



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**Simulación del sondeo de la humedad del suelo con
neutrones cósmicos atmosféricos**

Autor: Miguel Huerta Gómez

**Tutoras: Pilar Iñiguez de la Torre
y Alejandra Granja del Río**

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	3
2. INTRODUCCIÓN	3
3. FUNDAMENTO FÍSICO	6
3.1. Neutrones Cósmicos	6
3.2. Moderación y Absorción Neutrónicas	9
3.3. Transporte Neutrónico y Método Monte-Carlo	13
3.4. Detección de Neutrones	15
4. SIMULACIONES Y RESULTADOS	18
4.1. Programa de Simulaciones Monte-Carlo	18
4.2. Cálculos en Suelos de Diferente Composición Química	20
4.2.1. Suelo de SiO ₂	21
4.2.2. Suelo calcáreo.....	27
4.2.3. Suelo de carbonato cálcico puro (CaCO ₃).....	29
4.2.4. Suelo de roca caliza	29
4.3. Modificadores	30
4.3.1. Suelo de SiO ₂ con 25% de agua y gadolinio	30
4.3.2. Aire húmedo	33
4.3.3. Influencia de una capa de nieve.....	34
4.3.4. Pozo	37
4.4. Radiación Gamma de Captura del Hidrógeno	37
5. CONCLUSIONES	39
6. INDICE DE TABLAS Y FIGURAS	40
7. BIBLIOGRAFÍA.....	41

1. RESUMEN

Utilizando los conocimientos adquiridos en el Grado, así como los específicos de Física de Neutrones, se estudia en este trabajo una actualización de una técnica existente desde mediados del siglo XX para determinar la humedad del terreno mediante la dispersión neutrónica por los núcleos de hidrógeno. A diferencia de las fuentes neutrónicas artificiales, usadas anteriormente, se considera el uso de neutrones naturales, formados como resultado de reacciones nucleares en la atmósfera catalizadas a partir de altas energías aportadas por rayos cósmicos procedentes del espacio. Se emplea el método de simulación Monte-Carlo para calcular las trayectorias de los neutrones que entran en el suelo y son rebotados al aire, llegando a puntos alejados en los que se calcula el flujo de neutrones que alcanzarían un detector emplazado sobre el suelo según se ha propuesto recientemente. Se comparan distintos tipos de terreno y se incluyen factores externos propensos a afectar las determinaciones de humedad.

ABSTRACT

Using the physics knowledge acquired during the Physics degree, as well as the specific knowledge about Neutron Physics, this work presents an update to a well-known technique that has existed since the middle of the 20th century: the determination of the soil moisture by means of the scattering of neutrons due to their interaction with hydrogen nuclei. Unlike the artificial neutron sources proposed in its predecessor method, this work proposes the use of natural neutrons formed as a result of nuclear reactions occurring in the atmosphere catalysed from high energies brought by cosmic rays from space. For this work a Monte-Carlo simulation method has been used to calculate the trajectories of neutrons that enter the ground and are bounced back into the air reaching remote points where the flux of neutrons that would reach a detector placed on the ground as recently proposed is calculated. Some of these cases include the variation between different common soils, as well as the addition of external factors which may affect the humidity measurements.

2. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es una propiedad fundamental para la vida en la Tierra y posee un papel principal en áreas como la agricultura, ganadería, geología y ciencias del suelo. Desde siglos atrás, han existido métodos variados para la medida de la humedad del suelo, que han evolucionado obteniendo resultados más precisos. Tanto a la hora de edificar una región, arar un campo para sembrar cultivos o preparar cualquier explotación minera, conocer la humedad del terreno es de principal relevancia.

Entre las técnicas para determinar la humedad del suelo [1], una de las más simples es la gravimétrica, con extracción del suelo y medida por secado en el laboratorio, o la de la resistencia eléctrica de un bloque poroso en equilibrio higrométrico con el suelo. De mayor complejidad son las reflectometrías en los dominios de frecuencia y de tiempo, la atenuación de rayos gamma y las sondas de neutrones. Por su carácter puntual no cubren grandes extensiones debido a la heterogeneidad del suelo y a la dificultad de elección de posiciones relevantes estadísticamente. En el otro extremo, los sensores remotos vía satélite basados en radiación óptica, infrarroja y de microondas rastrean extensiones mayores que 1 km².

El uso de sondas de neutrones en medidas de humedad [2] se basa en el efecto de frenado de los neutrones rápidos provenientes de una fuente artificial al colisionar elásticamente con los núcleos de hidrógeno del suelo. El principio físico en el que se fundamenta el método es ya bien conocido. Un neutrón de alta velocidad se emite desde la fuente (como la de Am-Be) y recorre una distancia donde, por las interacciones con los núcleos atómicos de los elementos del medio (en este caso hidrógeno), se frena lo suficiente para dejar de ser un neutrón libre al capturarlo uno de los núcleos del medio al que se lanzó. Cómo el frenado (y posterior captura) de los neutrones está determinado por el número de interacciones que sufran con los átomos de hidrógeno, una medida de la densidad neutrónica aportará información directa sobre la cantidad del mismo y, por ende, sobre la humedad del suelo. Las fuentes artificiales como la que se muestra en la Figura 1 pueden situarse a diferentes profundidades y se utilizan también en prospección de hidrocarburos aprovechando la misma propiedad de moderación por hidrógeno.

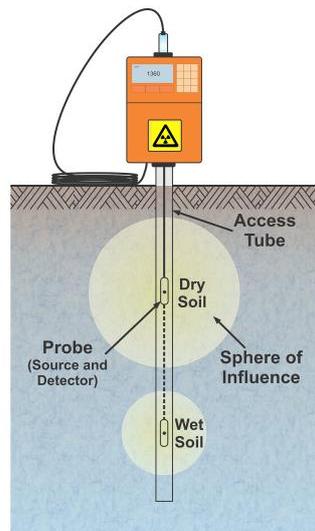


Fig. 1 Fuente artificial de neutrones y zona de efectividad del sensor sumergido bajo tierra.

Por otra parte, la idoneidad de los neutrones cósmicos como sensores de humedad se demostró por primera vez a partir de la correlación entre la cantidad de neutrones subterráneos y la cantidad de lluvia en días sucesivos [3]. Estos neutrones se forman por interacciones de los rayos cósmicos en la atmósfera, alcanzando la superficie terrestre alrededor de $0.01 \text{ neutrones cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Al encontrarse en este caso el detector de neutrones enterrado bajo el suelo, la extensión horizontal sondeada es de unas decenas de centímetros.

Más reciente y menos conocida es la técnica que motiva este trabajo, en la que el detector de neutrones cósmicos está localizado sobre el suelo y registra únicamente neutrones en el rango de energías inferiores a 1 MeV. Un único monitor de neutrones a unos pocos metros sobre el suelo es capaz de rastrear la humedad con un radio de más de 250 m a su alrededor y una profundidad de entre 10 y 80 cm [4]. Posteriormente se precisa con más detalle el alcance del método, sin embargo, esta primera aproximación es suficiente para entender la importancia de la imagen que se muestra a continuación, en la que se observan los horizontes o capas del suelo:

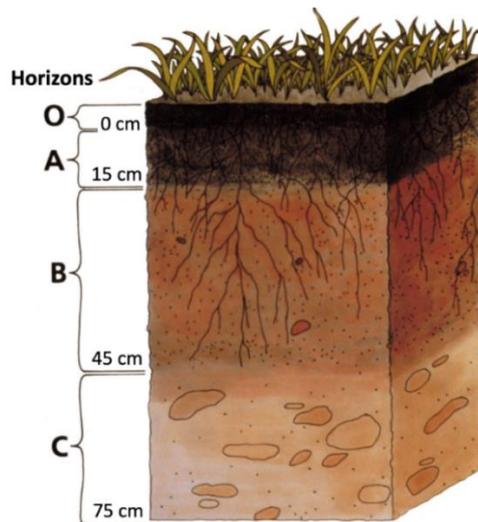


Fig. 2 Horizontes superiores del suelo. Son los adecuados para el desarrollo de las raíces.

Dado que la agricultura es una de las áreas en las que más relevancia posee determinar la humedad del suelo, es importante conocer la extensión de las raíces ya que son la parte de la planta encargada de absorber el agua. En la figura anterior se observa cómo estas se encuentran en la zona efectiva del método, es decir, la zona cubierta por el alcance de los neutrones cósmicos. Puesto que en realidad el método neutrónico detecta hidrógeno, para tener unas medidas fiables de humedad, a la hora de calibrar el sensor se precisa conocer la proporción de hidrógeno en otras formas distintas como en materia orgánica del suelo. Las calibraciones instrumentales dependen también de la localización pues, por ejemplo, una vegetación arbórea espesa interferirá con los neutrones transitando hacia el suelo.

Los neutrones presentan un espectro energético que es sensible al contenido en agua, debido a las propiedades moderadoras de los núcleos de hidrógeno. Sin embargo, los que el suelo refleje hacia la atmósfera recorrerán mayores distancias por la carencia de este elemento u otros moderadores en el aire. Esta propiedad permite al sensor obtener información sobre neutrones procedentes de zonas alejadas horizontalmente cientos de metros del mismo. La magnitud de la escala horizontal no es abordable por las restantes técnicas, a no ser que se utilizara un elevado número de sensores (exceptuando los sensores vía satélite los cuales suponen una menor precisión).

En este trabajo se realizan simulaciones Monte-Carlo del transporte neutrónico usando un modelo sencillo en el que una fuente puntual sobre el suelo imita la llegada de neutrones cósmicos. La finalidad es la de comprender el sondeo de agua. Analizando el espectro energético de los neutrones a diferentes distancias de la fuente, se estudia la sensibilidad de los neutrones al contenido en agua en función de sus energías. Además, dicho análisis permite determinar la extensión horizontal, monitoreada por un único detector que se encuentra sobre el suelo. Mediante la representación de las trayectorias de los neutrones se obtiene la profundidad del suelo de estudio. Se simulan varios suelos de diferente composición química y se estudia la influencia de la humedad del aire y la existencia de una capa de nieve sobre el terreno. El código PHITS [5] es el utilizado en las simulaciones.

3. FUNDAMENTO FÍSICO

Se presenta a continuación el conocimiento básico que permite la comprensión de las simulaciones realizadas.

3.1. Neutrones Cósmicos

Los rayos cósmicos galácticos (GCR) son núcleos de alta energía que llegan desde fuera del sistema solar concretamente protones (90%), iones de helio (9%), otros iones más pesados (1%). Junto con las partículas energéticas solares (SEP), o rayos cósmicos solares, constituyen la radiación en las altas altitudes de la atmósfera terrestre. Las componentes más energéticas de esta radiación cósmica primaria interaccionan con las moléculas, átomos y núcleos de la atmósfera. Esto produce cascadas de radiación secundaria que consiste en partículas cargadas, neutrones, rayos γ y X, radiación de frenado y también mesones μ y π [6].

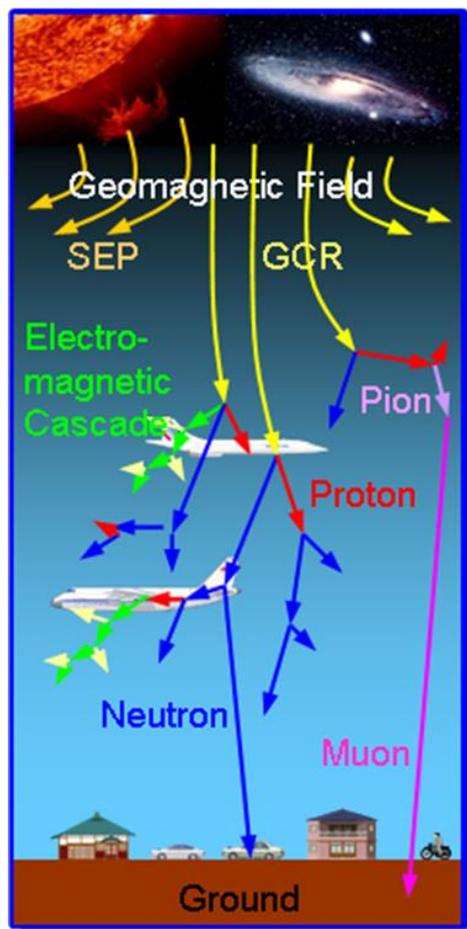


Fig. 3 Interacciones de rayos cósmicos en la atmósfera, <https://phits.jaea.go.jp/expacs/main-eng.htm>

Se suele denominar rayos cósmicos únicamente a aquellos que no provienen del sistema solar (GCR). Las SEP no son lo suficiente energéticas como para sobrepasar el campo magnético

terrestre (auroras boreales), sin embargo, tendrán también cierta influencia en los GCR como se explica a continuación. A diferencia de los SEP, los GCR pueden ser tan energéticos que no solo atraviesen el campo magnético, sino también la atmósfera terrestre. Aún no se conoce con certeza la procedencia de todos los rayos cósmicos que llegan a la Tierra, aunque principalmente se forman en las supernovas de la Vía Láctea. Las supernovas son potentes explosiones de estrellas masivas que han alcanzado un estado terminal en su desarrollo. Una enorme cantidad de energía es liberada durante la explosión en un amplio rango de longitudes de onda. La explosión de supernova causa un inminente aumento en la luminosidad de la estrella moribunda, que puede llegar a eclipsar momentáneamente la galaxia entera en la que esta reside. [7]

Como se introdujo, la actividad solar influirá en la proporción de rayos cósmicos galácticos que llegan a la Tierra. Se muestra la Figura 4:

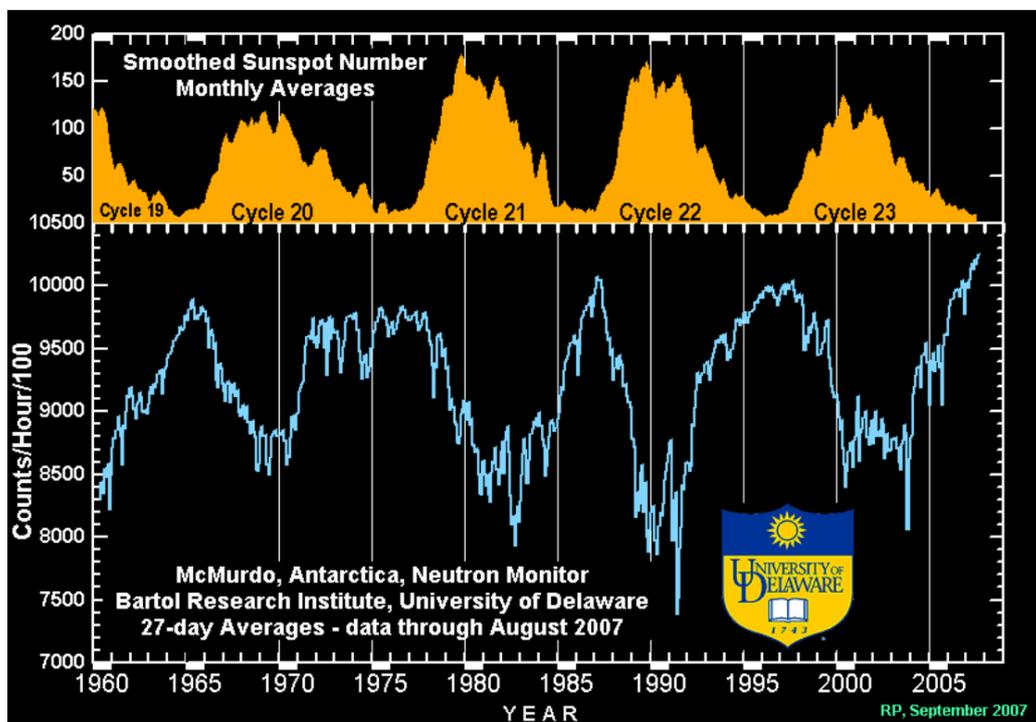


Fig. 4 Cuentas por hora de rayos cósmicos llegando a la Tierra en función del tiempo. En la parte superior (naranja) se representa la actividad solar.

Se utiliza el mismo eje de tiempos con el objetivo de visualizar la relación entre ambas.

La actividad solar aumenta y disminuye con un período de unos 11 años, se denominan ciclos solares. El número de manchas solares (*Sunspot*) indica el nivel de actividad solar. Las emisiones de materia y campos electromagnéticos del Sol aumentan durante la alta actividad solar, lo que dificulta que los GCR lleguen a la Tierra. Por tanto, tal y como se aprecia en la figura, la intensidad de los rayos cósmicos es menor cuando la actividad solar es alta.

Las energías de los rayos cósmicos oscilan desde los pocos giga-electronvoltios (GeV) hasta energías que ni en el Large Hadron Collider del CERN se han alcanzado a día de hoy, del orden de 10^{20} eV. Sin embargo, el flujo de llegada de estos a la atmósfera disminuye con la energía. Los neutrones que forman el núcleo de los diferentes átomos de los gases de la atmósfera pueden liberarse con la energía aportada por los rayos cósmicos que, en ocasiones, puede descomponer

los nucleones (neutrones y protones) en quarks. Estos neutrones libres son los denominados neutrones cósmicos atmosféricos, de interés en este trabajo.

Los neutrones cósmicos a nivel del mar dan lugar a una dosis de radiación despreciable (1 nanoSievert por hora) comparada con la dosis total ambiental que recibimos [8]. Sin embargo, pueden causar daños en dispositivos electrónicos. Por el contrario, a las altitudes de los vuelos comerciales constituyen la fuente principal de la dosis de radiación [9]. Estos hechos han dado lugar a una investigación activa en las últimas décadas, midiéndose experimentalmente su espectro energético a diferentes altitudes de la atmósfera y a nivel del mar [10]. Como se observa en la Figura 5 dicho espectro cubre 12 órdenes de magnitud extendiéndose hasta 10 GeV.

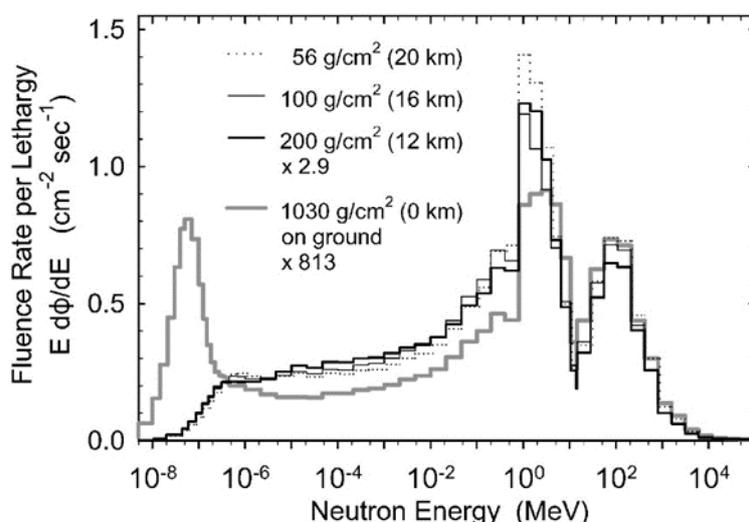


Fig. 5 Espectro energético de los neutrones cósmicos.

El pico de mayor energía corresponde a neutrones producidos en cascadas mientras que el próximo a 1 MeV representa a los neutrones que se forman por evaporación en los núcleos que se encuentran en estados excitados tras las cascadas.

Se puede entender la interacción de una partícula de alta energía con un núcleo atómico como un proceso de dos etapas. El "aviso" o "cascada": colisiones individuales nucleón-nucleón que resultan en el escape de algunas partículas del núcleo. Los que no escapan acaban repartiendo su energía a lo largo del núcleo, que se eleva así a un estado altamente excitado, y cuya posterior desintegración por emisión de partículas de baja energía conforma la segunda etapa de la reacción, la "evaporación" [11].

Las diferentes curvas (véase la leyenda) corresponden a la presión atmosférica en las alturas señaladas entre paréntesis respecto al nivel del mar. El espectro en la superficie (curva gris) presenta una contribución de neutrones rebotados, que tienen energías muy bajas debido a las colisiones con los materiales del suelo dando lugar al pico de menor energía. Entre este último y los dos picos a la derecha se encuentran los neutrones que han perdido energía en la atmósfera y también debido al rebote con el suelo.

Además de medidas experimentales como las de la Figura 5, también se han realizado cálculos teóricos del espectro [12] [13].

3.2. Moderación y Absorción Neutrónicas

La física de neutrones considera tres tipos de neutrones en función de sus energías:

- **Térmicos:** Son los que, después de moderarse (frenarse) en sucesivas colisiones, se encuentran en equilibrio térmico con el medio (energías KT, 0.025 eV o 2200 m/s a 20°C). En este trabajo consideramos como térmicos a los que tienen energías inferiores a 0.4 eV.
- **Epitérmicos:** Neutrones con energías de entre 0.4 eV y 0.1 MeV (10^5 eV). Son los que están siendo moderados desde que son emitidos hasta alcanzar el rango térmico. Este tipo de neutrones posee gran peso en este trabajo puesto que la principal moderación es debida al hidrógeno del agua.
- **Rápidos:** Los más energéticos y cuya energía sobrepasa los 0.1 MeV. Estos neutrones son los que se emiten desde las fuentes, como son la de fisión espontánea del californio, de fisión inducida en uranio, las isotópicas como la de americio-berilio o los propios neutrones cósmicos como ejemplos con una distribución ancha de energías.

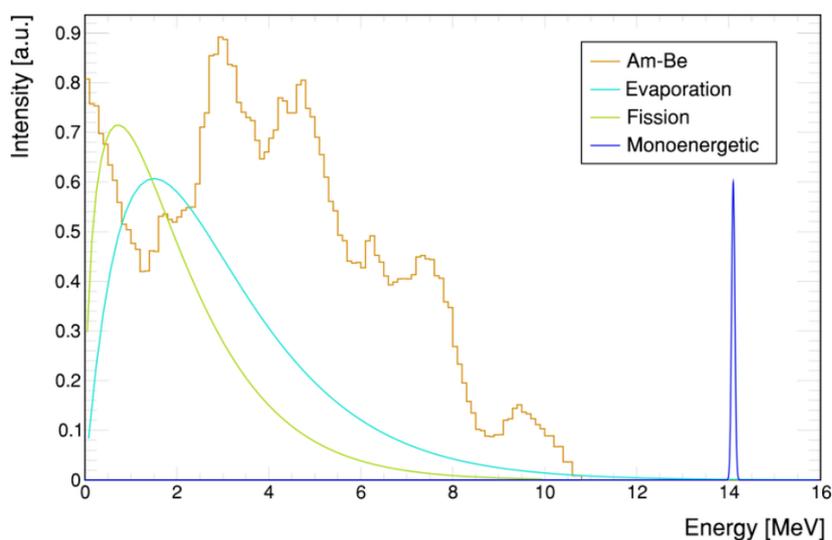


Fig. 6 Espectros energéticos de cuatro fuentes artificiales de neutrones.

El caso monoenergético de 14 MeV corresponde a una fuente de fisión deuterio-tritio. Aún no ha sido posible producir la fusión rentable (que genere más energía que la necesaria para fusionar los átomos), sin embargo, hace tiempo que se usa esta reacción como fuente de neutrones monoenergéticos. Se puede obtener esta energía de valor tan preciso debido a que el neutrón se produce en un proceso a dos cuerpos: $d + T \rightarrow He + n$.

En lo que sigue se explican las diferentes interacciones que sufren los neutrones según su energía. Los neutrones, al contrario que las partículas cargadas, atraviesan la nube electrónica de los átomos sin frenarse debido a interacciones electromagnéticas.

Cuando chocan con los núcleos pueden ser dispersados a menores energías (se denomina moderación) y también pueden ser absorbidos por los mismos. Estos procesos ocurren con una probabilidad que se cuantifica mediante la sección eficaz microscópica σ definida de la siguiente manera. Suponiendo un medio con una densidad volumétrica de núcleos n , la probabilidad P de que un neutrón interactúe con uno de estos núcleos al recorrer la distancia x viene determinada por $P = n \sigma x$. El producto $n \sigma$ es la sección macroscópica Σ .

La pérdida de velocidad de los neutrones ocurre mediante choques tanto elásticos como inelásticos con los núcleos. En lo que concierne a este trabajo son de especial interés los primeros. Se representa en la Figura 7 las secciones eficaces de colisiones elásticas para hidrógeno (rojo), nitrógeno (verde), carbono (negro), silicio (amarillo) y aluminio (gris) en función de la energía cinética del neutrón [14].

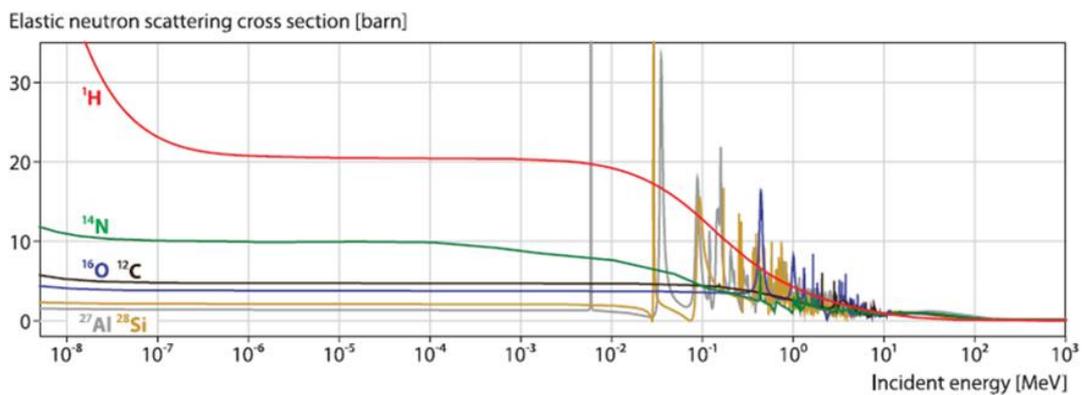


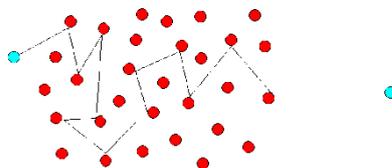
Fig. 7 Secciones eficaces (en barns) de dispersión elástica de neutrones para distintos átomos.

Después de una colisión elástica el núcleo queda en su estado fundamental, conservándose la energía cinética del sistema neutrón-núcleo. La energía final E' del neutrón en función de la inicial E es:

$$\frac{E'}{E} = \frac{1+\alpha}{2} - \frac{1-\alpha}{2} \cos \theta, \text{ con } \alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

siendo θ el ángulo de dispersión en el sistema centro de masas y A el número de masa del núcleo. Las energías máxima y mínima con las que rebota el neutrón son E y αE . Cuanto menor es A más energía pierde. El hidrógeno tiene $A=1$, el menor posible.

Esquema 1: Neutrón en azul colisionando con núcleos en rojo.



Si el núcleo blanco es pesado, el neutrón apenas se frena, como una pelota de golf contra una de bolos. Si el núcleo blanco es ligero retrocede y el neutrón se frena mucho, como una bola de golf contra otra. El hidrógeno es el elemento con el núcleo más ligero (un protón) y los materiales con alto contenido en hidrógeno (polietileno, petróleo, agua) son los mejores moderadores de neutrones (la masa de estos es prácticamente la misma que la del protón). Tras unas pocas decenas de colisiones (Tabla 1), los neutrones son tan lentos como el movimiento térmico de los átomos y por eso se denominan neutrones térmicos.

Si además de elástica, la colisión es isótropa en el c.d.m., todas las energías finales son igualmente probables y la probabilidad de cada una de ellas es el inverso del intervalo de valores. De esto se deduce que la energía media después de un choque es:

$$\overline{E_1} = \int_{\alpha E}^E E_1 \frac{dE_1}{E(1-\alpha)} = \frac{E(1+\alpha)}{2}$$

Si cambiamos la variable energía por la variable letargia, u , definida como el logaritmo neperiano del cociente entre la energía con la que se produce el neutrón (valor fijo E_0) y E , entonces la variación en una colisión es independiente de la energía como se deduce en la siguiente ecuación:

$$\xi = \Delta u = \int_{\alpha E_i}^{E_i} [u_f - u_i] P(E_i \rightarrow E_f) dE_f = \int_{\alpha E_i}^{E_i} \left[\ln \left(\frac{E_0}{E_f} \right) - \ln \left(\frac{E_0}{E_i} \right) \right] \frac{1}{(1-\alpha)E_i} dE_f$$

$$\xi = \Delta u = 1 + \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \ln \alpha$$

Observando la Tabla 1 se aprecia cómo el hidrógeno destaca notablemente sobre los demás. Comparando las propiedades moderadoras del agua con el hidrógeno, se observa la gran similitud a pesar del átomo de oxígeno cuya capacidad de frenado es mucho menor como también puede verse en la misma tabla. Esta propiedad del agua es clave en el estudio realizado a lo largo del trabajo.

Tabla 1: Número de colisiones necesarias para moderar neutrones desde 2 MeV hasta el rango térmico y hasta 100 eV para algunos elementos comunes en el suelo.

Element	Mass [u]	log. energy decrement ξ	avg. no. collisions n_{col}	
			to thermal	to 100 eV
H	1	1	18	10
H ₂ O	-	0.92	20	11
N	14	0.136	135	73
O	16	0.12	153	82
Al	27	0.0723	255	137
Si	28	0.0698	264	142
Fe	56	0.0353	522	280

En cuanto a la absorción neutrónica, un aspecto importante es que la sección eficaz es mayor en el rango térmico, hecho que se aprovecha a la hora de detectar los neutrones, cómo se explica más adelante. La Figura 8 muestra la sección eficaz del gadolinio 157 en función de la energía del neutrón incidente. Se ha elegido este elemento debido a su gran sección eficaz para neutrones térmicos, además se estudia la presencia de gadolinio en suelo más adelante.

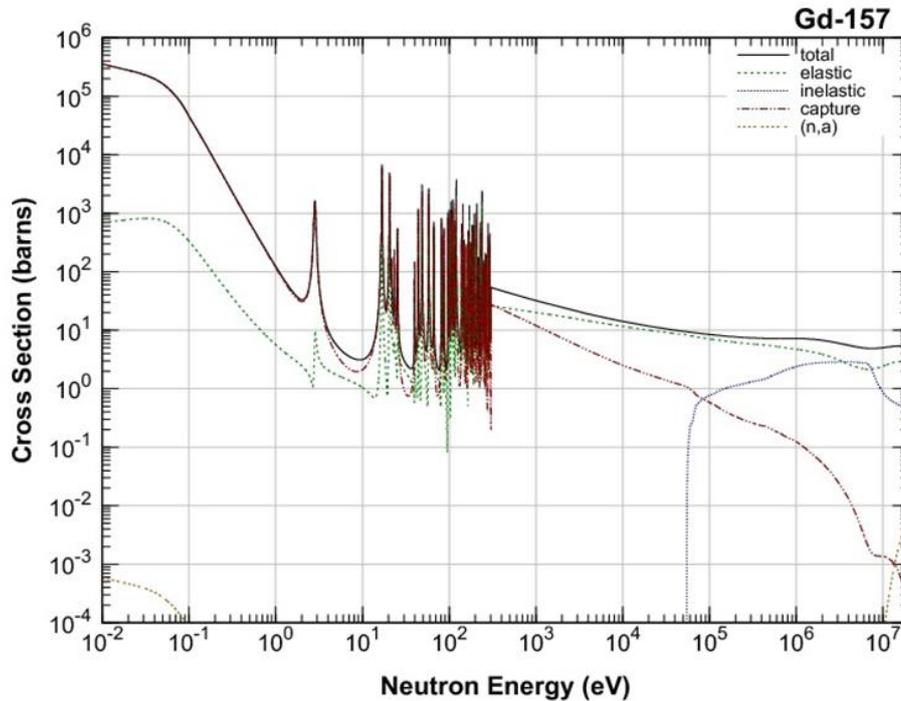


Fig. 8 Sección eficaz del gadolinio 157 en función de las energías del neutrón incidente.

Se diferencian tres regiones según aumenta la energía del neutrón incidente. Se aprecia cómo en la primera parte, a excepción de la región correspondiente al rango térmico, donde la caída es más suave, la sección eficaz total disminuye linealmente, cayendo varios órdenes de magnitud. La siguiente franja comienza en el orden de los eV, donde presenta un pico. Un orden de magnitud después (decenas de eV), empieza a oscilar desde los pocos barns hasta los miles de barns con una frecuencia elevada, siendo estos picos cada vez más próximos entre sí. Se denominan picos de resonancia y son el resultado de la afinidad del núcleo blanco con los neutrones cuyas energías coinciden estrechamente con sus niveles de energía discretos, cuánticos. Es decir, cuando el neutrón incidente posea una energía coincidente con la energía de uno de los estados excitados del núcleo del gadolinio, la probabilidad de absorción aumenta drásticamente, para acto seguido (en cuanto se supere esta energía) volver a caer al rango anterior. En la última región, cuando la energía del neutrón supera los aproximadamente 300 eV, la sección eficaz total se estabiliza decreciendo de manera suave.

Por tanto, en este caso, se aprecia cómo cuanto menos energético sea el neutrón, más sensible será el gadolinio al mismo, siendo especialmente significativo para energías de hasta los 0.1 eV.

Con respecto a las energías de resonancia mencionadas en la gráfica anterior, se observa en la Figura 7 que otros núcleos más ligeros que el gadolinio también presentan resonancias a energías mayores. En la Figura 9 se presenta el hidrógeno, en el que no existen estas resonancias.

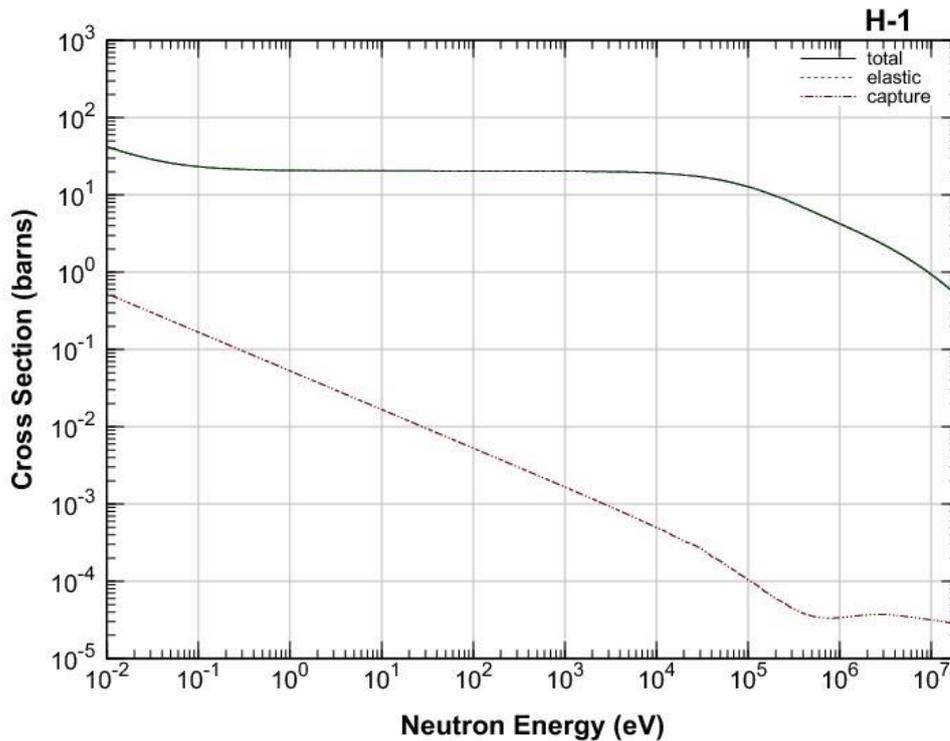


Fig. 9 Secciones eficaces de absorción (discontinua) y dispersión (continua) del hidrógeno.

El núcleo de hidrógeno (un protón cargado), al captar un neutrón, se transformará en deuterio (${}^2_1\text{H}$). De la física nuclear se conoce que el núcleo de deuterio no admite estados excitados, luego no aparecerán estas resonancias en ninguna de las energías de los neutrones incidentes. Con respecto a la sección eficaz de absorción, destaca su rápida caída con el aumento de energía del neutrón.

3.3. Transporte Neutrónico y Método Monte-Carlo

Se conoce como transporte neutrónico a la teoría que describe la propagación de los neutrones a través de un medio material. Esto incluye la transmisión desde un punto de colisión al siguiente, la dispersión, la captura neutrónica y otros procesos posibles como la fisión [15].

Para un haz de neutrones, se demuestra fácilmente que el número de interacciones en un cilindro de eje paralelo a su velocidad v por cm^3 y por segundo es igual a $\Sigma v N$, siendo N el número de neutrones por cm^3 y Σ la sección eficaz macroscópica para la interacción considerada. El flujo neutrónico es el producto $v N$ y se expresa en neutrones por cm^2 y por segundo.

Consideremos ahora neutrones moviéndose en todas las direcciones y sea $\Psi(r, \Omega, E)$ la densidad angular de flujo en el punto r , definida como el producto $v N(r, \Omega, E)$. Su significado es el número de neutrones de energía E que cruzan la superficie unidad perpendicular a la dirección de

su movimiento por unidad de tiempo. La **ecuación de transporte estacionaria** expresa que el número de neutrones con energía cinética E y dirección del movimiento Ω que aparecen en un volumen diferencial alrededor de un punto es el mismo que el de los que desaparecen:

$$\Omega \nabla \Psi(\mathbf{r}, \Omega, E) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \Psi(\mathbf{r}, \Omega, E) = S(\mathbf{r}, E)$$

siendo Σ_t la sección eficaz total, suma de la de dispersión y la de absorción. S es una integral que incluye todos los procesos por los que aparecen neutrones con E y Ω provenientes de cualquier otra energía y dirección por colisiones o producidos por fisión (en caso de que hubiera un elemento fisionable) o provenientes de una fuente externa.

El flujo total integrado a todas las direcciones es:

$$\Phi(E) = v \int_{4\pi} N(\Omega) d\Omega$$

Su significado es el número de neutrones de energía E (velocidad v) que cruzan por unidad de tiempo las superficies unidad de todas las orientaciones posibles Ω .

Mientras que la ecuación de transporte aporta el valor medio del flujo de neutrones, el Monte-Carlo (MC) es una aproximación para obtener el flujo, pero sin resolver esa ecuación. Emplea números aleatorios para, utilizando unas secciones eficaces conocidas, generar diferentes historias de neutrones. El resultado de MC será mejor o peor dependiendo de lo bien que se encuentre representada la población neutrónica en las historias generadas, las cuales son una secuencia de eventos que ocurren probabilísticamente.

A continuación, se explica la generación de los eventos mediante los números aleatorios y las secciones eficaces conocidas. Los números aleatorios que nos interesan aquí son una secuencia de valores R con distribución uniforme entre 0 y 1, es decir, que cualquier valor es igualmente probable.

Supongamos que un neutrón de energía E va a sufrir una interacción en el punto r en un medio compuesto de agua ligera H_2O . Para seleccionar el tipo de interacción y continuar con su historia, se divide el intervalo 0-1 en los cuatro intervalos Σ_s^H / Σ_t , Σ_a^H / Σ_t , Σ_s^O / Σ_t y Σ_a^O / Σ_t . Estos intervalos se calculan con las composiciones atómicas y secciones eficaces microscópicas de scattering (s) y absorción (a) conocidas en el punto r para los distintos isótopos y para la energía en cuestión.

Por ejemplo, supongamos que esos valores fueran 0.5, 0.2, 0.2 y 0.1. Entonces, si el siguiente número aleatorio no usado de la secuencia está entre 0.7 y 0.9 la interacción seleccionada es un scattering con el núcleo de oxígeno, y si está entre 0.5 y 0.7 es una absorción en hidrógeno. Si el scattering es elástico e isótropo en el sistema del centro de masas, la energía final E' puede tomar con igual probabilidad cualquier valor entre E y αE siendo $\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$.

Entonces, si R es el siguiente número aleatorio, la energía del neutrón tras la colisión seleccionada es $E' = (E - R(E - \alpha E))$.

No todas las variables a seleccionar tienen una distribución uniforme de valores dentro de su rango. Esto ocurre con la probabilidad de que el neutrón tenga su primera interacción después de recorrer una distancia x . De lo que se explicó anteriormente se deduce que la probabilidad de que

un neutrón emitido en el origen recorra una distancia x y tenga una interacción cualquiera entre x y $x+dx$ es igual a:

$$p(x)dx = e^{-\Sigma_t x} \Sigma_t dx$$

Por tanto, no se puede determinar la localización del punto de interacción directamente de la selección del número aleatorio. Pues bien, consideremos la función $F(x)$ siguiente:

$$F(x) = \int_0^x p(x')dx' = 1 - e^{-\Sigma_t x}$$

la cual, según x varía en su rango accesible, va creciendo monótonamente de 0 a 1. Por tanto, para cada punto de interacción observado entre 0 e ∞ , existe un número $F_i (= F(x_i))$ entre 0 y 1. Veamos que si los x_i están distribuidos según $p(x)$, entonces los F_i están distribuidos uniformemente.

Para demostrarlo definimos $P(F) dF$ como la probabilidad de que un valor de F se encuentre entre F y $F+dF$. Por la correspondencia entre los valores de F y los de x , tenemos evidentemente que:

$$P(F) dF = p(x) dx, \text{ y como } dF = p(x) dx, \text{ entonces } P(F) = 1$$

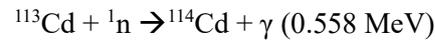
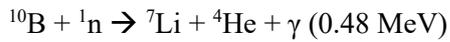
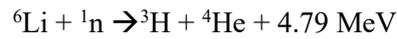
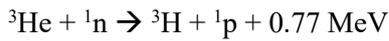
Es decir, la distribución de los números F es uniforme. Así pues, a partir de la secuencia de números aleatorios, seleccionamos el valor de F para un evento dado y determinamos el valor de x a partir de la ecuación anterior:

$$x = - \frac{\ln(1 - F)}{\Sigma}$$

De esta manera las historias se generan según su probabilidad de ocurrencia.

3.4. Detección de Neutrones

La respuesta de un detector de impulsos eléctricos, así como otros de tipo pasivo, depende de la cantidad de carga producida por ionización. Los neutrones no ionizan directamente el medio por el que se desplazan, sino que a partir de reacciones nucleares producen radiaciones ionizantes. Lo más habitual es aprovechar las altas secciones eficaces de absorción que poseen algunos isótopos en el rango térmico como se vio en la Figura 9. Las reacciones de captura más frecuentemente utilizadas en la detección de neutrones térmicos son las siguientes:



Las secciones eficaces correspondientes aparecen en la Tabla 2 junto a las de otros isótopos. Se trata de secciones eficaces respecto al rango térmico de los neutrones.

Tabla 2: Abundancia de distintos isótopos y sus secciones eficaces de absorción de neutrones térmicos.

Isótopo	Abundancia natural, %	$\sigma_a(\text{barns})$
${}^1\text{H}$	99,985	0,333
${}^2\text{H}$	0,015	0,0005
${}^3\text{He}$	99,99986	5333,0
${}^6\text{Li}$	7,5	940
${}^7\text{Li}$	92,5	0,045
${}^{113}\text{Cd}$	12,22	20600,0
${}^{10}\text{B}$	20	3835,0
${}^{11}\text{B}$	80	0,006
${}^{149}\text{Sm}$	13,9	42080,0
${}^{155}\text{Gd}$	14,8	61100,0
${}^{157}\text{Gd}$	15,7	259000

Primero el neutrón es absorbido y se forma un núcleo compuesto excitado que se transforma en los productos de la reacción, que son partículas cargadas o rayos gamma según cada caso, y son las que ionizan el material sensible del detector. En el departamento donde se realiza este TFG se han utilizado y diseñado varios tipos de detectores de neutrones térmicos [16], [17] los más usados son tubos contadores de impulsos rellenos de gas de BF_3 o de helio 3.

Pero antes de alcanzar el material donde se encuentra el elemento absorbente, los neutrones deben moderarse hasta el rango térmico, ya que recordemos su sección eficaz es alta para estos rangos, pero disminuye con la energía. Para esto, el detector en el que se producen las reacciones anteriores se rodea de un material de alto contenido en hidrógeno, típicamente polietileno, el cual se compone de largas cadenas de C_2H_4 .

En la detección de los neutrones cósmicos se emplea un conjunto de esferas de diferentes tamaños y, a partir de la respuesta del detector dentro de cada una de ellas, se obtiene el espectro por deconvolución [18].

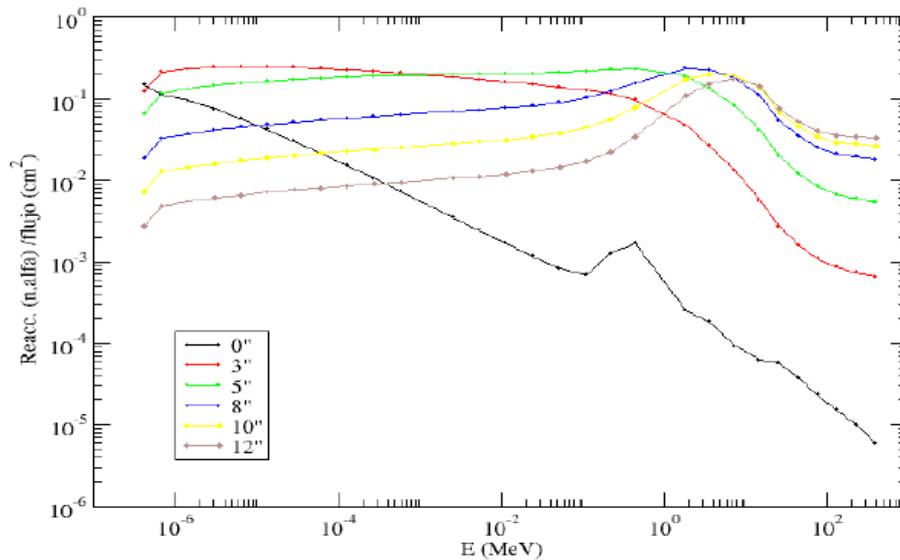


Fig. 10 Reacciones ionizantes llevadas a cabo en el detector de neutrones en función de su energía.

Las diferentes curvas hacen referencia al grosor en pulgadas (") de la esfera Bonner que recubre al detector en cada caso. Para comenzar se observa el caso del detector al descubierto (línea negra) en el cual se aprecia claramente la predisposición del mismo hacia los neutrones menos energéticos (térmicos), y cómo para neutrones epitérmicos o rápidos las ionizaciones que producirá serán despreciables en comparación. En la esfera de menor grosor (rojo) se aprecia una ionización aproximadamente constante hasta el orden de los MeV, donde empieza a decaer rápido de manera análoga al caso anterior. Respecto al resto de casos, se observa cómo la ionización producida por el detector se mantiene dentro de unos márgenes constante para todo el rango energético, presentando incluso un pico para los neutrones con energías del orden de MeV.

Se aprecia cómo al aumentar el recubrimiento del detector, este captará menos neutrones, por lo que habrá un valor crítico del grosor de la esfera. Al superarlo, todos los neutrones de un rango de energía serán moderados antes de poder alcanzar el detector.

Se muestra en la Figura 11 un mapa con todos los puestos de CRNS (Cosmic Ray Neutron Sensor) construidos en Europa, así como los climas en dichos puntos según la clasificación Köppen. Se encuentran también señalados con una cruz los lugares donde existen CRNS pero no se utilizaron para la toma de datos del estudio de donde se obtuvo la imagen, o los lugares donde se planea instalar un nuevo sensor CRNS.

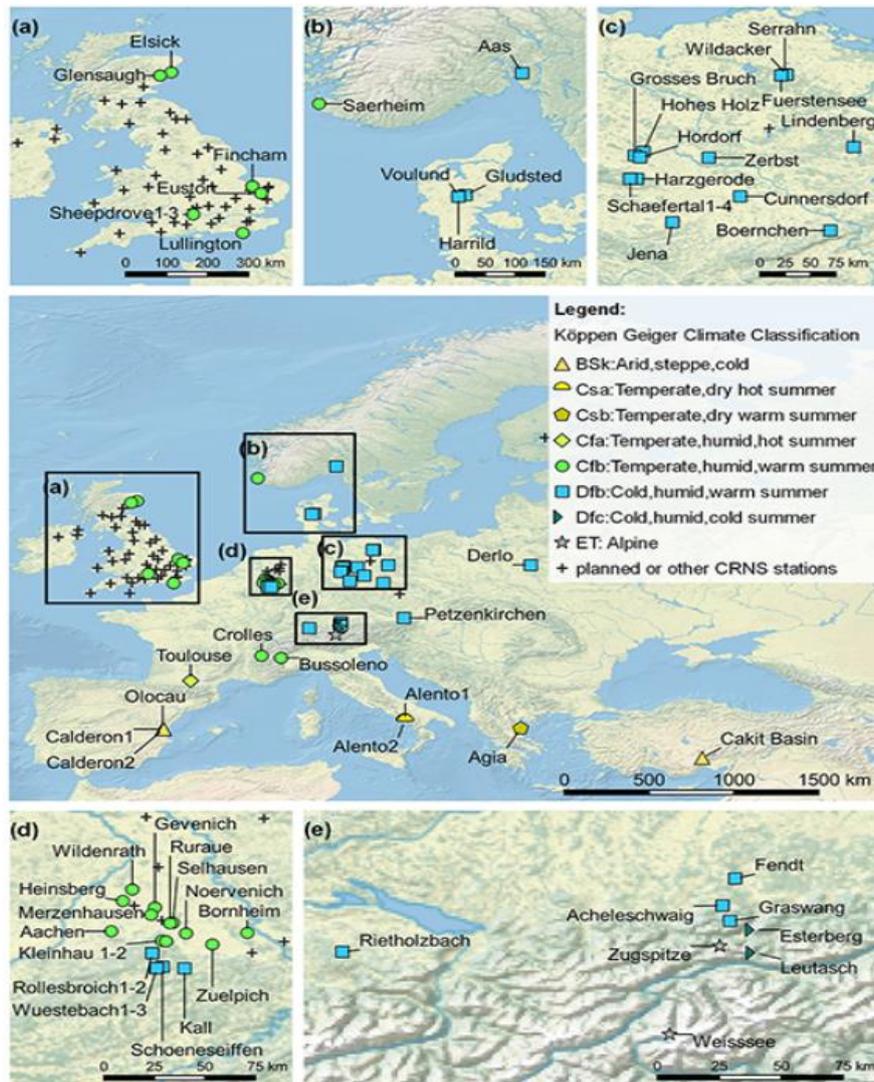


Fig. 11 Puestos de monitorización de neutrones cósmicos en Europa,
<https://essd.copernicus.org/articles/14/1125/2022/essd-14-1125-2022-discussion.html>

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

4.1. Programa de Simulaciones Monte-Carlo

Las simulaciones se realizan con el código PHITS [5] versión 3.26A suministrado por la Agencia Japonesa de Energía Atómica JAEA. El código contiene la librería de secciones eficaces JENDL [14] para energías neutrónicas de hasta 20 MeV.

En el **input**, o datos de entrada, se dan las proporciones relativas de los diferentes elementos que componen el suelo y la densidad total, puesto que esos parámetros determinan las secciones eficaces macroscópicas a partir de la librería del código. Además, se especifican las geometrías de los materiales y el espectro energético y distribución angular de la fuente de neutrones iniciales. Se utiliza una fuente puntual con una amplitud de dispersión de 45°.

También se define la celda de simulación o el volumen en el que se transportan los neutrones, es decir, fuera del mismo los neutrones ya no sufren más interacciones. Dado que se va a simular un volumen de terreno, y que es esencial estudiar los neutrones que salgan rebotados hacia el exterior, la celda consta de dos partes, el suelo y el aire. Se analiza un ejemplo a continuación:

```
[ M a t e r i a l ]
mat[1]   O (1.0*0.25)  H  (2.0*0.25)   Si (1.0*0.75) O  (2.0*0.75)
$ mat[1]   Si 1.0  O  2.0
mat[2]   N  0.8
         O  0.2

[ C e l l ]
100      -1          10          $void outsphere
$ 101     1 -2.6     -11   $soil
$ 101     1 -1.     -11   $agua
101      1 -(2.6*0.75+0.25) -11   $suelo-agua

110      2 -1.22e-3 -10 11   $air

[ S u r f a c e ]
10      RPP   -20000.0  20000.0   -20000.0  20000.0   -1000.0  20000.0
11      RPP   -20000.0  20000.0   -20000.0  20000.0   -1000.0  0.0
```

Fig. 12 Fragmento de uno de los archivos de entrada.

En [Material] se especifican las composiciones atómicas de los materiales que, en el caso mostrado, corresponde a un suelo de SiO₂ con una proporción molar del 25% de agua. En [Cell] se establece el contenido de las dos regiones 101 (suelo) y 110 (aire) de la celda de simulación y sus densidades respectivas, 2.6 y 1.22 10⁻³, en g/cm³ ((las líneas que comienzan con \$ son comentarios del editor). [Surface] define las geometrías mediante regiones paralelepípedicas (RPP) 10 y 11, que separan los volúmenes de las regiones ocupadas por los distintos materiales. El caso mostrado corresponde a una celda paralelepípedica de 200 m por 200 m de base (x,y), con una altura de 210 m (z), donde se distinguen los dos medios materiales a dos alturas: suelo, desde -10 m a 0 m; y aire, desde 0 m a 200 m. En la Figura 13 se muestran las regiones para 100 m en lugar de 200 m.

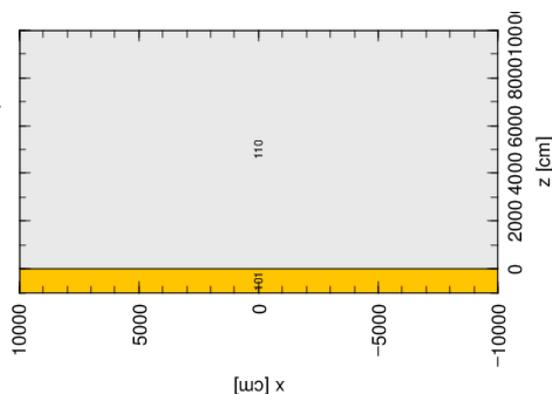


Fig. 13 Región paralelepípedica formada por suelo (amarillo) y aire (gris).

El **output**: el programa calcula el flujo de neutrones que mediría el detector colocado en determinados puntos. Este flujo se da de dos maneras: como función de la energía discretizada en grupos o intervalos finos, e integrado a los tres grupos energéticos: térmicos, epitérmicos y rápidos. El valor corresponde al número de neutrones captados por cada neutrón emitido por la fuente. Si se desea comparar una simulación con medidas experimentales hay que conocer la intensidad de la fuente y su espectro energético para determinar el número de neutrones de cada energía que alcanzan el detector. Con una calibración previa del detector se dispondrá de la relación entre número de cuentas (impulsos eléctricos) y número de neutrones.

También se puede solicitar al programa que genere un output con las trazas o trayectorias de los neutrones en un rango de energías de interés. Se muestran en la Figura 14 las trayectorias de 100 neutrones de 20 MeV emitidos por la fuente puntual con una amplitud de 45°, pero habiendo sustituido el suelo de la parte izquierda por aire para observar a una escala grande los neutrones de la fuente inicial, puesto que en el suelo la distancia que recorren es obviamente mucho menor.

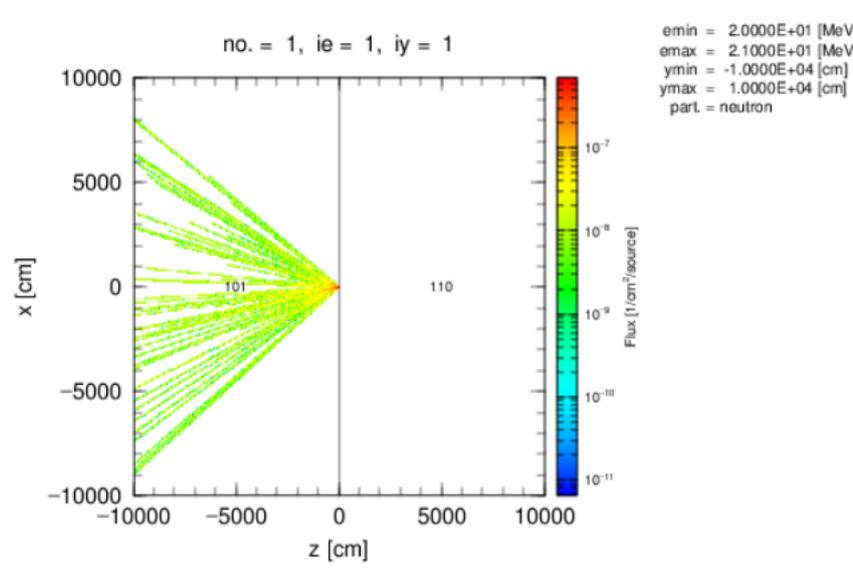


Fig. 14 Trayectorias de los neutrones con la energía inicial de la fuente.

Respecto a la información superior derecha, determina el rango de energías ($e_{min} \rightarrow e_{max}$) representado, es decir, en el momento en el que el neutrón salga de ese rango, su trayectoria dejará de ser visible en dicho gráfico. En el caso de estudio se trata de un rango muy pequeño en el que únicamente se representan los neutrones de 20 MeV, energía con la que son disparados. El color de las trazas se relaciona con su concentración, el cual corresponde al flujo neutrónico como se aprecia en la leyenda de la derecha. De ahí que en la fuente se observe un punto rojo.

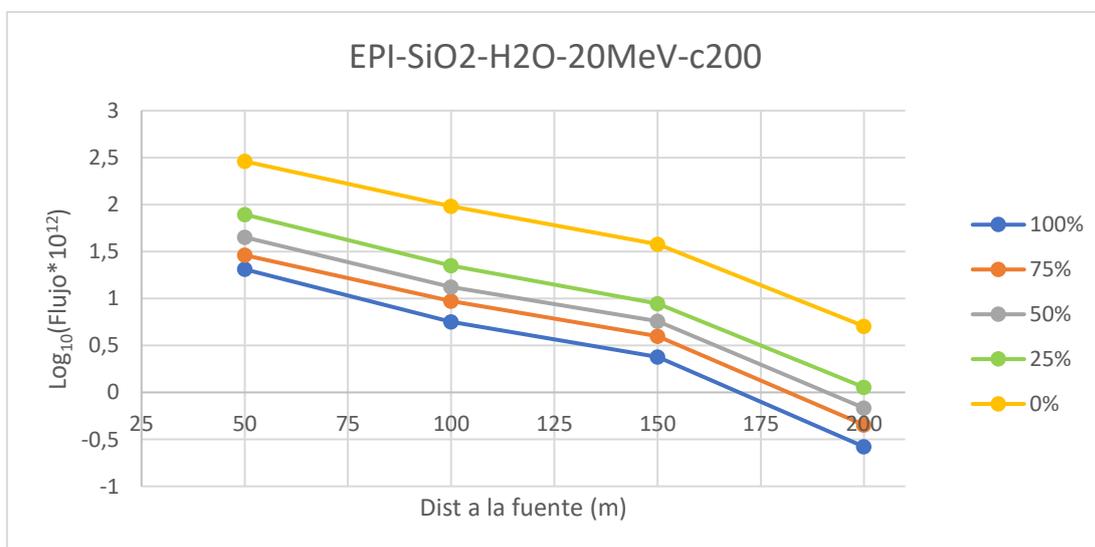
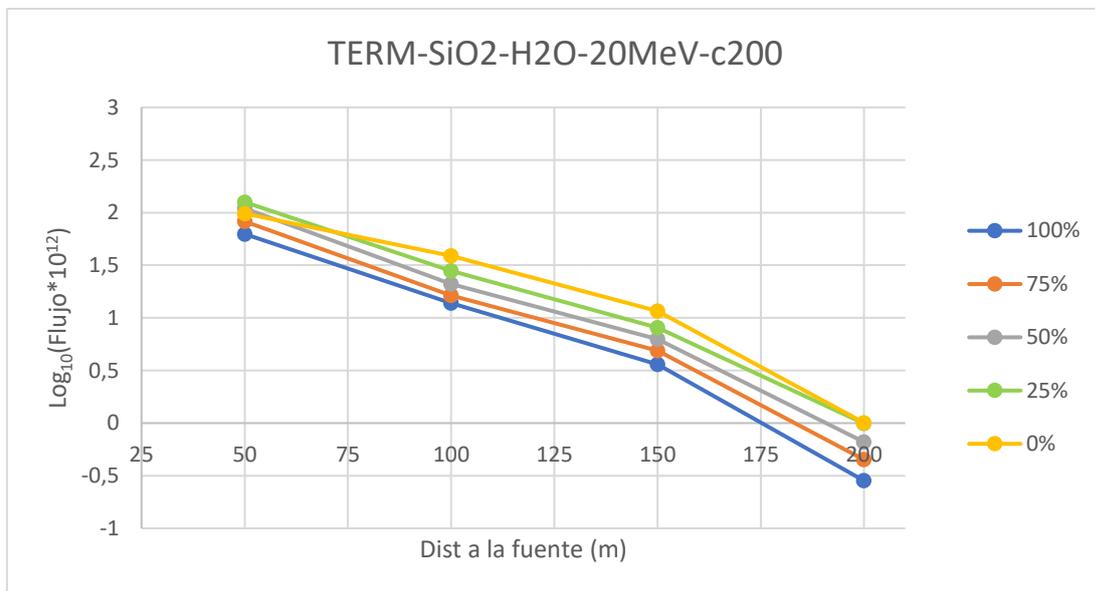
4.2. Cálculos en Suelos de Diferente Composición Química

Se muestran a continuación los cálculos para cuatro suelos de diferente composición química. Dos de ellos contienen un solo tipo de molécula, SiO_2 o CaCO_3 . De los otros dos, uno es una roca caliza de referencia y el otro un suelo calcáreo español. Las densidades de los suelos son de 2.6 g/cm^3 para el suelo de silicio y de 2.4 g/cm^3 para los demás suelos calizos. Los suelos se suponen

homogéneos por sencillez, ya que la técnica da un valor promedio de humedad en la zona sondeada. La energía de los neutrones emitidos por la fuente es de 20 MeV a menos que se indique lo contrario. Se realiza un estudio comparativo sobre la sensibilidad al agua de los flujos neutrónicos en los rangos térmico, epitérmico y rápido de un hipotético detector situado a diferentes distancias de la fuente y a una altura sobre el suelo de 1 m.

4.2.1. Suelo de SiO₂

El contenido en agua se define como la fracción molar o fracción de moléculas de H₂O respecto al total de moléculas H₂O y SiO₂ y se varía entre el 0% (suelo seco) y el 100% (agua pura). El flujo neutrónico espectral que resulta en las simulaciones viene expresado en unidades de letargia por neutrón emitido por la fuente, es decir neutrones/cm²/letargia/s/fuente. En la Figura 15 se muestran las tres gráficas para los logaritmos de los flujos espectrales en los tres grupos de energía.



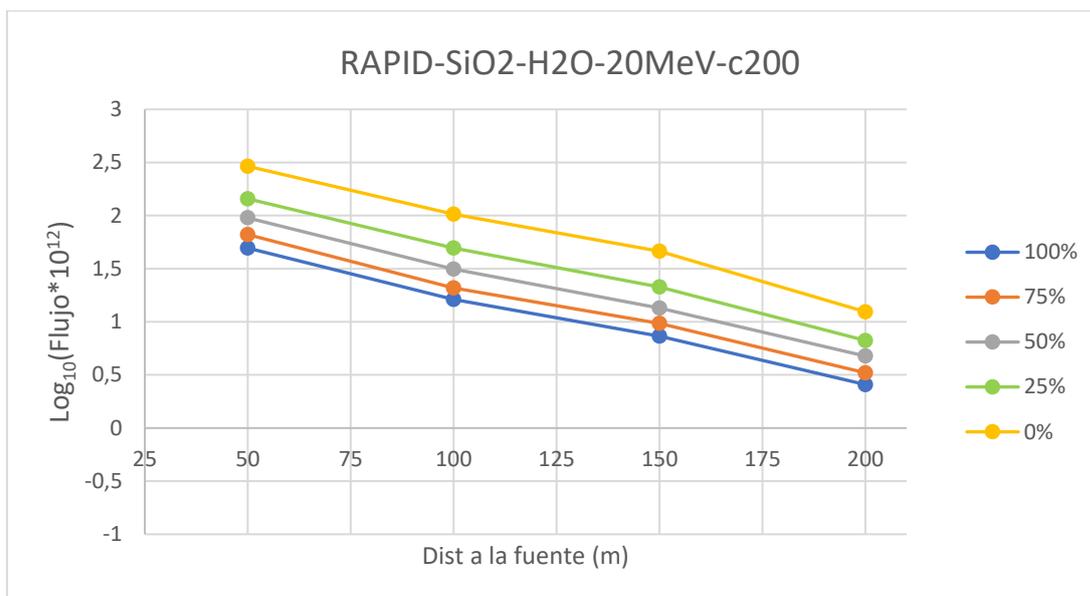


Fig. 15 En orden descendente: gráficas de flujos térmicos, epitérmicos y rápidos para distintas humedades del suelo.

Debido a que el punto más alejado (200 m) coincide con el límite de la celda de simulación, la caída del flujo en el mismo está sobreestimada. En efecto, fuera de la celda, por definición, los neutrones ya no interactúan y por tanto no rebotan a su interior. Se repitió el cálculo del caso con un 25% de agua y una celda de 250 m. Comparando ambos resultados, la variación de los flujos neutrónicos con la distancia a la fuente es idéntica, salvo a 200 m. Es decir, a partir de ahora se simula una celda mayor que el último punto representado, para evitar este suceso.

Puesto el logaritmo del flujo decrece linealmente con la distancia a la fuente, el flujo lo hace exponencialmente, como ocurre en la teoría de la difusión de neutrones monoenergéticos en un medio homogéneo. Se observa que la mayor separación interlineal se da para los neutrones epitérmicos, seguidos de los rápidos, con una notoria diferencia entre estos dos y los térmicos. Es decir, la sensibilidad al agua de los neutrones en los tres grupos de energía sigue ese mismo orden. El hecho de que los térmicos no sean sensibles al agua se explica considerando que hay dos procesos que se oponen en el cómputo total del flujo térmico. Por un lado, cuanto mayor sea la moderación por el hidrógeno mayor debiera ser el flujo térmico; sin embargo, una vez termalizados, los neutrones son absorbidos, así que el flujo apenas varía al aumentar el contenido en agua. Se observa también que la sensibilidad de los neutrones rápidos no difiere tanto de la de los epitérmicos. Esto se hace notar porque en las medidas experimentales se detectan los epitérmicos, pero ello es debido a que el moderador que rodea al sensor de neutrones térmicos no tiene el grosor suficiente como para captar los rápidos.

En ambos casos, epitérmicos y rápidos, hay una mayor separación entre las curvas de 0% y 25% de agua en suelo que entre las demás. Esto significa una alta sensibilidad a la humedad respecto al estado seco, pero una menor precisión a la hora de diferenciar entre proporciones de agua dentro de un suelo ya húmedo. También se observa que las curvas son paralelas, la sensibilidad se mantiene según aumenta la distancia a la fuente. Sin embargo, el flujo va disminuyendo y las medidas experimentales pierden precisión puesto que menos neutrones llegan al detector.

En las gráficas de la Figura 16 se comparan los espectros energéticos a una distancia de 50 m de la fuente para los dos casos extremos: agua y suelo seco. Los flujos espectrales de la Figura 15 son las integrales del espectro extendidas a cada uno de los tres grupos de energía.

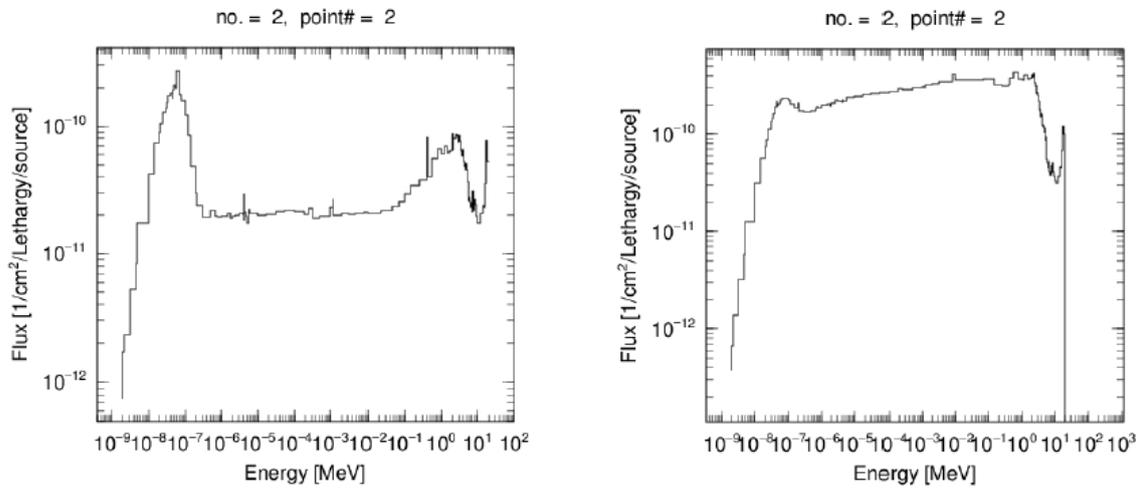


Fig. 16 Flujos neutrónicos a diferentes energías a una misma distancia de la fuente. Agua pura a la izquierda y suelo seco a la derecha.

La principal diferencia entre estas es la presencia de picos en la izquierda mientras que, en el caso seco de la derecha, el nivel de neutrones se mantiene aproximadamente constante para todo el espectro de energías. Estos picos son los que permiten explicar los resultados experimentales obtenidos en el apartado anterior. Observando el gráfico correspondiente al agua, se observa una drástica disminución en el flujo de neutrones en el rango epitérmico. Los neutrones epitérmicos se moderan a térmicos y finalmente son absorbidos por el hidrógeno no llegando al detector. De ahí el notorio valle en la gráfica del agua, el cual no aparece en la del suelo seco.

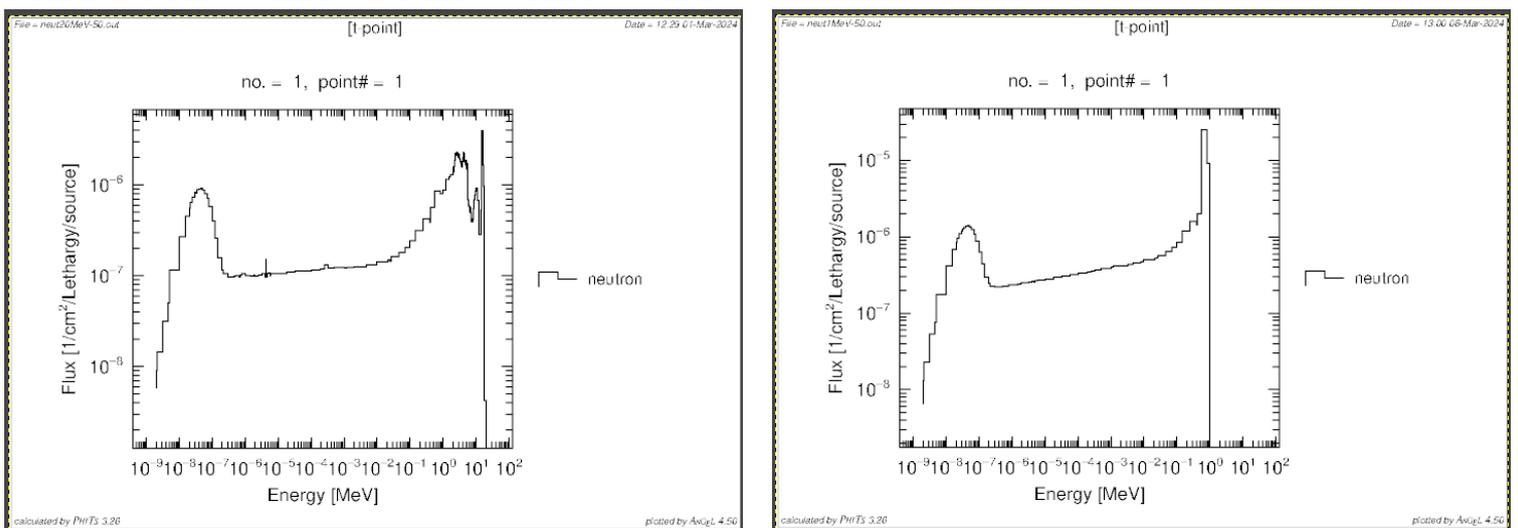


Fig. 17 Flujos neutrónicos en función de sus energías para 1 millón de historias con fuente de 20 MeV (izq.) y para 100 millones de historias con fuente de 1 MeV (drcha.).

Para la Figura 16 se han usado 100 millones de historias. En la Figura 17 se presentan dos espectros en los que se han disminuido el número de historias o la energía de la fuente. Ambos casos corresponden a un suelo con un 25% de agua. Se aprecia que también aparece este valle independientemente del número de neutrones que se generen o de la energía con la que partan (siempre que lo hagan desde el rango rápido). Además, se distingue a la perfección incluso en un caso donde el agua no es del todo abundante (25%).

A continuación, se varía la energía de los neutrones de la fuente de 20 MeV a 1 MeV. La Figura 18 muestra los resultados para el flujo epitérmico.

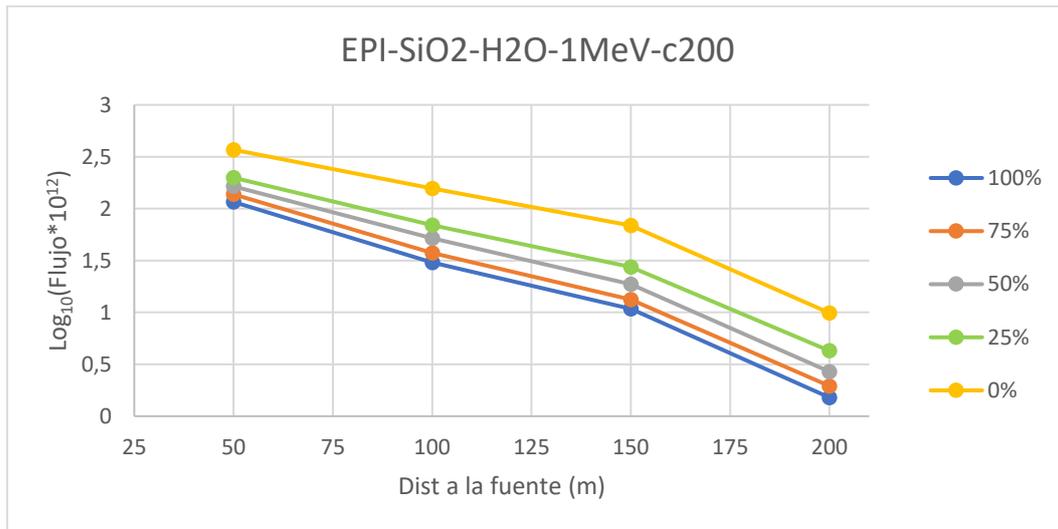


Fig. 18 Flujos epitérmicos para una fuente con energía de 1 MeV.

Se observa cómo, en comparación con su análogo de fuente de 20 MeV (Figura 15), sigue existiendo una separación notoria entre curvas de humedad.

La altura sobre el suelo del detector se ha variado de 1 m a 3 m para estudiar si afecta a las simulaciones. Se han encontrado resultados muy similares, como se muestra en la Figura 19.

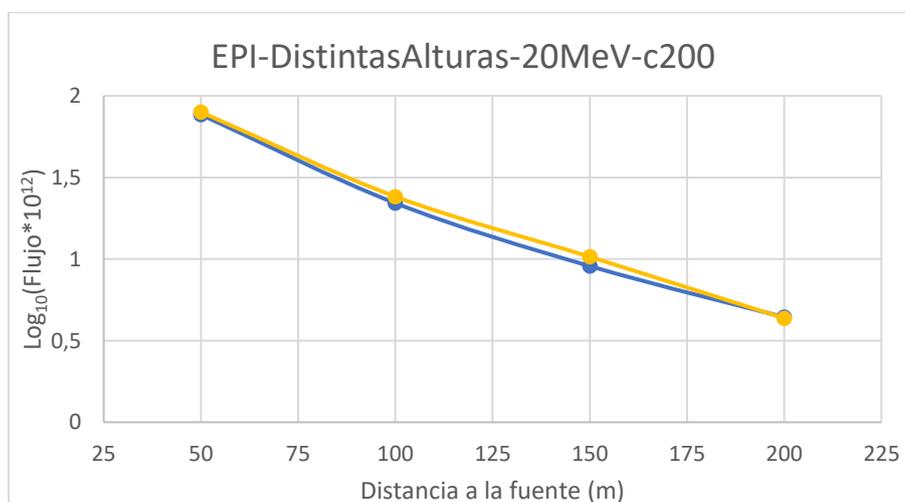


Fig. 19 Curvas para detector a 3 m de altura (amarillo) y a 1 m (azul).

Se muestra en la Figura 20 dos columnas correspondientes a las trazas para suelo completamente seco (columna izquierda) y para agua pura (columna derecha), con representaciones de térmicos, epitérmicos y rápidos de arriba a abajo.

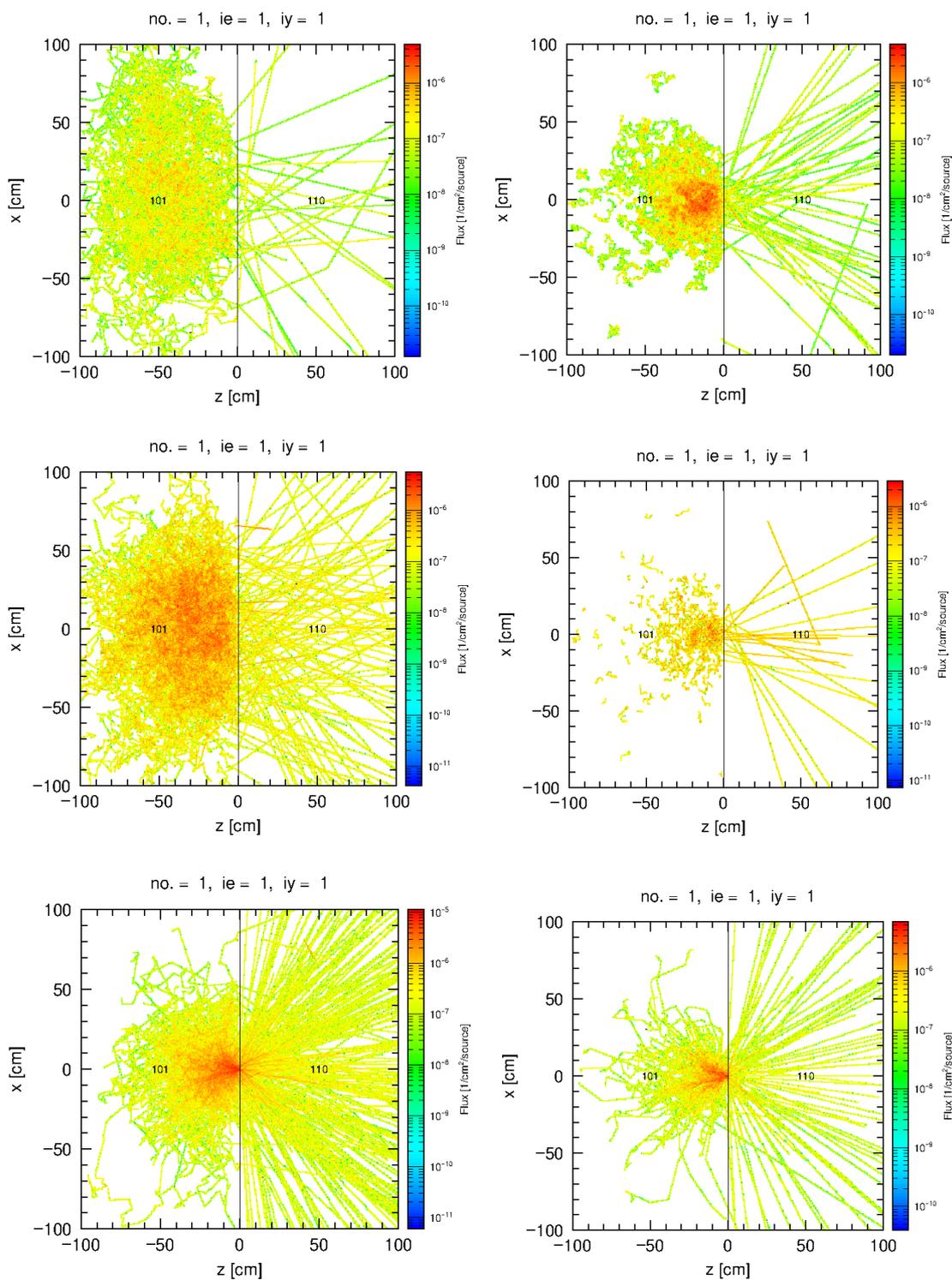


Fig. 20 Trazas de 500 historias para suelo seco (izq.) y para agua pura (drcha.).

Comenzando con la columna del agua, se observa la principal diferencia al comparar los casos térmico y rápido (los cuales presentan una semejanza razonable), con su caso energético intermedio. En el epitérmico las trazas son mucho menos abundantes. Se aprecia cómo en este caso los neutrones al entrar al agua interactúan mucho más con la misma, debido a la alta sección eficaz del hidrógeno para este rango energético. Estas interacciones provocan una rápida deceleración de los neutrones en muy poco recorrido, confinándose así en una región mucho menor en comparación con los otros dos casos. Además, también puede observarse la alta interacción de los neutrones epitérmicos en las trazas rebotadas hacia el aire, las cuales son menos abundantes por la misma razón. En estas comparaciones se ve reflejada la gran moderación de los neutrones debida al hidrógeno hasta el rango térmico. Obsérvese que no se dibuja la trayectoria completa, sino solamente el momento durante el que el neutrón se encuentra dentro del rango de energía correspondiente a cada caso. Por eso aparecen trazas espontáneamente en puntos del terreno, sin tener conexión directa con la fuente. Se trata de neutrones en cuya trayectoria están siendo moderados, hasta entrar en el rango energético admitido en la representación, momento en el que sus trazas comienzan a ser representadas. En el suelo completamente seco destaca el gran número de trazas en comparación con el caso del agua. Esto se debe a que los neutrones son frenados mucho menos cuanto más masivo sea el núcleo blanco, tal y como se explicó en la sección de moderación neutrónica.

La humedad que un suelo es capaz de retener depende del tamaño de los poros entre las partículas sólidas que lo forman y se expresa como humedad gravimétrica o volumétrica según las magnitudes siguientes:

RP = razón de pesos = peso agua/peso suelo

RV = volumen agua/volumen suelo

HV = volumen agua / (volumen agua + volumen suelo) = Humedad Volumétrica = $RV/(1+RV)$

Tabla 3 Fracciones molares, en peso y en volumen para SiO₂.

% humedad	Razón de Peso	Razón de Volumen	% humedad volumétrica
5	0,016	0,04	3,94
15	0,053	0,14	12,10
25	0,100	0,26	20,63
50	0,300	0,78	43,82
75	0,900	2,34	70,06

El intervalo de valores de las simulaciones de este trabajo es realista si se compara con las humedades retenidas por los suelos.

Una vez realizado este estudio más exhaustivo para el suelo de SiO₂, se plantean nuevos casos de suelos con el objetivo de estudiar la influencia de la composición química del terreno. En suelos peninsulares y en general de la zona mediterránea, es común la roca caliza, por lo que se simulan tres casos diferentes con una base común de carbonato de calcio (CaCO₃). Para los tres suelos se supone una densidad de 2.4 g/cm³.

4.2.2. Suelo calcáreo

Se trata de un suelo vitícola de la región de La Mancha cuya composición química se ha determinado en diferentes perfiles y profundidades en el trabajo de la referencia [19]. Se ha elegido el perfil P1HA de 20 cm de profundidad y que contiene un 55% de CaCO_3 . A partir de la calcinación de la muestra del suelo, los autores de dicho trabajo obtienen las proporciones de óxidos que se muestran en la Tabla 4 y que representan el 65.4% del peso total. Un 32% se compone de las pérdidas por calcinación, las cuales se han obtenido en este trabajo calculando el porcentaje del CO_2 proveniente de la descomposición del CaCO_3 y suponiendo que las pérdidas restantes son debidas al H_2O estructural ligada a moléculas (H_2O estr.).

Tabla 4: Porcentaje en peso de las distintas moléculas del suelo calcáreo simulado.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	CO_2	H_2O estr.
% peso	15.27	3.72	2.19	3.34	40.86	24.35	7.64
Pm	60.06	101.94	159.68	40.32	56.07	44.01	18.02

Los porcentajes de la Tabla 3 suponen un 97.4% de la composición total del suelo. El suelo, una vez calcinado, contiene además varios óxidos más y elementos con porcentajes inferiores al 1% y con una contribución pequeña a las secciones eficaces macroscópicas, y que, para simplificar, no se han considerado. Dividiendo los porcentajes entre los pesos moleculares se obtienen las proporciones atómicas que se dan a continuación para el input del PHITS (el agua de la humedad aparece en negrita para diferenciarla del agua estructural):

H (2.0*0.25) O (1.0*0.25) / Si (1.0*0.75*0.2542) O (2.0*0.75*0.2542)

Al (2.0*0.75*0.0365) O (3.0*0.75*0.0365) Fe (2.0*0.75*0.0137) O (3.0*0.75*0.0137)

Mg (1.0*0.75*0.0828) O (1.0*0.75*0.0828) Ca (1.0*0.75*0.7287) O (1.0*0.75*0.7287)

C (1*0.75*0.5533) O (2*0.75*0.5533) H (2*0.75*0.4244) O (1*0.75*0.4244)

El contenido en agua no es una fracción molar como en el caso del SiO_2 , sino el porcentaje que aparece en un input como el anterior para el 25% de humedad. Ese porcentaje se traduce en los siguientes valores de los parámetros anteriormente establecidos:

$$\text{RP} = (25/75) * 18.02/97.4 = 0.062 \quad \text{RV} = 0.062 * 2.4 = 0.15 \quad \text{HV} = 0.13 \rightarrow \mathbf{13\%}$$

En la Figura 21 se muestran los flujos epitérmicos para humedades del 0% al 75%, entendiendo estos porcentajes como los que forman parte del input, de igual manera que como más arriba aparece para el 25%. En este caso la celda es de 300 m.

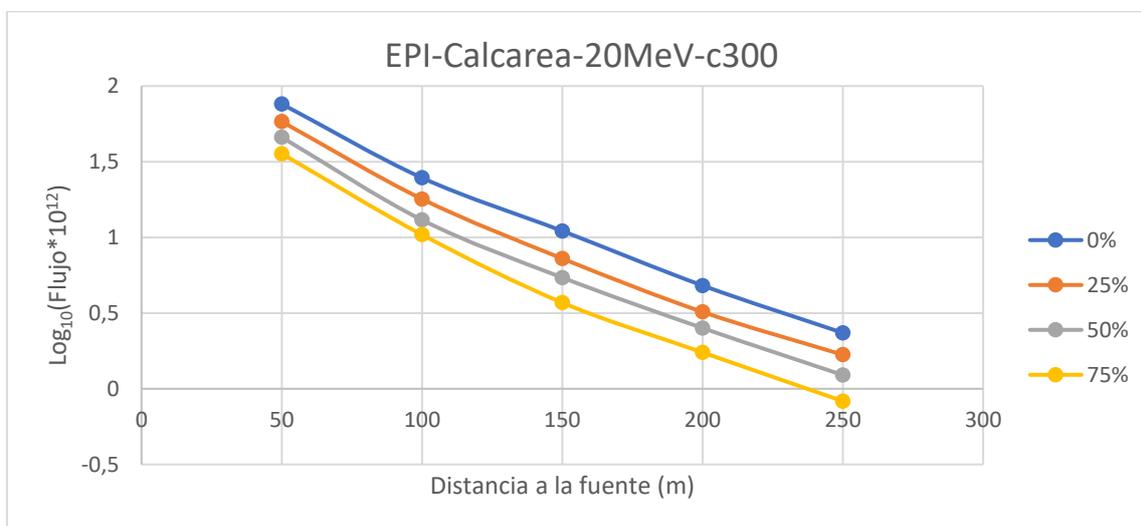


Fig. 21 Flujos epitérmicos en función de la distancia a la fuente para el suelo calcáreo.

Los resultados son semejantes a los del terreno de SiO₂, ya que, aunque se sustituya el silicio aparecen otros elementos relativamente masivos (en comparación al hidrógeno del agua) como son el calcio, el hierro o el aluminio entre otros. Al igual que ocurría con el silicio, los neutrones apenas pierden energía en el choque contra los núcleos de estos átomos. Por tanto, siguen siendo moderados principalmente por el hidrógeno y aportando la misma información sobre la humedad.

La principal diferencia con el SiO₂ es la mayor separación de este entre las curvas de 0% y 25% de humedad lo cual se resalta más en la Figura 22.

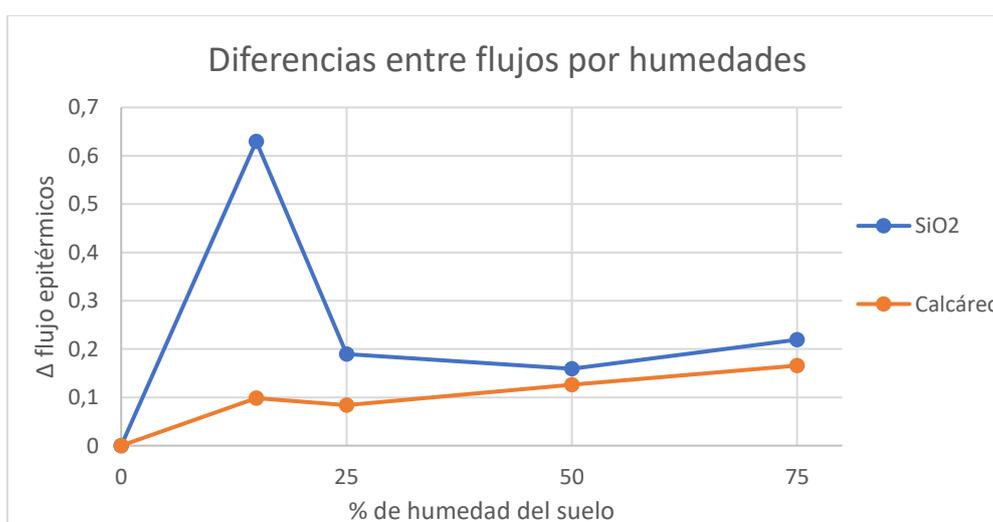


Fig. 22 Separación entre curvas de humedad (flujo frente a distancia de la fuente) consecutivas (de 25% en 25%) a 150 m de la fuente.

4.2.3. Suelo de carbonato cálcico puro (CaCO_3)

El porcentaje de agua se define según la fracción molar o fracción de moléculas de H_2O respecto al total de moléculas H_2O y CaCO_3 . Se añaden humedades intermedias con una variación más fina entre 0 y 25% así como más puntos a distancias intermedias. Los flujos epitérmicos, para celda de 300 m, aparecen en la Figura 23.

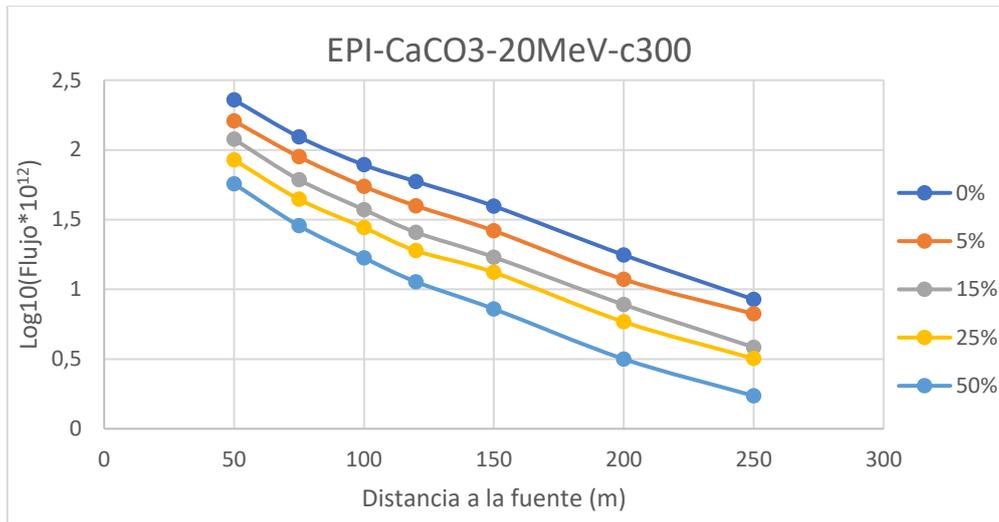


Fig. 23 Flujos epitérmicos en suelo de CaCO_3 puro.

Los resultados, como se observa, son muy similares al caso anterior (Figura 21) y por ende, también al del SiO_2 . A 250 m de la fuente, donde los errores estadísticos son mayores por ser menor el número de neutrones, se observa imprecisión para variaciones pequeñas de la humedad.

El peso molecular del CO_3Ca es 112, algo más del doble que el del SiO_2 . Para 25, 50, 75 y 82 % molar resultan 5, 14, 33 y 42 % en peso. Por ejemplo $82 \cdot 18 / (82 \cdot 18 + 18 \cdot 112) = 0.42$

4.2.4. Suelo de roca caliza

Los porcentajes atómicos en este caso se obtienen de la referencia [20] y son los siguientes:

H: 0.01709 / C: 0.181445 / O: 0.595930 / Na: 0.000310 / Mg: 0.03772 / Al: 0.00302 / Si: 0.01665
S: 0.00012 / K: 0.00016 / Ca: 0.146173 / H: 0.01709 / Ti: 0.000145 / Fe: 0.001205 / Pb: 0.000031

La representación de los resultados es análoga a los casos anteriores, por eso se optó por realizar una comparación entre los tres casos con base de CaCO_3 .

Los flujos epitérmicos de los tres suelos calizos se representan en la Figura 24 en función del porcentaje en peso mostrando un comportamiento muy parecido entre ellos.

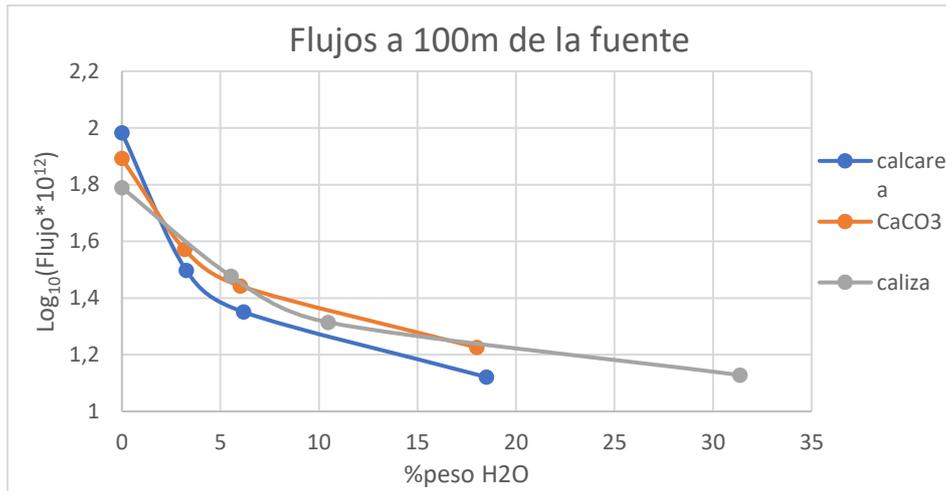


Fig. 24 Flujos epitérmicos en función del porcentaje de agua en peso.

4.3. Modificadores

En esta sección se analiza la influencia de varios factores, como la presencia en el suelo de un elemento de muy alta sección eficaz de absorción, la humedad del aire y una capa de nieve sobre el suelo.

4.3.1. Suelo de SiO₂ con 25% de agua y gadolinio

El gadolinio es un metal de tierras raras que se utiliza con una diversidad de fines. Por ejemplo, como elemento de contraste en Resonancia Magnética debido a su alto momento magnético. Su uso más importante es el control de la reacción en cadena en centrales nucleares y el blindaje de neutrones térmicos. Esto es debido a su elevada sección eficaz de captura neutrónica.

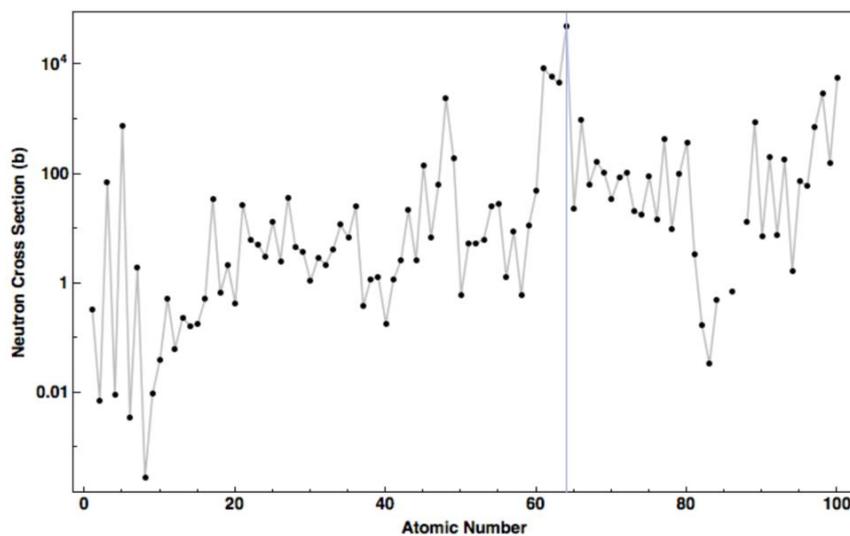


Fig. 25 Secciones eficaces de absorción en el rango térmico de diferentes elementos en función de su número atómico.

Como se aprecia en la Figura 25, la mayor sección eficaz (marcada con una línea vertical) corresponde al gadolinio ($Z=64$). Este elemento se encuentra en los suelos en cantidades traza o partes por millón (ppm).

Para estudiar el efecto de la presencia de este metal en el flujo neutrónico, se han simulado cuatro suelos con contenidos en gadolinio de 1, 10, 100 y 1000 ppm, definidos como número de átomos de gadolinio por cada molécula de SiO_2 .

Los resultados obtenidos para neutrones epitérmicos y térmicos se dan en las Figuras 26 y 27 respectivamente.

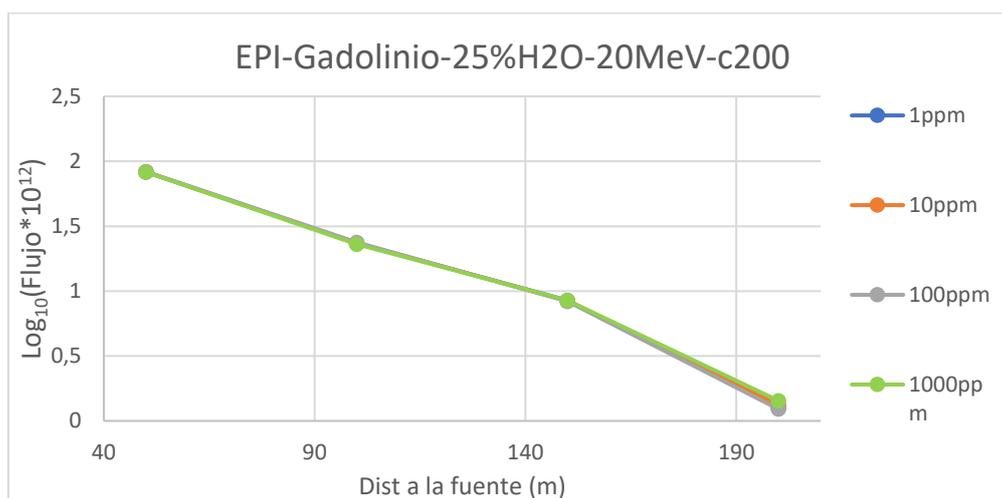


Fig. 26 Flujo epitérmico para distintos contenidos de gadolinio.

Las cuatro curvas para el flujo epitérmico están solapadas lo cual indica que, si bien el gadolinio presenta resonancias de absorción en el rango epitérmico (Figura 8), no son suficientes para competir con el efecto de la moderación por hidrógeno. Para toda humedad (aunque solo se dé el 25 %) se espera que las curvas sin gadolinio coincidan con las que sí lo tienen y que, por tanto, la sensibilidad a la humedad sea la misma.

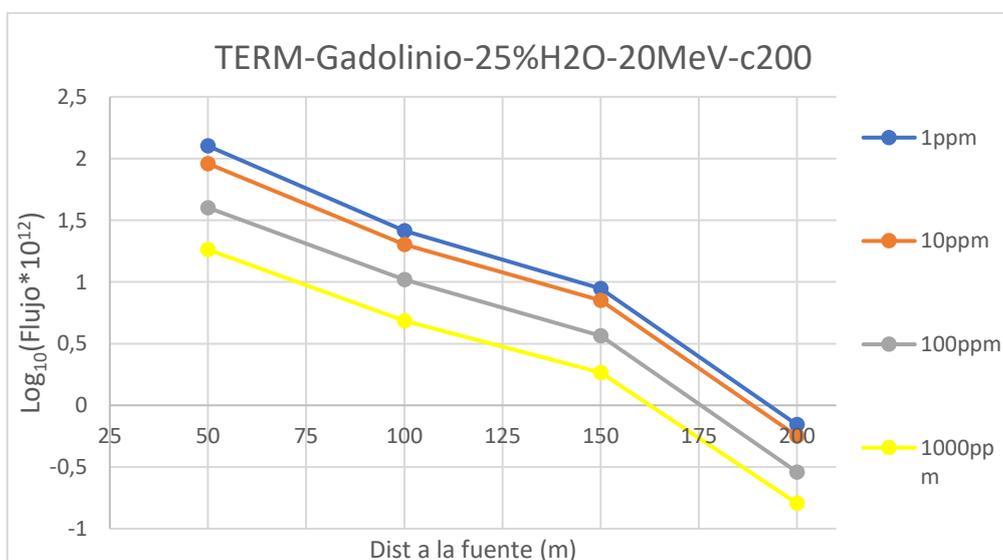


Fig. 27 Flujo térmico para distintos contenidos de gadolinio.

Sin embargo, el flujo térmico es muy sensible a cantidades traza de gadolinio, lo cual no sorprende dada su enorme sección eficaz de captura en el rango térmico.

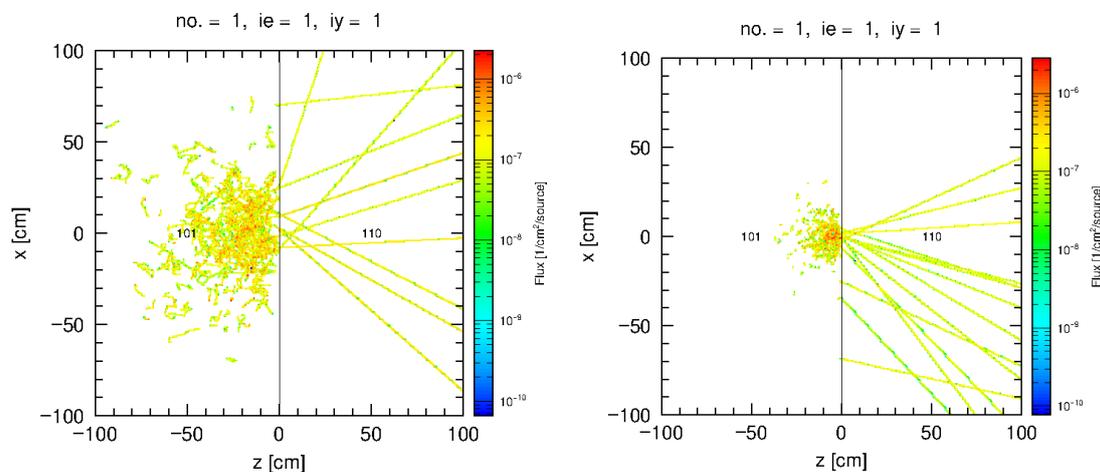


Fig. 28 Trazas de neutrones térmicos para 100 ppm de gadolinio, en los casos extremos de suelo seco (superior) y agua (inferior).

Se observa la diferencia de penetración de los neutrones, siendo aproximadamente el doble en el caso del suelo seco. Esto indica que ni si quiera la alta presencia (100 ppm) en el suelo del mayor absorbente neutrónico de todos los elementos naturales, el gadolinio, puede eclipsar el efecto del hidrógeno sobre los neutrones, que permanece siendo notorio.

El estudio anterior conduce a dos importantes resultados:

- El gadolinio no afecta a la determinación de humedad basada en la medida de los neutrones epitérmicos rebotados que llegan a un detector sobre el suelo. Cuando se pone el sensor enterrado se detectan los térmicos, ya que no posee moderador, únicamente se encuentra rodeado del terreno en el que se sumerja y, por tanto, el método da error si hay absorbentes neutrónicos en el rango térmico. Este es el caso de suelos con gadolinio o suelos salinos debido al Cloro que, aunque no es un absorbente muy grande, su concentración es alta.
- El segundo no se refiere a la medida de agua, pero ha surgido de la realización de este trabajo. Vemos que el gadolinio podría detectarse midiendo el flujo térmico. Se trata de uno de los 17 elementos químicos que conforman las **tierras raras**, denominadas en ocasiones como “el oro del siglo XXI” debido a su gran utilidad y versatilidad en la sociedad actual. Obsérvese que el flujo térmico por sí solo no es capaz de diferenciar unos elementos absorbentes de otros. Por ello, si se detecta un absorbente neutrónico fuerte, el análisis se completaría con el análisis de las partículas y radiaciones emitidas tras la captura neutrónica que si son específicas de cada núcleo. Esta técnica, denominada análisis por activación neutrónica, se emplea desde hace tiempo en geoquímica, determinando el contenido de elementos con umbrales de detección de 1 ppm e incluso 0.1 ppm. En estos trabajos se usan fuentes de neutrones artificiales de tipo isotópico o

incluso de reactores nucleares, siendo estas últimas las más intensas. Sin embargo, no se ha encontrado en la bibliografía ningún trabajo experimental de activación neutrónica usando neutrones cósmicos. Por ello se propone esta aplicación para lo cual en primer lugar habría que realizar las simulaciones pertinentes.

4.3.2. Aire húmedo

Otra de las principales alteraciones que podría sufrir este método viene dada por la presencia de agua (en forma de vapor) en el aire. Como se explicó, el detector neutrónico se encuentra a cierta altura sobre la superficie y hasta ahora se había interpretado el aire como un medio en el cual los neutrones apenas varían su energía. Sin embargo, dependiendo de la región del planeta en la que se realicen los experimentos y dependiendo de la época del año, el aire puede ser más o menos húmedo, variando su contenido en H₂O gaseoso. ¿Afectará este hidrógeno gaseoso a los neutrones que viajan por el aire antes de llegar al detector?

Se ha simulado un aire con humedad de 2 g de vapor de agua por cada 100 g de aire seco que es suficientemente alta como para saturar. También una aún mayor de 3 g por cada 100 g de seco para analizar un caso más extremo.

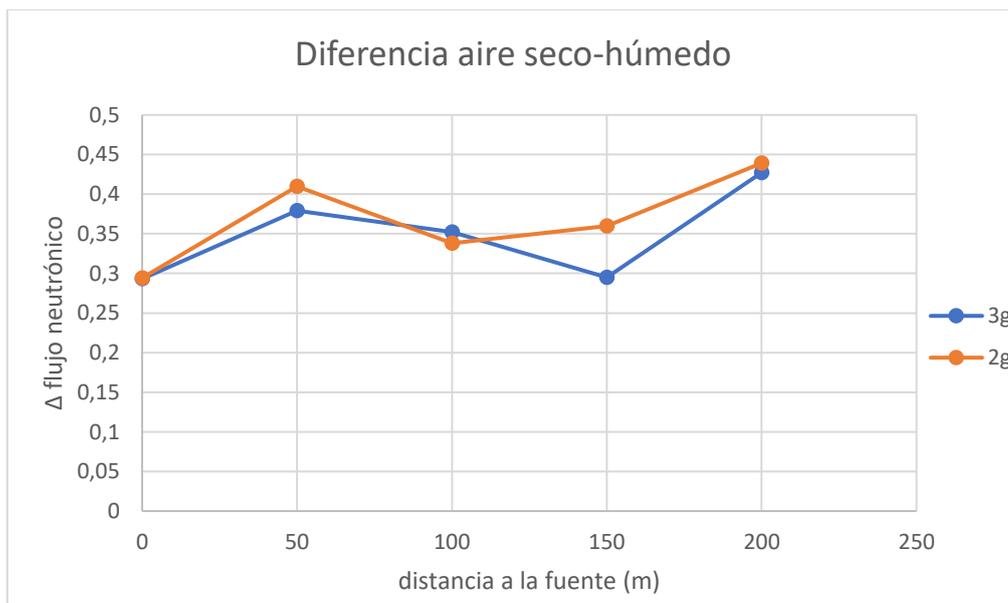


Fig. 29 Diferencia de flujos epitérmicos entre aires húmedos y aire seco.

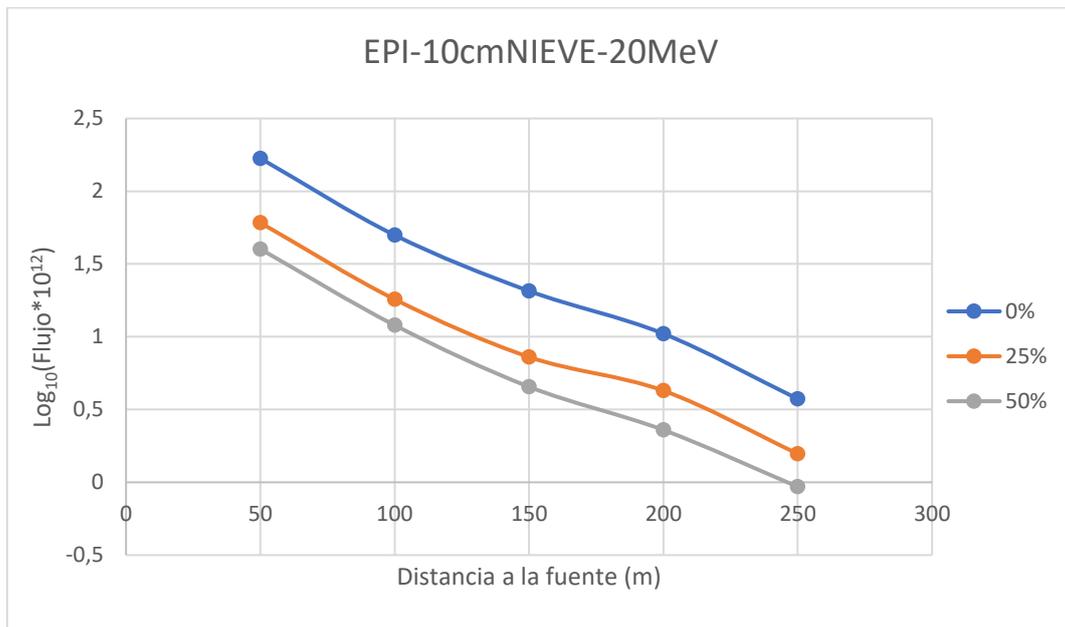
Las unidades del flujo son las mismas que en las gráficas anteriores. Se observa cómo las variaciones de los flujos oscilan entre 0.3 y 0.45 unidades respecto a los mismos casos con un aire seco. Estas diferencias han de compararse con cualquiera de las gráficas en las que se representaba el flujo neutrónico en función de la distancia para diferentes humedades del suelo, como las que se muestran en la Figura 15. En ellas se aprecia cómo la separación entre curvas de diferentes humedades, en los casos en los que el método es efectivo, equivale a valores semejantes a los obtenidos anteriormente. Los resultados implican que la humedad del aire afecta a las simulaciones y, por tanto, será otro factor a tener en cuenta a la hora de calibrar el instrumento de medida.

4.3.3. Influencia de una capa de nieve

Si, por ejemplo, a un agricultor le nieva sobre el terreno, y tiene instalado un detector de neutrones, cuya función es la de determinar la humedad mediante los neutrones atmosféricos como se presenta en este trabajo, ¿será capaz de obtener una simulación fiable al haber sido cubierta su tierra de una capa de nieve de grosor considerable? Y en caso afirmativo, ¿hasta qué nivel de nieve las medidas serán útiles?

En las simulaciones se añadió una capa de nieve de densidad 100 kg/m^3 sobre el terreno. Dado que la nieve puede encontrarse en diversos estados dependiendo de la cantidad depositada, el tiempo que ha pasado desde que se depositó o la acción de agentes externos como la compactación por aplastamiento de esta, su densidad puede oscilar entre 20 y 180 kg/m^3 .

Respecto a la posible cubierta de la fuente de simulación por la nieve, no se dará el caso. En lugar de añadir los centímetros correspondientes de nieve encima de la superficie del suelo (donde se coloca la fuente en la simulación), se sustituyeron los últimos centímetros de terreno por la nieve. Esto no supone un problema para la simulación ya que se está suponiendo una profundidad de 10 m , y se conoce que el alcance vertical del método apenas llega al m , luego no será de importancia restarle unos pocos cm . Además, de este modo, la fuente sigue situada superior a todo el terreno de estudio (incluida la nieve) imitando la llegada de los neutrones atmosféricos. Estos deben atravesar la capa de nieve para poder llegar al terreno de estudio y ser de utilidad para determinar su humedad.



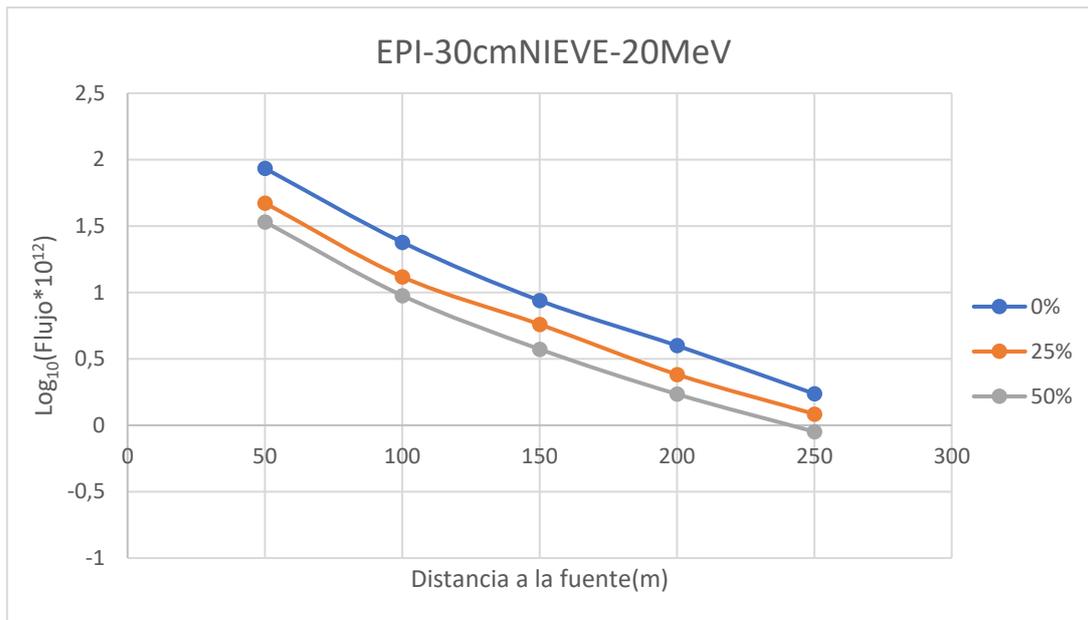


Fig. 30 Flujos epitérmicos a distintas humedades del suelo para dos capas de nieve de 10 cm (superior) y 30 cm (inferior).

Se observa que la principal diferencia es la separación entre curvas, la cual, como era de esperar, es menor cuanto mayor sea el grosor de nieve que cubre el terreno. Esto ocurre ya que el hidrógeno de la nieve modera los neutrones. Sin embargo, se observa que esa gran disminución en la densidad de la misma es relevante. Se aprecia cómo en ambos casos se sigue pudiendo determinar la humedad del suelo, aunque los cálculos serán menos precisos cuanto más nieve haya. Veamos, por tanto, si hay un límite para esta precisión.

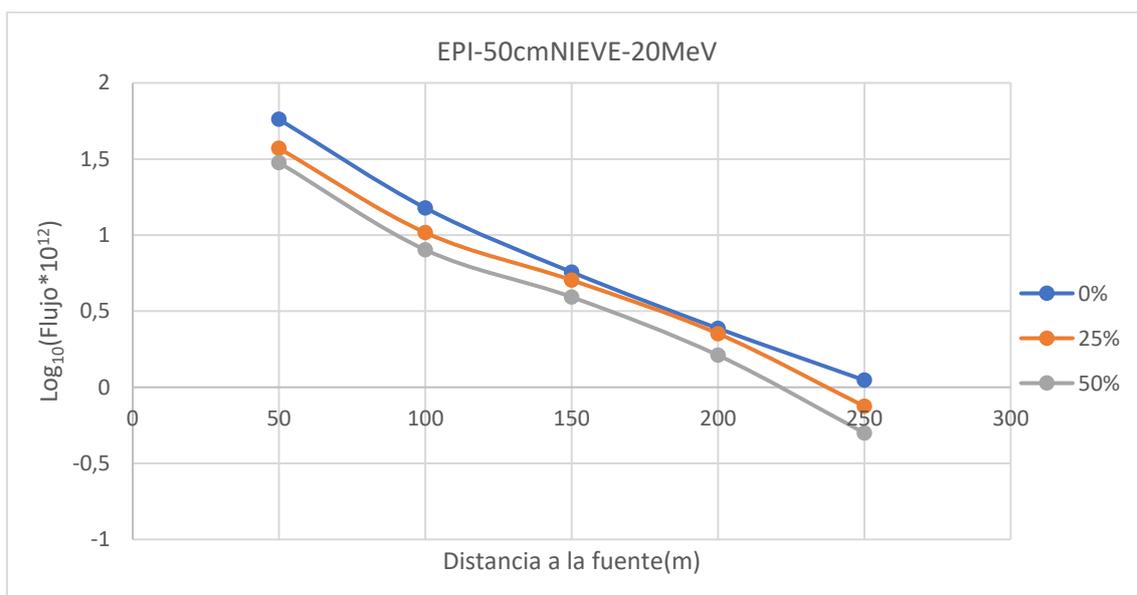


Fig. 31 Simulación análoga a los casos de la Fig. 30 pero para una capa de 50 cm de nieve.

Se contempla cómo se pierde la fiabilidad de este método, al ir tendiendo a solaparse las curvas. Se demuestra, por tanto, como para un grosor alto de nieve (50 cm o más) el método deja de ser fiable ya que la nieve aun siendo mucho menos densa, sigue siendo agua. Por tanto, al haber una capa considerable de la misma entre el detector y el terreno de estudio, esta acabará moderando los neutrones. Este problema de la nieve podría solucionarse si los detectores fuesen subterráneos, sin embargo, no es el caso de estudio de este trabajo.

Para mostrar lo que ocurre con los neutrones, se generan las trazas que se muestran en la Figura 32.

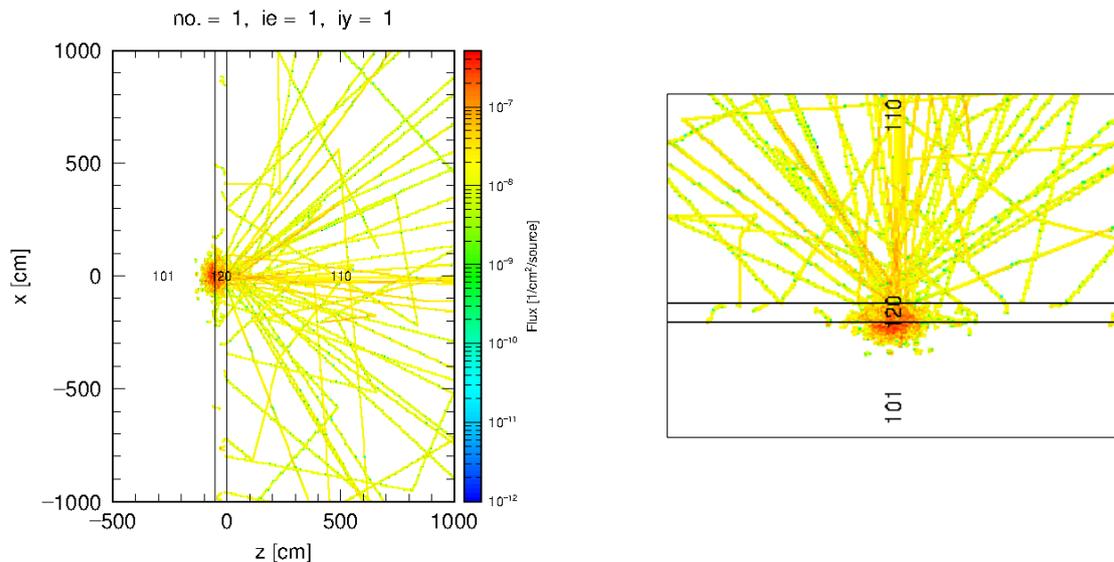


Fig. 32 Trayectorias de los neutrones epitérmicos en un suelo cubierto por 50 cm de nieve.

Se trata de la misma imagen, aumentada en la figura de la derecha, para observar en detalle la información importante que aportan estas trazas (lo que ocurre desde que los neutrones salen de la fuente hasta que rebotan al aire). Los números de las regiones corresponden a: 110: aire / 120: nieve / 101: suelo de SiO_2 con 25% de humedad.

En la Figura 32 se puede apreciar cómo, debido a la presencia de la capa de nieve, los neutrones se dispersan debido a sus interacciones con el hidrógeno de la nieve. Se observa cómo los neutrones no profundizan apenas en el suelo. Hay que tener en cuenta que el suelo no comienza en la horizontal superior si no en la inferior (gráfica derecha Figura 32). Ocurre debido a la moderación y choque elástico contra el hidrógeno. También puede apreciarse este efecto al analizar las trazas que salen rebotadas hacia el exterior. Se observa un alto contenido de las mismas, sin embargo, la mayoría de estos neutrones han sido dispersados hacia el exterior antes de atravesar por completo la capa de nieve y, por tanto, la información no es fiable, como se determinó anteriormente. Además, en caso de que lleguen al suelo, tendrían que volver a atravesar la capa de nieve para llegar al detector absorbiéndose algunos de ellos en el camino.

4.3.4. Pozo

Otra de las aplicaciones de la vida cotidiana en la que puede ser de utilidad este método de medición por neutrones naturales, es el de la determinación de ríos o bolsas de agua subterráneas. El objetivo será analizar los resultados de una nueva simulación en la que se introduzca agua por debajo de la superficie, y así determinar si el método de estudio es eficiente al detectar estas acumulaciones acuáticas subterráneas.

Para generar una simulación realista, se buscó información sobre la profundidad a la que se pueden encontrar estas acumulaciones de agua y se obtuvieron datos muy dispersos, de decenas a cientos de metros bajo tierra. Viendo trazas como las de la Figura 20, se observa que los neutrones son moderados rápidamente en el suelo, y con agua o no, estos no alcanzan más de unas pocas decenas de centímetros de profundidad. Debido a estos resultados, se concluye que no se podría determinar la existencia de un pozo subterráneo mediante este método.

4.4. Radiación Gamma de Captura del Hidrógeno

Cuando el hidrógeno captura (absorbe) un neutrón, se emite instantáneamente un fotón de 2.22 MeV. La intensidad de las gammas instantáneas de todos los elementos de los materiales también es una de las salidas del programa.

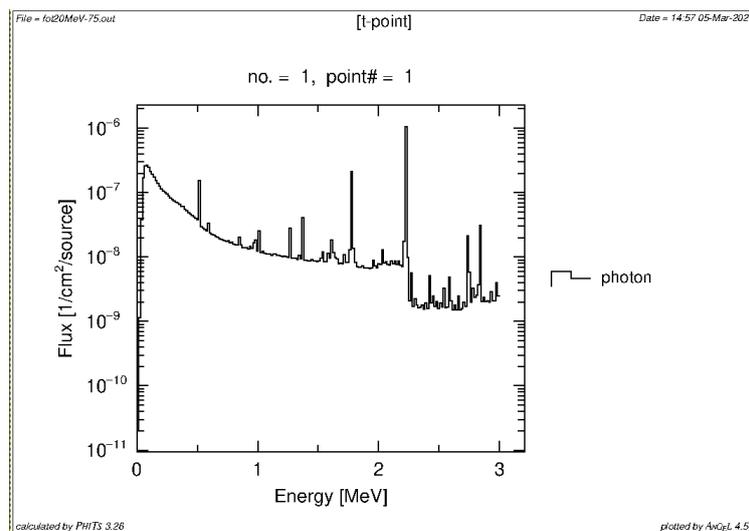


Fig. 33 Espectro gamma para una fuente de 20MeV y un suelo de SiO₂ con un 75% de agua.

Antes de comenzar el análisis, cabe comentar que a pesar de que solo se grafiquen energías de hasta 3 MeV no implica que para energías mayores el flujo se anule. Hay producción de energías mayores debido a la absorción del neutrón por otros elementos del suelo, sin embargo, el interés en este trabajo radica en el hidrógeno. Se observa claramente cómo destaca sobre los demás un pico a unos 2.2 MeV que es la energía de enlace del deuterio. A la vista de los resultados surgió la siguiente cuestión: ¿No se podría realizar un estudio de la humedad del suelo mediante el estudio de las gammas emitidas?

Para responder a esta pregunta se calculan los flujos tanto de fotones como de neutrones en función de la humedad del suelo, ambos para un mismo punto, a 100 m del detector. Con el objetivo de compararlos en una gráfica, se busca que las curvas de ambos flujos comiencen en el origen de coordenadas, y para ello se representan los flujos relativos al flujo para suelo seco. La variación de las correspondientes diferencias de flujos con el contenido de H₂O se muestra en la Figura 34. Para el neutrónico las unidades son 1/cm²/letargia/10¹²/fuente, como en las gráficas anteriores, mientras que para el flujo de fotones las unidades son 1/cm²/fuente.

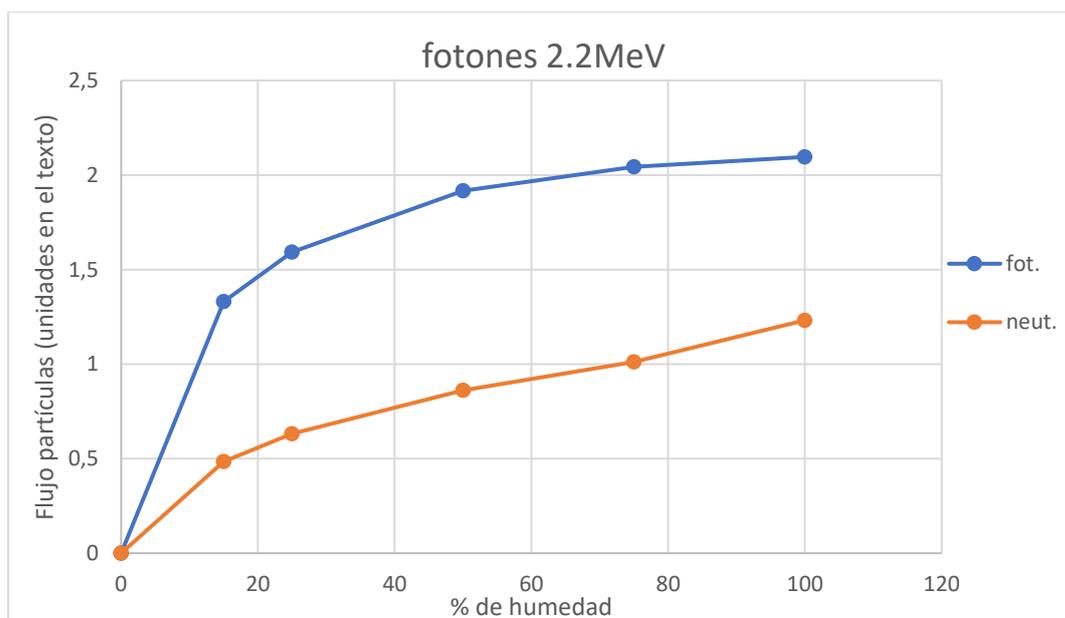


Fig. 34 Flujo de fotones de 2.2MeV (azul) en comparación al de neutrones epitérmicos (naranja) para un mismo punto y diferentes humedades del suelo.

Cabe resaltar que, en el caso de los neutrones, su flujo disminuye con la humedad como se explicó a lo largo del trabajo, pero para el caso del pico de fotones de 2.2 MeV de energía ocurre lo contrario, ya que este se debe al hidrógeno. Por tanto, cuanto mayor sea la presencia de este, mayor será la absorción de neutrones y por ende mayor la producción de fotones. Por eso se representa el valor absoluto de la diferencia de flujos para los neutrones.

Ambas curvas tienden a la saturación al aumentar la humedad. Este estudio nos permite concluir no solo que el método del conteo de fotones de 2.2 MeV es tan válido para la determinación de la humedad del suelo como el de neutrones, sino que incluso podría aportar mayor sensibilidad en humedades pequeñas dada la mayor pendiente de la curva.

Se han buscado estudios en los que se explote esta propiedad de emisión gamma a partir de la captura de neutrones cósmicos para la determinación de la composición del suelo. Solo se ha encontrado una simulación teórica para el análisis del carbono del suelo [21]. En este caso se establece una relación directa entre la disminución de fotones de 2.2 MeV y el aumento de la proporción de carbono en la tierra: Según los autores de [21]: “A medida que el carbono orgánico del suelo aumenta del 0% al 15% en volumen, la materia mineral disminuye y el recuento de rayos gamma de isótopos relacionados con minerales disminuye. Los rayos gamma con energías características de una variedad de elementos se recolectan cerca de la superficie con un detector de germanio. De estos, los rayos gamma de 2.224 MeV provenientes del hidrógeno son sensibles a cambios en el carbono orgánico del suelo tan bajos como 0.12%”.

5. CONCLUSIONES

La aplicación del método utilizado, consistente en el uso de neutrones cósmicos atmosféricos, ha demostrado ser efectivo para determinar la humedad del suelo. Además, no se ha detectado una gran dependencia con el tipo de suelo al realizar simulaciones con diferentes terrenos y obtener resultados análogos. El hidrógeno es un elemento muy ligero. La masa del neutrón es aproximadamente la del hidrógeno. Una colisión entre ambos, debido a la conservación del momento lineal, provoca una gran disminución en la velocidad del proyectil. Si ese mismo neutrón choca con un núcleo 10 o 20 veces más pesado que este, la conservación del momento hará que el neutrón rebote manteniendo una velocidad alta. El neutrón no ha sido moderado. Por eso no es relevante la composición del suelo, ya que este está compuesto por los átomos pesados de 15, 20 o más veces la masa del neutrón. Una vez que cualquiera de estos suelos se humedezca, el hidrógeno del agua eclipsará cualquier moderación provocada por los átomos pesados del terreno.

Se han estudiado otras formas de encontrar agua en terrenos, y cómo pueden afectar estas a la moderación. Una capa de nieve requiere de un grosor considerable (50 cm o más) para perjudicar la llegada de neutrones al detector. Se debe a que la nieve es mucho menos densa que el agua líquida, por tanto, es mucho menos probable que un neutrón se encuentre con un núcleo de hidrógeno que lo modere. Por tanto, una nevada puntual no será preocupante para el sensor. Conociendo esto podría pensarse que el vapor de agua en aire, al ser aún menos denso que la nieve no afectará a las simulaciones, sin embargo, se ha demostrado que no es así. A diferencia de los cm recorridos en la nieve o en el suelo, los neutrones se desplazan por el aire cientos de m. Tanto al caer al suelo, como al rebotar hacia el detector. Por tanto, habrá de tenerse en cuenta el clima de la zona donde se instale el sensor, para calibrarlo de manera correcta.

Se trata de un método innovador en el que resulta interesante el ahorro en el número de detectores necesarios para obtener unos datos fiables. Las simulaciones revelaron que, aunque el alcance en profundidad apenas abarque varias decenas de centímetros, horizontalmente se podrán obtener datos de humedad de puntos alejados centenas de metros del detector. Además, aunque en principio podría parecer que no es un método al alcance de cualquiera, se ha mostrado cómo ya existen diversos detectores de neutrones cósmicos por todo Europa y otros que se planifican instalar. Parte del auge de este método se debe a que es un proceso limpio (no produce residuos), con precisión y con alcance.

Es un método en desarrollo, existe mucho margen de mejora de las simulaciones. Se ha generado una fuente que simula la llegada de los neutrones cósmicos en un punto concreto. Sin embargo, podría sustituirse por una fuente extensa, la cual se ajusta mejor a la realidad, en la que los neutrones caen por toda la superficie del suelo. También podría considerarse el espectro de cósmicos incidentes en la fuente inicial en lugar de valores concretos de la energía.

Aunque no hemos utilizado energías mayores a 20 MeV por limitación del programa de simulaciones, podría calcularse. Se obtendrían neutrones muy rápidos, los cuales, como se ha estudiado, apenas interaccionarían con el hidrógeno del suelo debido a la baja sección eficaz del mismo para altas energías. Además, se han tomado los neutrones epitérmicos como rango energético más preciso a la hora de determinar la humedad.

Por último, se ha de tener en cuenta que en las simulaciones se han tomado terrenos ideales, homogéneos, con una composición constante. Sin embargo, en la realidad, existirán otras imperfecciones del terreno, como la posibilidad de encontrar bolsas de aire, restos orgánicos o desniveles en la superficie.

6. INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Fig. 1 Fuente artificial de neutrones y zona de efectividad del sensor sumergido bajo tierra.....	4
Fig. 2 Horizontes superiores del suelo. Son los adecuados para el desarrollo de las raíces.	5
Fig. 3 Interacciones de rayos cósmicos en la atmósfera, https://phits.jaea.go.jp/expacs/main-eng.htm	6
Fig. 4 Cuentas por hora de rayos cósmicos llegando a la Tierra en función del tiempo. En la parte superior (naranja) se representa la actividad solar. Fuente: Universidad de Delaware, 2007.	7
Fig. 5 Espectro energético de los neutrones cósmicos.	8
Fig. 6 Espectros energéticos de cuatro fuentes artificiales de neutrones.	9
Fig. 7 Secciones eficaces (en barns) de dispersión elástica de neutrones para distintos átomos.	10
Tabla 1: Número de colisiones necesarias para moderar neutrones desde 2 MeV hasta el rango térmico y hasta 100 eV para algunos elementos comunes en el suelo.	11
Fig. 8 Sección eficaz del gadolinio 157 en función de las energías del neutrón incidente.	12
Fig. 9 Secciones eficaces de absorción (discontinua) y dispersión (continua) del hidrógeno. ...	13
Tabla 2: Abundancia de distintos isótopos y sus secciones eficaces de absorción de neutrones térmicos.	16
Fig. 10 Reacciones ionizantes llevadas a cabo en el detector de neutrones en función de su energía.	17
Fig. 11 Puestos de monitorización de neutrones cósmicos en Europa. Fuente: Heye Reemt Bogena et al., 2022.	18
Fig. 12 Fragmento de uno de los ficheros de entrada.	19
Fig. 13 Región paralelepípedica formada por suelo (amarillo) y aire (gris).	19
Fig. 14 Trayectorias de los neutrones con la energía inicial de la fuente.	20
Fig. 15 En orden descendente: gráficas de flujos térmicos, epitérmicos y rápidos para distintas humedades del suelo.	22
Fig. 16 Flujos neutrónicos a diferentes energías a una misma distancia de la fuente. Agua pura a la izquierda y suelo seco a la derecha.	23
Fig. 17 Flujos neutrónicos en función de sus energías para 1 millón de historias con fuente de 20 MeV (izq.) y para 100 millones de historias con fuente de 1 MeV (drcha.).	23
Fig. 18 Flujos epitérmicos para una fuente con energía de 1 MeV.	24
Fig. 19 Curvas para detector a 3 m de altura (amarillo) y a 1 m (azul).	24
Fig. 20 Trazas de 500 historias para suelo seco (izq.) y para agua pura (drcha.).	25
Tabla 3 Fracciones molares, en peso y en volumen para SiO ₂	26
Tabla 4: Porcentaje en peso de las distintas moléculas del suelo calcáreo simulado.	27
Fig. 21 Flujos epitérmicos en función de la distancia a la fuente para el suelo calcáreo.	28
Fig. 22 Separación entre curvas de humedad (flujo frente a distancia de la fuente) consecutivas (de 25% en 25%) a 150 m de la fuente.	28
Fig. 23 Flujos epitérmicos en suelo de CaCO ₃ puro.	29

Fig. 24 Flujos epitérmicos en función del porcentaje de agua en peso.....	30
Fig. 25 Secciones eficaces de absorción en el rango térmico de diferentes elementos en función de su número atómico.	30
Fig. 26 Flujo epitérmico para distintos contenidos de gadolinio.	31
Fig. 27 Flujo térmico para distintos contenidos de gadolinio.	31
Fig. 28 Trazas de neutrones térmicos para 100 ppm de gadolinio, en los casos extremos de suelo seco (superior) y agua (inferior).....	32
Fig. 29 Diferencia de flujos epitérmicos entre aires húmedos y aire seco.	33
Fig. 30 Flujos epitérmicos a distintas humedades del suelo para dos capas de nieve de 10 cm (superior) y 30 cm (inferior).....	35
Fig. 31 Simulación análoga a los casos de la Fig. 30 pero para una capa de 50 cm de nieve. ...	35
Fig. 32 Trayectorias de los neutrones epitérmicos en un suelo cubierto por 50 cm de nieve.	36
Fig. 33 Espectro gamma para una fuente de 20MeV y un suelo de SiO ₂ con un 75% de agua. .	37
Fig. 34 Flujo de fotones de 2.2MeV (azul) en comparación al de neutrones epitérmicos (naranja) para un mismo punto y diferentes humedades del suelo.	38

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Susha Lekshmi S.U., D.N. Singh, Maryam Shojaei Baghini, *A critical review of soil moisture measurement*, *Measurement* **54**, 92–105, 2014.
- [2] W. Gardner, D. Kirkham, *Determination of soil moisture by neutron scattering*, *Soil Science* **73/5**, 391-402, 1952.
- [3] M. Kodama, S. Kudo, T. Kosuge, *Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement*, *Soil Science* **140/4**, 237-242, 1985.
- [4] M. Zreda, D. Desilets, T.P.A. Ferré, and R.L. Scott, *Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic ray neutrons*. *Geophys. Res. Lett.* **35**: L21402, 2008.
- [5] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, K. Niita, *Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.02*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684-690, 2018.
- [6] G. Reitz, *Radiation Environment in the Stratosphere*, *Radiation Protection Dosimetry* **48**, 5-20, 1993.
- [7] S. Al Dallal and W.J. Azzam, *A Brief Review of Historical Supernovae*. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, **11**, 73-86, 2021.
- [8] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation) Report, United Nations, New York, 1993.
- [9] Y.A. Akatov, *Some results of dose measurements along civil airways in the USSR*, *Radiation. Protection. Dosimetry.*, **48**, 59, 1993.

- [10] P. Goldhagen, M. Reginatto, T. Kniss, J.W. Wilson, R.C. Singleterry, I.W. Jones, W.V. Steveninck, *Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high altitude airplane*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **A 476**, 42-51, 2002.
- [11] D.M. Skyrme, *The evaporation of neutrons from nuclei bombarded with high energy protons*, Nuclear Physics, **35**, 177-193, 1962.
- [12] T. Sato, K. Niita, *Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere*, Radiat. Res. **166**, 544–555, 2006.
- [13] T. Sato, *Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS*. PLoS ONE 10(12): e0144679, 2015.
- [14] K. Shibata, O. Iwamoto, et al. “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering”, Journal of Nuclear Science and Technology **48**, 1–30, 2011.
- [15] A.K. Prinja, E.W. Larsen, *General principles of neutron transport*, **15**, 4-6, 2010.
- [16] M. Voytchev, M.P. Iñiguez, R. Méndez, A. Mañanes, L.R. Rodríguez and R. Barquero, *Neutron detection with a silicon PIN photodiode and 6LiF converter*, Nuclear Instruments and Methods **A 512/3**, 546, 2003.
- [17] A. Martin-Martin, M.P Iñiguez, P.N. Luke, R. Barquero, A. Lorente, J. Morchon , E. Gallego, G. Quincoces and J.M Marti-Climent, *Evaluation of CdZnTe as neutron detector around accelerators*, Radiation Protection Dosimetry **133**, 193, 2009.
- [18] R.L. Bramblett, R.I. Ewing, Boner T.W, *A new type of neutron spectrometer*, Nucl. Instr. Meths. **9**, 112, 1960.
- [19] S. Bravo Martín-Consuegra, J.A. Amorós Ortiz-Villajos, C. Pérez de los Reyes, F.J. García Navarro, R. Ruedas Luna, R. Jiménez Ballesta, "*Natural Enrichment of Trace Elements in Surface Horizons of Calcareous Soils (La Mancha, Spain)*", Journal of Chemistry, Article ID 606837, 10 pages, 2015.
- [20] R.J. McConn Jr, C.J. Gesh, R.T. Pagh, R.A. Rucker, R.G. Williams, *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*, Homeland Security, 257/357, 2011.
- [21] R. McTaggart, *The assay of soil carbon with naturally occurring cosmic ray neutrons*, South Dakota State University, Journal of Environmental Radioactivity, **264**, 2023.