógeno dentro de un modelo de transición, con perspectiva crítica, humana y sostenible.
- Etapas de trabajo:** el proyecto se propone diferentes fases de trabajo para cumplir los objetivos de apropiación social del conocimiento, que se irán desarrollando en tiempos progresivos y en ocasiones paralelos, con una serie de actividades transversales al desarrollo de exploración científico técnica.
- a. **Diseño y planeación:** Plan de apropiación social para un modelo de transición energética sostenible, con énfasis en el hidrógeno blanco.
 - b. **Diagnóstico participativo:** caracterización sociocultural de la zona de exploración identificada.
 - c. **Lectura del entorno:** discusión colectiva del modelo de transición energética sostenible en zona de exploración identificada.
 - d. **Divulgación científica:** producción de materiales de Apropiación Social del conocimiento
 - e. **Difusión científica:** socialización de experiencia socio científico técnica a comunidad científica, académica y tomadores de decisiones públicas.
 - f. **Cierre del proyecto** divulgando los resultados y consolidando los testimonios de las comunidades e investigadores participantes.

Resultados esperados:

1. Identificación y Caracterización de Afloramientos Ofiolíticos: Se espera identificar y caracterizar con precisión al menos dos sitios de afloramientos ofiolíticos en Colombia susceptibles de contener yacimientos de hidrógeno blanco. Utilizando la herramienta computacional MUYSC y la metodología ARTI, estos sitios serán seleccionados y evaluados mediante simulaciones detalladas. La información obtenida permitirá delinear las características geológicas y topográficas de los afloramientos, optimizando la selección de puntos de observación y tiempos de exposición para la muografía.

2. Desarrollo y Calibración del Telescopio de Muones: El proyecto resultará en la construcción y calibración de un telescopio de muones Tri-panel, portátil y autónomo. Este instrumento innovador, basado en un hodoscopio de paneles centelladores, estará diseñado para operar en condiciones ambientales extremas. Las pruebas de integración y calibración en las instalaciones de la UIS asegurarán que el telescopio funcione correctamente antes de su despliegue en campo.

3. Desarrollo de un gemelo digital del Telescopio de muones. El desarrollo de un gemelo digital para el telescopio de muones es una inversión estratégica que mejora significativamente la eficiencia, precisión y fiabilidad del instrumento. Al monitorear y optimizar la distribución de temperatura, la vibración y la humedad, el gemelo digital asegura que el telescopio opere en condiciones óptimas, prolonga su vida útil, y minimiza el riesgo de fallos. Estas capacidades no solo mejoran el rendimiento del telescopio sino que también permiten una exploración geofísica más precisa y eficiente, contribuyendo al descubrimiento y caracterización de yacimientos de hidrógeno blanco y al avance en la comprensión de los procesos geológicos.

4. Estrategia de inteligencia artificial para inversión geofísica: una estrategia de inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos, incluyendo muografía, gravimetría y resistividad eléctrica 2D..

5. Fortalecimiento de Capacidades Técnicas y Científicas: El proyecto fortalecerá las capacidades técnicas y científicas en Colombia para el uso de la muografía en estudios geofísicos. La implementación de programas de capacitación y talleres avanzados para estudiantes e investigadores fomentará el desarrollo de nuevas habilidades y conocimientos en el uso de tecnologías avanzadas de exploración geofísica.

6. Apropiación Social del Conocimiento: se diseñará un Plan de apropiación social para un modelo de transición energética sostenible. También se definirá una política de preservación y diseminación de datos y códigos computacionales. Igualmente se establecerá un código de conducta y mecanismos de implementación la política nacional de ciencia abierta.

Se espera involucrar activamente a las comunidades locales y académicas en el proyecto, promoviendo la comprensión y aceptación de la muografía como una técnica innovadora y beneficiosa para la exploración de recursos naturales. Las actividades de divulgación y los talleres comunitarios contribuirán a generar un sentido de pertenencia y colaboración, asegurando el apoyo y la sostenibilidad del proyecto a largo plazo. Estos resultados esperados no solo contribuirán al avance del conocimiento científico y tecnológico en la exploración geofísica, sino que también posicionarán a Colombia como un líder en la búsqueda y aprovechamiento de fuentes de energía limpia y sostenible.

Productos esperados

Productos obligatorios:

1. informe final
2. Base de datos
 - a. Con el listado de los posibles puntos de observación de muografía para los afloramientos ofiolíticos en el territorio nacional.
 - b. Con los archivos de datos de resistividad, gravimetría, muografía y observación multiespectral de uno de los afloramientos ofiolíticos
3. Códigos desarrollados (gemelo digital e inteligencia artificial) en git, con licencias creative commons de uso abierto *CC BY-NC (Attribution-NonCommercial)*.
4. Descripción del muógrafo, estructura, operación, calibración y utilización del instrumento físico y de su gemelo digital. Se incluirán protocolos de operación y análisis de datos.
5. Artículo de divulgación aceptado.
6. Estrategia de comunicación y apropiación social del proyecto.
7. Cuatro cursos dirigidos a la ANH y a MinCiencias.
 - a. Astronomía General para principiantes. Conociendo el Universo (20h)
 - b. Astropartículas para principiantes y sus aplicaciones (20h)
 - c. Narrar la Ciencia en la era de las redes sociales (20h)
 - d. Ciencia Ciudadana y Cambio Climático (20h)

Productos esperados adicionales a los obligatorios:

Resultados de actividades de apropiación social del conocimiento.

1. Participación en eventos científicos presentando los resultados preliminares de la investigación. Dos eventos internacionales y dos nacionales.
2. Elaboración de Cartillas o Folletos como medio de divulgación de los objetivos y justificación del proyecto.
3. Dos talleres de muografía para estudiantes graduados e investigadores de universidades cercanas al afloramiento seleccionado.
4. Generación de contenidos
 - a. Contenido para redes sociales (Tik Tok, Instagram, X y facebook)
 - b. Sitio web del proyecto con la descripción y avances del proyecto
 - c. Dos videos testimoniales de la experiencia

Productos y resultados de formación de recursos humanos.

1. Tres jóvenes investigadores vinculados al proyecto
2. Una tesis de maestría en ejecución, enmarcada en el proyecto.

Producto de desarrollo tecnológico e innovación

1. muógrafo de tercera generación y su gemelo digital
2. Estrategia de inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos.

Cronograma de actividades:

- 1. Identificación de puntos de observación para muografía de afloramientos (Meses 1-6)**
 - a. *Mes 1-3*: Revisión de literatura y selección de posibles afloramientos (Alvarez 1989; Agudelo 1995; Ortiz 2004; Carrillo-Ramirez 2023).
 - b. *Mes 2-4*: Generación de topografía utilizando datos SRTM (NASA) e identificación de puntos de observación para la muografía usando MUYSC (Peña-Rodríguez et al 2024).
 - c. *Mes 4-5*: Simulación y selección de mejores sitios usando ARTI (Sarmiento-Cano et al 2022) y MUYSC (Peña-Rodríguez et al 2024).
 - d. *Mes 6*: Redacción del reporte
- 2. Construcción y calibración del telescopio de muones (Meses 1-13)**
 - a. *Mes 1-8*: Compra de insumos, partes, piezas
 - b. *Mes 3-5*: Simulación del flujo de muones y la interacción con paneles centelladores (MEIGA, Taboada 2022), estimación de fotoelectrones y determinación de umbrales de operación de la electrónica.
 - c. *Mes 4-6* : Diseño CAD de la estructura portátil y desmontable. Simulación del comportamiento térmico y mecánico de la estructura.
 - d. *Mes 6-8*: Construcción de los planos de centelleo y guías de soporte de fibras.
 - e. *Mes 8-10*: Calibración del arreglo de SiPM, medición de valores de crosstalk e integración de módulos de electrónica rápida y de bajo consumo (FPGA).
 - f. *Mes 11-12*: Diseño del sistema de alimentación autónomo de potencia.
 - g. *Mes 9-13*: Integración de placa digitalizadora para control de paneles, desarrollo del software de control y adquisición de datos .
 - h. *Mes 11-13*: Adaptación rutinas de procesamiento de información
 - i. *Mes 12-13*: Realización de pruebas de integración y calibración en la UIS.
- 3. Desarrollo del gemelo digital del muógrafo *MuTe D-Twin* (Meses 4-13)**
 - a. *Mes 4*: Definir alcances del gemelo digital y esquemas de interacción entre los gemelos digital y real
 - b. *Mes 5-6*: Crear un modelo digital 3D, detallado y funcional para el telescopio de muones utilizando software CAD. Integrando la información del posible puntos de observación (flujo de muones e información climática)
 - c. *Mes 7-9*: Desarrollo e implementación de la red de sensores (temperatura, humedad y vibración) en el muógrafo real y los esquemas de adquisición de datos en esa red.
 - d. *Mes 9-10*: Conectividad de datos entre el telescopio físico con su gemelo digital.
 - e. *Mes 10-11*: Generación de simulaciones de situaciones físicas y análisis por *machine learning* para prever contingencias
 - f. *Mes 9-11*: Desarrollo tableros de control interactivos (*dashboards*) y ambientes de realidad virtual/aumentada para la visualización en tiempo real de datos y análisis.
 - g. *Mes 12-13*: Validación y calibración en la interacción de los gemelos físico y digital.
- 4. Recolección de datos geofísicos complementarios, pruebas en campo y validación del telescopio (Meses 6-17)**

- a. Mes 6-7: Visita al sitio seleccionado del afloramiento. Identificación y accesibilidad de los puntos de observación, contacto con las comunidades de la zona. Configuración y calibración de equipos de resistividad y gravimetría en campo. Diseño de malla de medición y recolección de datos geofísicos conjuntamente mediciones con la cámara multiespectral del dron.
 - b. Mes 14: Segunda campaña de recolección de datos geofísicos y mediciones con la cámara multiespectral del dron. Instalación de la estructura y configuración del sistema de conectividad. Traslado del muógrafo al sitio seleccionado, calibración y alineación en campo
 - c. Mes 15-17 Pruebas de funcionalidad y recolección inicial de datos muografía. Preparación, integración y análisis de datos utilizando machine learning.
5. **Estrategia de inteligencia artificial basada en el desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo para el análisis integral de datos geofísicos. (Meses 8-17)**
- a. Mes 8-9: Recolección y procesamiento de datos geofísicos: Identificar y seleccionar fuentes de datos geofísicos de muografía, gravimetría, resistividad eléctrica 2D e información multiespectral.
 - b. Mes 9-11: Diseño y desarrollo de modelos generativos de aprendizaje profundo. Seleccionar las arquitecturas de modelos generativos adecuados para el análisis y procesamiento de datos geofísicos a partir de una revisión en la literatura
 - c. Mes 11-14: Análisis de resultados de la estrategia de modelos generativos. Analizar los resultados obtenidos a partir de los conjuntos de datos seleccionados para identificar las fortalezas y debilidades de los modelos entrenados.
 - d. Mes 14-17: Uso los modelos entrenados para predecir y mapear las propiedades geofísicas del área de estudio, como la densidad, gravimetría y resistividad.

6. Programa de apropiación social del conocimiento (Meses 1-17)

- a. Mes 1-4 Plan de apropiación social para un modelo de transición energética sostenible, con énfasis en el hidrógeno blanco. En esta fase se realizarán las siguientes actividades:
 - Identificación de estrategias y recursos de comunicación para narrar de una manera efectiva y transparente el fenómeno de exploración de hidrógeno blanco desde el reconocimiento de las potencialidades científicas y tecnológicas de la muografía como mecanismo de exploración innovadora.
 - Definición de ejes discursivos para acercar los objetivos del proyecto al contexto social, dentro de las particularidades territoriales posibles.
 - Diseño de canales para la visibilidad del proyecto.
 - Diseño y desarrollo de taller dirigido a la comunidad científica involucrada sobre: ciencia abierta y apropiación social del conocimiento.
- b. Mes 5-9 Diagnóstico participativo. Caracterización sociocultural de la zona de exploración identificada. En esta fase se realizarán las siguientes actividades:
 - Identificación y caracterización de actores en la zona de exploración identificada:
 - Aliados, población de incidencia y grupos de interés en el territorio.

- Comunidad académica: grupos de investigación en Física, Geología o Geofísica en universidades cercanas a los afloramientos ofiolíticos.
 - Profesionales y organizaciones educativas.
 - Mediadores del conocimiento (medios de comunicación, gestores culturales, periodistas, líderes con influencia mediática).
 - Reconocimiento de las condiciones socio culturales de la zona de exploración identificada:
 - Detección de indicadores formales relacionados con el territorio.
 - Levantamiento de información con fuentes vivas que permitan caracterizar condiciones del territorio: económicas, culturales, productivas, educativas.
 - Desarrollo de informe diagnóstico.
- c. Mes 10-15 Lectura del entorno. Discusión colectiva del modelo de transición energética sostenible en zona de exploración identificada. En esta fase se realizarán las siguientes actividades:
- Definición metodológica y desarrollo de espacio de participación y discusión local sobre energías alternativas.
 - Plan de producción audiovisual testimonial.
 - Definición y desarrollo de taller dirigido a jóvenes.
- d. Mes 10-18 Divulgación científica. Producción de materiales de Apropiación Social del conocimiento. En esta fase se realizarán las siguientes actividades:
- Concepto, diseño y producción de material impreso sobre experiencias energías alternativas, centradas en el hidrógeno, desde exploración innovadora.
 - Documentación audiovisual experiencia energías alternativas, centrada en el hidrógeno, desde exploración innovadora en zona de exploración seleccionada.
 - Desarrollo de comunicación digital sobre avances del proyecto.
- e. Mes 16-18 Difusión científica. Socialización de la experiencia socio-científica y técnica a comunidad científica, académica, así como también a los tomadores de decisiones públicas. En esta fase se realizarán las siguientes actividades:
- Preparación y desarrollo de ponencias.
 - Preparación y desarrollo de taller a tomadores de decisiones (8h).
 - Preparación de artículo en revista de divulgación científica especializada.
- f. Mes 18 Cierre del proyecto divulgando los resultados y consolidando los testimonios de las comunidades e investigadores participantes.

Efectos sobre el medio ambiente y la salud humana

Este proyecto no tiene efectos negativos sobre el medio ambiente o la salud humana, por el contrario realiza un uso no invasivo de la zona a explorar. A diferencia de la perforación, la muografía es un método no invasivo que no requiere la penetración física de la superficie terrestre, lo que la hace menos perturbadora y más respetuosa con el medio ambiente.

Impactos potenciales:

El proyecto de muografía para identificar yacimientos de hidrógeno blanco tiene el potencial de generar impactos significativos en la economía, el medio ambiente y la sociedad Colombiana. A través de la diversificación energética, la reducción de emisiones de carbono, la creación de empleo y la apertura de nuevos mercados, el proyecto puede contribuir al desarrollo sostenible de Colombia. Además, el fortalecimiento de capacidades locales y el fomento de la innovación tecnológica impulsarán el crecimiento regional, posicionando al país como un líder en la transición hacia energías limpias.

El hidrógeno blanco es una fuente de energía limpia que no produce emisiones de carbono, ayudando a reducir la huella de carbono y a cumplir con los compromisos climáticos internacionales. La tecnología de muografía, al ser no invasiva, minimiza el impacto ambiental durante la exploración geológica, preservando los ecosistemas locales. Promover el uso de hidrógeno blanco favorece el desarrollo sostenible mediante el uso de una fuente de energía renovable y abundante, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU.

Con la capacidad de producir y exportar hidrógeno blanco, Colombia se posicionará como un actor clave en el mercado global de energías renovables, mejorando su competitividad internacional. La exploración y explotación de hidrógeno blanco abrirá puertas a nuevas alianzas estratégicas con países y empresas interesadas en energías limpias, facilitando el acceso a mercados internacionales. Además, el hidrógeno blanco puede ser utilizado en diversas industrias nacionales, abriendo nuevos mercados internos y mejorando la competitividad de las empresas locales.

El proyecto promoverá programas de capacitación y formación en tecnologías avanzadas, geología y energías renovables, mejorando la cualificación de la mano de obra local y empoderando a las comunidades. La infraestructura necesaria para la exploración y producción de hidrógeno blanco contribuirá al desarrollo regional, mejorando las instalaciones de investigación y las capacidades tecnológicas. Colaborar con universidades e institutos de investigación locales fortalecerá las capacidades científicas y tecnológicas, promoviendo un ecosistema de innovación en la región. Involucrar a las comunidades locales a través de programas de empleo y educación fomentará su desarrollo socioeconómico y aumentará el apoyo comunitario para iniciativas de energías limpias, creando un impacto positivo y sostenible.

Bibliografía

Adair & Kasha 1976	R.K. Adair y H. Kasha (1976) in: V. W. Hughes y C. S. Wu (Eds.), Muon Physics, 1, p 323 (New York: Academic Press).
Adjei & Montasari 2020	Adjei, P., & Montasari, R. (2020). A Critical Overview of Digital Twins. , 3, 51-61. https://doi.org/10.4018/ijose.2020010104 .
Agudelo 1995	Agudelo, J. Á. (1995). Geología del Complejo Ofiolítico de Pácora y secuencias relacionadas de Arco de Islas (Complejo quebrada Grande), Colombia. Boletín Geológico, 35(1), 5-49.

Alvarez 1989	Álvarez, J. (1989). Mapa metalogénico de las fajas ofiolíticas de la zona occidental de Colombia. Boletín Geológico, 30(2), 8-23.
Archila et al 2022	Archila, J., et al (2022). A multimodal Parkinson quantification by fusing eye and gait motion patterns, using covariance descriptors, from non-invasive computer vision. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 215, 106607.
Asorey et al 2018A	Asorey, H. et al (2018). miniMuTe: A muon telescope prototype for studying volcanic structures with cosmic ray flux. Scientia et technica, 23(3), 386-391.
Asorey et al 2018B	Asorey, H. et al (2018) Astroparticle projects at the eastern colombia region: facilities and instrumentation. Scientia et technica, 23(3), 391-396.
Bonechi, et al 2019	Bonechi, L. et al. (2019). Atmospheric muons as an imaging tool. Reviews in Physics. https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038 .
Bonilla et al 2021.	Bonilla et al (2021). Política pública de apropiación social del conocimiento en el marco de la ciencia, tecnología e innovación. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Bogotá D.C., Colombia.
Briceño 2013	Briceño, Y. (2013) El modo emergente de la comunicación de la ciencia: incidencias y gestión distribuida en América Latina., Tesis Doctoral, Universidad de Los Andes.
Briceño 2014	Briceño, Y. (2014). Comprendiendo el modo emergente de la comunicación. Revista Cuestiones Universitarias, 4(4), 92-104.
Briceño-Romero et al 2019	Briceño-Romero, Y. C., et al (2019). Twitter en tiempos electorales. Una revisión de# ColombiaDecide. Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social" Disertaciones", 12(2), 216-236.
Briceño-Romero et al 2024	Briceño-Romero, Y. C., et al (2024). Percepción de riesgo e información en tiempos de pandemia: el recuerdo de un encierro conectado en jóvenes bumangueses. Comunicación, (50), 29-51.
CanosaReyes et al 2022	Canosa-Reyes, R. M. et al (2022). Dynamic performance–Energy tradeoff consolidation with contention-aware resource provisioning in containerized clouds. Plos one, 17(1), e0261856.
Carrillo-Ramirez 2023	Carrillo Ramirez, A., et al. (2023). Natural H ₂ Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings. Geosciences, 13(12), 358.
Conforto & Amaral 2010	Conforto, E., & Amaral, D. (2010). Evaluating an Agile Method for Planning and Controlling Innovative Projects. Project Management Journal, 41, 73 - 80. https://doi.org/10.1002/pmj.20089 .
Daae et al 2013	Daae, F., et al (2013). Microbial life associated with low-temperature alteration of ultramafic rocks in the Leka ophiolite complex. Geobiology, 11. https://doi.org/10.1111/gbi.12035 .
Davis & Oldenburg 2012	Davis, K., & Oldenburg, D. W. (2012). Joint 3D of muon tomography and gravity data to recover density. ASEG Extended Abstracts, 2012(1), 1-4.
de Leon-Barrios et al 2021	de León-Barrios, R. et al (2021). Muography for the Colombian Volcanoes,

	PoS(ICRC2021)280.
EROS 2017	Earth Resources Observation and Science Center, US (2017) https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm
Errandonea et al 2020	Errandonea, I., et al (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. <i>Comput. Ind.</i> , 123, 103316. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316 .
Gélvez-Cortés et al 2020	Gélvez-Cortés, S. A., et al (2020, September). Fostering Remote Visualization: Experiences in Two Different HPC Sites. In Latin American High Performance Computing Conference (pp. 18-33). Cham: Springer International Publishing.
Gomez et al 2017	Gómez, H. et al (2017). Forward scattering effects on muon imaging. <i>Journal of Instrumentation</i> , 12(12), P12018.
Groom et al. 2001	Groom, D. E. et al. (2001). Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV. <i>Atomic Data and Nuclear Data Tables</i> , 78(2), 183-356.
Guayacán & Martínez 2021	Guayacán, L. C., & Martínez, F. (2021). Visualising and quantifying relevant parkinsonian gait patterns using 3D convolutional network. <i>Journal of biomedical informatics</i> , 123, 103935.
Guayacán et al 2022	Guayacán, L. C. et al (2022). Quantification of parkinsonian kinematic patterns in body-segment regions during locomotion. <i>Journal of Medical and Biological Engineering</i> , 42(2), 204-215.
Guerrero et al 2019	Guerrero, I. D., et al (2019). Design and construction of a muon detector prototype for study the galeras volcano internal structure. In <i>Journal of Physics: Conference Series</i> (Vol. 1247, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
Hahn et al 2023	Hahn, C., et al (2023). The DESI bright galaxy survey: final target selection, design, and validation. <i>The Astronomical Journal</i> , 165(6), 253.
Holma et al 2022	Holma, M. et al (2022). Muography, Outreaching, and Transdisciplinarity: Toward the Golden Age of Muography. <i>Journal of Advanced Instrumentation in Science</i> .
Jourde et al. 2015	Jourde, K., et al. (2015). Improvement of density models of geological structures by fusion of gravity data and cosmic muon radiographies. <i>Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems</i> , 4(2), 177-188.
Katayama et al 2010	Katayama, I. et al (2010). Low silica activity for hydrogen generation during serpentization: An example of natural serpentinites in the Mineoka ophiolite complex, central Japan. <i>Earth and Planetary Science Letters</i> , 298(1-2), 199-204.
Kusagaya & Tanaka 2015	Kusagaya, T., & Tanaka, H. K. (2015). Muographic imaging with a multi-layered telescope and its application to the study of the subsurface structure of a volcano. <i>Proceedings of the Japan Academy, Series B</i> , 91(9), 501-510.
Lesparre et al 2010	Lesparre, N. et al. (2010). Geophysical muon imaging: feasibility and limits. <i>Geophysical Journal International</i> , 183(3), 1348-1361.
Lesparre, et al 2012	Lesparre, N. et al (2012). Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. <i>Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems</i> , 1(1), 33-42.

Lewis et al 2006	Lewis, J. F., et al. (2006). Ophiolite-related ultramafic rocks (serpentinites) in the Caribbean region: a review of their occurrence, composition, origin, emplacement and Nilaterite soil formation. <i>Geologica Acta: an international earth science journal</i> , 4(1-2), 237-263.
Liu et al 2020	Liu, M., et al (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. <i>Journal of Manufacturing Systems</i> . https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017 .
Madni et al 2019	Madni, A., et al (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. <i>Syst.</i> , 7, 7. https://doi.org/10.3390/SYSTEMS7010007 .
MinCiencias 2020	MinCiencias. (2020). Anexo 1: Descripción productos y resultados apropiación social. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias). https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_1_descripcion_productos_y_resultados_apropiacion_social.pdf
MoralesNorato et al 2023	Morales-Norato, D. et al (2023). Hyperspectral camera as a compact payload architecture for remote sensing applications. <i>Applied Optics</i> , 62(8), C88-C98.
Navaux et al 2022	Navaux, P. O. et al (2022). Hyperparameter Optimization for Convolutional Neural Networks with Genetic Algorithms and Bayesian Optimization. In 2022 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI) (pp. 1-5). IEEE.
Nishiyama, et al 2017	Nishiyama, R., et al (2017). First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography. <i>Geophysical Research Letters</i> , 44(12), 6244-6251.
Olah et al 2022	Oláh, et al (2022) (Editors) Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles, Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union
Olah et al 2024	Oláh, L., et al. (2024). Plans for Muography of Samail Ophiolite. <i>Journal of Advanced Instrumentation in Science JAIS-499</i> .
Ortiz 2004	Ortiz, F. (2004). Guías para la localización de metales preciosos en ofiolitas colombianas. Informe de avance proyecto Cyted XIII. 1. Ofiolitas: características mineralógicas y petrográficas del yacimiento de... <i>Dyna</i> , 71(142), 11-23.
Particle Data Group 2020	Particle Data Group, Zyla, P. et al (2020). Review of particle physics. <i>Progress of theoretical and experimental physics</i> , 2020(8), 083C01.
Peña-Rodríguez et al 2020	Peña-Rodríguez, J. et al (2020). Design and construction of MuTe: a hybrid muon telescope to study colombian volcanoes. <i>Journal of Instrumentation</i> , 15(09), P09006.
Peña-Rodríguez et al 2021A	Peña-Rodríguez, J. et al (2021). Muography background sources: simulation, characterization, and machine-learning rejection PoS(ICRC)400
Peña-Rodríguez et al 2021B	Peña-Rodríguez, J. et al (2021). Modeling and simulation of the R5912 photomultiplier for the LAGO project. <i>IEEE Sensors Journal</i> , 21(18), 20184-20191.
Peña-Rodríguez et al 2022	Peña-Rodríguez, J. et al (2022). Muography in Colombia: Simulation Framework, Instrumentation, and Data Analysis. <i>Journal of Advanced Instrumentation in Science JAIS-271</i> .
Peña-Rodríguez et al 2023	Peña-Rodríguez, J. et al. (2023). Characterization and On-Field Performance of the MuTe Silicon Photomultipliers. <i>Instruments</i> , 7(1), 7.

Peña-Rodríguez et al 2024	Peña-Rodríguez, J. et al. (2024). MUYS: An end-to-end muography simulation toolbox. <i>Geophysical Journal International</i> , gga064.
PNUD & ANH 2013	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) (2013): Línea de base. Programas en beneficio de las comunidades implementados por el sector de hidrocarburos en Colombia. Colombia.
Portal et al. 2013	Portal, A., et al. (2013). Inner structure of the puy de dôme volcano: cross-comparison of geophysical models (ert, gravimetry, muon imaging). <i>Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems</i> , 2(1), 47-54.
Poulet et al 2015	Poulet, F., et al (2015). The pre-flight calibration setup of the instrument SIMBIO-SYS onboard the mission BepiColombo. <i>Planetary and Space Science</i> , 117, 82-95.
Puentes et al 2022	Puentes, M., et al (2022). Datacentric analysis to reduce pedestrians accidents: A case study in Colombia. In <i>Sustainable Smart Cities and Territories</i> (pp. 163-174). Springer International Publishing.
Ribeiro de Oliveira et al 2021.	Ribeiro de Oliveira, T. et al (2021). Systematic Review of Virtual Reality Solutions Employing Artificial Intelligence Methods. In <i>Proceedings of the 23rd Symposium on Virtual and Augmented Reality</i> (pp. 42-55).
Rosas-Carbajal et al 2017	Rosas-Carbajal, M., et al (2017) Three-dimensional density structure of La Soufrière de Guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data. <i>Geophysical Research Letters</i> , 44(13), 6743-6751.
Salazar et al 2022.	Salazar, C. et al (2022). Cloud detection autonomous system based on machine learning and cots components on-board small satellites. <i>Remote Sensing</i> , 14(21), 5597.
Sarmiento-Cano et al 2022.	Sarmiento-Cano, C. et al (2022). The ARTI framework: cosmic rays atmospheric background simulations. <i>The European Physical Journal C</i> , 82(11), 1019.
Schouten 2019	Schouten, D. (2019). Muon geotomography: selected case studies. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society A</i> , 377(2137), 20180061.
Serrador & Pinto 2015.	Serrador, P., & Pinto, J. (2015). Does Agile work? - A quantitative analysis of agile project success. <i>International Journal of Project Management</i> , 33, 1040-1051. https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2015.01.006 .
Sierra-Porta 2022	Sierra-Porta, D. (2022). On the fractal properties of cosmic rays and Sun dynamics cross-correlations. <i>Astrophysics and Space Science</i> , 367(12), 116.
Sierra-Porta 2024	Sierra-Porta, D. (2024). A multifractal approach to understanding Forbush Decrease events: Correlations with geomagnetic storms and space weather phenomena. <i>Chaos, Solitons & Fractals</i> , 185, 115089.
SierraPorta et al 2023.	Sierra-Porta, D., et al (2023). Linking PM10 and PM2. 5 Pollution Concentration through Tree Coverage in Urban Areas. <i>CLEAN—Soil, Air, Water</i> , 51(5), 2200222.
Singh et al 2021	Singh, S., et al (2021). Implementation of Battery Digital Twin: Approach, Functionalities and Benefits. <i>Batteries</i> . https://doi.org/10.3390/batteries7040078 .

Singh et al 2022	Singh, M., et al (2022). Applications of Digital Twin across Industries: A Review. <i>Applied Sciences</i> . https://doi.org/10.3390/app12115727 .
Taboada et al 2022	Taboada, A. et al (2022) Meiga, a dedicated framework used for muography applications Journal of Advanced Instrumentation in Science JAIS-266.
Tanaka et al 2023	Tanaka, H. K., et al (2023). Muography. <i>Nature Reviews Methods Primers</i> , 3(1), 88.
Tapia et al 2016	Tapia, A. et al (2016). Preliminary monte carlo simulation study of the structure of the galeras volcano using muon tomography. In Proceedings of the 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2016). 3-10 August 2016. Chicago (p. 885).
Thompson, L. F. et al 2020	Thompson, L. F. et al (2020) Muon tomography for railway tunnel imaging. <i>Physical Review Research</i> , 2(2), 023017.
Truche et al 2024	Truche, L., et al (2024). A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite. <i>Science</i> , 383(6683), 618-621.
Useche & Avila-Bernal 2019	Useche J. U., & Avila-Bernal, C. Á. (2019). Estimation of cosmic-muon flux attenuation by Monserrate Hill in Bogota. <i>Journal of Instrumentation</i> , 14(02), P02015.
Vasquez-Ramirez et al. 2020	Vásquez-Ramírez, A., et al (2020). Simulated response of MuTe, a hybrid muon telescope. <i>Journal of Instrumentation</i> , 15(08), P08004.
Vesga-Ramirez et al. 2020	Vesga-Ramírez, A., et al (2020). Muon Tomography sites for Colombian volcanoes. <i>Annals of Geophysics</i> , 63(6).
Vesga-Ramirez et al. 2021	Vesga-Ramírez, A., et al (2021). Simulated Annealing for volcano muography. <i>Journal of South American Earth Sciences</i> , 109, 103248.
Wang et al 2022	Wang, P., et al (2022). Assisting Production Decision Technology in Gas Storage Operation Based on Digital Twin Technologies. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (p. D031S042R004). SPE.
Ward et al 2023	Ward, F., et al (2023). Multi-sensor 3D data visualization in virtual reality for planetary science and mission operations. 2023 International Conference on Environmental Systems.
Watkins et al 2021	Watkins, D., et al (2021). Using Workspace to implement Digital Twins in the Mixed Reality Lab. MODSIM2021, 24th International Congress on Modelling and Simulation.. https://doi.org/10.36334/modsim.2021.c1.watkins .
Yang et al 2019	Yang, G., et al. (2019). Novel muon imaging techniques. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society A</i> , 377(2137), 20180062.
Zhang et al 2020	Zhang, Z., et al. (2020). Muography and Its Potential Applications to Mining and Rock Engineering. <i>Rock Mechanics and Rock Engineering</i> , 53, 4893 - 4907. https://doi.org/10.1007/s00603-020-02199-9 .

