

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE FÍSICA

OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DETECCIÓN DE NEUTRONES DE UN
DETECTOR CHERENKOV DE AGUA

Autor: Lic. Victor Clarizio, Universidad Central de Venezuela

Director: Dr. Christian Sarmiento Cano

6 de septiembre de 2022

Resumen

A través de este trabajo se propone realizar la calibración, caracterización y puesta en marcha de un detector de agua Cherenkov en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de encontrar aplicaciones en el área de detección de los rayos cósmicos. Se presentan 3 trabajos que representan el estado del arte y en los cuales se muestran resultados relacionados con el estudio de la eficiencia de los detectores de agua Cherenkov para la detección de neutrones cósmicos y de su respuesta frente a aditivos dopantes, como por ejemplo, un isótopo ^{35}Cl en un caso y NaCl en otro. Dentro del espectro de energía de rayos cósmicos, es de nuestro interés la zona por debajo de los 10^{15} eV , la cual es una energía atribuida a rayos cósmicos que provienen de fuentes galácticas y del Sol.

1. Introducción

Los rayos cósmicos son núcleos atómicos que bombardean nuestro planeta diariamente a velocidades relativistas producto de la aceleración producida por diversas fuentes dentro o fuera de nuestra galaxia. Fueron descubiertos en 1912 por el físico austríaco Victor Franz Hess, quien demostró que la radiación ionizante provenía del espacio exterior. En años más recientes, específicamente en el año 2017, hubo un gran avance en este tópico gracias a los datos obtenidos por el *Observatorio Pierre Auger* en Argentina, en el cual se registraron y estudiaron las trayectorias de arribo de al menos 30000 partículas cósmicas [4]. Se concluyó que la frecuencia de arribo dependía de donde se observara al cielo.

Hoy en día sabemos que la composición química de los rayos cósmicos está representada mayormente por protones (89%), seguida de núcleos ligeros ($\approx 10\%$) y el resto de la composición porcentual corresponde a electrones y a núcleos más pesados. El rango de energías en el que estas partículas ingresan a la Tierra han sido medidas desde los GeV hasta miles de EeV [4], siendo estos últimos considerados como rayos cósmicos ultraenergéticos, o *UHECR*, por sus siglas en inglés. En este trabajo, nos interesan específicamente los neutrones provenientes de la componente hadrónica de los rayos cósmicos. Un rayo cósmico puede ser clasificado como primario o secundario. Los rayos cósmicos primarios son partículas estables que han sido aceleradas por fuentes astrofísicas y que inciden en la atmósfera. Por otro lado, los rayos cósmicos secundarios son el resultado de la interacción de los primarios con los elementos presentes en la atmósfera, produciendo lo que también se conoce como las cascada de partículas secundarias. Debido a las altas energías de las partículas que componen los rayos cósmicos primarios y que no existe un campo magnético lo suficientemente fuerte para generar desviaciones significativas, estas cascadas se mueven por lo general en la misma dirección promedio de arribo. El estudio de la componente neutrónica comenzó en 1930 y subsecuentemente en 1940 comenzó el estudio de los neutrones en las cascadas atmosféricas extensas o *EAS* [4], por sus siglas en inglés. Posterior a esto se crea una red global de monitores de neutrones con el propósito principal de crear una interconexión de cada dispositivo localizado en un lugar específico y optimizar la extracción de datos sobre la física de fenómenos cósmicos como lo son los espectros de energía y la dirección de propagación de partículas primarias [2]. Además, esta red brinda la oportunidad de utilizar los monitores de neutrones como sistemas de alerta meteorológica espacial.

Los detectores de superficie más utilizados son los tipo Cherenkov y los contadores de centelleo para detectar partículas cargadas al nivel de la tierra. Los telescopios utilizados para medir la fluorescencia y la luz Cherenkov usan grandes espejos para focalizar la luz a los PMT [2]. Adicional a esto, las lluvias de partículas secundarias emiten ondas de radio debido a la desviación de los electrones y positrones por el campo geomagnético, y como una ventaja sobre los sistemas de detección óptica, la detección de estas ondas es posible a cualquier hora y no solo durante noches oscuras y despejadas. Para el caso de la detección de neutrones, existen los conocidos monitores de neutrones, como los tipo *IGY* o *International Geophysical Year* por sus siglas en inglés, y los *NM64*, también conocidos como supermonitores. Estos monitores implementan la misma estrategia de medición que evidencia la diferencia en la manera en que los neutrones de alta y baja energía interactúan con diferentes núcleos [2]. Los neutrones de altas energías interactúan poco con la materia, pero cuando lo hacen pueden ser capaces de romper núcleos atómicos, en particular los pesados, produciendo muchos neutrones menos energéticos en el proceso. Estos últimos tienen una mayor probabilidad de interacción, en las cuales se transfiere energía pero no se cambia la estructura del núcleo. Los cuatro componentes principales de un monitor de neutrones son [8]:

- **Material reflector:** Es la capa más externa del monitor y está hecha de un material cuya composición es rica en protones. Los neutrones de baja energía no pueden atravesarlo y los neutrones producidos por las cascadas secundarias de los rayos cósmicos lo atraviesan sin problemas.
- **Material productor:** Por lo general es plomo, y por su peso representa el mayor componente en cualquier monitor de neutrones. Los neutrones rápidos que atraviesan el reflector interactúan con el plomo produciendo en promedio neutrones 10 veces más lentos.
- **Moderador:** También un material rico en protones, realentiza los neutrones ahora confinados en el reflector, volviéndolos más fácil de detectar. En el caso de los detectores Cherenkov de superficie, el moderador es el agua.
- **Contador proporcional:** Luego de que neutrones muy lentos son generados por el reflector, el productor, el moderador y así sucesivamente, ellos encuentran un núcleo en el contador proporcional, provocando su desintegración. Esta reacción nuclear produce partículas energéticas cargadas que ionizan el medio en el contador proporcional, produciendo señales eléctricas.

Algunos ejemplos para los cuales los monitores de neutrones resultan de especial utilidad son las mediciones de los ciclos solares y el estudio de los decrecimientos de Forbush. En un proceso llamado modulación solar, el Sol produce una emisión de masa coronal que altera la intensidad y energía del espectro de rayos cósmicos que entran al Sistema Solar [7]. Cuando el Sol está en su etapa activa, menos rayos cósmicos galácticos inciden en la atmósfera terrestre en relación a los que inciden cuando el Sol está en su etapa menos activa. Por esta razón, el flujo de rayos cósmicos galácticos respetan un comportamiento temporal de 11 años, como el Sol, pero en dirección opuesta. Una alta actividad solar corresponde a una disminución en los rayos cósmicos detectados, y viceversa. Esta disminución de la intensidad de rayos cósmicos detectados en la Tierra producto del desprendimiento de masa coronaria tiene el nombre de decrecimiento de Forbush, el cual puede ser observado días después de que ocurre la emisión de masa coronal, y al pasar unos días más la intensidad medida regresa a la normalidad. La agricultura inteligente es un ejemplo de la aplicación de monitoreo de neutrones. La tecnología de los sensores de neutrones de rayos cósmicos, o *CRNS* por sus siglas en inglés, cubren un área efectiva de 2 a 3 hectáreas y está basada en la detección de neutrones cósmicos de altas energías que eventualmente penetran la tierra para luego ser dispersados de vuelta a la atmósfera [6]. Estos neutrones dispersados pierden energía debido a las colisiones con principalmente átomos de hidrógeno presentes en la humedad misma del suelo. Los *CRNS* miden estos neutrones de bajas energías cerca de la superficie y, debido a que los mismos son distribuidos espacialmente y dispersados a través de largas distancias en el aire, los sensores pueden monitorear la humedad en largas áreas de terreno sin ocupar demasiado espacio o interrumpir las actividades agropecuarias. Este trabajo apunta a la detección de dichos neutrones dispersados.

2. Antecedentes y relevancia

En el presente apartado procedemos a hacer una revisión detallada de las investigaciones relacionadas con la detección de la componente neutrónica de los rayos cósmicos mediante la utilización de detectores Cherenkov de agua. En el año 2016 se publica un trabajo titulado “*Neutron detection using a water Cherenkov detector with pure water and a single PMT*” [5], en el que se expone el rendimiento de un detector de agua Cherenkov cuyo volumen solo consiste en agua pura, y posee un único fotomultiplicador. Este detector es expuesto a dos fuentes emisoras de neutrones:

$^{241}\text{AmBe}$ y ^{252}Cf , emitiendo esta última neutrones con energías superiores a 1 keV (neutrones rápidos) que son obtenidos también del fondo del flujo de partículas atmosféricas. Se realizó el montaje de distintas configuraciones de blindaje: Gadolinio (Gd), plomo (Pb) y cera de parafina. Las diferentes configuraciones de blindaje fueron las siguientes:

1. **Conf. 0:** Fuente $^{241}\text{AmBe}$. Con la pared de gadolinio, plomo y la cera de parafina.
2. **Conf. 1:** Fuente $^{241}\text{AmBe}$. Con la pared de plomo y la cera de parafina.
3. **Conf. 2:** Fuente $^{241}\text{AmBe}$. Solo con la pared de plomo.
4. **Conf. 3:** Fuente $^{241}\text{AmBe}$. Solo con la cera de parafina.
5. **Conf. 4:** Fuente ^{252}Cf . Sin blindaje.
6. **Conf. 5:** Fuente ^{252}Cf . Sin blindaje.
7. **Conf. 6:** Fuente ^{252}Cf . Solo con la pared de plomo.

Siguiendo estas configuraciones, se procedió a obtener los histogramas característicos asociados a la detección de neutrones con los respectivos ajustes de substracción de señales de fondo, pudiéndose evidenciar una clara distinción entre cada caso. Como podemos observar en Figura 1, para los casos en los que se utiliza la fuente de $^{241}\text{AmBe}$, las configuraciones 0, 1 y 2 están por debajo de las configuraciones 3 y 4, evidenciando una diferenciación más acentuada por debajo de los 30ADCq. Por encima de los 100ADCq los eventos se deben mayormente a la presencia de rayos cósmicos. Ahora, para el caso en el que se utilizó la fuente ^{252}Cf , se muestra en la Figura 2 que los espectros para las configuraciones 5 y 6 son similares a los obtenidos anteriores, por lo que se concluye que el blindaje de plomo no tiene un impacto significativo en estas mediciones.

Finalmente, en términos de la determinación analítica de la **eficiencia del detector**, se utilizó la aproximación de una fuente puntual para llegar a la expresión:

$$\epsilon_D \approx \frac{N_{Pb} - N_{fondo}}{t_m N_s e^{-\lambda t_d} \frac{d\Omega}{4\pi}}$$

Donde $N_s e^{-\lambda t_d}$ es la tasa de emisión de neutrones de la fuente el día del experimento, N_s es la tasa de emisión de neutrones al momento de la calibración, λ es la probabilidad de decaimiento por unidad de tiempo, t_d es la diferencia temporal entre la calibración y el experimento, $\frac{d\Omega}{4\pi}$ es el

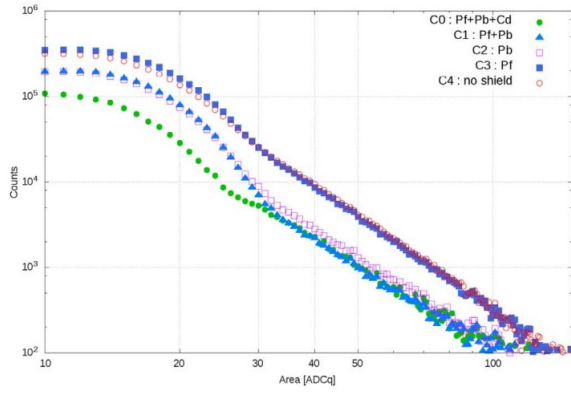


Figura 1: Histograma de cargas de los eventos registrados para la señal adquirida utilizando la fuente AmBe-241 y las configuraciones de blindaje C0 a C4 luego del ajuste de la señal de fondo. [5]

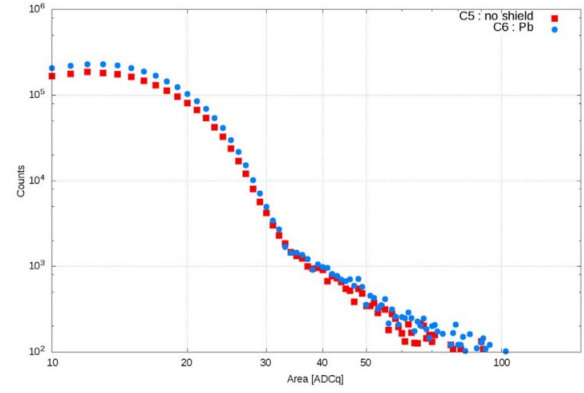


Figura 2: Histograma de cargas de los eventos registrados para la señal adquirida utilizando la fuente Cf-252 y las configuraciones de blindaje C5 y C6 luego del ajuste de la señal de fondo. [5]

ángulo sólido, el tiempo de adquisición t_m (300s). Para la fuente ^{252}Cf se obtuvo una eficiencia de aproximadamente 20 % y para la fuente $^{241}\text{AmBe}$ aproximadamente 10 %. En este trabajo se observa por primera vez una señal clara para la detección de neutrones utilizando un detector de agua Cherenkov con un solo *PMT*, y se obtiene una estimación de la eficiencia de detección de neutrones de $(15 \pm 5) \%$ para neutrones rápidos. Debido a que el agua es un material económico y fácil de tratar, resulta de especial interés utilizarlo como alternativa para futuras aplicaciones relacionadas con el monitoreo del clima espacial.

Dos años después, en el año 2018, se publica un trabajo titulado: “*Neutron Detection Capabilities of Water Cherenkov Detector*” [3], en el que caracterizaron experimentalmente las capacidades de detectar neutrones de un *WCD*, utilizando un solo fotomultiplicador y nuevamente una fuente de neutrones ^{252}Cf . Se hace posteriormente una comparativa de los resultados obtenidos utilizando agua pura y agua con aditivos no contaminantes (en particular, un aditivo que posee ^{35}Cl en su composición química). La razón del porqué se utiliza este isótopo del cloro es que, además de ser el isótopo más abundante, sino que posee una sección eficaz alta para la absorción de neutrones: $(43,84 \pm 0,17)\text{barns}$. Se utiliza entonces sal *NaCl* ya que, además de lo previamente mencionado, es un compuesto que se disuelve fácilmente en agua y no es contaminante si se derrama, a diferencia del gadolinio (*Gd*). En el experimento, se usa un recubrimiento de plomo entre la fuente y el detector para evitar que los fotones γ lleguen al detector. En la Figura 3 se evidencian los resul-

tados experimentales obtenidos para la detección de neutrones utilizando agua pura cuya señal es representada por los puntos morados, y agregando el aditivo en el volumen de agua cuya señal es representada por los puntos naranja. En la misma, se evidencia un incremento significativo de la señal para el caso en que se agrega el aditivo al volumen.

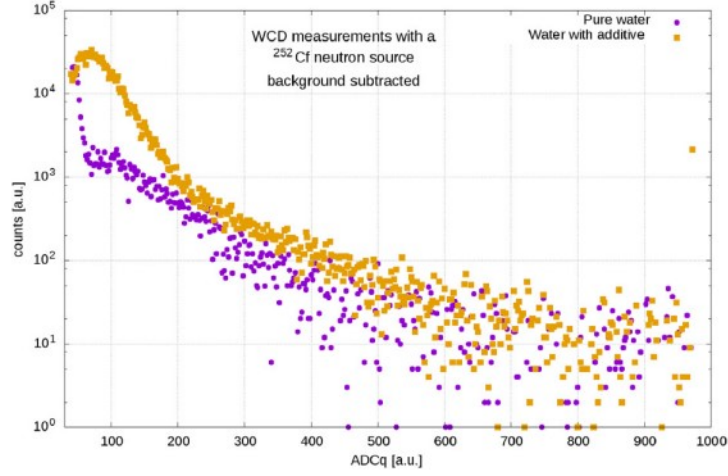


Figura 3: Espectro del experimento utilizando la fuente de neutrones luego de la substracción de la señal de fondo. Los círculos morados representan las señales medidas con agua pura y los círculos naranja las señales utilizando un 2,5 % de aditivo. [3].

En una primera estimación de la eficiencia de detección de neutrones, se obtiene experimentalmente un valor de 19 % para agua pura, y 44 % cuando el volumen de agua tiene el aditivo no contaminante. Con esto, se concluye que detectores Cherenkov de agua con aditivos no contaminantes y en baja proporción resultan ser sumamente viables para detectar neutrones. Adicional a esto, el hecho de que estos detectores sean económicos, fáciles de obtener y no contaminantes, posee una clara ventaja por sobre otros sistemas de detección. Sin embargo, debido a su relativo alto umbral energético para el cual las partículas cósmicas pueden ser detectadas, esta técnica se presenta únicamente como una alternativa frente a otras más eficientes.

Finalmente, en un trabajo publicado en el 2020 y titulado “*Simulation of 500 MeV neutrons by using NaCl doped Water Cherenkov detector*”, se presentan las capacidades de un *WCD* para la detección de neutrones de altas energías por medio de una simulación realizada en *Geant4* [1]. En el trabajo, se presenta la simulación de la respuesta de un *WCD*, dopado con diferentes concentraciones de sal basada en ^{35}Cl como en el trabajo mostrado anteriormente. Según simulaciones previas realizadas en *CORSIKA* por la Colaboración LAGO, se mostró que para rayos cósmicos primarios con energías entre los 10^{11}eV y los 10^{15}eV , para diferentes altitudes, el espectro de energía asociado a los neutrones cósmicos tiene su pico de intensidad en los 500MeV . Por esta razón, en este trabajo se simularon neutrones monocromáticos con energías de 500MeV [1]. En un esquema presentado, se describe el montaje experimental: Cuando un neutrón ingresa al volumen del *WCD* es moderado por el agua, es decir, reduce su velocidad inicial. Luego, es absorbido principalmente por los núcleos de hidrógeno o los elementos dopantes presentes. Los fotones γ emitidos luego la absorción producen electrones principalmente por dispersión Compton y efectos de producción de pares. En algunos casos, estos electrones tienen energías por encima del umbral de Cherenkov, produciendo entonces fotones que son detectados por el *PMT*.

En la simulación realizada fueron inyectados 150000 neutrones, y se establecieron parámetros específicos para la geometría del detector: Se compone de un cilindro de acero inoxidable de $0,96\text{m}$ de diámetro y $1,33\text{m}$ de alto, con un espesor de $0,5\text{m}$. Las paredes internas del detector están recubiertas por una capa delgada de un material con propiedades reflectivas y refractarias conocido como *Tyvek* que promueve la propagación de los fotones Cherenkov dentro del detector. Dependiendo de la configuración seleccionada, el cilindro se llena con agua pura o con diferentes concentraciones masivas de *NaCl*, las cuales serán de 2,5 %, 5 % y 10 %. En la Figura 4 se representan las distancias desde el borde del detector hasta el punto en el que los neutrones incidentes son absorbidos. El máximo para la absorción se encuentra en los $(8,4 \pm 0,1)\text{cm}$ para el agua pura, y se puede ver que el número de absorciones incrementa a proporcionalmente con el aumento en la concentración de *NaCl*, teniendo un mínimo en $(7,3 \pm 0,1)\text{cm}$ para una concentración del 10 %, y mejorando así la eficiencia del detector sin afectar significativamente el proceso de moderación en el agua.

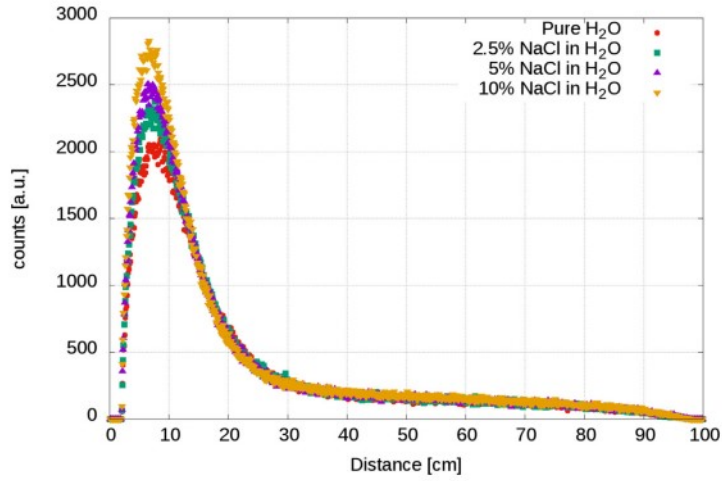


Figura 4: Captura de neutrones para un haz monocromático de neutrones de 500MeV. [1] Se observa como los conteos incrementan a medida que aumenta el porcentaje del aditivo agregado

En el trabajo se concluye entonces que agregando al volumen activo *NaCl* como sustancia dopante se incrementa la sensibilidad del detector e intensidad de la señal producida por la detección de neutrones, mejorando así la capacidad de medir neutrones de altas energías.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Instalar y caracterizar el funcionamiento de un detector Cherenkov de agua en la Universidad Industrial de Santander para realizar trabajos de detección de la componente neutrónica de los rayos cósmicos.

3.2. Objetivos específicos

- Calibrar el detector de agua Cherenkov utilizando como fuente la componente hadrónica de los rayos cósmicos.
- Caracterizar las mediciones obtenidas para la detección de neutrones agregando diferentes aditivos al agua del tanque.
- Medir la componente neutrónica de los rayos cósmicos utilizando el aditivo que optimice la eficiencia del detector.

4. Metodología

4.1. Instalación del detector

Se instala el detector Cherenkov de agua en una ubicación que no represente un riesgo a la integridad del mismo, y que se adecúe a los objetivos del proyecto. Luego de esto, se procederá a comprobar que el equipo está funcionando adecuadamente.

4.2. Calibración del detector

En esta sección, calibraremos el instrumento utilizando como fuente la componente hadrónica de los rayos cósmicos. Previo a esto, debemos tener en cuenta diversos factores como lo son la purificación del agua que contiene el tanque, la impermeabilización de la luz, el buen estado del fotomultiplicador y del material *Tyvek*, entre otros. Luego, deben realizarse 3 tipos de calibraciones: La calibración del volumen activo, la calibración lumínica y la calibración de voltajes en los fotomultiplicadores de los tanques. Para el proceso de purificación el fin es obtener el agua más transparente posible. La calibración lumínica o impermeabilización de la luz consiste en evitar todo tipo de entrada de luz al tanque, para que de esta manera los únicos fotones que detecte el PMT sean solo los producidos por las partículas dentro del detector por la radiación Cherenkov. Existe además una técnica experimental que consiste en el recubrimiento de uno de los tanques con varias capas de pintura de aceite y una capa de plástico de 0.3 mm de grosor, después se intenta envolverlo con una capa de manto asfáltico y por ultimo se busca cubrir con “bolsas de plástico”. Para la calibración del voltaje en los fotomultiplicadores, de igual manera que con un tubo Geiger se busca la región de voltajes de trabajo. Se hace un barrido de voltaje midiendo la cantidad de eventos en un intervalo de tiempo y se busca la zona Plateau, es decir, la zona en donde una variación del conteo no se ve afectada por una variación del voltaje. Posterior a esto, debemos determinar la eficiencia del detector mediante la comparación de los datos teóricos y los datos experimentales que se obtengan.

4.3. Optimización de la eficiencia

Una vez calibrado el instrumento, se procede a realizar distintas pruebas de medición agregando distintos aditivos (principalmente compuestos de cloro) con diferentes concentraciones, y se analiza

la información recogida con el fin de encontrar la concentración óptima del aditivo dopante que maximiza la eficiencia. Finalmente, una vez encontrada dicha concentración óptima, se realizarán mediciones de rayos cósmicos con especial enfoque en la detección de los neutrones en la componente hadrónica de los rayos cósmicos.

Referencias

- [1] Iván Sidelnik, Hernán Asorey, Nicolás Guarín, Mauricio Suárez Durán, Mariano Gómez Berisso, José Lipovetzky, Juan Jerónimo Blostein. **“Simulation of 500 MeV neutrons by using NaCl doped Water Cherenkov detector”**. *Advances In Space Research*. May 17th, 2019.
- [2] Yu. V. Stenkin, D. D. Djappuev, J. F. Valdes-Galicia. **“Neutrons in Extensive Air Showers”**. *Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences*. Russia. May, 2006.
- [3] Iván Sidelnik, Hernán Asorey, Nicolás Guarín, Mauricio Suárez Durán, Fabricio Alcalde Bessia, Luis Horacio Arnaldi, Mariano Gómez Berisso, José Lipovetzky, Martín Pérez, Miguel Sofo Haro, Juan Jerónimo Blostein. **“Neutron detection capabilities of Water Cherenkov Detectors”**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Argentina, October, 2018.
- [4] Particle Data Group. **“Review of Particle Physics”**. *University of California*. 2012.
- [5] Iván Sidelnik, Hernán Asorey, Juan Jerónimo Blostein, Mariano Gómez Berisso. **“Neutron detection using a water Cherenkov detector with pure water and a single PMT”**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Argentina, October, 2016.
- [6] Hami Said Ahmed **“Cosmic Ray Neutron Sensor (CRNS) technology for area-wide soil moisture monitoring”**. *International Centre for Theoretical Physics*. December, 2021.
- [7] Christopher Light , Veronica Bindi , Cristina Consolandi , Claudio Corti , Christopher Freeman , Andrew Kuhlman , Matteo Palermo , and Siqi Wang. **“Interplanetary Coronal Mass Ejection Associated Forbush Decreases in Neutron Monitors”**. *Physics and Astronomy Department, University of Hawaii*. Honolulu. May, 2020.
- [8] Moraal, H.; Belov, A.; Clem, J. M. (2000). **“Design and coordination of multi-station international neutron monitor networks”**. *Space Science Reviews*. 93 (1–2): 285–303.