

Simulación de la respuesta de la interacción de la radiación cósmica con las minas
antipersonales en Colombia

Michael Leonardo Ariza Gómez
Marcos Fernando Carrillo Moreno

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Químico

Director

PhD. Víctor Gabriel Baldovino Medrano

Codirectores

Msc. Adriana Carolina Vásquez Ramírez

PhD. Luis Alberto Núñez de Villavicencio

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2019

Contenido

Introducción.....	1
1. Metodología	6
1.1 Software empleado en la simulación	7
1.2 Caracterización elemental y geometría de la mina antipersonal.....	8
1.3 Caracterización elemental y geometría del suelo.....	10
1.4 Geometría del sistema en GEANT4, mina antipersonal y el suelo.....	12
1.5 Simulación de la interacción del flujo de fondo de rayos cósmicos, con las diferentes configuraciones de suelo-mina.....	12
1.6 Simulación de la interacción de muones de 500 MeV con las diferentes configuraciones de suelo-mina.....	14
2. Resultados y análisis	15
2.1 Resultados de la simulación de la interacción de la mina con secundarios a nivel de Bucaramanga	15
2.1.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones de 500 MeV	15
2.1.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas	16
2.2 Resultados de la simulación de la interacción con los muones de 500 MeV....	19
2.2.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones de 500 MeV	19
2.2.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas	20
3. Conclusiones.....	23
Referencias Bibliográficas.....	25
Apéndices.....	28

Introducción

Los conflictos armados alrededor del mundo han generado grandes cantidades de víctimas, usando distintos métodos para este fin. Uno de ellos son las denominadas minas antipersonas, que son de especial preocupación debido a que son indetectables a simple vista y permanecen años activos. Estas son minas poco profundas con objetos explosivos ocultos debajo del suelo, que están diseñados para mutilar o matar.

Desde tiempos antiguos los romanos fueron quien diseñaron estos dispositivos para afectar a su adversario. Consistía en una pequeña lanza plantada en el suelo que podía causar lesiones al pisarla, no eran tan devastadoras como las minas explosivas, las cuales, fueron usadas por primera vez por los chinos alrededor del año 1277 DC (Lewis, 1999). Sin embargo, el uso masivo de estos artefactos se empezó a documentar a mediados del siglo XIX, en la guerra civil americana (1862) por parte del bando de la confederación. Más adelante en la primera guerra mundial (1914-1918) este tipo de tecnología se modificó para que fueran empleados contra los tanques enemigos, estas nuevas minas se denominaron minas antitanques; en contraste, en la segunda guerra mundial (1939-1945) ambos tipos de minas fueron utilizados, y la producción de estos artefactos contribuyó a que se construyeran más de 300 millones de minas, fabricadas por Estados Unidos y la Unión Soviética durante este conflicto (Rogers, 2014).

Después de esta guerra, el diseño de las minas se refinó y se enfocó en 5 criterios: efectividad, tamaño, detectabilidad, esfuerzo logístico y velocidad de minado; esto tuvo como consecuencia que para el año 2000, más de 600 tipos de minas fueran producidas (Rogers, 2014). Además, impulso el desarrollo en el área de los explosivos que pueden emplearse para formar una mina antipersonal. Algunos de ellos son de fabricación industrial como el RDX, TNT, PETN, C4, HMX, amonita, entre otras, que normalmente son minas usadas por los ejércitos y en aplicaciones civiles, y otros de fabricación artesanal y que son utilizados por las fuerzas insurgentes como en el caso del ANFO o el TAPT que son de fácil fabricación casera (OTAN, 2007).

Este flagelo ha afectado a numerosas cantidades de territorios en el mundo, en especial a regiones donde han existido conflictos armados, ya sean externos o internos, como guerras civiles, el caso de Afganistán, Camboya, Angola, Colombia, la región del Cáucaso o actualmente en Siria, además de otros más de 50 países (Chiovelli, Michalopoulos, & Papaioannou, 2018); este problema perjudica directamente a la comunidad, debido a que es una amenaza que atenta contra la vida de cualquiera que participe o no, en estos enfrentamientos.

Esta problemática no solo se enfoca en las personas que tuvieron contacto directo con el explosivo, sino que es un riesgo en común, ya que la comunidad que por sospecha al encontrarse con estos dispositivos son forzados a ser desplazados de sus territorios. Esto afecta la economía de la región, debido a que los territorios minados terminan siendo inutilizados. Las consecuencias del conflicto son multifacéticas, de tal manera que afectan la seguridad de la comunidad y al mismo tiempo inciden en la agresión, permeando en los aspectos de la sociedad, como pérdidas de vidas, heridos, desconfianza y deterioro de la capacidad institucional, entre otros, es por esto que es de gran importancia para el desarrollo normal y natural de la vida de las personas que estos dispositivos sean detectados y desactivados lo más rápido posible.

Según cifras dadas por la **International Campaign to ban Landmines** (ICBL), Colombia en el año 2018 se convirtió en el segundo país con mayor cantidad de víctimas de minas antipersonal en el mundo, con un total de 11765 personas afectadas por este flagelo en más de medio siglo de conflicto (ICBL, 2018), esto debido al conflicto armado interno que ha sufrido el país y del cual han participado varios grupos al margen de la ley como el ELN, las FARC, el EPL, las AUC. Que surgieron por diversas problemáticas, como: persecución de la población civil debido a su orientación política, posesiones de tierra, inestabilidad política e industria del narcotráfico entre otros.

El uso de estos dispositivos en Colombia se empezó a documentar en la década de los 70, siendo el ELN que las empezó a utilizar como táctica militar. Sin embargo, estas agrupaciones se dispusieron a crear sus propios artefactos debido a que las minas

convencionales representan un alto costo, de tal manera que, al realizar minas caseras, eliminaban este factor, no obstante, esto representa una amenaza, porque estos dispositivos son hechos a base de una receta tradicional, donde no existe parámetros que indiquen que proporción se debe agregar para obtener un artefacto de estos. Principalmente este producto contiene compuestos químicos altamente volátiles, y también se utilizan materiales no convencionales como tuercas, tornillos, vidrio, material fecal humana y animal, esto es una problemática ya que complica la detección y la desactivación de estos dispositivos por la gran variabilidad de su composición (Castañeda, 2015).

Existen tecnologías que permiten la detección de estos artefactos, entre estos métodos encontramos aquellos que usan animales como perros, ratas, abejas o la mosca de la fruta (Marshall, Warr, & de Bruyne, 2010). Existen procedimientos que detectan iones, como la espectrometría de movilidad iónica, o la espectrometría de masas (Buryakov, 2011), distinto a los que detectan los metales empleando el principio de inducción electromagnética (Lopera & Milisavljevic, 2007), y otros métodos de radiación electromagnética en la banda del microondas, como es el caso del Georradar (GPR). La tomografía de impedancia eléctrica utiliza la conductividad eléctrica del suelo para tomar una imagen del mismo; y algunos casos se usa la radiación ionizante o neutrones como es el caso de la espectroscopia en radiación de Tera hercios que usan ondas electromagnéticas del orden de 0.5 a 10 THZ (Cardona, Jiménez, & Vanegas, 2014), la Dispersión Raman utiliza la interacción luz- molécula, la energía de los estados vibratorios y rotacionales pueden intercambiarse y se emite una energía cuántica de luz más baja Sin embargo, el efecto Raman es extremadamente débil, no tiene suficiente sensibilidad para la aplicación de detección de minas terrestres. La Resonancia nuclear cuádruplo Esta técnica envía pulsos de radiofrecuencia que excita los núcleos de nitrógeno en el explosivo, lo que induce Un potencial eléctrico en una bobina receptora. El espectro registrado de cada explosivo es único y por lo tanto la detección es altamente específica y menos susceptible a falsas alarmas [34]. Su principal inconveniente es una señal baja /relación de ruido (SNR) [30]. Además, se ve afectado por la radio interferencia de frecuencia (RFI), por la distancia entre la bobina de detección, el explosivo, y la

temperatura. La espectroscopía de absorción (IR), reflectividad y reflexión total atenuada de infrarrojos (ATR) son métodos poderosos de identificación y de explosivos a través de la medición del espectro vibratorio molecular. La absorción resonante de la luz por estas vibraciones se observa cuando el momento dipolar de la molécula cambia [24]. Sin embargo, los espectros infrarrojos de moléculas grandes pueden tener anchos de banda amplios, lo que conduce a un espectro indistinto. Además, muchos explosivos se descomponen a las altas temperaturas necesarias para lograr la presión de vapor requerida para la detección. La activación de neutrones y emisión gamma, son otros métodos y técnicas más comunes para la detección de explosivos. (Brown, Greenfield, McGrane, & Moore, 2016). Aunque exista una gran variedad sobre técnicas de detección, todavía no existe una forma que proporcione, una alta selectividad, aplicabilidad a distancias cercanas y de campo, y la portabilidad requerida por los profesionales de detección de explosivos (Brown, Greenfield, McGrane, & Moore, 2016b).

Entre las técnicas anteriormente mencionadas, destacan por su versatilidad, los procedimientos que usan bombardeo directo de neutrones para la detección de explosivos (Heider & Dunn, 2015). Las siguientes técnicas: Thermal Neutron Analysis (TNA), Fast Neutron Analysis (FNA), Fast Thermal Neutron Analysis (FTNA), Fast Neutron scattering analysis (FNSA) or neutron elastic scatter (NES). Una fuente de neutrones como el ^{252}CF , Am/Be, Deuterio-Deuterio o Deuterio-Tritio en la que la energía de los neutrones emitidos puede variar entre los 0.7 MeV hasta los 14.1 MeV. Sin embargo, el coste de estos generadores puede ser realmente alto, además de la logística con la que tienen que contar como, generadores, reflectores, detectores. Esta tecnología debe utilizarse en aplicaciones de campo donde se pueda contener la cantidad de radiaciones ionizantes, todo esto para prevenir la exposición a esta energía que de alguna u otra manera afecta la salud (Gierlik et al., 2016), de tal manera que se ha llevado a lugares que puedan soportar el funcionamiento de estas técnicas como por ejemplo, en aeropuertos o puertos de carga (Whetstone & Kearfott, 2014).

En la naturaleza encontramos una fuente inagotable de partículas subatómicas que se generan a partir de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre. Los

rayos cósmicos son partículas que constantemente llegan a la Tierra procedente de distintos sitios del universo. Los de más baja energía provienen del sol y las estrellas, y otros más energéticos, pueden originarse del centro de la galaxia o de cambios violentos en el universo. Las propiedades de los rayos cósmicos se han medido a través de la detección de cascadas atmosféricas extendidas lo que es decir una lluvia de partículas primarias, estos rayos tienen una energía de hasta 3×10^{20} MeV, que se encuentran compuestos por un 92% de protones, 6% de partículas alfa, 1% de electrones, 1% de núcleos de los elementos del litio al níquel y unos pocos núcleos de elementos más pesados que el níquel, también se pueden encontrar antinúcleos, electrones y positrones, neutrinos y antineutrinos, a estas partículas son lo que se les llama, partículas primarias (Medina, 2010); (H.-M. Mok, 2012) al momento que estas partículas interactúan con los núcleos de nitrógeno y oxígeno de la atmósfera, se generan una lluvia de partículas secundarias que a su vez producen luz fluorescente al interactuar con las moléculas de la atmósfera.

Los rayos cósmicos actualmente poseen una amplia red de aplicaciones, como por ejemplo, en meteorología pueden emplearse como una especie de sondas de detección remota para determinar las condiciones atmosféricas (H. M. Mok & Cheng, 2001). En agricultura, los rayos cósmicos se pueden usar para monitorear el contenido de agua ambiental cerca de la superficie terrestre y así optimizar el uso del agua (Köhli et al., 2015), además se han utilizado para la detección de minas naturales empleando la muongrafía, una técnica que permite la exploración de zonas poco accesibles como los volcanes (Asorey et al., 2017).

En este proyecto, se evalúa la factibilidad del uso de la radiación cósmica para la detección de las minas antipersonales, como alternativa no convencional frente a los métodos actuales que presentan algunas complicaciones y debido a esto, son poco eficientes y de alto riesgo en su aplicación, de tal manera que para ello se buscará simular la detección de las minas antipersonales típicas en Colombia, mediante cálculos físicos implementados en el simulador Geant4. Las simulaciones estarán enfocadas en analizar la posible interacción de radiación cósmica con los explosivos (ANFO) contenidos en la

mina, con el fin de determinar e identificar las respuestas de las partículas tiempo después de haber interactuado con el núcleo de los elementos químicos que constituyen el (ANFO).

Objetivos

Objetivo general

Analizar la interacción de la radiación cósmica con un tipo de mina antipersonal improvisada encontrada en Colombia

Objetivo específico

- Desarrollar una simulación que determine la respuesta de la interacción de los componentes de una mina antipersonal improvisada compuesta por (ANFO) con el flujo de fondo de rayos cósmicos y muones.
- Evaluar el espectro de energía de las distintas configuraciones de la mina antipersonal a partir de la interacción de flujo de fondo de rayos cósmicos y muones
- Determinar si los factores como nitrato de amonio (fertilizante) y humedad, son inhibidores para recibir respuesta de la interacción de los rayos cósmicos con la mina antipersonal improvisada.

1. Metodología

A continuación, se presenta la metodología a seguir para simular la interacción de los rayos cósmicos con las minas antipersona. En primer lugar se describe el tipo de dispositivo escogido, su composición química y dimensiones; la composición elemental del suelo, y el flujo de partículas empleado. Seguido de esto se describen las variables del suelo como la humedad y el contenido de NH_4NO_3 ; y el tiempo de exposición de las partículas empleadas para cada tipo de simulación. En la figura 1 se muestra la metodología empleada para este trabajo, representada en un diagrama de flujo.

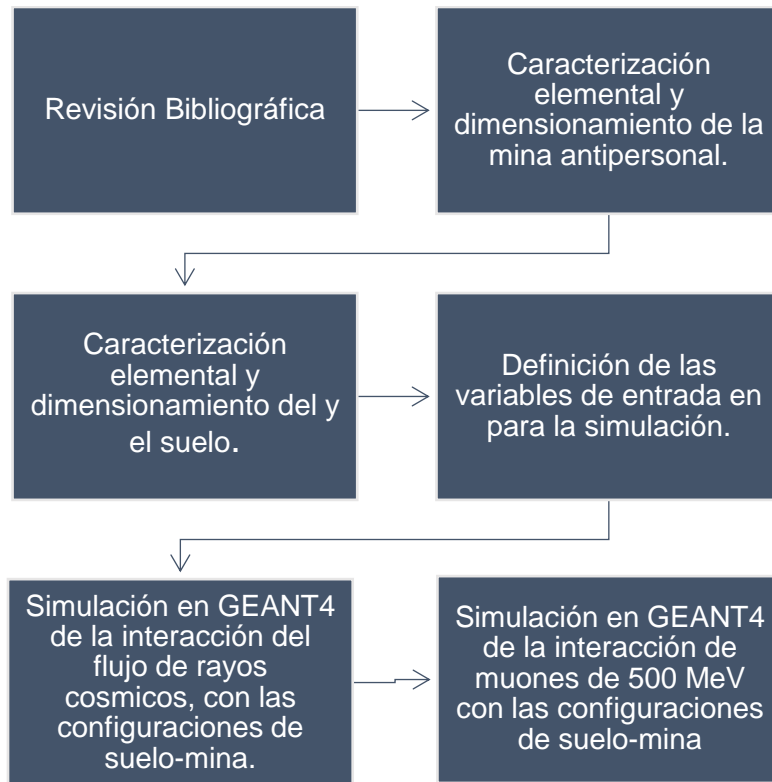


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada para el desarrollo de la simulación.

1.1 Software empleado en la simulación

Se emplea un conjunto de herramientas computacionales colectivamente llamada ARTI, la cual se usa para simular la respuesta de la interacción de las partículas secundarias provenientes de la radiación cósmica a detectores Cherenkov de agua (C. Sarmiento, Suárez, Vásquez, & et al., 2019). ARTI utiliza en su primera etapa CORSIKA para calcular el flujo de partículas secundarias al nivel del suelo en cualquier posición geográfica; en su segunda etapa se emplea MAGCOS el cual hace correcciones al flujo las partículas de bajas energías que se deflactan debido al campo geomagnético terrestre. Por último, ARTI recoge estos flujos y utiliza GEANT4 para simular de forma detallada la interacción de estas partículas con los detectores Cherenkov de agua.

Para esta simulación se usó este conjunto de herramientas para estimar el flujo de partículas secundarias a nivel de Bucaramanga (956 m.s.n.m), y empleando este flujo se simulo la interacción varios tipos de suelo y una mina antipersonal en el software GEANT4.

1.2 Caracterización elemental y geometría de la mina antipersonal

Para la selección de la mina antipersonal a simular se realizó una búsqueda de los dispositivos que se encuentran con mayor frecuencia en Colombia, y se escogió una mina antipersonal que cuenta con un mecanismo de activación por presión, que cuando es empujado cierra un circuito eléctrico el cual activa un detonador que está en contacto con el explosivo principal (Paz, 2005); este dispositivo aproximadamente es de 5.85 cm de ancho y 13.05 cm de alto, la geometría se muestra en la figura 2.

Para la simulación en GEANT4 se escogió el material del que está compuesto la mina, en este caso de ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil); este explosivo que se clasifica como oxidante se compone de nitrato de amonio (NH_4NO_3) y combustible orgánico habitualmente Diesel No2 o ACPM (L. F. Sarmiento, 2013). El nitrato de amonio es una sal inorgánica normalmente en forma granular y de alta porosidad para que pueda absorber el fuel oil en estado líquido; este combustible es agregado en suficiente cantidad para que reaccione con el oxígeno disponible en la porción del NO_3 del nitrato de amonio (Cranney & Sudweeks, 2012). Se seleccionó este explosivo ya que se encuentra en más del 80% de las minas antipersona encontradas por las fuerzas militares en Colombia debido a la facilidad con la cual se adquieren los componentes del explosivo, como es el caso del nitrato de amonio que es usado comúnmente como fertilizante (Jaramillo, 2009).

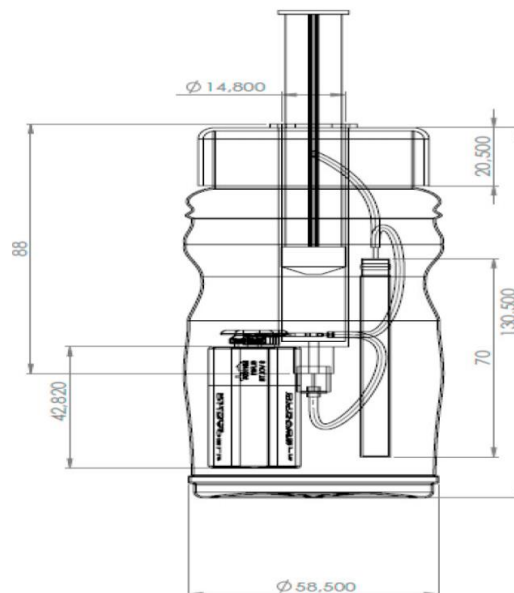


Figura 2. Mina antipersonal con mecanismo de activación eléctrico

La geometría de la mina se simuló de forma esférica con un radio de 4.81 cm porque los volúmenes de minas antipersona encontrados en la literatura varían de 300cm³ a 900cm³ (Acción contra minas, 2011); asimismo por simplicidad, ya que la mina tiene pequeñas partes que aumentarían la complejidad de la simulación, y además porque el propósito principal de este proyecto es observar la respuesta de la interacción del explosivo principal con las partículas secundarias.

La composición del ANFO a simular se tomó como 94.3% nitrato de amonio y 5.7% de fuel oil no2, esta proporción se escogió debido a que es la fracción másica en la cual se genera la máxima cantidad de energía en la detonación (Reyes, 2009).

En GEANT4 se programó primero de forma separada el nitrato de amonio y el fuel oil No2, requiriendo para este fin la composición elemental, la masa atómica y la densidad de cada compuesto; seguidamente se formó el ANFO mezclando el NH₄NO₃ y el combustible orgánico programados anteriormente. La composición y la masa atómica del nitrato de amonio se tomó de su fórmula molecular, y su densidad la cual es 1.72 $\frac{g}{cm^3}$ fue tomado de (Babrauskas, 2016). La composición del Diesel se tomó de (Liang, Lu, Keener, Liu, & Khang, 2005); para programar el Diesel se tuvo en cuenta que este es una mezcla compleja de gran cantidad de hidrocarburos algunos de los cuales están presentes en la mezcla en una muy pequeña proporción (menor de 0.001 % porcentaje en peso), por esta razón se simuló los compuestos presentados por Liang que tiene una fracción másica mayor de 0.01% y son presentados en la tabla 2, donde se muestra el nombre, la fórmula molecular, la masa molar, la densidad y la fracción másica para cada sustancia simulada.

Compuesto	Fórmula	Masa molar g/mol	Densidad g/cm ³ a 20°C	Fracción másica
Alcanos				
n-dodecane	C ₁₂ H ₂₆	170.33	0.7945	3.205
n-tridecane	C ₁₃ H ₂₈	184.37	0.762	5.389
n-tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	198.39	0.7628	4.875
n-pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212.42	0.769	5.169
n-hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226.41	0.773	4.479
n-heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	240.47	0.777	4.874
Alcanos ramificados				
2,6,10-trimethyl undecane	C ₁₄ H ₃₀	198.39	0.8±0.1	53.84

Cicloalcanos saturados				
heptylcyclohexane	C ₁₃ H ₂₆	182.35	0.81	2.883
octylcyclohexane	C ₁₄ H ₂₈	196.37	0.81	2.515
nonylcyclohexane	C ₁₅ H ₃₀	210.39	0.8±0.1	2.321
Hidrocarburo policíclico aromático				
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	128.17	1.0253	0.165
Biphenyl	C ₁₂ H ₁₀	154.21	1.04	0.0095
Hidrocarburo policíclico aromático alquilados				
2-methylnapthalene	C ₁₁ H ₁₀	142.20	1±0.1	0.494
1,7 dimethylnaphtalene	C ₁₂ H ₁₂	156.22	1±0.1	0.549
trimethylnaphtalene	C ₁₃ H ₁₄	170.25	1±0.1	2.657
Alquilbencenos				
Toluene	C ₇ H ₈	92,14	0.867	0.201
Bencene	C ₆ H ₆	78,11	0.876	6.349

Tabla 1. Compuestos que forman el FUEL oil No2 usados en la simulación, tomado de (Liang et al., 2005)

1.3 Caracterización elemental y geometría del suelo

Normalmente, las minas antipersonal se suelen encontrar enterradas en el suelo, en lugares estratégicos donde pueden llegar a hacer bastante daño como caminos, riberas de ríos y en campos de cultivos ilícitos; es por esta razón que es necesario simular el suelo además de la mina antipersonal para estimar el ruido y poder diferenciar la mina del suelo.

Se tomó en cuenta que la composición elemental de los suelos a nivel mundial varía de región en región, y por lo tanto sería poco práctico tomar todas estas fracciones; por esta razón se tomó de (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006) una composición elemental que es una representación general de las fracciones encontradas normalmente en los suelos, estas fracciones másicas se presentan en la tabla 2. Para programar el suelo en GEANT4, es necesario tener: la composición elemental, la masa atómica y la densidad del material. Para el suelo presentado en la tabla 2 la densidad seleccionada es de $2700 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$.

Tomando como base el suelo de tabla 2 que se denomina suelo seco, se configuraron 4 tipos de suelo más. El primer tipo de suelo es el suelo seco y como su nombre lo indica no presenta ningún tipo de humedad en su composición, este suelo es la base para los otros tipos de suelo que se presentan a continuación. El segundo y el tercer tipo de suelo son los suelos secos con un contenido de humedad de 10% y 30% (P/p) y se propone

estudiar el efecto de la humedad ya que los neutrones interactúan con los núcleos de los átomos de hidrogeno generando fotones (Köhli et al., 2015), las cuales se espera se generen en mayor cantidad para estos tipo de suelos. El cuarto y el quinto tipo son los suelos abonados con nitrato de amonio en un porcentaje 0.0001% y 0.0002% (P/p) con respecto del suelo base; se estudia el efecto del NH_4NO_3 ya que este es usado normalmente como fertilizante en los campos de cultivo y puede existir un efecto de apantallamiento que impida diferenciar el suelo del ANFO, el cual también se compone de nitrato de amonio.

Para determinar los porcentajes de humedad se seleccionó este rango según datos obtenidos en (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019), en los cuales se muestran los valores de la humedad de los suelos en diferentes lugares del mundo, permitiendo determinar la variabilidad de la humedad. Para determinar el porcentaje de nitrato en el suelo abonado se realizó un tratamiento matemático con datos obtenidos en FERMAGRI con el fin de estimar el porcentaje de nitrato en la superficie de suelo.

La geometría del suelo se tomó como un cubo de 13.6 cm de lado, y rodea completamente la mina; se seleccionó de este tamaño con el fin de que la mina estuviera a 2 cm sobre la parte inferior y la superficie del suelo.

Elemento	Porcentaje en peso (%)
Oxigeno (O)	49
Silicio (Si)	33
Aluminio (Al)	7.13
Sodio (Na)	0.63
Potasio (K)	1.36
Calcio (Ca)	1.37
Hierro (Fe)	3.8
Magnesio (Mg)	0.6
Carbono (C)	2
Azufre (S)	0.08
Nitrógeno (N)	0.1
Fosforo (P)	0.09
Titanio (Ti)	0.46

Hidrogeno (H)	0.38
----------------------	------

Tabla 2. Porcentaje en peso de los elementos que conforman el suelo seco usado en la simulación tomado de (Juárez Sanz et al., 2006)

1.4 Geometría del sistema en GEANT4, mina antipersonal y el suelo

En la figura 3 se presenta la geometría del sistema suelo-mina que se programó en GEANT4, las dimensiones del suelo y la mina se describieron en las secciones anteriores; además de estas geometrías se programó una superficie de 1m² puesta sobre la superficie del suelo, y en la cual se generan de forma aleatoria la posición inicial de las partículas que se generaron por ARTI.

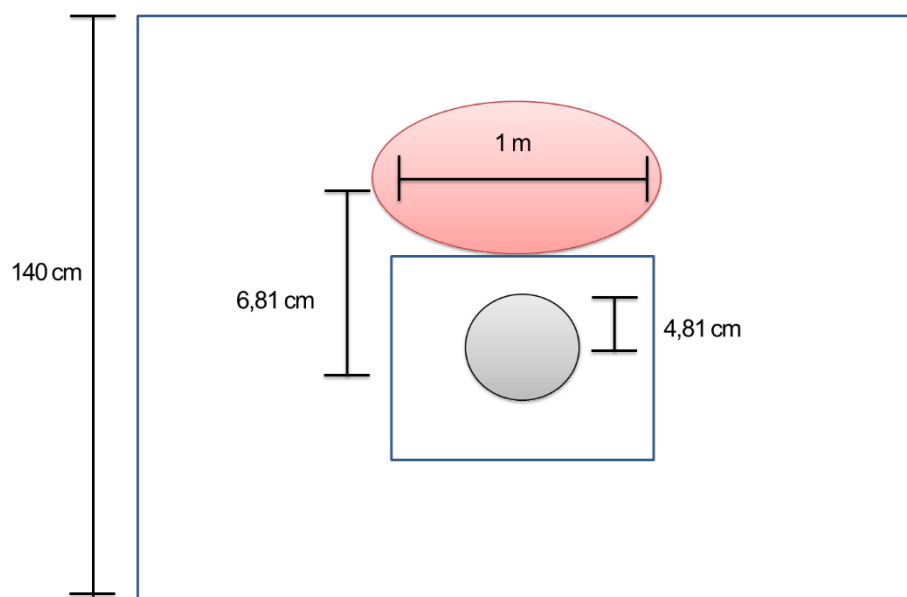


Figura 3. Esquema de la geometría del sistema.

1.5 Simulación de la interacción del flujo de fondo de rayos cósmicos, con las diferentes configuraciones de suelo-mina.

Para esta simulación se usó el espectro completo de partículas del flujo de fondo de rayos cósmicos a nivel de Bucaramanga (956 m.s.n.m), estas partículas se generaron usando la herramienta ARTI desarrollada por (C. Sarmiento et al., 2019). El flujo de partículas secundarias usada en esta simulación fue obtenido por (Jaimes-Motta, 2018) y se puede observar en la Figura 3. Estas partículas fueron introducidas en el software GEANT4 (donde se simula la interacción de las partículas con las geometrías suelo-mina) usando un código que transcribe la información generada en CORSIKA.

Se decidió que la variable que modifique la cantidad de partículas sea el tiempo de flujo en horas; para Bucaramanga se tiene que en una hora de flujo hay $3'855.333$ partículas/ m^2 . Para la simulación con el flujo de fondo de rayos cósmicos se decidió seleccionar 3 tiempos de flujo con el fin de poder comparar los efectos del tiempo de exposición, estos tiempos fueron de 1, 3 y 24 horas respectivamente. En total se realizaron 30 simulaciones, donde para cada configuración de suelo sin mina se realizó su respectiva simulación usando suelo con mina para su posterior comparación. Las 30 configuraciones se presentan en la figura 5.

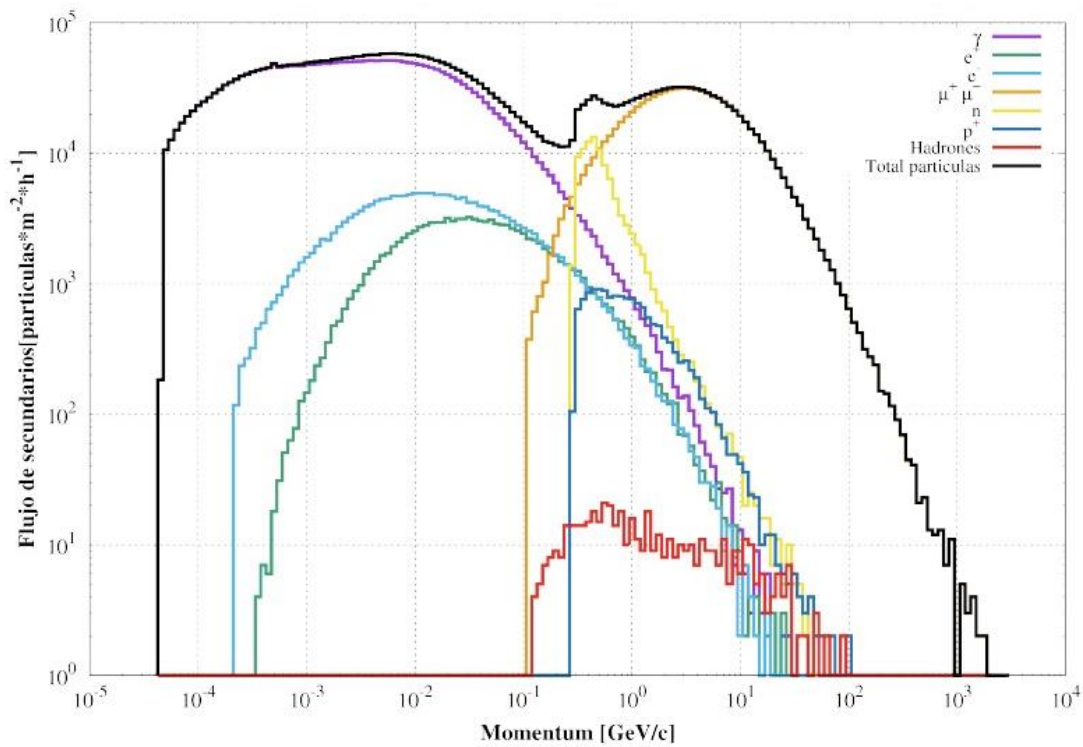


Figura 4. Espectro de partículas secundarias producidas a nivel de Bucaramanga (956 m.s.n.m) en un hora de flujo. Tomado de (Jaimes-Motta, 2018)

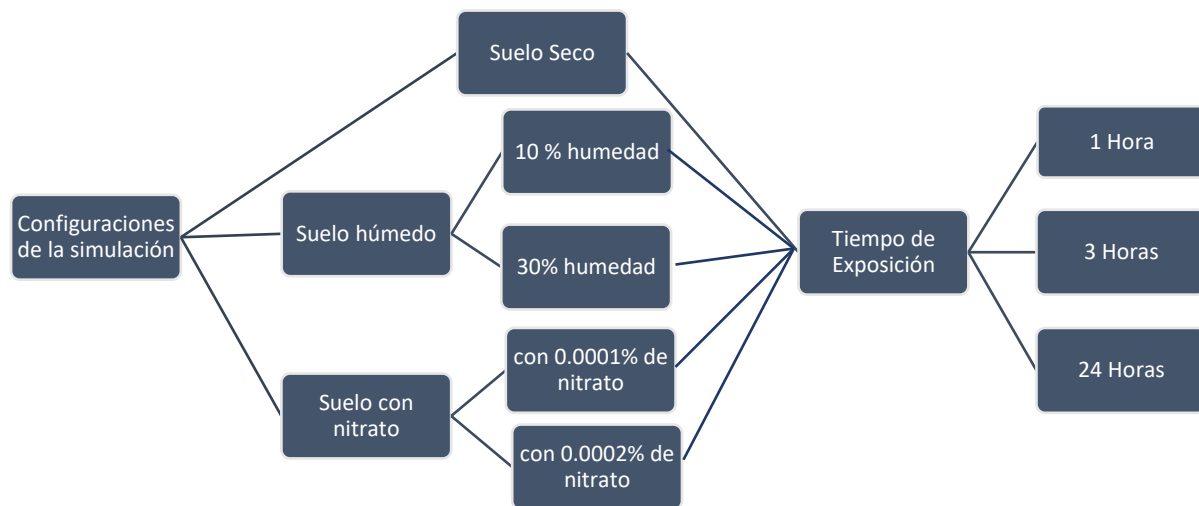


Figura 5. Total de configuraciones realizadas en la simulación usando el flujo de fondo de rayos cósmicos a nivel de Bucaramanga.

1.6 Simulación de la interacción de muones de 500 MeV con las diferentes configuraciones de suelo-mina.

Se realizó esta simulación usando como partícula primaria muones de 500 MeV que se generan perpendicularmente en el centro de la geometría mostrada en la figura 1. Para este caso se realizaron en total 30 simulaciones; las configuraciones suelo-mina seleccionadas se muestran en la Figura 5. Se realizaron 10 simulaciones para cada cantidad de muones seleccionado; estas cantidades de muones se eligieron para representar 30, 60 y 90 minutos del flujo completo de rayos cósmicos en el área metropolitana de Bucaramanga, partículas

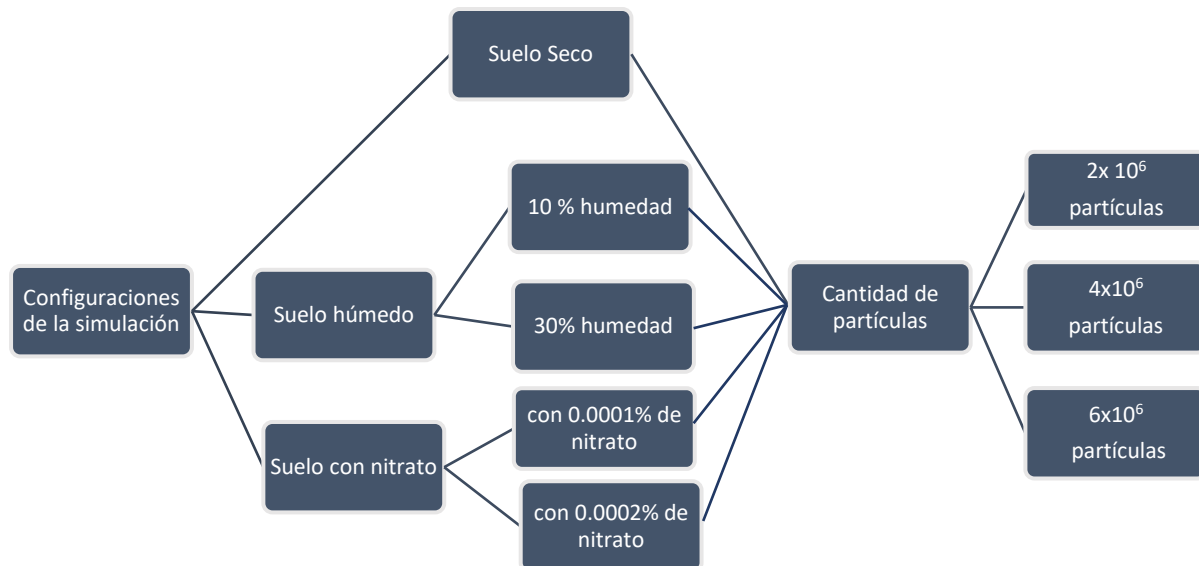


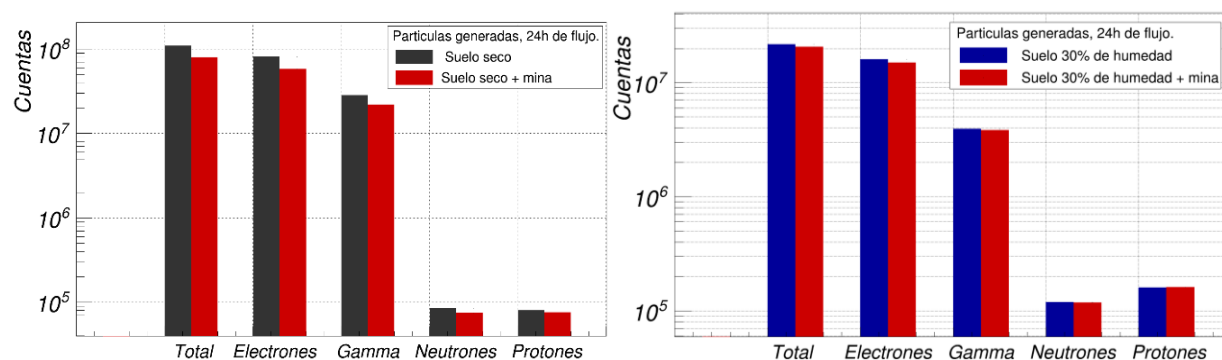
Figura 6 Diagrama que muestra las diferentes configuraciones realizadas para la interacción del suelo con los muones de 500 MeV.

2. Resultados y análisis

2.1 Resultados de la simulación de la interacción de la mina con secundarios a nivel de Bucaramanga.

A continuación, se mostrarán una serie de resultados que se generaron a partir de las simulaciones realizadas; en esta sección se presenta los resultados obtenidos en la simulación que emplea el flujo de secundarios; se analiza los espectros de energía que se obtienen, comparando las distintas interacciones de flujo con respecto a las configuraciones de mina.

2.1.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones el flujo de secundarios a nivel de Bucaramanga.



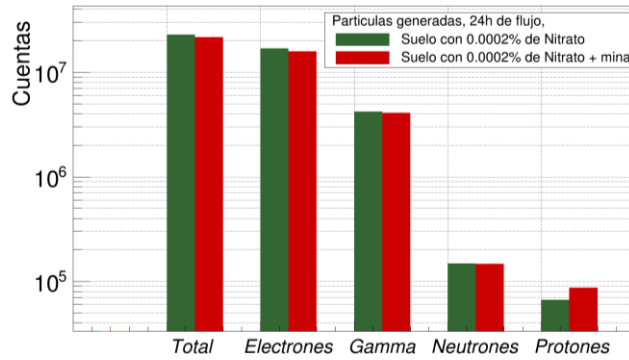
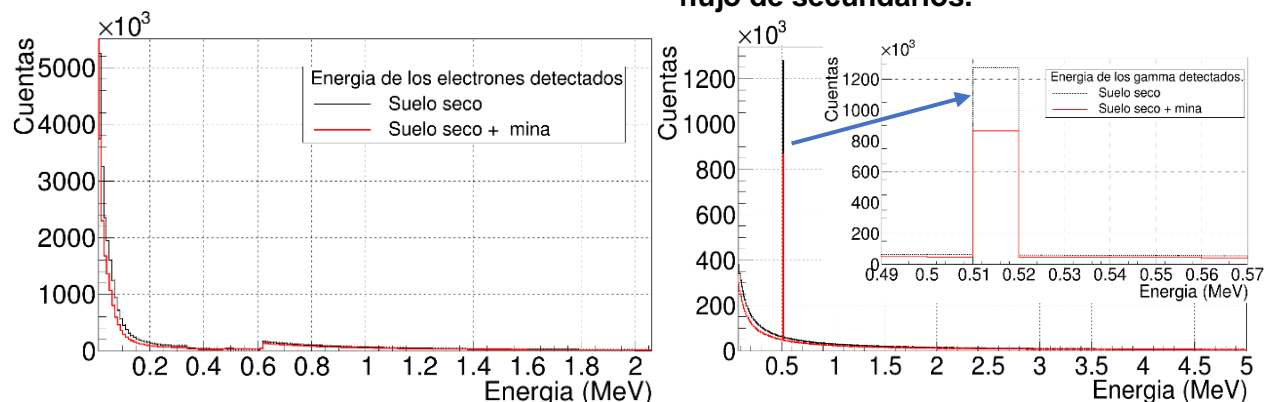


Figura 6. Total de partículas generadas en las diferentes configuraciones de suelo-mina, a partir de la interacción con un flujo de secundarios de $4 \times 10^6 \frac{\text{Partículas}}{\text{m}^2 \text{h}}$. Suelo seco (arriba a la derecha), suelo con 30% de humedad (arriba la izquierda), suelo con 0.0002% nitrato de amonio (abajo).

Al analizar los histogramas de las distintas configuraciones suelo-mina, se logra evidenciar la cantidad de partículas generadas a partir de la interacción del flujo de secundarios con las minas, de tal manera que se puede equiparar, que tantas partículas se logra obtener de cada distribución. La figura 6, permite visualizar el número de partículas generadas en la interacción con el flujo de 4×10^6 secundarios a nivel de Bucaramanga. Con suelo seco, suelo al 30% de humedad y suelo con 0,0002% de nitrato de amonio. Las partículas que se originaron en mayor cantidad son electrones-positrones (e^- , e^+), fotones (γ), neutrones-antineutrones (n , \bar{n}) y protones (p^+). De tal manera que el porcentaje que oscila de estas partículas en los histogramas son respectivamente: (74%-73), (27%-24%), (0,7%-0,5%) y (0,6%-0,3%). Como resultado no se puede apreciar un contraste, para las diferentes configuraciones, ya que todas presentan una similitud en la cantidad de generación de las partículas.

2.1.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas en la interacción con el flujo de secundarios.



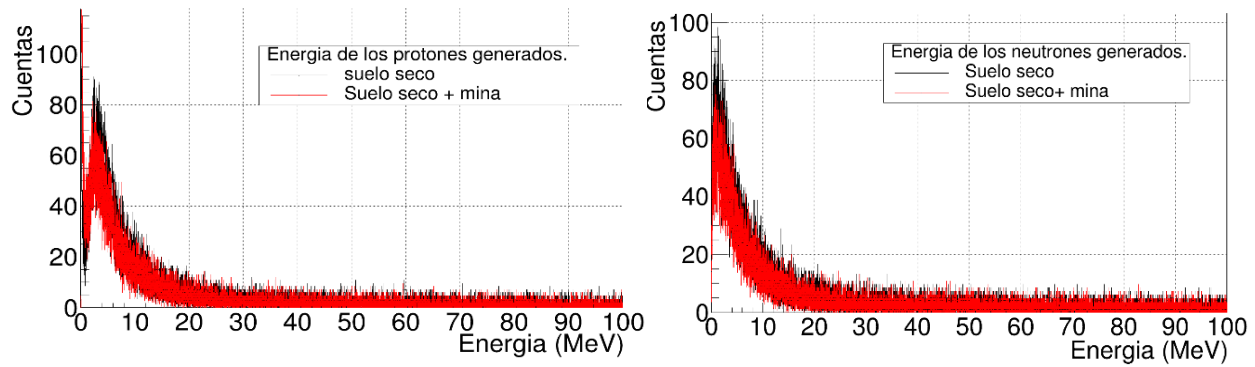
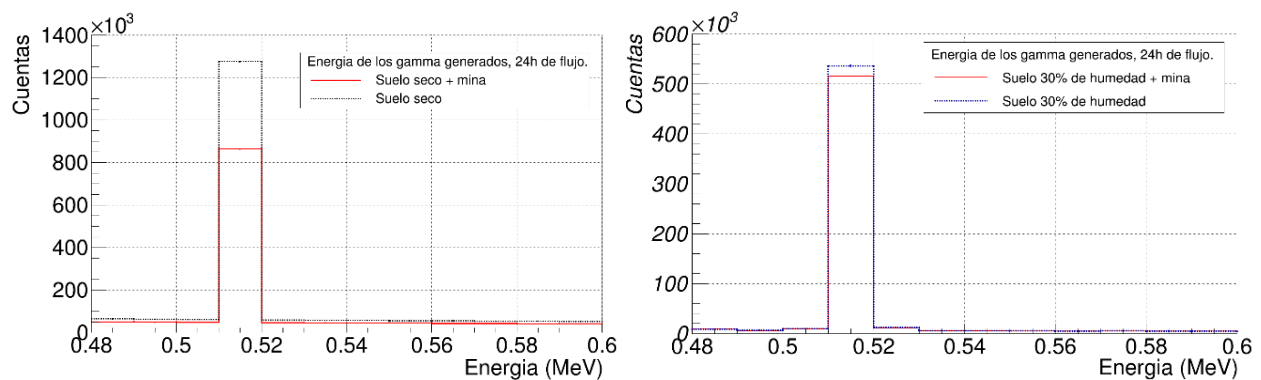


Figura 7. Espectros de energía de las partículas generadas en las simulaciones después de 24 horas de interacción con flujo de secundarios a nivel de Bucaramanga: Electrones (Arriba izquierda), Gammas (Arriba derecha), Neutrones (Abajo izquierda), Protones (Abajo derecha).

Al observar el histograma del espectro de energía a comparación con la figura 6, este denota un cambio significativo en la energía de los fotones de rayos gamma como se presenta en la figura 7, y no solo en este caso se presenta, sino también se puede contemplar en las demás configuraciones de mina. Este pico representativo que se encuentra ubicado en el punto 0.5111 MeV, se refiere al fenómeno de Aniquilación partícula – antipartícula; esta ocurre en el encuentro de una partícula material con su respectiva antipartícula, al tener estados cuánticos apropiados, pueden aniquilarse la una a la otra, creando partículas, como es el caso de los fotones de rayos gamma. (Luis, 2016).

Debido a que el espectro de energías de partículas generadas torna una respuesta respecto a los fotones de rayos gamma, se analizó esta ilustración a diferentes configuraciones que son: suelo con nitrato, suelo con humedad y suelo seco.



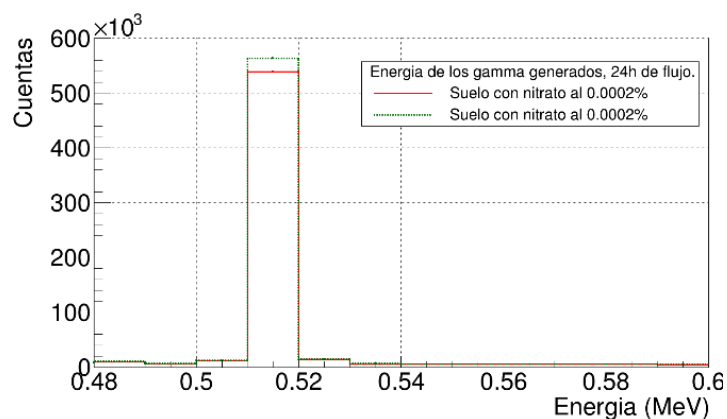


Figura 8. Espectro de energía de los rayos gamma generados en las simulaciones después de 24 horas de interacción con: suelo seco (arriba izquierda), suelo con 0.002% NH_4NO_3 (arriba derecha) y suelo con 30% de humedad (abajo) con el flujo de fondo de rayos cósmicos.

La diferencia porcentual permite conocer que cantidad de porcentaje de partícula se esta generando o detectando, a partir de una comparación de las configuraciones del suelo con mina y sin mina

$$\frac{|E_s - E_m|}{E_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde E_s representa la energía de los rayos gamma generados o detectados en la configuración suelo sin mina, y E_m representa la energía de los rayos gamma usando la configuración suelo con mina. En la tabla 3. se listan los resultados para todas las configuraciones donde puede observar que en todas las ellas se obtuvieron diferencias porcentuales significativas.

Tipo de suelo \ Tiempo de exposición	Tiempo de exposición		
	1h (%)	3h (%)	24h (%)
Suelo base seca	31.44 %	31.80%	32.25%
Suelo 10% humedad	6.43%	4.69%	4.00%
Suelo 30% humedad	3.67%	4.68%	3.75%
Suelo nitrato 0.0001%	5.50%	3.42%	3.85%
Suelo nitrato 0.0002%	2.30%	4.64%	4.30%

Tabla 3. Diferencias porcentuales entre el número de fotones de 0.5 MeV producidos en la mina respecto a los producidos en el suelo

La tabla 3 permite visualizar las diferencias porcentuales entre el número de fotones de 0.511 MeV producidos en la mina respecto a los producidos en las distintas configuraciones, en el cual, entre ellos la gráfica que presenta la mayor diferencia porcentual, es la configuración del suelo base seca con 32.25%. Esto debe ser debido a que las partículas al momento de encontrar la mina, interaccione con los compuestos orgánicos como el nitrato de amonio y el Diesel N°2, generando una gran cantidad de partículas que haga la diferencia entre esta configuración, de otro modo, las demás estructuraciones de mina quizás no presenten este rasgo similar de obtener una alta diferencia porcentual, puede ser dado por las características de humedad y material de abono orgánico que poseen.

El efecto del NH_4NO_3 al observar la tabla 3 es evidente ya que esta pequeña cantidad en el suelo si afecta la discriminación de la mina con respecto del suelo, esto se observa al comparar las diferencias porcentuales de los fotones del suelo base seca con el suelo abonado; por otra parte, debido a las pequeñas cantidades de NH_4NO_3 simuladas no es posible determinar si la inhibición de la estadística se ve ampliada por la cantidad de este compuesto.

2.2 Resultados de la simulación de la interacción con los muones de 500 MeV

La simulación de la interacción de los muones con las configuraciones del suelo generó varios tipos de partículas que se clasificaron y contaron a partir del código empleado.

A partir de esto se estudiaron dos criterios: la cantidad de partículas generadas y las energías de estas partículas justo después de interactuar con cada configuración suelo mina.

2.2.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones de 500 MeV

Para todas las configuraciones de suelo-mina se obtuvo el número de partículas generadas en el suelo con el número de partículas generadas en el suelo con mina. En la figura 10 se muestran los histogramas del número de partículas generadas en la interacción de un flujo de 6×10^6 muones con el suelo seco, con el suelo de 30% de humedad y con el suelo 0.0001% de nitrato de amonio. Las partículas que más se

produjeron son electrones y positrones (e^- , e^+), fotones (γ), neutrones y antineutrones (n , \bar{n}) y protones (p^+). Se puede observar que el número de electrones representa alrededor del 70% de partículas generadas, seguido de los fotones con un porcentaje de 20 a 25%, los neutrones con 1 a 2 % y los protones con un 0.5% a 2%. En las gráficas se observa que no hay una diferencia apreciable en el número de partículas que se generaron, sólo existe una diferencia más apreciable para los protones en el caso del suelo seco y el suelo con 0.00001%; este comportamiento se repite para todos los tiempos de flujo de las configuraciones de suelo-mina estudiadas.

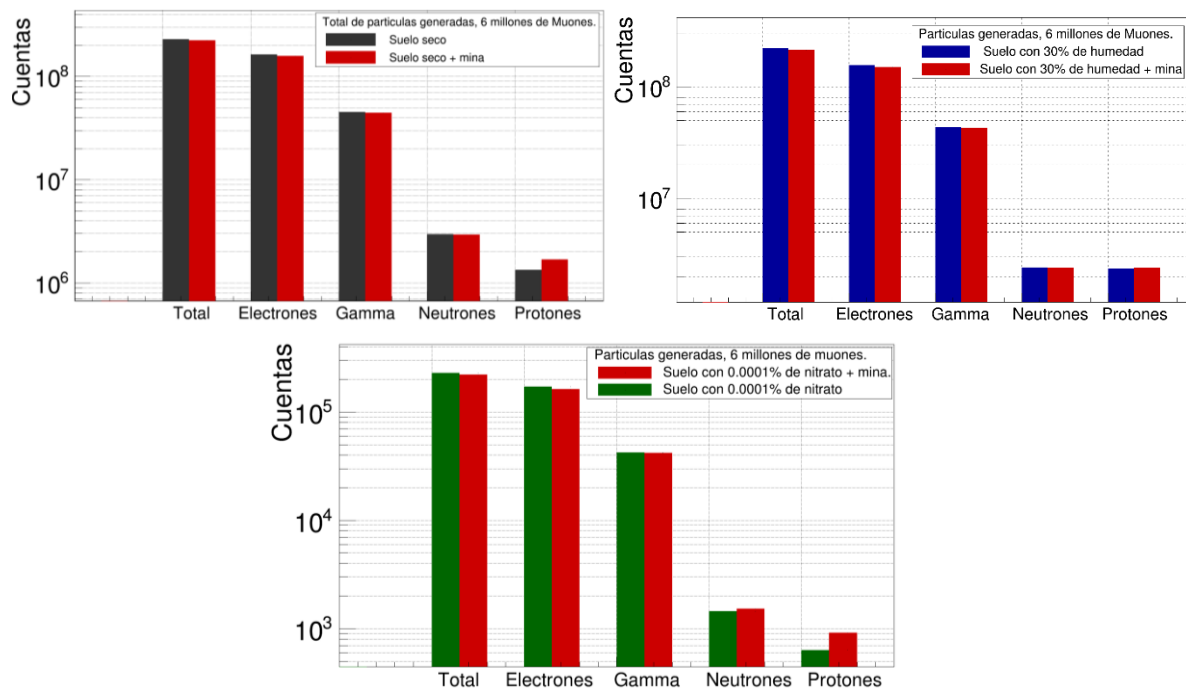


Figura 9. Total de partículas generadas en las diferentes configuraciones de suelo-mina, a partir de la interacción con un flujo de 6×10^6 muones. Suelo seco (arriba a la derecha), suelo con 30% de humedad (arriba la izquierda), suelo con 0.0001% nitrato de amonio (abajo).

2.2.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas

Se analizó el espectro de energías de las partículas generadas en el anterior inciso, con el fin de observar si existe una diferencia entre el suelo y el suelo con mina. El espectro de energía de las partículas generadas para el suelo seco y con un flujo de 6×10^6 muones se presentan en la figura 10.

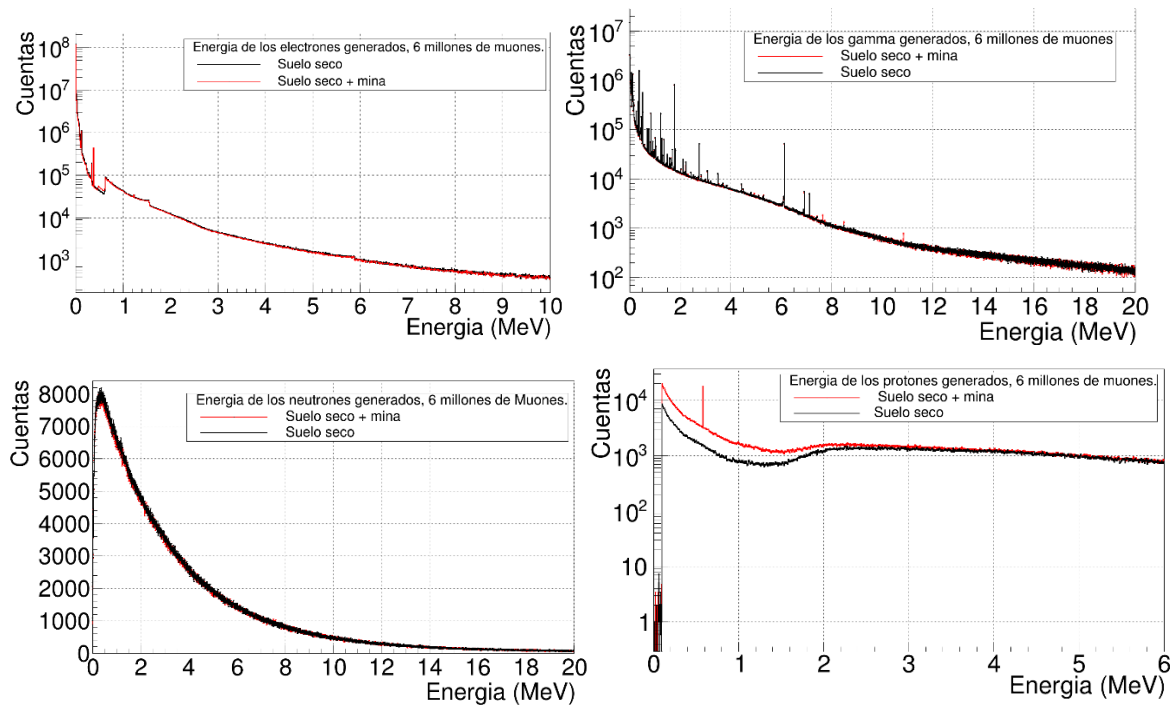


Figura 10. Espectros de energía de las partículas generadas. Arriba izquierda: Espectro de energía de los electrones. Arriba derecha: Espectro de energía de los fotones. Abajo izquierda: Espectro de energía de los neutrones. Abajo derecha: Espectro de energía de los protones.

En la figura 10 se muestra que la energía de los protones y fotones mostraron una diferencia apreciable, en el primer caso la diferencia se presenta entre los 0.1 MeV y los 3 MeV; para el segundo caso la diferencia se muestra en energías específicas: en 6.13 MeV, 8.4 MeV y 10.829 MeV. Estos puntos específicos se generan debido a la captura térmica de neutrones por los núcleos, lo cuales quedan excitados, generando un desequilibrio en el núcleo que se compensa con la emisión de rayos gamma con una energía característica del elemento con el que reacciona el neutrón. (Koltick & McConchie, 2007).

El pico de emisión de rayos gamma en 6.13 MeV está asociado al ^{16}O , el pico de 8.4 MeV está asociado al ^{28}S , y el pico de 10.829 MeV corresponde a un pico de emisión del ^{14}N (Marziale, 2016). Para nuestro caso el pico de emisión del nitrógeno es de interés, porque al ser la energía que muestra mayor diferencia con respecto de los otros picos puede emplearse como punto característico diferenciador.

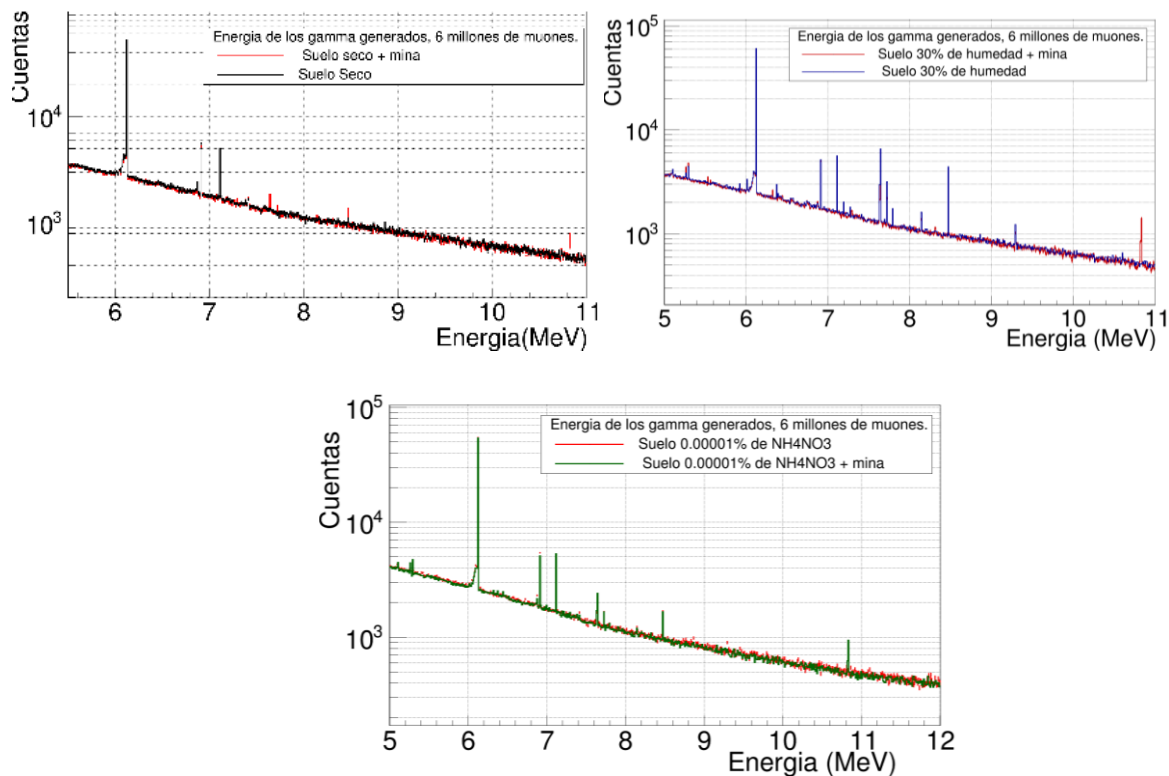


Figura 11. Espectro de energía de los gamma generados, para suelo seco, suelo con 30% de humedad y suelo con 0.0001% de nitrato de amonio, para un flujo de 5'783.000 muones.

En la gráfica 10 se muestra el espectro de energía de los fotones generados, se puede observar que existen energías específicas donde se diferencian estos dos espectros, pero solo solo alrededor de 10.83 MeV (pico de emisión del nitrógeno) la diferencia entre las dos curvas es mucho más marcada; estas graficas representan el patrón de comportamiento de la energía de los fotones generados por las 15 configuraciones de suelo.

En la tabla 4 se listan los resultados para todas las configuraciones donde puede observar que en todas las ellas se obtuvieron diferencias porcentuales significativas. Para un flujo de 6×10^6 muones la mayor diferencia fue de 187.16% para el suelo a 30% de humedad, la menor diferencia fue de 60.95% para la configuración de suelo seco. Para el flujo 4×10^6 muones la diferencia más grande fue de 142.25% para la configuración de suelo-mina con un suelo de 30% de humedad, la menor diferencia porcentual fue de 61.35% para la configuración de suelo seco. Por último para un flujo de 2×10^6 muones la diferencia más significativa se presentó para el suelo con 30% de humedad, y la diferencia menos significativa fue para la configuración con suelo seco.

Cantidad de partículas Tipo de suelo	2x10⁶ partículas	4x10⁶ partículas	6x10⁶ partículas
Suelo base seca	19.84%	61.35%	60.95%
Suelo 10% humedad	99.12%	94.87%	83.73%
Suelo 30% humedad	187.16%	142.25%	187.16%
Suelo nitrato 0.0001%	63.94%	50.87%	163.11%
Suelo nitrato 0.0002%	72.12%	48.43%	159.77%

Tabla 4. Diferencias porcentuales entre el número de fotones de 10.83 MeV producidos en la mina respecto a los producidos en el suelo.

3. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos para la interacción de flujo de rayos cósmicos y el flujo muones presentados en la figura 7 y figura 10 respectivamente, se presentan las partículas que se generaron a partir de las interacciones mencionadas por las diferentes configuraciones de suelo-mina, donde el porcentaje en que fluctuaron las cantidades de partículas fueron: electrones y positrones (70%-80%), seguido de los fotones (20% a 30%), los neutrones-antineutrones y protones-antiprotones (1% a 2%). Al comparar la cantidad de partículas que se generan en los suelos sin mina y con mina, se observó que se generó una mayor cantidad de partículas para suelo sin mina, esto implica que la composición química de la mina tiene un efecto de absorción sobre las partículas que se generaron en las interacciones.

Al evaluarse el espectro de energía para el flujo de rayos cósmicos a nivel Bucaramanga se puede observar en la figura 8 la respuesta de los fotones de rayos gamma, que resalto sobre las otras partículas, permitiendo discriminar la mina para cada configuración, donde existe una energía particular de 0.511 MeV en el cual se generaron mayor cantidad de partículas para el suelo sin mina. La tabla 3 muestra que las diferencias porcentuales

entre los picos de 0.511 MeV son mayores para las configuraciones de suelo seco, donde para un flujo de 24h llegó a ser del 32.25%, para el suelo húmedo alrededor de 3.75% y para el suelo con NH_4NO_3 es 4.30%. Esta diferencia indica que para detectar minas antipersona con el flujo de secundarios es necesario que el suelo sea seco. La variable de tiempo de exposición no aumenta significativamente la diferencia porcentual para ninguna configuración suelo-mina, lo cual indica que puede ser usado el flujo de secundarios para cualquier de los 3 tiempos de flujo estudiados.

Para los resultados obtenidos en el espectro de energía de la interacción del flujo de muones con las respectivas configuraciones. Muestran que la humedad es relevante en la diferenciación del pico de emisión del nitrógeno (10.83 MeV) donde la cantidad de partículas que se generan para esta energía es mayor en los suelos minados, esta diferencia aumenta a medida que la humedad del suelo es mayor. Además, el efecto de la cantidad de partículas empleadas en la interacción no evidencia una diferencia notoria para los suelos con humedad.

La interacción del flujo de secundarios con las configuraciones suelo-mina mostraron que el NH_4NO_3 utilizado como fertilizante y la humedad del suelo son inhibidores para poder diferenciar las minas con respecto del suelo, esto se evidencia al observar las diferencias porcentuales obtenidas para estos suelos y compararlos con los resultados obtenidos para suelos secos.

Referencias Bibliográficas

- Acción contra minas. (2011). *TIPOS DE MINAS ANTIPERSONAL EN COLOMBIA*. Bogotá. Retrieved from WWW.ACCIONCONTRAMINAS.GOV.CO
- Asorey, H., Nunez, L. A., Sanabria-Gomez, J. D., Sarmiento-Cano, C., Sierra-Porta, D., Suarez-Duran, M., ... Vesga-Ramírez, A. (2017). Muon Tomography sites for Colombia volcanoes, 1–24. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1705.09884>
- Babrauskas, V. (2016). Explosions of ammonium nitrate fertilizer in storage or transportation are preventable accidents. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.040>
- Brooks, F. D., Drosch, M., Smit, F. D., & Wikner, C. (2012). Detection of explosive remnants of war by neutron thermalisation. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(1), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.07.006>
- Brown, K. E., Greenfield, M. T., McGrane, S. D., & Moore, D. S. (2016a). Advances in explosives analysis—part II: photon and neutron methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(1), 49–65. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9043-1>
- Brown, K. E., Greenfield, M. T., McGrane, S. D., & Moore, D. S. (2016b). Advances in explosives analysis - Part I: Animal, chemical, ion, and mechanical methods ABC Highlights: Authored by Rising Stars and Top Experts. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(1), 35–47. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9040-4>
- Buryakov, I. A. (2011). Detection of explosives by ion mobility spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 66(8), 674–694. <https://doi.org/10.1134/s1061934811080077>
- Cardona, L., Jiménez, J., & Vanegas, N. (2014). Landmine Detection Technologies To Face the Demining Problem in Antioquia Tecnologías Para La Detección De Minas

- Frente Al Problema De Desminado En Antioquia. *Dyna*, 81(183), 115–125. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.37441>
- Castañeda, C. X. (2015). *Minas antipersona y artefactos explosivos improvisados como elementos como elementos de la conspiración subersiva contra Colombia*. Villavicencio. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14296/2015carolcastaneda.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chiovelli, G., Michalopoulos, S., & Papaioannou, E. (2018). Landmines and Spatial Development, 1–51. Retrieved from <http://www.nber.org/papers/w24758>
- Cranney, D., & Sudweeks, W. (2012). Chemical Explosives. In *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology: Twelfth Edition* (pp. 1473–1495). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4259-2_37
- Gierlik, M., Borsuk, S., Guzik, Z., Iwanowska, J., Kaźmierczak, Korolczuk, S., ... Urban, A. (2016). SWAN - Detection of explosives by means of fast neutron activation analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 834, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.07.042>
- Heider, S. A., & Dunn, W. L. (2015). A simulation study of fast neutron interrogation for standoff detection of improvised explosive devices. *Radiation Physics and Chemistry*, 116, 341–344. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.04.013>
- ICBL. (2018). *Landmine Monitor 2018 - 20th Annual Edition*. Retrieved from www.themonitor.org/cp
- Jaimes-Motta, A. (2018). *Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga (956 m s.n.m)*. Universidad Industrial de Santander.
- Jaramillo, Y. A. (2009). *Determinación de técnicas de detección de explosivos óptimas para el departamento de antioquia*. Universidad de Antioquia.
- Juárez Sanz, M., Sánchez Andreu, J., & Sánchez Sánchez, A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente*. San Vicente del Raspeig: Digitalia. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=318168&lang=es&site=eds-live>
- Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., & Zacharias, S. (2015). Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 51(7), 5772–5790. <https://doi.org/10.1002/2015WR017169>
- Koltick, D., & McConchie, S. (2007). A neutron based vehicle borne improvised explosive device detection system. *Proceedings - International Carnahan Conference on Security Technology*, 261, 292–300. <https://doi.org/10.1109/CCST.2007.4373503>
- Lewis, A. R. (1999). The History of Landmines. *The Journal of Military History*, 63(4), 1055–1056. <https://doi.org/10.2307/120638>

- Liang, F., Lu, M., Keener, T. C., Liu, Z., & Khang, S. J. (2005). The organic composition of diesel particulate matter, diesel fuel and engine oil of a non-road diesel generator. *Journal of Environmental Monitoring*, 7(10), 983–988. <https://doi.org/10.1039/b504728e>
- Lopera, O., & Milisavljevic, N. (2007). Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonnel landmine detection performance of ground-penetrating radar : A Colombian case study, 63, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.02.002>
- Marshall, B., Warr, C. G., & de Bruyne, M. (2010). Detection of Volatile Indicators of Illicit Substances by the Olfactory Receptors of *Drosophila melanogaster*. *Chemical Senses*, 35(7), 613–625. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjq050>
- Marziale, M. D. (2016). *Thermal neutron analysis for improvised explosive device detection*. Purdue University. Retrieved from https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1813&context=open_access_dissertations
- Medina, J. (2010). *Introducción al estudio de los rayos cósmicos*. Madrid, España.: Universidad de Alcalá. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouissp/detail.action?docID=3195292#>
- Mok, H.-M. (2012). *Cosmic Rays : Climate, Weather, and Applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=606397&lang=es&site=eds-live>
- Mok, H. M., & Cheng, K. M. (2001). The Day-night Variation of Cosmic Rays Intensity at Sea Level Under the Influence of Meteorological Fronts and Troughs. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsarx&AN=edsarx.physics%2F0105005&lang=es&site=eds-live>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). Propiedades Físicas. Retrieved October 1, 2019, from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- OTAN. (2007). *Detection and Disposal of Improvised Explosives*. (H. Schubert & A. Kuznetsov, Eds.), *Detection and Disposal of Improvised Explosives*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4887-6>
- Paz, H. (2005). Minas Antipersonales En Colombia. *Indumil*, 7–12. Retrieved from <http://copernico.escuelaing.edu.co/hpaz/images/PDF/Artículo Minas.pdf>
- Reyes, A. J. (2009). *Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para explosivos de uso industrial en la minería*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. Retrieved from <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10946>
- Rogers, C. M. (2014). Legal Landmines. *BusinessWest*, 31(5), 19. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=f5h&AN=97507294&lang=es&site=eds-live>
- Sarmiento, C., Suárez, M., Vásquez, A., & et al. (2019). Modeling the LAGO ' s detectors

response to secondary particles at ground level from the Antarctic to Mexico.

Sarmiento, L. F. (2013). *Mecanismos microbiológicos para la detección de minas antipersonal*. Universidad de los Andes. Retrieved from <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto22013220.php?id=2664.pdf>

Whetstone, Z. D., & Kearfott, K. J. (2014). A review of conventional explosives detection using active neutron interrogation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301(3), 629–639. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3260-5>

Apéndices