

# Instalación de un detector Cherenkov de neutrones

**Autor:** Betancourt *J.*<sup>1</sup>, **Director:** Cazar *D.*<sup>2</sup> y **Coodirector:** Nuñez *L.*<sup>3</sup> \*

*1. Universidad Industrial de Santander, Colombia.*

*2. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.*

*3. Universidad Industrial de Santander, Colombia.*

02/09/2022

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Estado del arte</b>	<b>4</b>
<b>3. Antecedentes</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. General . . . . .	9
4.2. Especificos . . . . .	9
<b>5. Metodología</b>	<b>10</b>
<b>6. Cronograma y resultados</b>	<b>11</b>
<b>7. Resultados</b>	<b>12</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>13</b>

---

\* e-mail: jabetanudenar@gmail.com, dcazar@usfq.edu.ec y lnunez@uis.edu.co



## Resumen

El Detector de neutrones de rayos cósmicos permite monitorear la humedad del suelo. Los detectores Cherenkov de agua están siendo probados en la detección de neutrones, con materiales no tóxicos y de fácil acceso. Sin embargo, no existe un estudio dedicado a evaluar el uso de detectores Cherenkov para monitorear la humedad del suelo.

Este trabajo presenta los aspectos teóricos y técnicos de la instalación de un detector Cherenkov de neutrones en la Universidad San Francisco de Quito (Ecuador), como parte de la pasantía LA-CoNGA physics. Este detector permitirá evaluar la posibilidad de detectar neutrones atmosféricos cerca del suelo.



## 1. Introducción

El detector de neutrones de rayos cósmicos (DNRC) es un tipo de detector que ha mostrado excelentes resultados en la medición de la humedad del suelo al punto que se han desarrollado extensas redes de monitoreo en varios suelos del planeta (Cosmos US[1], Cosmos UK[2], CosmOZ [3] entre otros).

Esta técnica se basa en la correlación inversa que existe entre la abundancia de neutrones de baja energía ( $10 \text{ eV} < k < 1000 \text{ eV}$ ) y la cantidad de Hidrógeno en el terreno y la atmósfera cercana al suelo [4]. Dado que el Hidrógeno nos indica la presencia de agua podemos, entonces medir la humedad de la atmósfera, del suelo, de la biomasa y de grandes cuerpos de agua y nieve. Surgen varias aplicaciones de esta técnica: la optimización de recursos hídricos en la agricultura (automatización de riego), el monitoreo de cuencas hídricas (estudio de fenómenos de sequía e inundaciones), alertas en zonas de riesgo (monitoreo de quebradas y accidentes geográficos), por citar algunas.

Los DNRC usan diferentes medios de detección como pueden ser: gases (Helio-3 por ejemplo) o plásticos centelladores optimizados para la detección de neutrones [5],[6]. Dentro de la Colaboración LAGO se han hecho pruebas para optimizar los detectores Cherenkov de agua (WCD) para neutrones [7].

La aplicación de los DNRC para agricultura en nuestra región está poco desarrollada. Dado su potencial impacto en los ciclos productivos agrícolas, es importante poder realizar un estudio preliminar que sirva como base para una futura implementación.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 describimos la producción de neutrones cósmicos cerca de la superficie de la Tierra, método de medición de la humedad del suelo y sistemas de detección con neutrones. La sección 3 discute sobre los detectores Cherenkov de agua pura y con aditivos para medir neutrones. La sección 4 presenta los objetivos planteados para este trabajo. En la sección 5 indica la metodología llevada a cabo para lograr los objetivos. Finalmente, en la sección 6 se muestra el cronograma de actividades a desarrollar.

## 2. Estado del arte

Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio exterior y bombardean constantemente la Tierra en todas las direcciones (ver figura 1). Están compuestos por protones, partículas alfa y el resto son núcleos pesados [9].

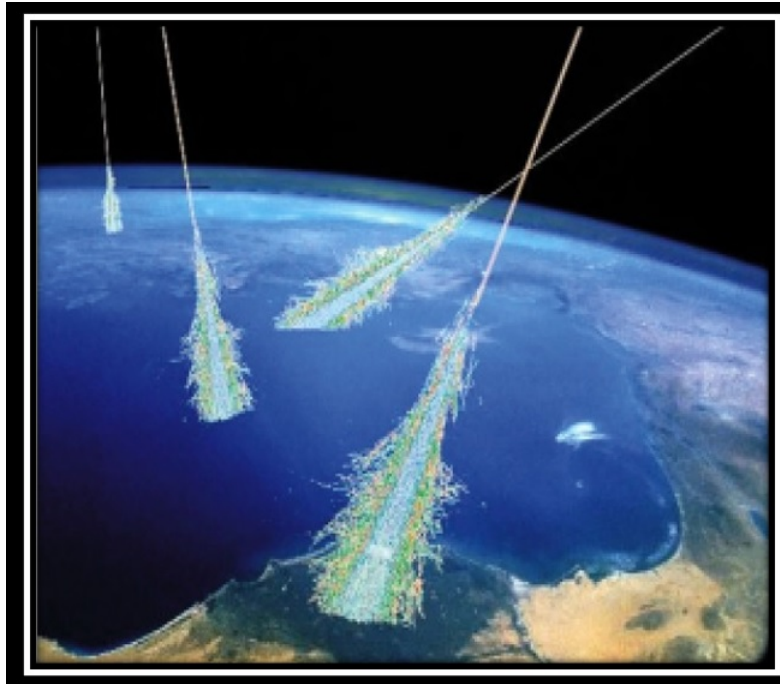


Figura 1: Lluvia de Rayos Cósmicos provenientes del exterior [8].

Al interactuar con la atmósfera (oxígeno o nitrógeno) se crean cascadas de partículas secundarias entre las que se encuentran las de neutrones secundarios[11]. Su espectro energético final a nivel del suelo se representa en la figura 2, donde se destacan tres picos, clasificados así;

1. **Neutrones de alta energía:** Con un rango de energía cinética  $E_c$  entre  $11MeV < E_c < 10GeV$  y el pico alrededor de 100 MeV de color rojo. Son generados por protones primarios y átomos más pesados que dividen los núcleos atmosféricos en partículas que incluyen neutrones [10]. Pueden viajar hacia abajo a través de la atmósfera y crear cascadas de neutrones (rápidos), que pueden llegar finalmente al suelo.
2. **Neutrones rápidos:** Su pico está alrededor de 2 MeV [1] y el rango de energía cinética está entre  $100KeV < E_c < 11MeV$  (color verde, ver la figura 2). Cuando los neutrones de alta energía o protones interactúan con el aire o el suelo, excitan los núcleos para luego liberar neutrones rápidos a una energía más baja.

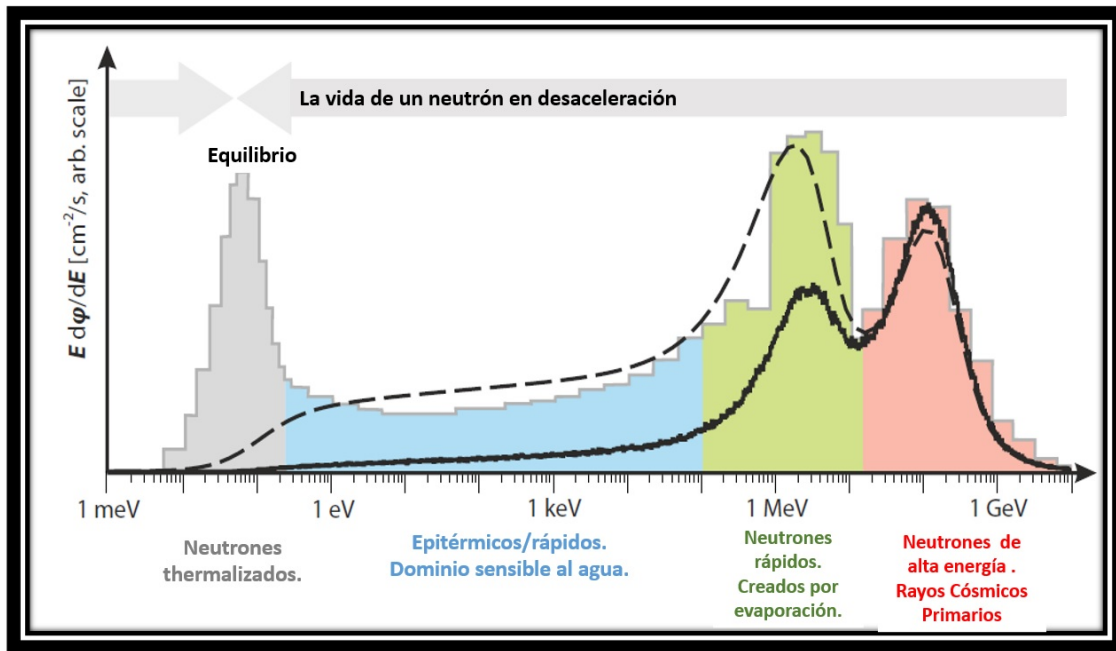


Figura 2: Espectro de energía de neutrones en el suelo: medición de Goldhagen [12] (gris) y simulada por Sato y Niita [13] (punteada). Resultado de restar la componente reflejada en el suelo sobre el agua pura, se obtiene una componente entrante pura (línea negra continua). Los colores ilustran la desaceleración de los neutrones iniciales de alta energía (rojo), neutrones de evaporación (verde), neutrones epitermales (azul) y neutrones térmicos (gris claro).

3. **Neutrones epitermales:** Con un rango de energía cinética entre  $0,5\text{eV} < E_c < 100\text{KeV}$  (color azul). Las interacciones de neutrones están dominadas por la colisión elástica, en la que la pérdida de energía está correlacionada con la masa del núcleo blanco. Debido a la masa pequeña del hidrógeno, esta banda de energía es la más sensible al agua y a las moléculas orgánicas, por tanto, la más importante para la medición de la humedad del suelo con el método de neutrones.
4. **Neutrones térmicos:** La banda de color gris (ver figura 2), presenta un rango de energía cinética entre  $0,005\text{eV} < E_c < 0,5\text{eV}$ . Los átomos blanco están en equilibrio térmico con el entorno. Aquí la energía del blanco contribuye significativamente a la energía del neutrón cuando se transfiere durante una colisión. Como consecuencia, los neutrones finalmente se termalizan a  $k_B T \approx 25\text{meV}$ , donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann [11].

Los neutrones rápidos que se producen en el aire, la vegetación y el suelo, viajan en todas las direcciones y penetran unas decenas de  $g/cm^2$  la materia <sup>1</sup>. De este modo se consigue una concentración de equilibrio de neutrones en cada uno de estos ambientes [14]. El equilibrio se alcanza casi instantáneamente

<sup>1</sup>Se define como el producto de la densidad del medio por la longitud de penetración de la partícula.

(del orden de  $10^{-4}$  s [14]) porque los neutrones rápidos tienen velocidades de decenas a miles de kilómetros por segundo [4]. La densidad de equilibrio de los neutrones rápidos depende de dos factores: la tasa de producción de neutrones (que se conoce implícitamente, a través de la calibración local) y la eficiencia de moderación de los neutrones rápidos, que depende del poder de frenado del medio y, por tanto, de su contenido en hidrógeno [1].

En consecuencia, midiendo la intensidad de los neutrones rápidos en los decímetros superiores por encima de la superficie del suelo se puede inferir el contenido de hidrógeno (humedad en un radio de hectómetros) del medio [1].

La probabilidad de interacción entre un neutrón con un átomo se mide con la sección transversal. Presenta grandes cambios debido a la composición isotópica y al número atómico. La masa atómica  $A$  clasifica los tipos de interacciones posibles. Los núcleos muy pesados con  $A > 80$  como el *Uranio*–235, pueden sufrir la fisión y dispersar inelásticamente los neutrones rápidos. Los núcleos intermedios pueden absorber o dispersar inelásticamente el neutrón ( $25 < A < 80$ ). Los núcleos ligeros con  $A < 25$  realizan dispersión elástica de los neutrones. El núcleo de hidrógeno,  $A = 1$ , presenta secciones transversales de absorción y dispersión elástica altas (ver figura 3). Sin embargo, la absorción sólo es significativa en el régimen de energía térmica a la que el detector ideal no puede medir la humedad del suelo [11].

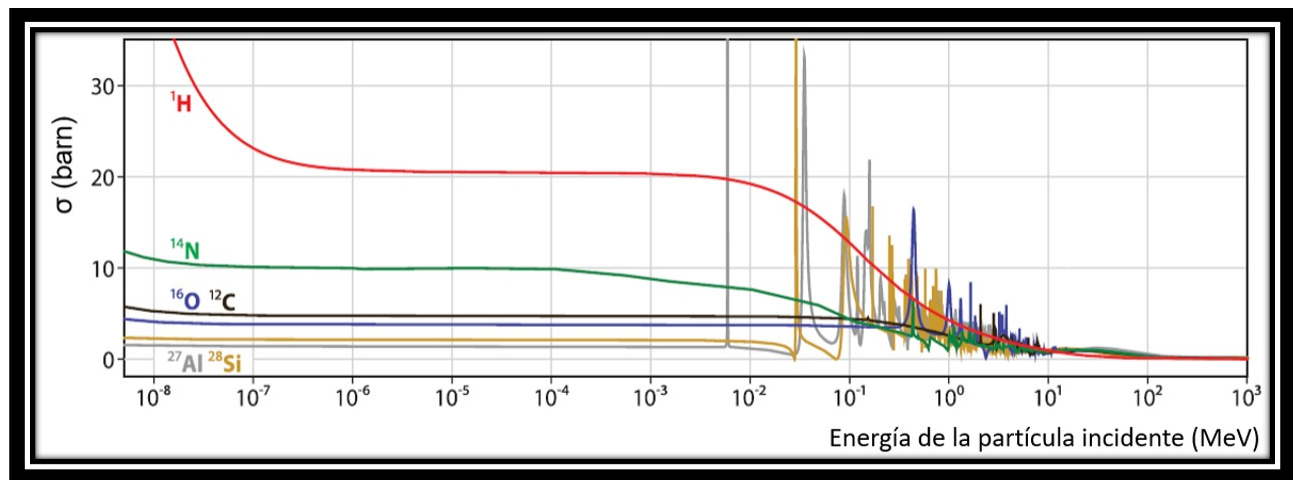


Figura 3: Comparación de las secciones transversales de neutrones elásticos de hidrógeno (rojo), nitrógeno (verde), oxígeno (azul), carbono (negro), silicio (ocre) y aluminio (gris) para energías cinéticas entre  $5\text{meV}$  y  $1000\text{MeV}$  [11].

El método de rayos cósmicos utiliza Detectores de Neutrones de Rayos Cósmicos para estimar la humedad del suelo en la zona de las raíces. Los sensores están compuestos por tubos de gas (Helio-3) y en conjunto con la electrónica asociada se les llama sondas. Una sonda consta de dos detectores de neutrones un detector desnudo que responde a los neutrones térmicos y un detector blindado de polietileno que responde a los neutrones epitérmicos - rápidos [1].



Los sistemas de detectores modulares (varios tubos de contadores revestidos de *Boro* – 10) gaseosos basados en *Boro* – 10 y *litio* – 6 proporcionan tasas de conteo significativamente más altas que los sistemas tradicionales de Helio-3, debido a su gran superficie [1].

Para competir con los sistemas de gas, se proponen detectores de centelleo de  $6\text{LiF}:\text{ZnS}$ . El litio-6 ( $6\text{LiF}$ ) actúa como agente de captura de neutrones, que se mezcla con un centellador de sulfuro de zinc ( $\text{ZnS}$ ) de alta sensibilidad para permitir la detección de neutrones [15]. Varias empresas ofrecen detectores de neutrones de tipo centelleo como el  $6\text{LiF}:\text{ZnS}$  para cubrir grandes superficies [16].

Los trabajos más recientes están dedicados a evaluar la viabilidad de construir detectores de neutrones de bajo costo, destinados a monitorear la humedad del suelo. Los detectores se construyen a partir de láminas de  $6\text{LiF}:\text{ZnS}$  sensibles sólo a la componente térmica del flujo de rayos cósmicos, por lo que su sensibilidad energética es más cercana a la de un tubo típico de Helio-3 [5].

### 3. Antecedentes

Los detectores Cherenkov están siendo probados en la detección de neutrones, con materiales no tóxicos y de fácil acceso. Los experimentos más recientes utilizaron un WCD de agua pura y un único tubo fotomultiplicador (PMT) radiado por fuentes de neutrones de Americio-Berilio-241 y Californio-252. En diferentes configuraciones de moderador de neutrones y blindaje. La eficiencia de detección de neutrones rápidos fue de  $(15 \pm 5) \%$  [17]. Los estudios anteriores mostraron resultados positivos en la detección de neutrones con un detector Cherenkov de agua y un PMT. La conclusión a la que se llegó fue que era necesario mejorar la intensidad de la señal de neutrones para que destacara sobre el fondo. La relación **señal/ruido** mejora al sumar un elemento que absorba neutrones, emitiendo partículas que produzcan señal Cherenkov de mayor intensidad [18].

El siguiente paso consiste en estudiar y comparar la capacidad de detección de neutrones del WCD de agua y agua con aditivo (isotopo Cl-35) [18]. Los experimentos demuestran que los neutrones rápidos de la fuente de californio-252 pueden detectarse por encima del flujo de partículas atmosféricas de fondo. La eficiencia de detección de neutrones fue del 19 % para el agua pura y del 44 % para el agua con el aditivo. Adicionalmente se incluye la simulación en Geant-4 de la respuesta del WCD a los neutrones utilizando una fuente simulada de californio-252. Las simulaciones están de acuerdo con los resultados experimentales. Una de las conclusiones importantes del trabajo corresponde a que los WCD utilizados como detectores de neutrones pueden ser una herramienta complementaria para los monitores de neutrones estándar basados en  $3\text{He}$ .

Investigaciones posteriores [7] continúan evaluando la forma de mejorar la de detección de neutrones con WCD de agua y una solución acuosa de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ). La solución se analiza a concentraciones de 2,5 %, 5 % y 10 %. Se utiliza una fuente de californio-252 para radiar el WCD. Los resultados muestran que los neutrones rápidos procedentes de la fuente de pueden ser identificados por encima del fondo de radiación natural. En conjunto con los experimentos se incluyen simulaciones en Geant4 que validan los estudios. La principal conclusión de este trabajo



radica en que el uso de  $N_aCl$  como dopante produce una notable mejora en la capacidad de detección de neutrones de un WCD.

Finalmente, el último estudio publicado [19] evaluó la capacidad de los WCD para detectar neutrones de alta energía ( $500MeV$ ). La investigación se realizó mediante simulaciones del WCD dopado con al 2,5 %, 5 % y 10 %. La principal conclusión muestra que el  $N_aCl$  mejora la capacidad de detección de neutrones altamente energéticos.



## 4. Objetivos

### 4.1. General

Instalar y calibrar un detector Cherenkov de agua para detección de neutrones en las instalaciones de la Universidad San Francisco de Quito (Ecuador).

### 4.2. Especificos

1. Simular el sistema de detección WCD diseñado para neutrones en la superficie del suelo.
2. Configurar un detector WCD para la detección de neutrones en la superficie del suelo.
3. Estudiar la influencia que tiene el  $NaCl$  como un aditivo para mejorar la capacidad de detectar neutrones.
4. Calibrar el fotodetector PMT, según la respuesta del WCD a los neutrones rápidos.
5. Calibrar sistema electrónico para la detección de neutrones usando un WCD.



## 5. Metodología

Para alcanzar los objetivos se propone una metodología que consta de las siguientes fases:

1. **Simular el sistema de detección:** Simulación de la geometría del sistema de detección y procesos físicos de producción de partículas.
2. **Instalar el tanque:** Para la instalación del tanque seguimos los siguientes pasos:
  - Configurar y construir el tanque: Se define el material, geometría y dimensiones del tanque.
  - Implementar el tanque: Con los criterios anteriores se procede a la instalación.
3. **Calibrar el PMT:** Para calibrar el foto detector procedemos como sigue:
  - Determinar el voltaje óptimo de operación del PMT acoplado al WCD.
  - Determinar el factor de conversión de carga QDC.
  - Determinar la respuesta espectral del PMT.
  - Determinar la eficiencia cuántica (QE) del tubo foto detector.
4. **Calibración del sistema electrónico:** En cuanto a la electrónica del sistema utilizaremos la que usa el proyecto LAGO en sus detectores. La calibración del sistema electrónico corresponde a:
  - Determinar parámetros de funcionamiento para la placa electrónica que tiene el divisor de tensión, la fuente de alta tensión y el amplificador del impulso de salida.
  - Determinar parámetros de funcionamiento del sistema de adquisición de datos.
5. **Estudiar el  $N_aCl$  como aditivo para mejorar la detección de neutrones con un WCD:** Implementar metodología de medidas con el WCD, para evaluar diferentes porcentajes del  $N_aCl$  como aditivo combinados en agua y determinar la eficiencia de detección de neutrones.



## 6. Cronograma y resultados

Item	Actividades	15 -30 Sept.	1 - 15 Oct.	15 -31 Oct.	1 -15 Nov.	15 - 30 Nov.
1	Simular el sistema de detección.					
2	Instalación el tanque.					
3	Calibración del fotodetector.					
4	Calibración del sistema electrónico.					
5	Instalación del detector WCD para detectar neutrones.					



## 7. Resultados

De esta investigación se espera obtener los siguientes resultados:

1. Detector de neutrones WCD funcionando.
2. Manuscrito para revisión y presentación Final.



## 8. Bibliografía

### Referencias

- [1] Zreda, M., W.J. Shuttleworth, X. Zeng, C. Zweck, D. Desilets, T. Franz, and R. Rosolem. (2012). COSMOS: The COsmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: Pages 4079–4099. doi:10.5194/hess-16-4079-2012.
- [2] Evans, J.G., H.C. Ward, J.R. Blake, E.J. Hewitt, R. Morrison, M. (2016). Soil water content in southern England derived from a cosmic-ray soil moisture observing system: COSMOS-UK, *Hydrological Processes*, 30(26), Pages 4987–4999. doi:10.1002/hyp.10929.
- [3] Hawdon, A., D. McJannet, J. Wallace. (2014). Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across Australia. *Water Resources Research*, 50(6), Pages 5029–5043. doi:10.1002/2013WR015138.
- [4] Andreasen M., Jensen K.H., Desilets D., Franz T.E., Zreda M., Bogen H.R., Looms M.C. (2017). Status and perspectives on the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications. *Vadose Zone J.*, 16(8), Pages 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0086>.
- [5] Stowell P., Fargher S., Steer C., Thompson L.F. (2021). Scintillating thermal neutron detectors for cosmic ray soil moisture monitoring. *Journal of Instrumentation*, 16(11), Pages 1-18. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11039>
- [6] Cester D., Lunardon M., Moretto S., Nebbia G., Pino F., Sajo-Bohus L., Stevanato L., Bonesso I., Turato F. (2016). A novel detector assembly for detecting thermal neutrons, fast neutrons and gamma rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 830, Pages 191-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.079>.
- [7] Sidelnik I., Asorey H., Guarín N. (2020). Enhancing neutron detection capabilities of a water Cherenkov detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 955, Pages 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163172>
- [8] Página web: <https://khosann.com/yildiz-gemisi-atilgan-ne-zaman-4-bilimkurgu-sinemasinin-en-gercekci-yildiz>
- [9] Gaisser, T., Engel, R. y Resconi, E. (2016). *Cosmic Rays and Particle Physics* (págs. 1-11). Cambridge: Prensa de la Universidad de Cambridge. doi:10.1017/CBO9781139192194.003.
- [10] Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D. (1983). Cascade-exciton model of nuclear reactions. *Nuclear Physics A*, 401(2), Pages 329-361. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(83\)90532-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(83)90532-8).
- [11] Kohli, M., M. Schron, M. Zreda, U. Schmidt, P. Dietrich, S. Zacharias. (2015). Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmicray neutrons, *Water Resour. Res.*, 51(7), 5772–5790, doi:10.1002/2015WR017169.



- [12] Goldhagen, P., J.M. Clem, and J.W. Wilson. (2004). The energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons measured on an airplane over a wide range of altitude and latitude. *Radiat. Prot. Dosim.* 110(1-4): Pages 387–392. doi:10.1093/rpd/nch216.
- [13] Sato T., Niita K. (2006). Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere, *Radiation Research*, 166(3), Pages 544-555. <https://doi.org/10.1667/RR0610.1>
- [14] Glasstone, S. and Edlund, M. C. Elements of nuclear reactor theory, 5th Edn., Van Nostrand, New York, 416 pp., 1952.
- [15] Barton J.C., Hatton C.J, McMillan J.E. (1991). A novel neutron multiplicity detector using lithium fluoride and zinc sulphide scintillator. *Journal of Physics G: Física nuclear y de partículas*, 17(12), pages 1901-1907. [iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/17/12/011/pdf](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/17/12/011/pdf)
- [16] Scintacor product webpage, [https : //scintacor.com/products/neutron – detection – screens/](https://scintacor.com/products/neutron-detection-screens/).
- [17] Sidelnika I., Asorey H., Jerónimo J., Gómez M., (2017). Neutron detection using a water Cherenkov detector with pure water and a single PMT. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 876, Pages 153-155, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.048>
- [18] Sidelnik I., Asorey H., Guarín N. (2019). Neutron detection capabilities of Water Cherenkov Detectors, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.017>.
- [19] 24. Sidelnik I., Asorey H., Guarín N., Suárez M., Gómez M. B., Lipovetzky J., Blostein J., (2020), Simulation of 500 MeV neutrons by using NaCl doped Water Cherenkov detector, *Advances in Space Research*, Volume 65(9), Pages 2216-2222. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.02.024>