

**TRABAJO FINAL  
CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN APLICACIONES  
TECNOLÓGICAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR**

**Datos neutrónicos para formaciones geológicas  
típicas en yacimientos de petróleo**

**Mario Orlando Azcurra**

**Co-directores:** Dr. Carlos Gho - Dr. Oscar Zamonsky

Diciembre de 2002

Comisión Nacional de Energía Atómica  
Universidad Nacional de Cuyo (Instituto Balseiro)  
Universidad de Buenos Aires (Facultad de Ingeniería)

## **AGRADECIMIENTOS**

A Oscar Zamonsky, por su buena voluntad y predisposición durante estos meses de trabajo.

A Carlos Gho, por su empeño y dedicación para que esta carrera de especialidad sea posible.

A mis compañeros de carrera, por su permanente apoyo, compañerismo y amistad forjada durante este año.

A Eugenia y Juan Pablo, por su amistad y alegría durante estos meses de trabajo final.

A mi familia, por su apoyo incondicional y su permanente aliento y confianza.

A mis amigos de siempre.

A Fernando Sanchez, por su contribución y aporte desinteresado en la realización del presente trabajo.

A la División Física de Reactores Avanzados del Centro Atómico Bariloche, por el uso de las instalaciones y por fomentar un clima de trabajo y compañerismo.

A la Comisión Nacional de Energía Atómica, por seguir apostando al desarrollo de la ciencia y la tecnología como camino hacia la construcción de un Estado-Nación independiente, justo y soberano.

Muchas gracias.

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizaron simulaciones con el programa Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Versión 4.B, de transporte de fotones y neutrones, irradiando con neutrones rápidos formaciones calizas puras, con 15% de porosidad absoluta y saturadas en diferentes proporciones de agua y petróleo. Se pretende modelar los resultados de irradiar una formación geológica productora de hidrocarburos con fuentes pulsadas de neutrones rápidos o fuentes continuas del tipo AmBe.

El principio físico de la herramienta simulada consiste en que los neutrones de alta energía colisionan con los átomos de la formación, excitando los mismos a niveles energéticos característicos de cada núcleo. Estos núcleos se desexcitan casi instantáneamente emitiendo fotones de energías correspondientes a sus niveles de excitación. Este proceso es el denominado scattering inelástico, y es el que interesa discriminar de otros procesos de interacción de neutrones a los fines de determinar la relación C/O en la formación.

En particular resulta de interés la detección de fotones de 4.439 MeV, correspondientes al 1er nivel inelástico del carbono, y fotones de 6.129 MeV, del 2do nivel inelástico del oxígeno. La relación de cuentas entre ambos picos del espectro será por lo tanto directamente proporcional a la relación C/O presente en la formación, la cual es utilizada como indicador de saturación en hidrocarburos. Un mayor contenido de carbono y un menor contenido de oxígeno es indicativo de mayor proporción de petróleo respecto de agua saturando los poros de la formación.

La herramienta RST (Reservoir Saturation Tool), existente comercialmente, utiliza una fuente pulsada de neutrones de 14 MeV y 10 kHz de frecuencia de pulso, contando con la ventaja de permitir discriminar diferentes procesos que ocurren durante y fuera del pulso de neutrones, tal como el scattering inelástico durante el pulso y la captura térmica fuera del mismo.

Se pretende determinar si, utilizando una fuente química continua de AmBe, es posible determinar la relación C/O sin interferencias en los picos del espectro obtenido, como así también evaluar el porcentaje de saturación en hidrocarburos  $S_o$  obtenido de dichas relaciones.

Se comprueba que no hay contribución de otros elementos del sistema simulado en los picos del C y O utilizando este tipo de fuentes, como así también que los valores de  $S_o$  calculados a partir de los mismos son concisos con lo esperado, de acuerdo a las composiciones utilizadas en la simulación.

Se verifica que el espectro de neutrones de la fuente sufre modificaciones en la formación, vinculadas a procesos de moderación de neutrones. Así mismo se verifica que el transporte de fotones en la formación es un proceso a tener en cuenta, de manera que se plantea la necesidad de calibración del instrumento con materiales de composiciones conocidas, si se pretende determinar cuantitativamente la relación C/O en átomos.

Por último se observa que se cumple un primer paso en la simulación de utilizar fuentes continuas para obtener un perfil C/O, ya que es posible con este tipo de fuentes reconocer en el espectro gamma obtenido los diferentes elementos constituyentes del sistema.

Se plantea para etapas posteriores del proyecto la simulación de detectores de NaI (TI) tal como los utilizados en este tipo de herramientas, como así también la utilización de litologías de diferentes composición respecto de rocas calizas puras, y la verificación de la intensidad de fuente de AmBe necesaria para lograr una detección de fotones estadísticamente significativa.

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| Agradecimientos.....   | i  |
| Resumen.....   | ii |
| <br>   |    |
| <b>1.INTRODUCCION AL MODELADO CON MCNP</b>   |    |
| 1.1. Introducción.....   | 1  |
| 1.2. Aproximación al modelado con Código Monte Carlo de sistemas geológicos productores de hidrocarburos.....  | 1  |
| 1.2.1. Física del problema y metodología de simulación utilizada.....  | 1  |
| 1.2.2 Característica del sistema simulado.....   | 3  |
| 1.3. Evaluación cualitativa de las relaciones C/O para formaciones saturadas con agua o petróleo, irradiadas con fuentes de neutrones continuas o pulsadas ..... | 6  |
| 1.4. Cuantificación de la relación C/O para formaciones saturadas con agua o petróleo, irradiadas con fuentes de neutrones continuas o pulsadas .....            | 8  |
| 1.5. Detección pulsada irradiando la formación geológica con fuente de neutrones pulsada de 14 MeV.....  | 9  |
| 1.6. Detección pulsada utilizando una fuente pulsada de neutrones de 14 MeV, para una formación caliza saturada en agua y petróleo de diferente composición..... | 12 |
| 1.7. Conclusiones.....   | 16 |
| <br>   |    |
| <b>2. FORMACION CALIZA IRRADIADA CONFUENTE QUIMICA CONTINUA DE AmBe</b>  |    |
| 2.1. Modelado de un sistema sonda-formación productiva real utilizando una fuente química continua de AmBe.....  | 17 |
| 2.1.1. Introducción.....   | 17 |
| 2.1.2. Generalidades.....  | 17 |
| 2.1.3. Características del sistema simulado.....   | 18 |
| 2.2. Evaluación cualitativa de la relación C/O para variaciones en la composición de los fluidos saturantes de formaciones calizas.....                          | 20 |
| 2.3. Cuantificación de las relaciones C/O para formaciones totalmente saturadas, semi-saturadas o no saturadas en petróleo.....                                  | 24 |
| 2.3.1. Generalidades.....  | 24 |
| 2.3.2. Analisis espectral de formaciones irradiadas con fuente de AmBe.....  | 24 |
| 2.3.3. Cálculo de la relación C/O en formaciones calizas con diferente grado de saturación en hidrocarburos.....   | 28 |
| 2.4. Conclusiones.....   | 30 |
| <br>   |    |
| <b>3. EVALUACION DE LA INTERACCION DE FOTONES Y NEUTRONES CON LA FORMACION</b>   |    |
| 3.1. Introducción.....   | 31 |
| 3.2. Espectros del Carbono y del Oxígeno.....  | 31 |
| 3.3. Necesidad de calibración de la sonda.....   | 33 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.1 Transporte de fotones en la formación.....  | 34        |
| 3.3.2 Transporte de neutrones en la formación.....  | 35        |
| <b>3.4. Cálculo de la relación C/O en átomos a partir del flujo de fotones y neutrones en la formación.....</b>                     | <b>37</b> |
| <br>  |           |
| <b>4. CONCLUSIONES</b>  |           |
| 4.1. Conclusiones finales.....  | 44        |
| <br>  |           |
| <b>5. BASE DE DATOS DE FORMACIONES GEOLOGICAS PRODUCTIVAS</b>   |           |
| 5.1. Generalidades.....   | 45        |
| 5.2. Datos de un testigo lateral del sondeo Los Perales (Santa Cruz)...   | 47        |
| 5.3. Composición de pozos de prueba para ensayos de sondas<br>contínuas C/O con fuentes pulsadas de 14 MeV.....                     | 48        |
| 5.4. Datos de pozos utilizados comunmente en calibración de sondas<br>neutrónicas.....  | 48        |
| 5.5. Composición y densidad de minerales comunmente presentes en<br>formaciones geológicas típicas de yacimientos petrolíferos..... | 49        |
| 5.6. Composición química y mineralógica promedio de rocas<br>sedimentarias e ígneas.....  | 50        |
| 5.7. Composición de formaciones metasedimentarias depositadas en<br>ambiente de margen continental pasivo.....                      | 51        |
| <br>  |           |
| <b>6. APENDICES</b>   |           |
| Apendice I: Tablas de resultados de simulaciones con MCNP.....  | 52        |
| Apendice II: Tabla de datos nucleares de elementos presentes en los<br>sistemas simulados.....                                      | 54        |
| <br>  |           |
| <b>7. BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>64</b> |

# **1. INTRODUCCION AL MODELADO CON MCNP**

## **1.1. Introducción**

El presente informe se realizó como conclusión del Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Aplicaciones Tecnológicas de la Energía Nuclear. El mismo se enmarca dentro del proyecto “Desarrollo a escala de laboratorio de una herramienta de perfilaje para determinar la saturación y las características litológicas mediante la irradiación neutrónica de formaciones geológicas”, dirigido por el Dr. Carlos Gho y llevado adelante por la División Física de Reactores Avanzados del Departamento de Ingeniería Nuclear, en instalaciones del Centro Atómico Bariloche (1).

Este trabajo final se realizó en dos etapas principales: una primera de adiestramiento en la técnica de simulación con el programa MonteCarlo N-Particle Transport Code System (2), en donde se evaluó de manera general la simulación de irradiar una formación geológica productiva saturada en agua o petróleo.

En una segunda etapa se pretendió una aproximación más certera a los sistemas reales explorados por hidrocarburos. Se procuró también lograr una mayor discriminación de la posible información a obtener, a partir de la cual determinar cualitativa y cuantitativamente las variaciones de la respuesta de la herramienta en función de variaciones composicionales en la formación geológica.

Por último se analizaron las variaciones en la relación C/O para diferentes porcentajes de saturación de la formación en hidrocarburos, a la vez que se calculó el porcentaje de saturación en petróleo a partir de las relaciones anteriores; este último resultado fue comparado con el esperado teóricamente, de acuerdo al sistema definido, realizando una evaluación de las posibles fuentes de error de acuerdo al método utilizado.

## **1.2. Aproximación al modelado con Código MonteCarlo de sistemas geológicos productores de hidrocarburos**

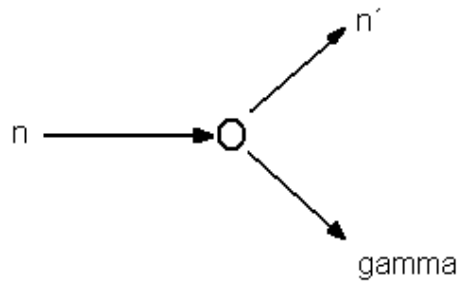
### **1.2.1. Física del problema y metodología de simulación utilizada**

La herramienta que se pretende simular es la denominada comercialmente RST o Reservoir Saturation Tool (3), la cual consiste en determinar variaciones en la relación C/O de la formación geológica, como indicador de variaciones en el porcentaje de saturación en hidrocarburos. Dicha relación es posible determinar bombardeando la formación geológica con neutrones rápidos, evaluando los picos de gammas emitidos por los núcleos atómicos excitados de la formación.

Los neutrones chocan con los componentes de la formación perdiendo parte de su energía, transfiriendo esta energía a los núcleos de los átomos blancos, los cuales se excitan a sus niveles energéticos característicos.

Esta reacción nuclear es denominada scattering inelástico, y tiene umbrales de energía a partir de los cuales se produce, dependiendo del núcleo blanco. Los núcleos excitados vuelven a su estado fundamental emitiendo gammas instantáneos de energías características (Fig. 1).

La reacción nuclear que ocurre puede sintetizarse como  $(n, n', \gamma)$ , siendo de particular interés la detección de los gamma prompt correspondientes al primer nivel de excitación del  $^{12}\text{C}$ , de 4.439 MeV, y los gamma prompt correspondientes al segundo nivel de excitación del  $^{16}\text{O}$ , de 6.129 MeV (4).



**Figura 1.** Esquema representativo de la dispersión o scattering inelástico  $(n, n', \gamma)$  de neutrones rápidos con núcleos atómicos de la formación

Los procesos de interacción y transporte de neutrones, fotones y electrones en la materia puede ser simulados a través de programas de cálculo. Uno de los más usados en la actualidad es el Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP), el cual permite simular geometrías en tres dimensiones, posee bibliotecas de datos nucleares e incluye técnicas de reducción de varianza (5).

La técnica Monte Carlo consiste en seguir a cada una de las partículas de un conjunto numeroso de ellas, desde una fuente u origen definido y a través de toda su vida o historia, desde que nace y hasta que desaparece del sistema definido, ya sea por absorción o escape.

En cada paso de la vida de la partícula se utilizan distribuciones de probabilidades, tomando un valor al azar desde los datos de transporte, para determinar cual será la salida de la partícula de ese paso. Se toman números al azar entre 0 y 1 para determinar la interacción posible y el sitio en donde tiene lugar la misma, basándose en reglas físicas y probabilidades que gobiernan los procesos y materiales involucrados en el sistema problema.

El método cuenta con la ventaja de poder definir diferentes trazas y “pesos” de las partículas de interés, como así también zonas del sistema en donde queden almacenados algunos aspectos de su comportamiento promedio (“tallies”), definidos por interés del usuario. Cuanto más historias de partículas individuales se sigan, la distribución de las mismas se va conociendo mejor, de manera que son computadas las cantidades de interés junto con las estimaciones de la incertidumbre estadística de los resultados.

En una primera etapa del trabajo se realizó una aproximación a la simulación de sistemas geológicos naturales factibles de ser explorados por contenido de hidrocarburos, utilizando la técnica Monte Carlo.

Se presentan las características de los inputs corridos en el programa MCNP, como así también las relaciones C/O obtenidas con tal método para formaciones geológicas calizas saturadas 100% en petróleo o 100% en agua, y su respuesta ante la utilización de fuentes puntuales continuas o pulsadas.



Los resultados de 55 horas de corrida del programa, durante la etapa de entrenamiento, son presnetados a continuación, con la correspondiente evaluación del error estadístico arrojado por el mismo (Apéndice I) y la aproximación de la relación C/O al valor teórico estimado.

Como primer objetivo se plantea la aproximación al modelado teórico de la sonda y a las características de los archivos de entrada del programa MCNP, como así también la interpretación de la información de salida arrojada por el mismo. Se realiza también una primer consideración cualitativa acerca de la influencia de las variaciones composicionales del fluido saturante en el espectro de detección gamma arrojado por la herramienta a diseñar.

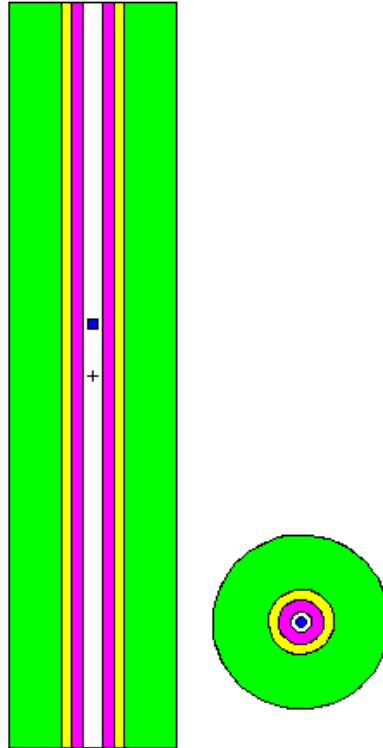
Se pretende evaluar la respuesta de una misma formación al ser irradiada por fuentes de neutrones de diferentes características, como son las fuentes pulsadas de 14 MeV o las fuentes continuas de AmBe, de 4.5 MeV de energía espectral promedio (3).

De esta manera es que se espera obtener una primer acercamiento a la técnica de simulación utilizada, como así tambien definir puntos débiles o críticos en el modelado teórico, con el objetivo de continuar, en una segunda etapa, con simulaciones más aproximadas a los diferentes tipos de sondas utilizadas en la actualidad.

### **1.2.2 Característica del sistema simulado**

Se simuló un pozo cilíndrico de 4.5'' de diámetro y 10 metros de longitud, con una sonda en su interior de 2'' de diámetro conteniendo una fuente puntual en el origen de coordenadas y un detector cilíndrico de 1'' de diámetro y 1'' de altura, colocado a una distancia de 5'' por encima de la fuente (1). El pozo posee un revestimiento de hormigón de 1'' de espesor y la profundidad de alcance dentro de la formación geológica es de 5.5'' a partir del revestimiento de hormigón (Fig.2).

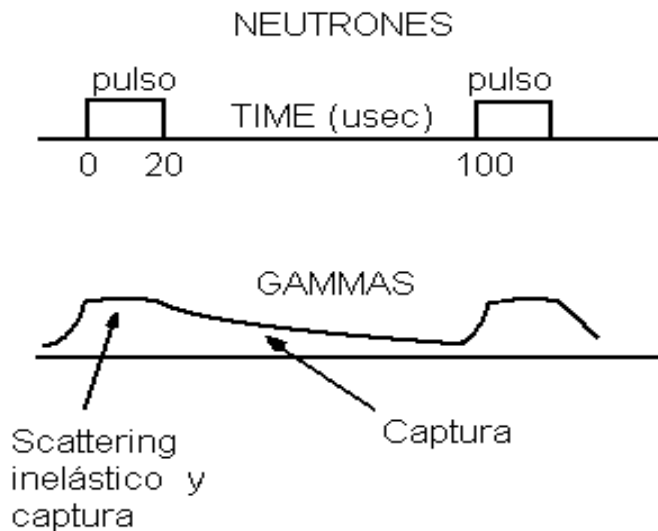
Se simuló la irradiación de la formación con los dos tipos de fuentes de neutrones mencionadas. La fuente puntual continua de neutrones, colocada en el origen de coordenadas, es una fuente química de AmBe, con un espectro de energía que varía de 0 a 11 MeV y un valor de energía promedio en 4.5 MeV aproximadamente. Los detectores simulados en este caso fueron dos, uno de fotones con ventanas de energía cada 0.5 MeV, cubriendo el espectro de energías de 0 a 7 MeV, y uno de neutrones con ventanas cada 1 MeV, cubriendo energías de 0 a 14 MeV (1).



**Figura 2.** Esquema parcial del sistema simulado, en donde no se representa la dimensión total a lo largo del eje Z; corte longitudinal y transversal al mismo a la altura del detector.

La fuente puntual pulsada de 14 MeV simulada es del tipo acelerador de iones D-T con blanco de T, con pulsos de 20 microsegundos de duración y 10 kHz de frecuencia de pulso (Fig. 3). Asociados a esta fuente pulsada se definieron dos detectores, uno de fotones y uno de neutrones, con espectros de energías similares a los utilizados para la fuente química; para esta fuente en particular se definieron detecciones pulsadas, una durante el pulso de neutrones y otra entre los 20 microsegundos y 100 microsegundos posteriores al pulso de neutrones.

A los fines de discriminar el scattering inelástico, ocurrido con neutrones rápidos durante el pulso de neutrones, de los gammas prompt por captura térmica ocurridos durante y fuera del pulso de neutrones (6) (Fig.3), se definieron ventanas temporales de detección cada 10 useg, desde que se inicia el pulso hasta 30 useg después de terminado el mismo. Por otra parte se tomaron intervalos de energía de 0.5 MeV en los picos de scattering inelástico del carbono y oxígeno (4.439 y 6.129 MeV) y en el intervalo correspondiente a los gamma prompt de captura térmica del hidrógeno (2.223 MeV).



**Figura 3.** Esquema de una fuente pulsada de 14 MeV y 10 kHz de frecuencia y pulsos de neutrones de 20 useg de duración; se esquematizan los diferentes procesos que ocurren durante y después del pulso de neutrones (6).

Los materiales utilizados fueron, como formación geológica, una roca caliza pura de composición  $\text{CaCO}_3$ , con una porosidad de 15% y una densidad de  $2.45 \text{ gr/cm}^3$  en el caso de saturación con agua, y  $2.68 \text{ gr/cm}^3$  en el caso de saturación con petróleo (1), (7); esta diferencia exagerada en los valores de densidades utilizadas aleja al sistema modelado de la realidad, pero se pretendía con la misma resaltar en esta primera etapa las diferencias composicionales entre una formación y otra.

| Elemento<br>(% en átomos) | Fm + AGUA<br>? = 2.45<br>grs/cm <sup>3</sup> | Fm + PETROLEO<br>? = 2.68<br>grs/cm <sup>3</sup> | HORMIGON LIVIANO<br>? = 2.2<br>grs/cm <sup>3</sup> | ACERO<br>? = 0.00139<br>grs/cm <sup>3</sup> | AGUA<br>? = 1.18<br>gr/cm <sup>3</sup> |
|---------------------------|--|--|--|---|--|
|                           | %v/v = 86.204                                |  | %v/v= 7.183  | %v/v= 0.0083                                | %v/v= 5.306                            |
| H                         | 11.77  | 13..59   | 15.32  |   | 66.7                                   |
| O                         | 55.32  | 47.99  | 50.85  |   | 33.3                                   |
| C                         | 16.45  | 22.41  | 0.13   | 0.14  |  |
| Ca                        | 16.45  | 16.00  | 1.70   |   |  |
| Na                        |  |  | 10.70  |   |  |
| K                         |  |  | 0.51   |   |  |
| Al                        |  |  | 1.94   |   |  |
| Fe                        |  |  | 0.39   | 67.53                                       |  |
| Si                        |  |  | 18.46  | 1.94  |  |
| Cr                        |  |  |  | 20.01                                       |  |
| Ni                        |  |  |  | 8.39  |  |
| Mn                        |  |  |  | 1.99  |  |

**Tabla 1.** Composición y densidad de los materiales utilizados; valores de composición expresados como porcentaje en átomos.

El hormigón utilizado fué hormigón liviano de  $2.2 \text{ gr/cm}^3$ , mientras que en el espacio definido entre sonda y diametro interno del pozo fue colocado un fluido teórico de composición acuosa y  $1.18 \text{ gr/cm}^3$  de densidad, valor similar al de los fluidos bentoníticos utilizados en perforaciones petroleras (7). Por último, en el espacio existente entre sonda y detector se colocó vacío, mientras que se definió al detector como compuesto de acero y relleno de aire de densidad  $0.00139 \text{ gr/cm}^3$ . Los datos de composición usados se muestran en la Tabla 1.

En cuanto a algunas especificaciones del input ingresado a MCNP, se hicieron los cálculos sin introducir ninguna técnica de reducción de varianza, a la vez que se definió en los detectores pulsados un factor de multiplicación igual a la inversa de la duración en tiempo del intervalo considerado, a los fines de que el detector arroje cuentas/cm<sup>2</sup>.seg en lugar de cuentas totales detectadas durante el intervalo de tiempo.

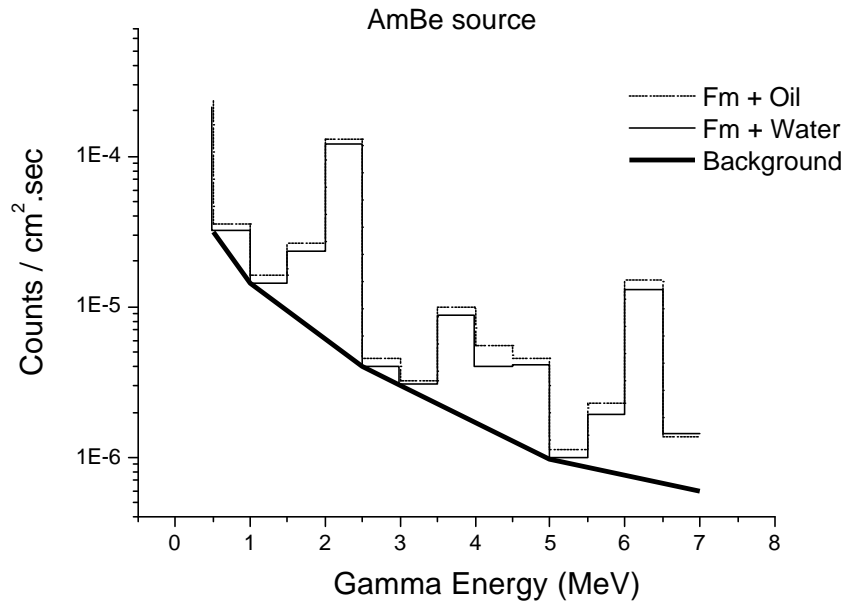
En la primer etapa de adiestramiento en el uso del programa, se corrió el mismo con los sistemas definidos anteriormente durante 55 horas, evaluando a continuación los resultados obtenidos en cuanto a las relaciones C/O para diferentes fluidos saturantes, como así también errores relativos observados para los diferentes dispositivos modelados.

### **1.3. Evaluación cualitativa de las relaciones C/O para formaciones saturadas con agua o petróleo, irradiadas con fuentes de neutrones continuas o pulsadas**

Se simuló en MCNP la irradiación de una formación caliza saturada con agua o con petróleo, a los fines de evaluar variaciones en la relacion C/O como indicador de la naturaleza del fluido saturante. Se asume que el principal proceso que registran los detectores de fotones son los rayos gamma instantáneos emitidos luego que los neutrones rápidos sufren scattering inelástico con los átomos de la formación. Los gamma prompt de scattering inelástico en el C son de  $4.439 \text{ MeV}$ , y en el O de  $6.129 \text{ MeV}$ , los que en el espectro obtenido corresponden a los intervalos entre 4 y  $4.5 \text{ MeV}$  y entre 6 y  $6.5 \text{ MeV}$  respectivamente.

Analizando el espectro obtenido (Fig. 4) se observan resultados concisos con los datos ingresados, tanto para los picos de H en  $2.22 \text{ MeV}$  como para el C en  $4.44 \text{ MeV}$ . Por su parte, en el caso del pico de O en  $6.13 \text{ MeV}$ , el espectro obtenido al irradiar la formación geológica con una fuente de AmBe muestra relaciones contrarias a la esperada, ya que la formación saturada en petroleo presenta menor contenido en oxigeno respecto de la misma formación saturada en agua.

Esta incongruencia puede interpretarse a partir de considerar los intervalos de energía de  $0.5 \text{ MeV}$  demasiado grandes como para asumir que el pico observado entre 6 y  $6.5 \text{ MeV}$  corresponde solo al gamma instantaneo de scattering inelástico del oxígeno, de  $6.129 \text{ MeV}$  de energía.

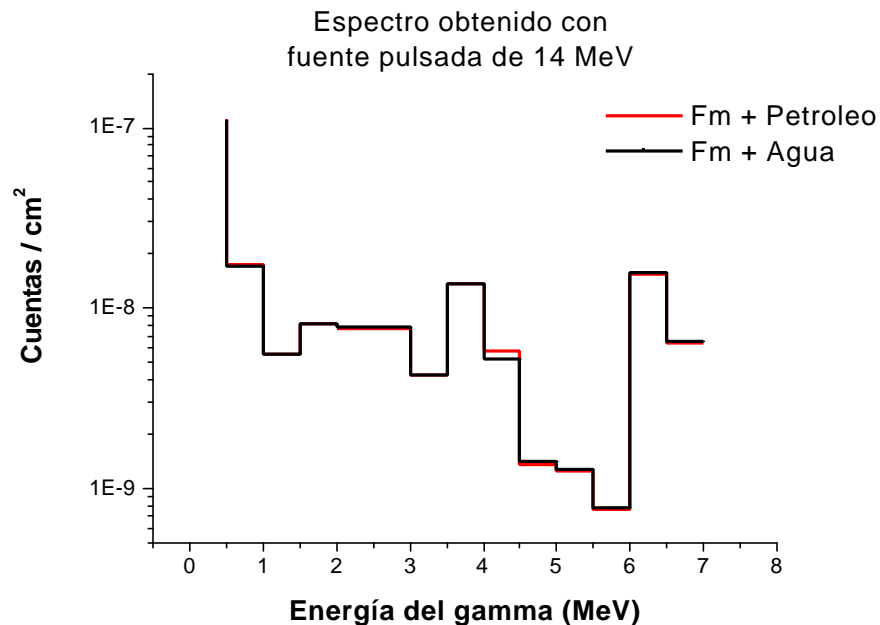


**Figura 4.** Espectro de detección de fotones utilizando una fuente química continua de AmBe de 4.5 MeV de energía promedio.

En el caso de la fuente pulsada de 14 MeV, se representa graficamente el espectro de detección durante el pulso de 20 useg restando cuatro veces el espectro de detección fuera del pulso en el intervalo de 20 a 100 useg (Fig.5). Esto último es debido al factor de multiplicación  $1/80$  useg utilizado en el caso de la detección fuera de pulso, y a los fines de hacerlo comparable con las cuentas detectadas durante el pulso, las cuales fueron registradas con un factor de multiplicación de  $1/20$  useg.

Se interpreta que los gamma detectados durante los 20 useg de duración del pulso se deben a scattering inelástico con neutrones rápidos y captura térmica, mientras que la detección registrada fuera del pulso corresponden en su mayoría a gammas de captura térmica, por lo cual se resta la detección gamma fuera del pulso por considerar que no corresponde al fenómeno que se pretende evaluar (6).

En el espectro obtenido con la fuente pulsada de 14 MeV (Fig.5) se observa, para los picos de C y O, como así también para el H, relaciones coherentes con los resultados esperados, en cuanto a las variaciones relativas en los contenidos de estos elementos en formaciones saturadas con agua o petróleo.



**Figura 5.** Espectro de detección de fotones utilizando una fuente pulsada de 14 MeV, restando la detección obtenida fuera del pulso de 20<sup>?</sup> seg.

#### 1.4. Cuantificación de la relación C/O para formaciones saturadas con agua o petróleo, irradiadas con fuentes de neutrones continuas o pulsadas

Se calcularon las relaciones C/O a partir de restar, de cada espectro obtenido y de cada pico de interés, el fondo debido principalmente a efecto Compton por interacción de la radiación gamma con los materiales del pozo. El mismo fué estimado graficamente de los espectros obtenidos con fuente continua de AmBe o con fuente pulsada de 14 MeV (Fig. 4 y Fig. 5).

Los resultados del cálculo de los cocientes C/O se muestran detallados en la Tabla 2, como así también el error relativo arrojado por MCNP, propagado al cociente entre las cuentas detectadas para el C y para el O; del resultado del cálculo realizado se observan resultados cualitativamente coherentes con los esperados

En el caso del sistema definido con fuente continua de AmBe, la detección de mayor contaje gamma dentro del rango de energías del O (6.13 MeV) para la formación saturada con petróleo respecto de la saturada con agua, resulta difícil atribuirla al error relativo de la medición, ya que este resultado cae fuera de los rangos de variación del mismo. Sin embargo se puede considerar la influencia de algunas características del sistema definido, tales como intervalos de detección de 0.5 MeV demasiado grandes para los picos de energía que se pretenden discretizar.

| AmBe                               |               | Error Relativo propagado |
|------------------------------------|---------------|--------------------------|
| C / O Oil                          | 0.270 ± 0.012 | 0.045                    |
| C / O Water                        | 0.186 ± 0.009 | 0.047                    |
| <b>14MeV</b>                       |               |                          |
| C / O Oil                          | 0.281 ± 0.015 | 0.056                    |
| C / O Water                        | 0.229 ± 0.013 | 0.058                    |
| <b>Teórica (total del sistema)</b> |               |                          |
| C/O Oil                            | 0.413         |                          |
| C/O Water                          | 0.267         |                          |

**Tabla 2.** Relaciones C/O y su error relativo propagado para saturación con agua o petróleo, en formaciones irradiadas con fuente continua de AmBe de 4.5 MeV promedio, o fuente pulsada de 14 MeV.

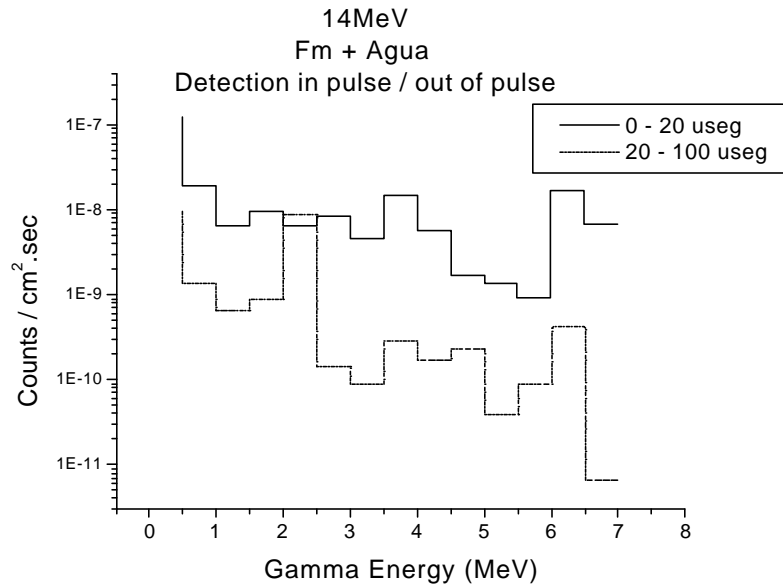
A su vez se observan errores relativos menores para el sistema definido con fuente continua respecto del sistema definido con fuente pulsada, lo cual puede entenderse a partir del uso de ventanas de detección en esta última, con la consecuente disminución de la estadística de la detección.

Por tratarse de una primer aproximación a la problemática del sistema a desarrollar, se consideran resultados concisos con lo esperado, de acuerdo a las características del sistema definido primariamente. Se evalúan como posibles fuentes de errores los intervalos de detección utilizados, considerados poco adecuados para las energías que se pretenden discretizar, como así también las variaciones en la densidad de la formación al modificar la composición del fluido saturante.

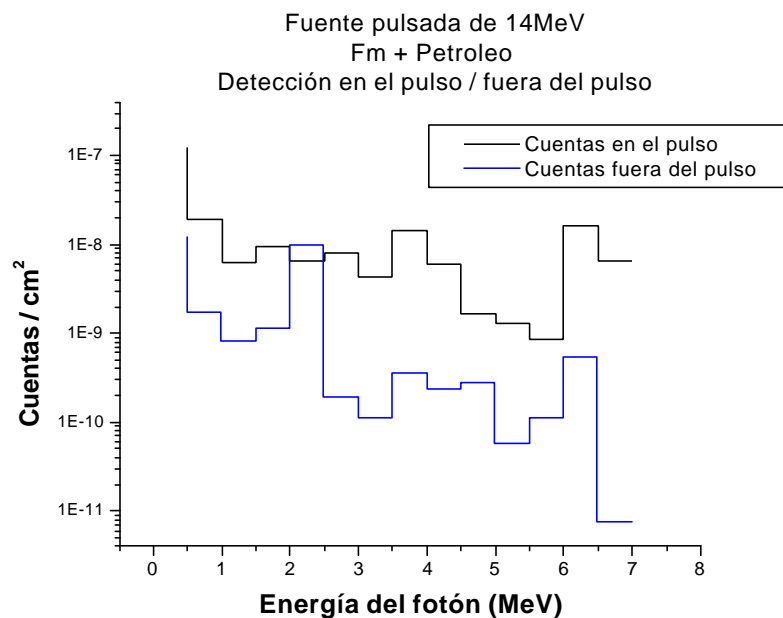
### **1.5. Detección pulsada irradiando la formación geológica con fuente de neutrones pulsada de 14 MeV**

En la simulación realizada para la formación caliza irradiada con fuente pulsada de 14 MeV, se definieron en principio dos ventanas temporales de detección, una de 20 useg durante el pulso de neutrones, y otra de 80 useg de duración, en el intervalo entre pulso y pulso de neutrones. Se comparan los espectros de cuentas colectadas durante el pulso y fuera del pulso de neutrones, tanto para la formación saturada en petróleo (Fig. 6) como para la saturada en agua (Fig. 7).

Del análisis de estos espectros se observa, para los picos de C y O, detecciones en cuentas por segundo, 20 a 30 veces mayores durante el pulso de neutrones, respecto de la detección fuera del pulso de neutrones (Tabla 3). Esto significa que ocurren 30 veces más reacciones con C y O, tales como scattering inelástico y captura térmica, durante el pulso de neutrones rápidos respecto del intervalo de tiempo existente entre un pulso y el siguiente pulso de neutrones.



**Figura 6.** Espectros de detección gamma para una fuente pulsada de 14 MeV, irradiando una formación caliza saturada con agua; las ventanas de detección son de 20 useg dentro del pulso de neutrones rápidos, y de 80 useg fuera del pulso de neutrones.



**Figura 7.** Espectros de detección gamma para una fuente pulsada de 14 MeV, irradiando una formación caliza saturada con petróleo; las ventanas de detección son de 20 useg dentro del pulso de neutrones rápidos, y de 80 useg fuera del pulso de neutrones.

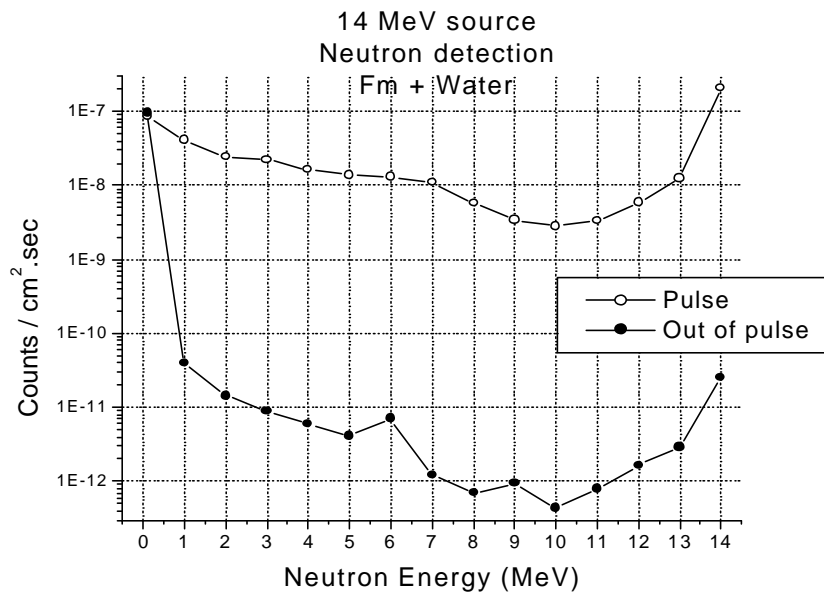
Por su parte, para el pico del hidrógeno entre 2 y 2.5 MeV se observa mayor contaje gamma fuera del pulso que durante el mismo. Si se asume que



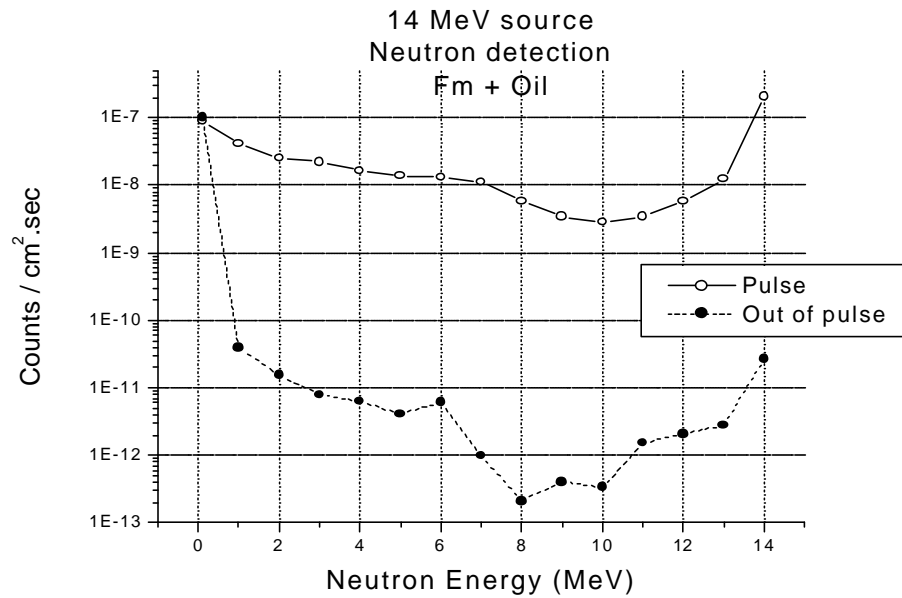
en el H ocurre mayormente captura de neutrones térmicos, observando los espectros de neutrones detectados durante y fuera del pulso aparenta haber mayor termalización fuera del pulso que dentro del mismo (Fig.8 y Fig. 9), por lo que este mayor conteo de gammas instantaneos en el rango de energías del H resulta coherente.

| 14 MeV source |          |              |                      |
|---------------|----------|--------------|----------------------|
| Fm + Oil      |          |              |                      |
|               | Pulse    | Out of Pulse | Pulse / Out of pulse |
| H             | 6.51E-09 | 9.64E-09     | 0.68                 |
| C             | 6.05E-09 | 2.26E-10     | 26.72                |
| O             | 1.60E-08 | 5.31E-10     | 30.11                |
| Fm + Water    |          |              |                      |
|               | Pulse    | Out of Pulse | Pulse / Out of Pulse |
| H             | 6.28E-09 | 8.88E-09     | 0.71                 |
| C             | 5.37E-09 | 1.67E-10     | 32.16                |
| O             | 1.62E-08 | 4.16E-10     | 38.97                |

**Tabla 3.** Relaciones de contaje entre las ventanas de detección definidas para la fuente pulsada de 14 MeV



**Figura 8.** Espectro de detección de neutrones para la formación saturada en agua, con ventanas de detección cada 1 MeV y ventanas temporales durante el pulso y fuera del pulso de neutrones de 14 MeV.



**Figura 9.** Espectro de detección de neutrones en la formación saturada con petróleo; ventanas de detección cada 1 MeV y ventanas temporales definidas durante el pulso y fuera del pulso de neutrones de 14 MeV.

A pesar de ellos se considera esta última observación como muy grosera, en función de los intervalos de energía de 1 MeV utilizados en la detección de neutrones. Se consideran estos intervalos no adecuados a los fines de discriminar el flujo de neutrones térmicos de 0.025 eV dentro y fuera del pulso, respecto del flujo de neutrones epitérmicos y rápidos.

### 1.6. Detección pulsada utilizando fuente pulsada de neutrones de 14 MeV, para una formación caliza saturada en agua y petróleo de diferente composición a la anterior

Se definió un nuevo sistema en donde se modificó la composición del petróleo saturante, se utilizaron densidades de formaciones geológicas reales, se redefinió la composición y densidad del detector y se agregó una tubería de acero entre el pozo y el casing de hormigón (3).

También fueron modificadas las dimensiones del detector al doble de su tamaño anterior, como así también se redujo la longitud del sistema, de 10 mts a 5,05 mts, a los fines de mejorar la detección de fotones y disminuir el error estadístico. La nueva composición del sistema, que será utilizada en las corridas sucesivas, se muestra detallada en la Tabla 4.

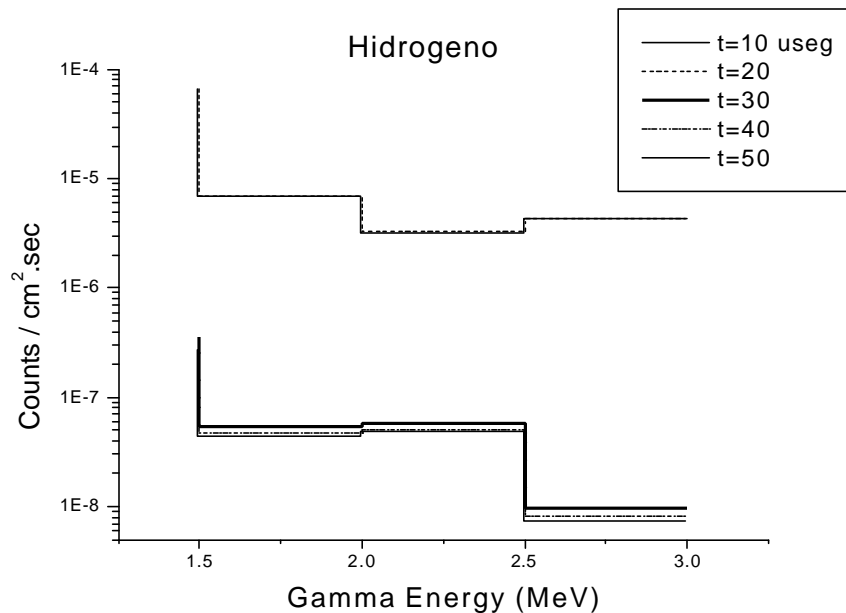
| Elemento<br>(% en<br>átomos) | Fm + AGUA +<br>PETROLEO<br>? =2.4485<br>grs/cm <sup>3</sup> | HORMIGON<br>LIVIANO<br>? = 2.2 grs/cm <sup>3</sup> | ACERO<br>? = 7.86<br>grs/cm <sup>3</sup> | AGUA<br>? = 1.00<br>gr/cm <sup>3</sup> | DETECTOR<br>? =<br>0.001293<br>gr/cm <sup>3</sup> |
|------------------------------|---|--|--|--|---|
|                              | %v/v = 86.204   | %v/v= 7.183  | %v/v=<br>0.0083                          | %v/v= 5.306                            | %v/v=<br>0.00547                                  |
| H                            | 25.378  | 15.32  |  | 66.7                                   |   |
| O                            | 42.684  | 50.85  |  | 33.3                                   | 21.2  |
| C                            | 19.616  | 0.13   | 0.14                                     |  |   |
| Ca                           | 12.243  | 1.7  |  |  |   |
| Na                           |   | 10.7   |  |  |   |
| K                            |   | 0.51   |  |  |   |
| Al                           |   | 1.94   |  |  |   |
| Fe                           |   | 0.39   | 67.53                                    |  |   |
| Si                           |   | 18.46  | 1.94                                     |  |   |
| Cr                           |   |  | 20.01                                    |  |   |
| Ni                           |   |  | 8.39                                     |  |   |
| Mn                           |   |  | 1.99                                     |  |   |
| S                            | 0.059   |  |  |  |   |
| N                            | 0.019   |  |  |  | 78.8  |

**Tabla 4.** Composición del sistema utilizada en la simulación de irradiación con fuente pulsada, con ventanas temporales de detección cada 10 useg, desde los 0 hasta los 50 useg de iniciado el pulso de neutrones.

Con este nuevo sistema definido se definieron ventanas temporales de detección durante el pulso y fuera del pulso, con el objetivo de intentar discriminar entre el scattering inelástico, principalmente ocurrido con neutrones rápidos durante el pulso de neutrones, de los gammas prompt por captura térmica ocurridos principalmente fuera del pulso de neutrones. Esto a los fines de determinar la existencia o no de un fondo no deseado en los picos de scattering inelástico del carbono y el oxígeno.

Se definieron ventanas temporales de detección cada 10 useg, desde que se inicia el pulso hasta 30 useg después de terminado el mismo.

Se tomaron intervalos de energía de 0.5 MeV en la energía de 2.223 MeV, correspondiente a la captura térmica del hidrógeno (Fig.10), como así también en los 4.439 MeV y 6.129 MeV, energías de los gamma prompt de scattering inelástico del carbono (Fig. 11) y del oxígeno (Fig.12).

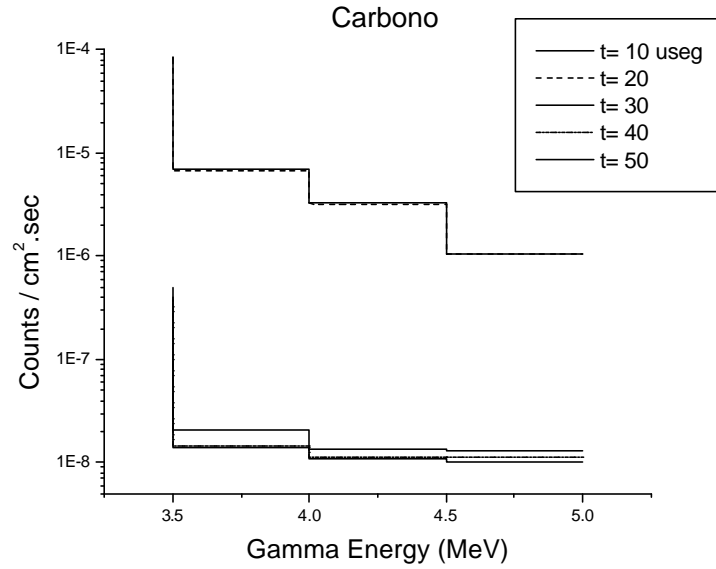


**Figura 10.** Ventanas temporales de detección de fotones en el rango de energía de los gammas prompt de captura térmica del H, utilizando una fuente pulsada de 14 MeV e irradiando formaciones calizas saturadas con petróleo. Los intervalos de 10 y 20 useg corresponden al pulso de neutrones rápidos.

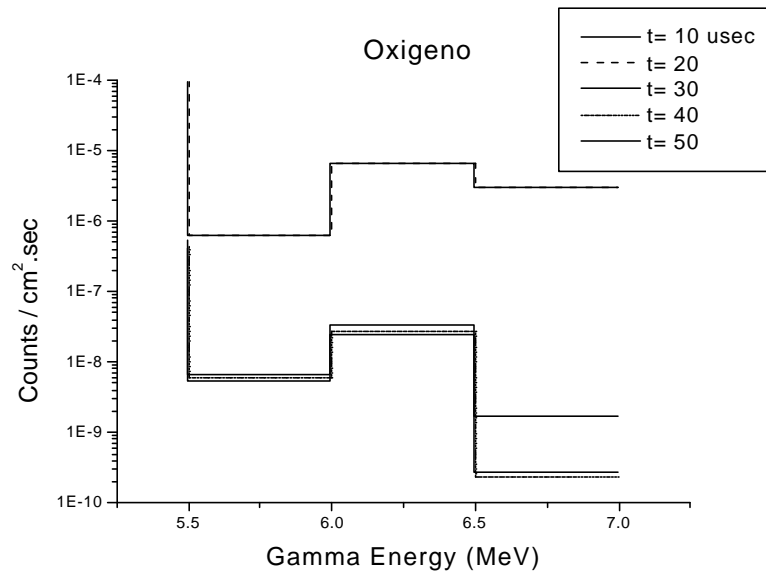
Se observa, en el caso del hidrógeno, que las cuentas detectadas durante el pulso son del orden de 50 veces mayor que las cuentas detectadas fuera del pulso, por ejemplo a los 10 useg de terminado el mismo (Tabla 5).

Esta diferencia es mayor en el caso del carbono y oxígeno, lo cual puede entenderse a partir de asumir que una vez apagada la fuente, aunque en menor cantidad, aún existen neutrones térmicos factibles de sufrir captura por el H.

Por otra parte, en el caso del C y O, prácticamente no existen fuera del pulso neutrones rápidos que puedan sufrir scattering inelástico con sus núcleos, por lo que el conteo de gammas prompt es mas de 200 veces menor fuera del pulso de neutrones que dentro del mismo (Tabla 4).



**Figura 11.** Ventanas temporales de detección de fotones en el rango de energía de los gammas prompt de scattering inelástico del C, utilizando una fuente pulsada de 14 MeV e irradiando formaciones calizas saturadas con petróleo. Los intervalos de 10 y 20 useg corresponden al pulso de neutrones rápidos.



**Figura 12.** Ventanas temporales de detección de fotones en el rango de energía de los gammas prompt de scattering inelástico del O, utilizando una fuente pulsada de 14 MeV e irradiando formaciones calizas saturadas con petróleo. Los intervalos de 10 y 20 useg corresponden al pulso de neutrones rápidos.

| Tiempo<br>(microseg.) | Cuentas.seg  |               |               |
|-----------------------|--------------|---------------|---------------|
|                       | H            | C             | O             |
| 10                    | 3.21485E-6   | 3.23775E-6    | 6.42025E-6    |
| 20                    | 3.24212E-6   | 3.24051E-6    | 6.44758E-6    |
| 30                    | 5.77514E-8   | 1.34205E-8    | 3.34168E-8    |
| 40                    | 5.07727E-8   | 1.11938E-8    | 2.75322E-8    |
| 50                    | 4.76729E-8   | 1.06352E-8    | 2.43247E-8    |
| <b>20 / 30</b>        | <b>56.14</b> | <b>241.46</b> | <b>192.94</b> |

**Tabla 5.**Conteo de gammas prompt durante el pulso y fuera del pulso de neutrones de 14 MeV para los núcleos de hidrógeno, carbono y oxígeno. La relación de las mismas se realiza con la detección registrada entre los 10 y 20 useg de iniciado el pulso, y los 0 y 10 useg luego de apagada la fuente.

## 1.7. Conclusiones

Las variaciones en la relación C/O para formaciones geológicas saturadas en petróleo o agua son cualitativamente coherentes con las esperadas, a partir de considerar las formaciones petrolíferas como enriquecidas en carbono y empobrecidas en oxígeno, respecto de las formaciones saturadas en agua. A pesar de no ser posible hacer aproximaciones cuantitativas más certeras a partir de las mismas, es factible obtener una primera aproximación a las características del problema.

Por su parte el uso de una fuente de neutrones pulsada permite discriminar los tipos de procesos de interacción de la radiación con la materia que ocurren en el sistema planteado. A partir de relaciones establecidas con ventanas temporales de detección es posible una mayor discretización de los procesos existentes para cada elemento de interés.

## **2. FORMACION CALIZA IRRADIADA CON FUENTE QUIMICA CONTINUA DE AmBe**

## **2.1. Modelado de un sistema sonda-formación productiva real utilizando una fuente química continua de AmBe**

### **2.1.1. Introducción**

En una primera etapa del proyecto de desarrollo a escala de laboratorio de la herramienta de perfilaje neutrónico RST (Reservoir Saturation Tool) (3), interesa conocer si la relación C/O de formaciones geológicas reales puede ser evaluada a partir de irradiar las mismas con fuentes continuas.

Las fuentes químicas continuas del tipo AmBe son comercialmente mas baratas que las fuentes pulsadas del tipo acelerador de iones. Sin embargo, la literatura consultada hace referencia a que estas fuentes no son las más adecuadas para perfilajes del tipo C/O (3),(8); esto último en función de que emiten neutrones con un espectro de energía cuyo promedio cae en 4.5 MeV, con lo que no superarían el umbral de energía para la reacción de scattering inelástico del O, ubicado en los 6 MeV aproximadamente.

A pesar de ello las fuentes del tipo AmBe tienen un espectro de emisión hasta los 11 MeV (9), lo cual sumado a que los argumentos contrarios a su uso no son del todo concisos, se hace incapié en simular irradiaciones de formaciones geológicas con este tipo de fuentes y evaluar a partir de los espectros obtenidos las relaciones C/O y los porcentajes de saturación en hidrocarburos calculados a partir de las mismas.

Se pretende, en esta primera etapa del proyecto, analizar la posibilidad de diferenciar picos de emisión gamma de los diferentes elementos, de acuerdo al espectro de energías de fotones que llegan al detector. En etapas posteriores del proyecto se analizará el mismo espectro obtenido a partir de simular un detector real, del tipo centellador de NaI(Tl) utilizados comunmente en este tipo de herramientas. También deberá ser analizada la intensidad mínima de fuente necesaria como para que la estadística, a partir del número de cuentas que llegan al detector, sea aceptable.

A continuación se detallan las características de los inputs corridos en el programa MCNP (MonteCarlo N-particle Transport Code System) simulando formaciones calizas totalmente saturadas, parcialmente saturadas o no saturadas en petroleo. Se presentan las relaciones C/O obtenidas para los diferentes casos, y su respuesta ante la utilización de fuentes puntuales continuas. Se compara el espectro del flujo neutronico de la fuente de AmBe con el flujo simulado en la formación.

### **2.1.2. Generalidades**

Se pretende evaluar la respuesta de una misma formación geológica, con diferentes porcentajes de saturación en petroleo, al ser irradiada por fuentes químicas continuas del tipo AmBe.

A su vez se pretende identificar con intervalos de energía adecuados los diferentes picos de detección que aparecen en el espectro gamma, factibles de interferir en la cuantificación de los picos de scattering inelástico



del carbono y oxígeno utilizados en la evaluación del fluido saturante de la formación.

Por otra parte se evaluaron las variaciones cualitativas y cuantitativas de la relación C/O, a la vez que se realizaron cálculos de porcentaje de saturación en petróleo a partir de las mismas y se evaluaron los resultados esperados con los obtenidos a partir del sistema definido.

Respecto del sistema utilizado en las simulaciones de adiestramiento en el uso de MCNP, se agregó un entubado de acero de 0.3'' de espesor entre cemento y pozo (3), y se modificó la composición del petróleo saturante agregando contenidos reales en sulfuro y nitrógeno, elementos comúnmente presentes en los petróleos de las cuencas argentinas (7).

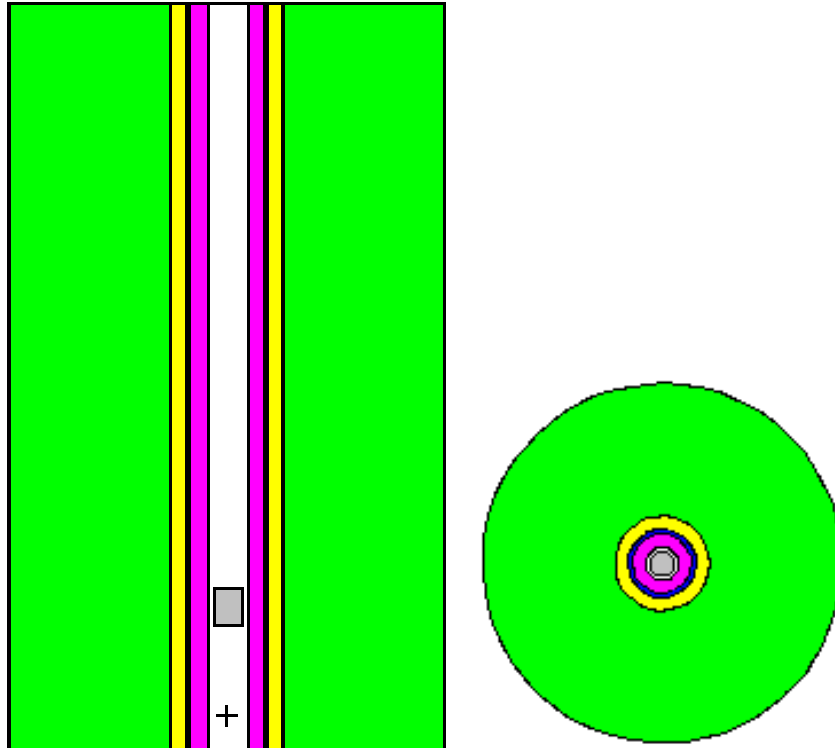
En cuanto a las dimensiones del sistema, y a los fines de mejorar la detección y convergencia de la simulación, se redujo el tamaño del pozo simulado a 5,05 m, comparado con el sistema anterior de 10 m de longitud y se duplicó el tamaño del detector, de 1'' a 2'' de diámetro y altura. En cuanto a este último se simuló el mismo como relleno de aire, a la vez que se colocó en el espacio existente entre la sonda y el entubado de acero un fluido acuoso de densidad igual a 1.0 gr/cm<sup>3</sup>.

### 2.1.3. Características del sistema simulado

Se simuló un pozo cilíndrico de 4.5'' de diámetro y 5.05 mts de longitud, con una sonda en su interior de 2.5'' de diámetro conteniendo una fuente puntual en el origen de coordenadas y un detector cilíndrico de 2'' de diámetro y 2'' de altura, colocado a una distancia de 5'' por encima de la fuente. El pozo posee un entubado de acero de 0.3'' de espesor y un revestimiento de hormigón de 1'' de espesor. La profundidad de alcance dentro de la formación geológica es de 10'' a partir del revestimiento de hormigón (Fig.13).

La fuente puntual de neutrones es colocada en el origen de coordenadas, siendo simulada una fuente química de AmBe, con un espectro de energía que varía de 0 a 11 MeV y un valor medio de 4.5 MeV aproximadamente (9), y una fuente pulsada de 14 MeV y 10 kHz de frecuencia de pulso (6).

El detector utilizado en el caso de la fuente continua fue un detector de fotones relleno de aire, con intervalos de energía de 0.1 MeV para todo el espectro, a la vez que se definieron ventanas de detección para el C y el O a los fines de discretizar los gammas de scattering inelástico de 4.439 y 6.129 MeV respectivamente, utilizando intervalos de energía de 0.005 MeV.



**Figura 13.** Esquema parcial del sistema simulado, de 5.05 mts de longitud y 0.69 mts de diametro; corte longitudinal a lo largo del eje X y transversal al eje Z a la altura del detector.

Los materiales utilizados fueron, como formación geológica, una roca caliza pura de composición  $\text{CaCO}_3$ , con una porosidad absoluta del 15% y una densidad promedio de  $2.456 \text{ gr/cm}^3$  en el caso de saturación con agua,  $2.4485 \text{ gr/cm}^3$  en el caso de saturación con agua y petróleo, y  $2.441 \text{ gr/cm}^3$  en el caso de saturación con petróleo. La cañería simulada esta compuesta de acero al cromo-niquel con 0.14% de carbono y una densidad de  $7.86 \text{ gr/cm}^3$ , mientras que el cementado del pozo se simuló con hormigón liviano de  $2.2 \text{ gr/cm}^3$ .

Por otra parte el espacio definido entre sonda y diametro interno del pozo fue relleno con agua de densidad  $1.0 \text{ gr/cm}^3$ , mientras que en el espacio existente entre sonda y detector se colocó vacío. Por ultimo se definio al detector como relleno de aire común de densidad  $0.001293 \text{ gr/cm}^3$ . Los datos de composición usados se muestran en la Tabla 1.

| Elemento<br>(% en<br>átomos) | Fm +<br>AGUA<br>? = 2.456<br>grs/cm <sup>3</sup> | Fm +<br>AGUA +<br>PETROLEO<br>? =2.4485<br>grs/cm <sup>3</sup> | Fm +<br>PETROLEO<br>? =2.441<br>grs/cm <sup>3</sup> | HORMIGON<br>LIVIANO<br>? = 2.2<br>grs/cm <sup>3</sup> | ACERO<br>? = 7.86<br>grs/cm <sup>3</sup> | AGUA<br>? = 1.00<br>gr/cm <sup>3</sup> | DETECTOR<br>? =<br>0.001293<br>gr/cm <sup>3</sup> |
|------------------------------|--|--|---|---|--|--|---|
|                              | %v/v = 86.204                                    |  |   | %v/v= 7.183   | %v/v=<br>0.0083                          | %v/v=<br>5.306                         | %v/v=<br>0.00547                                  |
| H                            | 24.64  | 25.378   | 26.053  | 15.32   |  | 66.7                                   |   |
| O                            | 50.02  | 42.684   | 35.757  | 50.85   |  | 33.3                                   | 21.2  |
| C                            | 12.567   | 19.616   | 26.227  | 0.13  | 0.14                                     |  |   |
| Ca                           | 12.567   | 12.243   | 11.81   | 1.7   |  |  |   |
| Na                           |  |  |   | 10.7  |  |  |   |
| K                            |  |  |   | 0.51  |  |  |   |
| Al                           |  |  |   | 1.94  |  |  |   |
| Fe                           |  |  |   | 0.39  | 67.53                                    |  |   |
| Si                           |  |  |   | 18.46   | 1.94                                     |  |   |
| Cr                           |  |  |   |   | 20.01                                    |  |   |
| Ni                           |  |  |   |   | 8.39                                     |  |   |
| Mn                           |  |  |   |   | 1.99                                     |  |   |
| S                            |  | 0.059  | 0.114   |   |  |  |   |
| N                            |  | 0.019  | 0.037   |   |  |  | 78.8  |

**Tabla 6.** Composición y densidad de los materiales utilizados; valores de composición expresados como porcentaje en átomos.

En cuanto a algunas especificaciones del input ingresado a MCNP, se hicieron los cálculos sin introducir ninguna técnica de reducción de varianza (5). Se corrió el programa con los sistemas definidos anteriormente, evaluando a continuación los resultados obtenidos en cuanto a las relaciones C/O para diferentes fluidos saturantes.

## 2.2. Evaluación cualitativa de las relaciones C/O para variaciones en la composición de los fluidos saturantes en formaciones calizas productivas

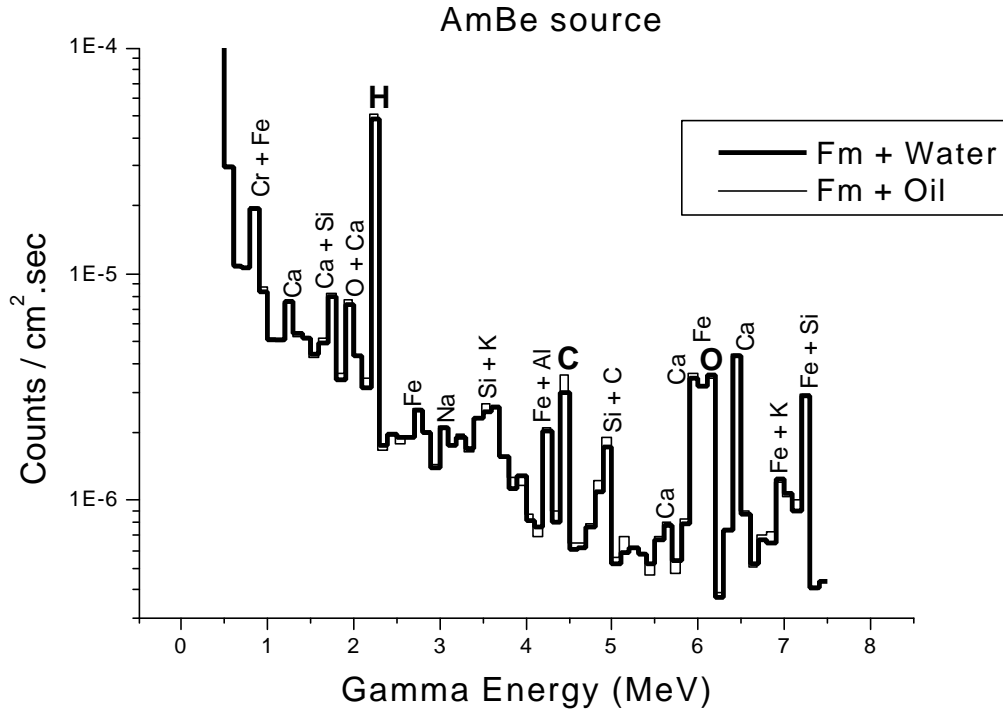
Se simuló inicialmente en MCNP la irradiación de una formación caliza saturada con agua o con petróleo, utilizando una fuente química continua de AmBe, a los fines de evaluar variaciones en la relación C/O como indicador de la naturaleza del fluido saturante.

Se asume que el principal proceso que registran los detectores de fotones son los rayos gamma instantáneos emitidos luego que los neutrones rápidos sufren scattering inelástico con los átomos de la formación. Los gamma prompt de scattering inelástico en el C son de 4.439 MeV, y en el O de 6.129 MeV, los que en el espectro calculado corresponden a los intervalos entre 4.4 y 4.5 MeV y entre 6.1 y 6.2 MeV respectivamente (10).

Analizando el espectro obtenido se observan resultados coherentes en los picos del carbono y oxígeno, es decir mayor conteo gamma en el C y menor en el O para la formación saturada en petróleo respecto de la saturada

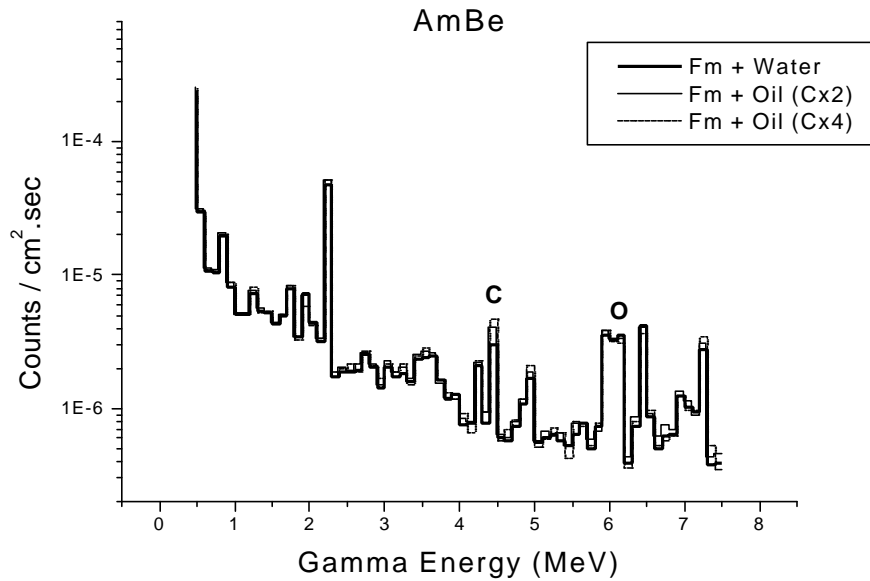
en agua (Fig. 14). Por otra parte, se diferencian en el espectro de detección gamma numerosos picos que corresponden a diferentes elementos incluidos en la composición global del sistema, los cuales emiten gammas instantaneos por captura térmica, captura epitérmica o scattering inelástico (11).

Estos picos son necesarios de identificar a los fines de evaluar posibles interferencias con los picos del C y O (Fig. 14; Tabla 6).



**Figura 14.** Espectro de detección de fotones utilizando una fuente química continua de AmBe de 4.5 MeV de energía promedio, con intervalos de detección de 0.1 MeV.

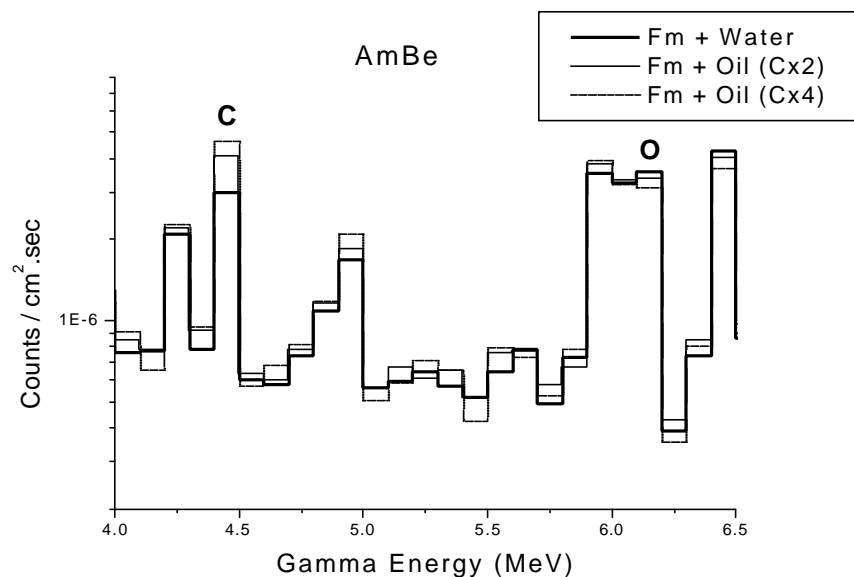
Se observan principalmente los gammas instantáneos de scattering inelástico del C en 4.439 MeV y sus gammas prompt de captura térmica en 4.945 MeV; los gammas de scattering inelástico del O en 6.129 MeV y 1.893 MeV; los gammas de captura térmica del H en 2.223 MeV; los gammas de scattering inelástico del Ca en 5.902 MeV, y sus gammas prompt de captura térmica en 1.260, 1.725, 1.942, 5.628, 5.900 y 5,420 MeV; los gammas instantáneos de scattering inelástico del Si en 1.778 MeV y sus gammas prompt de captura térmica en 3.539, 4.934 y 7.200 MeV; los gammas de scattering inelástico del Fe en 0,846 MeV y sus gammas prompt de captura térmica en 2.726, 4.218, 6.018, 6.960 y 7.278 MeV; y por último los gammas prompt de captura térmica del Cr en 0.834 MeV, del Na en 3.098 MeV, del Al en 4.259 MeV y del K en 3.546 y 6.999 MeV (Apendice II).



**Figura 15.** Espectro gamma irradiando formaciones calizas saturadas con agua o con un petróleo teórico conteniendo el doble y el cuádruple de C que la composición de petróleo anteriormente utilizada.

Por otra parte, y a los fines de estimar de manera grosera las variaciones cualitativas en el conteo gamma de scattering inelástico del C y O con bruscas variaciones composicionales en el fluido saturante, se simuló irradiar formaciones calizas saturadas en un fluido teórico conteniendo dos veces y cuatro veces más C que el petróleo saturante de la formación anterior; el resultado de tal simulación es comparado con el espectro obtenido de irradiar la formación caliza saturada en agua (Fig. 15).

Se observa efectivamente mayor conteo gamma en el pico correspondiente al C a medida que aumenta el contenido relativo de dicho elemento en el fluido saturante, a la vez que disminuye el conteo gamma correspondiente al pico del O con la disminución de tal elemento en la formación irradiada (Fig.16).



**Figura 16.** Detalle del espectro gamma en los picos generados por el scattering inelástico del C (4.439 MeV) y del O (6.129 MeV), en donde se observan las variaciones con la composición del fluido saturante

De la observación cualitativa de los espectros obtenidos con fuente continua de neutrones de AmBe, se concluye que la misma es adecuada a los fines de determinar variaciones cualitativas en los contenidos de C y O en formaciones con fluidos saturantes de diferente naturaleza.

Se resalta que es factible distinguir, con intervalos de energía de detección adecuados, picos de conteo gamma adjudicados a otros elementos composicionales del sistema, los cuales pueden llegar a “ensuciar” el espectro e interferir en los picos de interés.

Para el caso del oxígeno se observa que aún es necesaria una mayor discretización de los intervalos de energías de detección, ya que el pico producido por gammas instantáneos de scattering inelástico sufrido por neutrones rápidos en dicho elemento, de 6.129 MeV, sufre interferencia con los picos de absorción térmica del Ca y del Fe, de 5.900 y 6.018 MeV respectivamente (10). Tales elementos se encuentran presentes en la formación y materiales estructurales del sistema definido.

### **2.3. Cuantificación de las relaciones C/O para formaciones totalmente saturadas, semi-saturadas o no saturadas en petróleo.**

#### **2.3.1. Generalidades**

A los fines de cuantificar en detalle las variaciones en la relación C/O se simuló irradiaciones en formaciones calizas con 15% de porosidad, totalmente saturadas en agua, semi-saturadas en petróleo y agua o totalmente saturadas en petróleo.

Por otra parte se simularon en MCNP corridas con ventanas de detección en el rango del carbono y del oxígeno a intervalos menores de energía, del orden de los 0.005 MeV; esto último a los fines de diferenciar con mayor detalle los picos de 4.439 MeV y 6.129 MeV de scattering inelástico de estos elementos respecto de aquellos correspondientes a otros elementos, factibles de causar interferencia en la discriminación de los picos de interés.

Se presentan a continuación los resultados de estos análisis, junto con los cálculos de áreas y las correcciones por fondo, flujo integrado a partir de los umbrales de las reacciones de scattering inelástico y sección eficaz de las reacciones en los correspondientes rangos de energía.

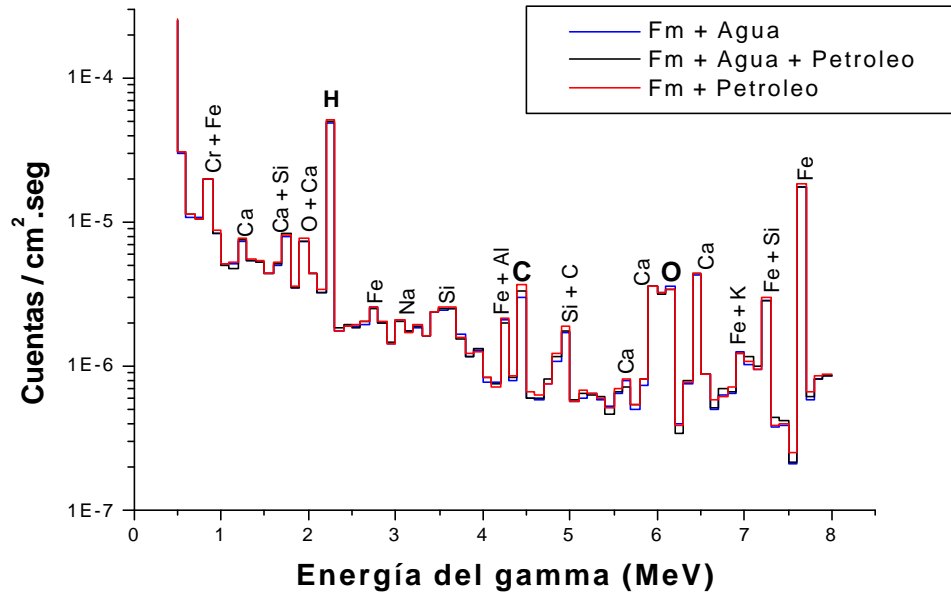
Se estimó, a partir de estos resultados, el porcentaje de saturación en hidrocarburos de la formación caliza (So), evaluando además las diferencias entre relaciones C/O de formaciones con diferente fluido saturante, en función de variaciones en la porosidad de la roca reservorio de hidrocarburos (8).

### **2.3.2. Analisis espectral de formaciones calizas irradiadas con fuente de AmBe**

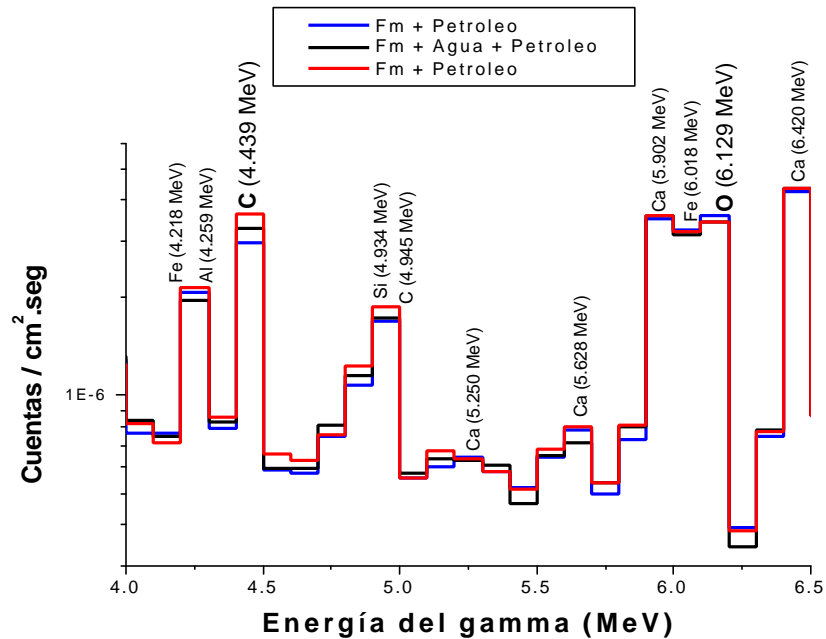
En la figura 17 se presenta el espectro gamma resultante de irradiar formaciones calizas saturadas en agua, en agua y petróleo o saturadas en petróleo, entre 0.5 MeV y 8 MeV de energía del fotón. Se observa en el mismo la repetición del espectro obtenido para la misma formación saturada en agua, petróleo o petróleo con dos veces o cuatro veces el contenido de C; se observa al aumentar hasta 8 MeV el espectro de energía la aparición del pico correspondiente a los gamma prompt de captura térmica del Fe, de 7.632 y 7.645 MeV.

En el detalle del espectro tomado entre los 4.0 y 6.5 MeV (Fig. 18) se observa un aumento coherente de los picos del carbono con el aumento en el contenido de petróleo en la formación, a lo cual también le corresponde una disminución del conteo gamma correspondiente al oxígeno; esta observación cualitativa es concisa con los resultados esperados.

## Espectro con fuente de AmBe



**Figura 17.** Espectro de detección gamma en formación caliza no-saturada (Oil 0), semi-saturada (Oil 50) y saturada (Oil 100) en petróleo, irradiada con fuente continua de AmBe de 4.5 MeV de energía promedio.

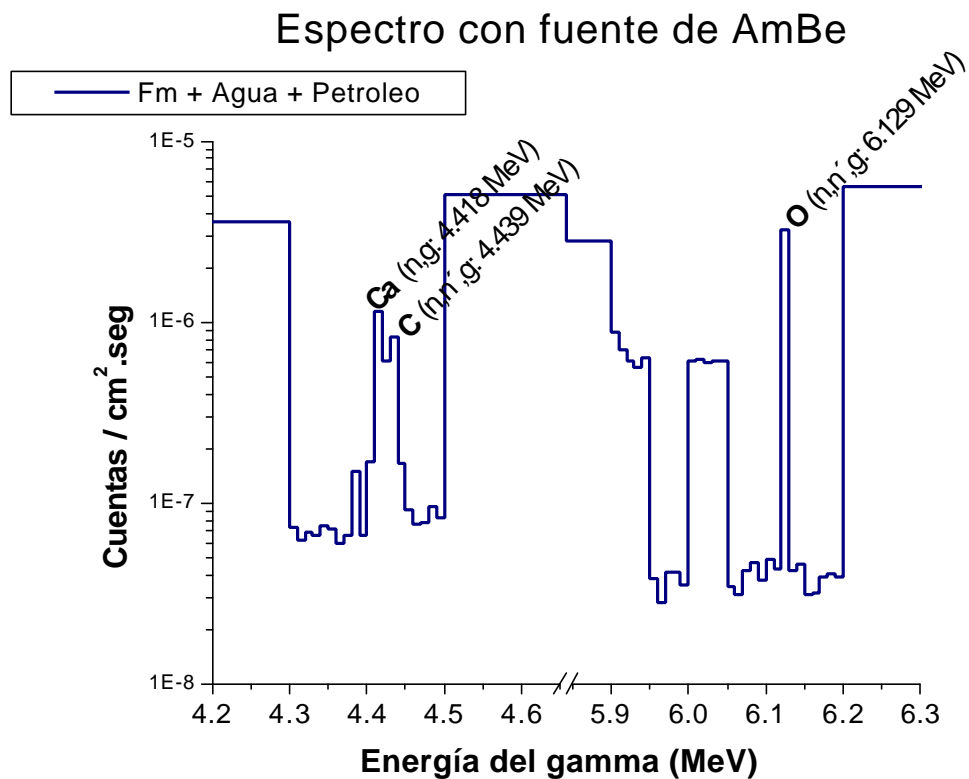


**Figura 18.** Ventana del espectro entre 4 y 6.5 MeV, en donde se observan las variaciones en los picos de C (4.4– 4.5 MeV) y O (6.1– 6.2 MeV) con la variación en el porcentaje de saturación en petróleo.



A los fines de cuantificar la relación C/O a partir del cálculo del área de los picos del carbono y oxígeno, y con el objetivo de discriminar posibles interferencias en los mismos, se tomaron en principio ventanas de detección entre los 4.3 y 4.5 MeV para el caso del C, y entre los 5.9 y 6.2 MeV para el caso del O, cada intervalos de energía de 0.01 MeV (Fig. 19).

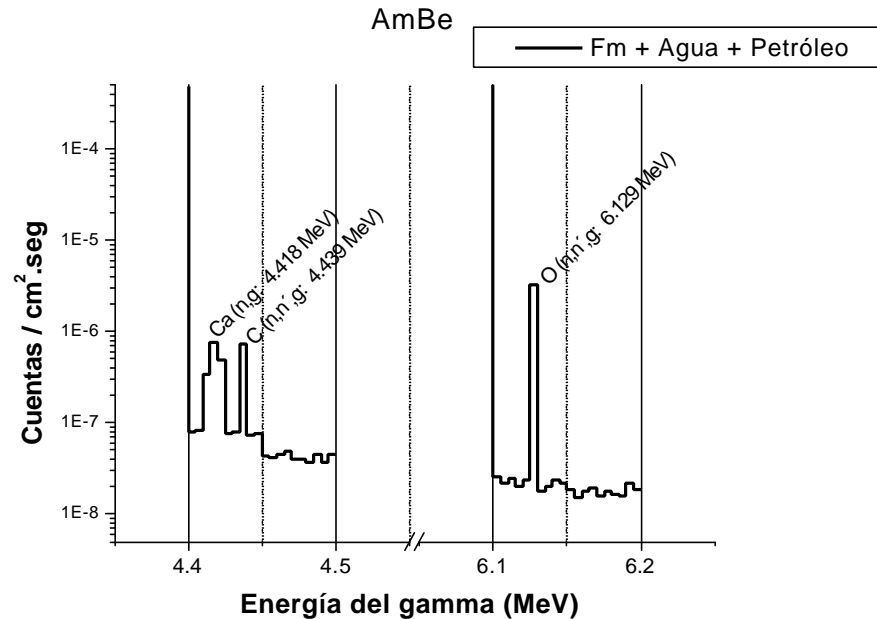
Se observa que en el intervalo entre 4.4 y 4.5 MeV, asumido anteriormente como correspondiente a los gamma prompt de scattering inelástico del C con neutrones rápidos, aparecen interfiriendo al menos un pico de energía, el cual puede corresponder a los gamma prompt de captura térmica del Ca, de 4.418 MeV. Mientras que en el intervalo de energía entre 6.1 y 6.2 MeV se observa solo un pico, correspondiente a los 6.129 MeV del gamma prompt de scattering inelástico de neutrones rápidos con núcleos de O (Apéndice II, Fig.19).



**Figura 19.** Ventanas de detección para el C y O, entre 4.3 y 4.5 MeV para el primero y 5.9 y 6.2 MeV para el caso del segundo, para la formación caliza con 15% de porosidad y semi-saturada en agua y petróleo. Se observan los picos de gamma prompt de scattering inelástico del C (4.439 MeV) y del O (6.129 MeV), así como la interferencia del primero con los gamma prompt de captura del Ca (4.418 MeV).

A los fines de diferenciar los picos de detección gamma que se observan entre 4.4 y 4.45 MeV, se simuló irradiar la formación, con la misma composición teórica pero con intervalos de energía cada 0.005 MeV, en el rango del C entre los 4.4 y 4.5 MeV, y en el rango del O entre 6.1 y 6.2 MeV.

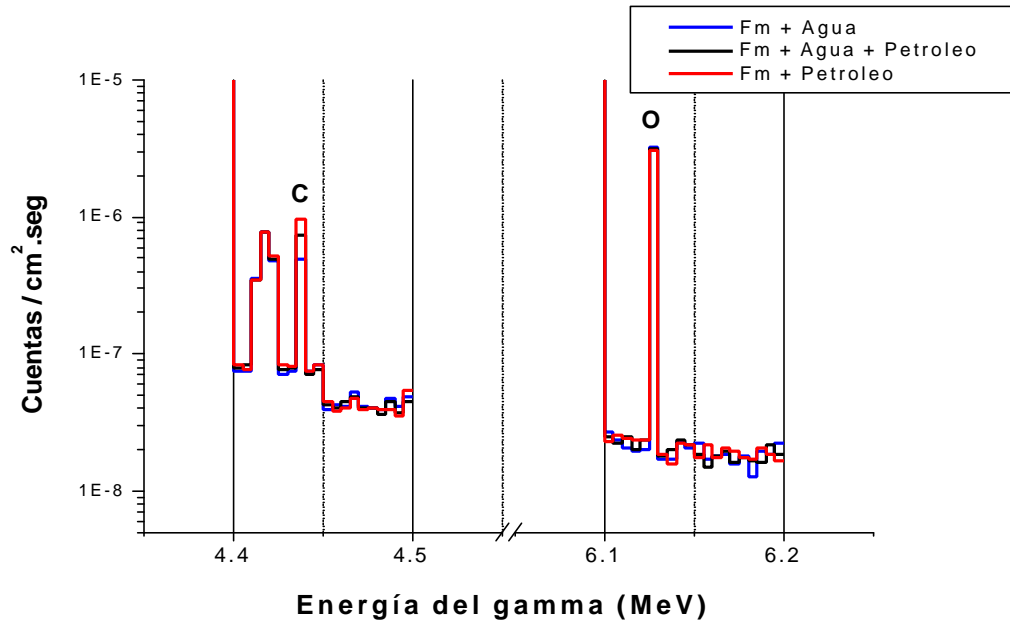
Se observa una buena discretización de los picos de detección de gammas instantáneos correspondientes a la captura térmica del Ca y al scattering inelástico con neutrones rápidos del C (Fig. 20). Es así que se procedió también a simular en MCNP las formaciones saturadas totalmente con agua o totalmente con petróleo, a los fines de evaluar cualitativamente las variaciones relativas entre ellas, como así también realizar los cálculos cuantitativos a partir del cálculo de área de los picos correspondientes al C y O.



**Figura 20.** Ventanas de detección para el C y O, entre 4.3 y 4.5 MeV y entre 5.9 y 6.2 MeV respectivamente, para la formación caliza con 15% de porosidad y semi-saturada en agua y petróleo. Se observan los picos de gamma prompt de scattering inelástico del C (4.439 MeV) y del O (6.129 MeV), así como la interferencia del primero con los gamma prompt de captura del Ca (4.418 MeV).

Observando los espectros obtenidos de las diferentes formaciones irradiadas con fuente de AmBe, se determinan variaciones coherentes con los resultados esperados. En la detección de los gammas de scattering inelástico del C, elemento que más varía su concentración a medida que se modifica el porcentaje de saturación en petróleo de la roca, se observa un aumento en el pico correspondiente a los 4.439 MeV a medida que aumenta el contenido de petróleo en la roca (Fig. 21).

## Espectro con fuente de AmBe



**Figura 21.** Ventanas de detección para C y O, entre 4.3 y 4.5 MeV y entre 5.9 y 6.2 MeV respectivamente, en formación caliza con 15% de porosidad y saturada en agua, semi-saturada y totalmente saturada en petróleo. Se observan variaciones relativas de la detección en función de variaciones composicionales en la formación, en particular en el pico de los gamma prompt de scattering inelástico del C (4.439 MeV).

### 2.3.3. Cálculo de la relación C/O en formaciones calizas con diferente grado de saturación en hidrocarburos

Se realizaron los cálculos de la relación C/O para diferentes porcentajes de saturación en petróleo de la formación caliza productiva. Se presentan los resultados de calcular, a partir de dicha relación, el grado de saturación en hidrocarburos de la formación  $S_o$  (8), obtenido de esta manera y comparando luego dicho resultado con el valor teórico esperado, de acuerdo al input corrido en MCNP.

Las mediciones de las áreas de los picos, a partir de los espectros obtenidos en las ventanas de detección entre 4.3 y 4.4 MeV para el C, y entre 6.1 y 6.2 MeV para el O, se presentan en la Tabla 8. Se asume que el área de cada pico es proporcional a las cuentas, por unidad de área y por segundo, detectadas en el intervalo de energía correspondiente a dicho pico del espectro de detección.

| AREA DEL PICO | FM + AGUA    |                |               | FM + AGUA + PETROLEO |                |               | FM + PETROLEO |                |               |
|---------------|--------------|----------------|---------------|----------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
|               | Area Total   | Area del fondo | Area del pico | Area Total           | Area del fondo | Area del pico | Area Total    | Area del fondo | Area del pico |
| <b>C</b>      | 2.45<br>E-09 | 3.72<br>E-10   | 2.07<br>E-09  | 3.63<br>E-09         | 3.75<br>E-10   | 3.25<br>E-09  | 4.82<br>E-09  | 3.85<br>E-10   | 4.44<br>E-09  |
| <b>O</b>      | 1.63<br>E-08 | 9.33<br>E-11   | 1.62<br>E-08  | 1.58<br>E-08         | 9.88<br>E-11   | 1.57<br>E-08  | 1.54<br>E-08  | 9.95<br>E-11   | 1.53<br>E-08  |
| <b>C/O</b>    | 0.151        |                | <b>0.128</b>  | 0.229                |                | <b>0.207</b>  | 0.314         |                | <b>0.290</b>  |

**Tabla 7.** Calculos de áreas de picos y relaciones de áreas entre el pico del C y el pico del O; se presentan los resultados restando el fondo por interacción Compton, estimado graficamente, y sin restarlo.

Se presentan también los resultados del cálculo del valor de saturación en petróleo  $S_o$  (8), a partir de la relación:

$$S_o = (C/O - C/O_w) / (C/O_o - C/O_w) \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde  $C/O$  es la relación de áreas en la formación de interés,  $C/O_w$  es la relación de áreas en una formación similar saturada 100% en agua, y  $C/O_o$  es la misma relación pero en una formación saturada 100% en petróleo. El resultado de dichos cálculos se presenta en la Tabla 7.

Se observa coherencia con las estimaciones esperadas, en cuanto a las variaciones relativas de la relación  $C/O$  en función de las variaciones composicionales. Sin embargo, se evidencian variaciones cuantitativas considerables entre la relación  $C/O$  obtenida de las simulaciones en MCNP, respecto de los valores teóricos esperados a partir de la relación  $C/O$  del sistema y la formación caliza definida.

Se plantea como probable causa de error el no tener en cuenta el factor de transporte de fotones, o también el no considerar que lejos de la fuente solo llegan neutrones rápidos, por lo que habría más reacciones de scattering inelástico en el O que en el C, con lo que disminuiría la relación  $C/O$ , entre otras causas probables.

Por su parte el parámetro  $S_o$ , o porcentaje de saturación en hidrocarburos, arroja un valor de 48,4 % para la formación saturada en agua y petróleo, comparado con el 44.3% del valor teórico de acuerdo al sistema definido. Esto implica que el valor medido presenta un error menor al 10% respecto del valor esperado, lo cual puede ser considerado aceptable en función de estimaciones realizadas por Lo Ré (8).

|                      | Fm + Agua            | Fm + Agua + Petróleo | Fm + Petróleo        |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>C / O Sistema</b> | <b>0.223</b>         | <b>0.401</b>         | <b>0.624</b>         |
| <b>C / O Areas</b>   | <b>0.128 ± 0.003</b> | <b>0.207 ± 0.004</b> | <b>0.290 ± 0.006</b> |
| <b>So Sistema</b>    | <b>0</b>             | <b>0.443</b>         | <b>1</b>             |
| <b>So Areas</b>      | <b>0</b>             | <b>0.487</b>         | <b>1</b>             |

**Tabla 8.** Valores de relaciones C/O y porcentaje de saturación en petróleo calculado a partir de los mismos, para formaciones calizas con 15% de porosidad y variaciones en el porcentaje de saturación en hidrocarburos.

|                      | Fm + Water    | Fm + Oil + Water | Fm + Oil      |
|----------------------|---------------|------------------|---------------|
| <b>C / O Sistema</b> | 0.2234        | 0.4008           | 0.6241        |
| <b>C / O Fm</b>      | <b>0.2512</b> | <b>0.4596</b>    | <b>0.7335</b> |
| <b>C / O Areas</b>   | 0.1284        | 0.2068           | 0.2905        |
| <b>So Sistema</b>    | 0             | 0.4428           | 100           |
| <b>So Fm</b>         | 0             | <b>0.4320</b>    | 100           |
| <b>So Areas</b>      | 0             | 0.4839           | 100           |

## 2.4. Conclusiones

La aproximación de la simulación teórica a los resultados experimentales de otros autores, como así también el cálculo del porcentaje de saturación en hidrocarburos  $S_o$ , en función de las relaciones C/O obtenidas de la simulación en MCNP, utilizando una fuente continua de AmBe, no representa una idealización del problema sino que muestra aproximaciones a la realidad con niveles de incerteza aceptables.

Por otra parte es necesario tener en cuenta los intervalos de energía de detección a utilizar, a los fines de determinar correctamente el área de los picos del espectro correspondiente a los elementos y procesos que se pretende cuantificar, evitando de esta manera posibles interferencias y errores en la determinación del grado de saturación en hidrocarburos de la formación. Una fuente química continua del tipo AmBe no parece presentar inconvenientes en ese sentido.

### **3. EVALUACION DE LA INTERACCION DE FOTONES Y NEUTRONES CON LA FORMACION**

### 3.1. Introducción

A los fines de discretizar mejor los procesos físicos que ocurren durante la interacción de neutrones y fotones con la formación geológica, se realizaron diferentes simulaciones en MCNP apuntando a evaluar principalmente la moderación de neutrones y el transporte de rayos gamma en el medio investigado.

Las relaciones entre átomos de carbono y oxígeno, objeto del sondeo a los fines de evaluar la saturación de la formación en hidrocarburos, resultan concisos cualitativamente y la estimación de la saturación en hidrocarburos So a partir de ellos es aceptable.

Sin embargo cuantitativamente arrojan valores muy por debajo de los esperados teóricamente, por lo que se puede estimar que algún fenómeno físico no considerado este afectando la medición.

Se espera, de las simulaciones siguientes en MCNP, evaluar procesos tales como absorción de fotones, transporte, moderación de neutrones y variaciones en el flujo neutrónico en función de la distancia a la fuente, a los fines de comprender mejor el fenómeno y evaluar las relaciones C/O observadas anteriormente.

### 3.2. Espectros del Carbono y del Oxígeno.

Se pretende verificar que no hay contribución de fotones a las energías del primer nivel excitado del  $^{12}\text{C}$  ni a las del segundo nivel excitado del  $^{16}\text{O}$ , debido a los demás elementos constituyentes del sistema modelado (4).

Para ello se calculó el espectro gamma en la formación, debido a la irradiación con fuente de AmBe, en los siguientes casos:

- a) Formación conteniendo solamente carbono y oxígeno en igual fracción en átomos
- b) Formación sin carbono ni oxígeno

La Fig. 22 muestra los espectros obtenidos en ambos casos, donde se detalla el nivel excitado que genera cada pico para el caso en el que sólo hay C y O en el sistema.

En las figuras 23 y 24 se muestran ampliaciones de la figura 22 en las regiones correspondientes al primer nivel del  $^{12}\text{C}$  y al segundo nivel del  $^{16}\text{O}$  respectivamente.

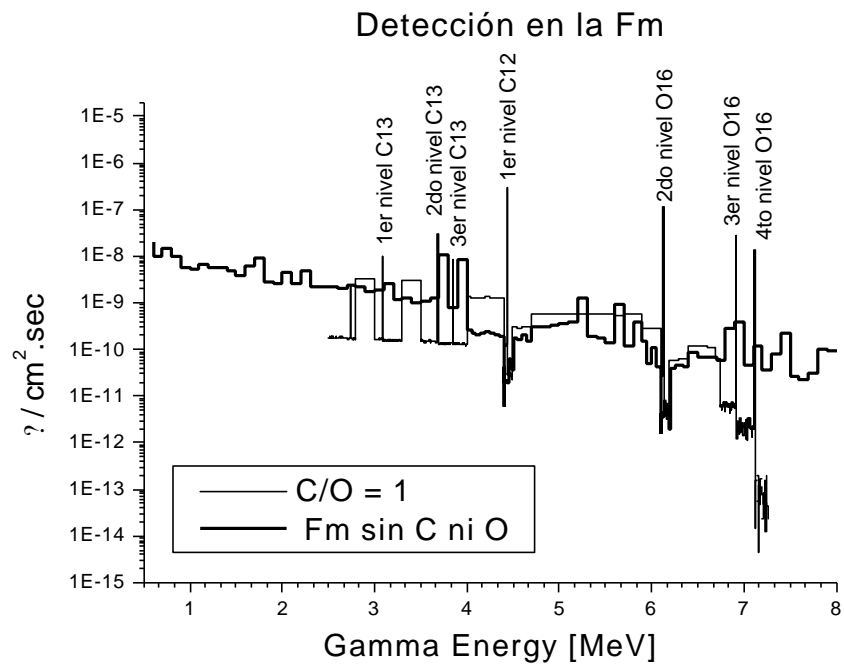
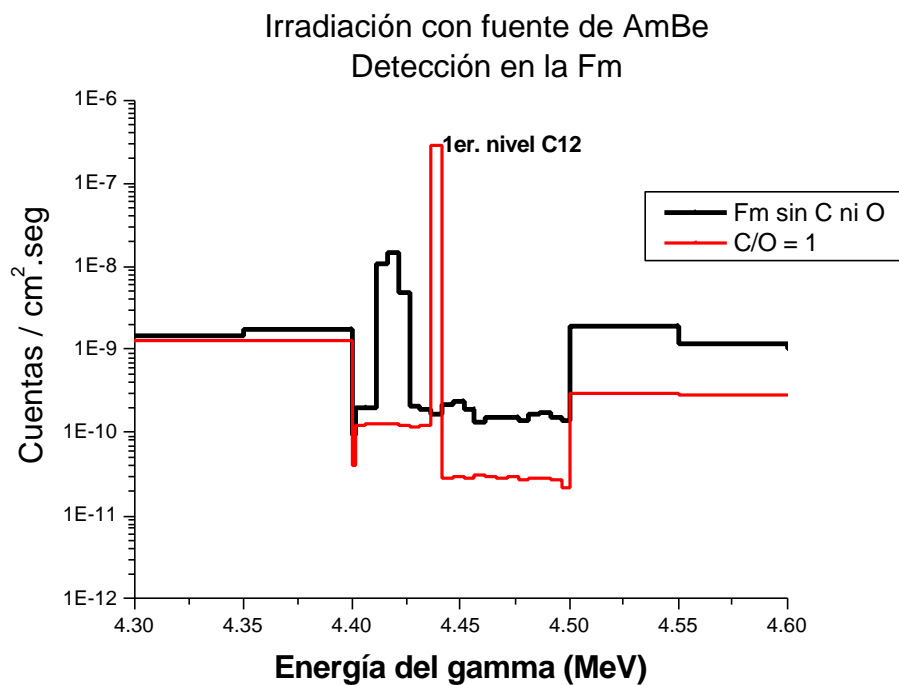


Figura 22. Espectro calculado en la formación con carbono y oxígeno solamente y sin carbono ni oxígeno.





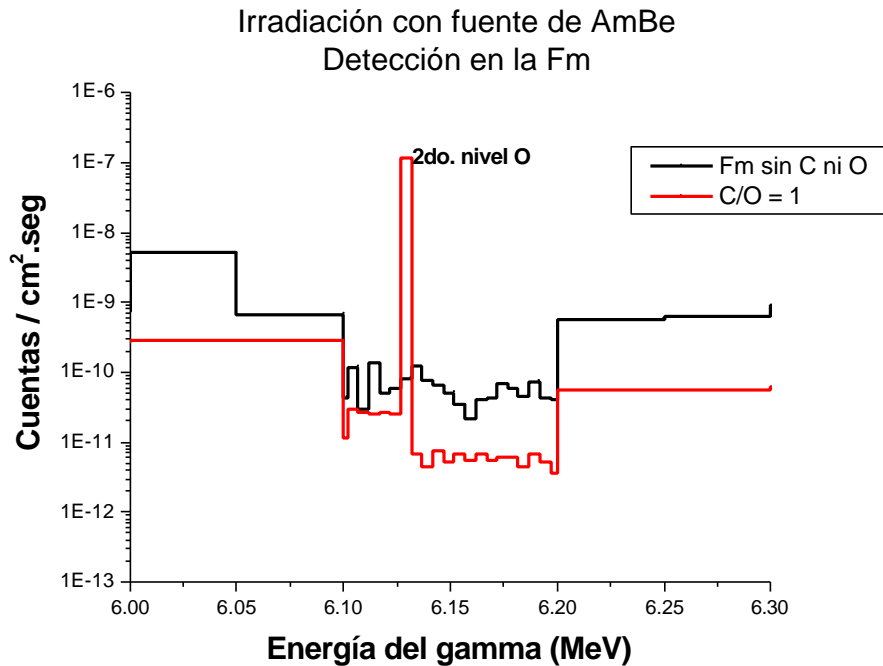


Figura 23. Ampliación de la Fig. 22 para el primer nivel del <sup>12</sup>C.

Figura 24. Ampliación de la Fig. 22 para el segundo nivel del <sup>16</sup>O

En estas ampliaciones se comprueba que, en la formación calculada, tal cual se había asumido en las simulaciones realizadas para evaluar el  $S_o$ , no hay contribución de otros elementos del sistema a los picos de scattering inelástico del carbono ni del oxígeno (10).

### 3.3. Necesidad de calibración de la sonda

Se simularon algunos casos que muestran la necesidad de calibrar la sonda de perfilaje a efectos de hacer determinaciones cuantitativas de la relación C/O en la formación. Es decir, dada una fuente de neutrones y un espectro de fotones en el detector, es necesaria la calibración de la sonda para obtener la relación C/O en átomos.

Los fotones detectados son producidos por interacciones de los neutrones con los materiales del sistema, es decir, entre la fuente de neutrones y la detección de fotones está involucrado el transporte de neutrones y el transporte de fotones en todo el sistema.

Es en este transporte en donde están involucrados muchos procesos tales como moderación, absorción y fugas, las que dependen entre otras cosas de la energía de la partícula transportada.

Por ejemplo, para una fuente de neutrones y diferentes geometrías de un mismo sistema, la relación de detección de fotones en las energías de determinados procesos será distinta.

### 3.3.1 Transporte de fotones en la formación

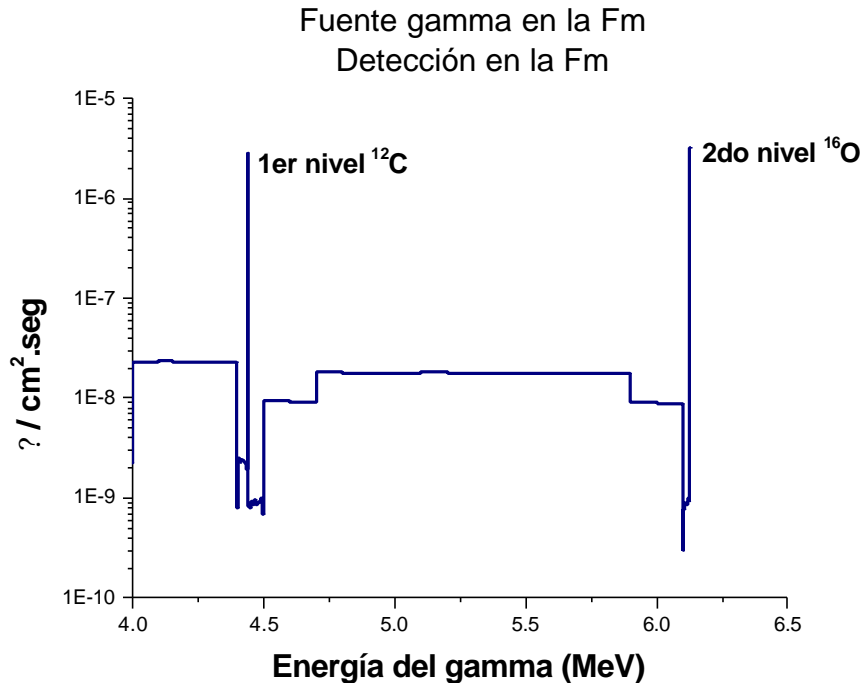


Figura 25. Espectro de fotones calculado en la formación debido a una fuente uniforme de fotones en la formación a 4.438 y 6.1293 MeV.

Un cálculo sencillo de transporte de fotones muestra la necesidad de una calibración del instrumento.

La Fig. 25 muestra el espectro de fotones detectado en la formación, colocando una fuente de fotones uniformemente distribuida en todo el volumen de la formación, con intensidad unitaria a 4.438 y 6.1293 MeV.

La relación de áreas entre el pico a 4.438 MeV respecto del pico a 6.1293 MeV es igual a 0.905, siendo la relación de fuentes igual a uno.

Es decir que a pesar de que la relación de fuentes es la misma, la relación de flujos no lo es debido a los fenómenos de transporte del fotón, los cuales dependen mayoritariamente de la energía del mismo.

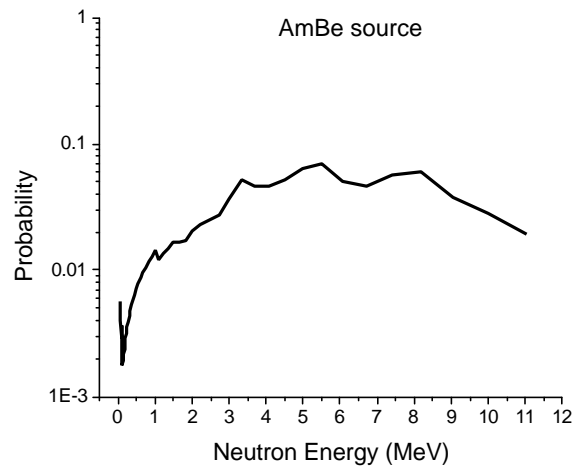
De acuerdo a la relación de detección menor que uno se concluye que el fotón de mayor energía sufriría absorción o fuga antes de ser detectado.

### 3.3.2 Transporte de neutrones en la formación

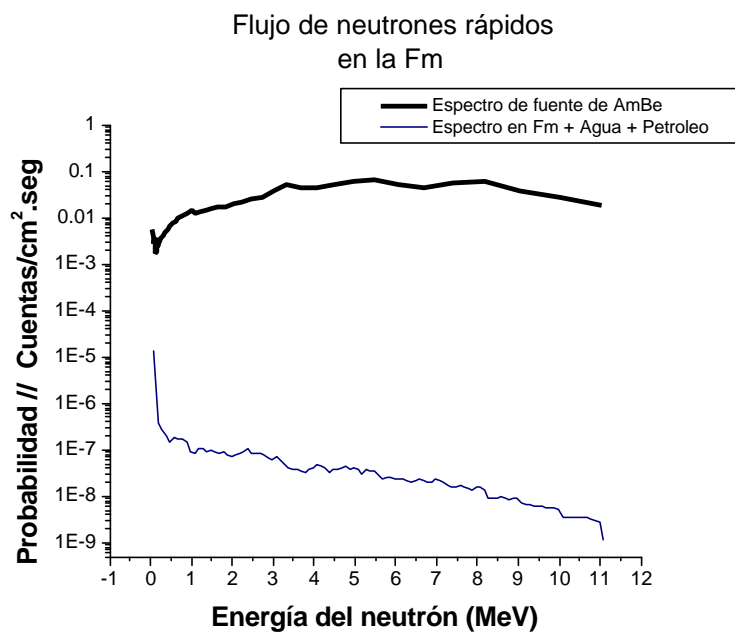
Se procedió a simular el mismo sistema utilizado anteriormente, pero definiendo detectores de neutrones térmicos y rápidos definidos en toda la formación, como así también detectores gamma con ventanas de detección en los intervalos de energía de interés, para la formación caliza saturada con agua y petróleo.

En la Fig. 26 y 27 se observan los espectros de la fuente continua de AmBe (9) y el flujo de neutrones rápidos en la formación comparados con el mismo, mientras que en la Fig. 28 se ilustra el flujo de neutrones térmicos detectados en la misma.

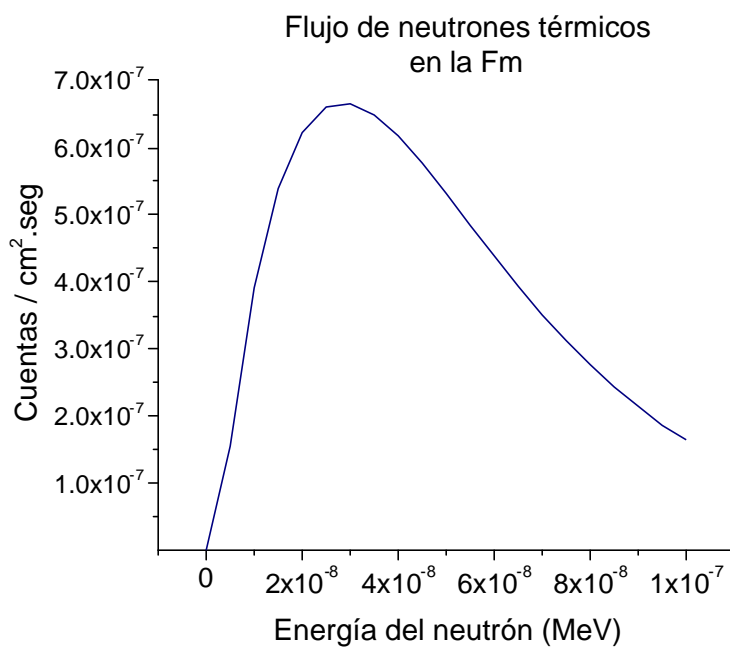
En el caso del flujo de neutrones rápidos detectado en la formación, se observa que el mismo presenta una forma levemente diferente a la del espectro teórico arrojado por la fuente, siendo evidente que ocurre moderación de neutrones rápidos en la formación irradiada, al chocar los mismos con átomos livianos e intermedios de la roca caliza. Esto modifica el espectro de neutrones rápidos, detectándose en general mayor cantidad de neutrones a medida que disminuye la energía de los mismos.



**Figura 26.** Espectro de neutrones de la fuente química continua de AmBe simulada en las irradiaciones de las formaciones calizas, dado en energía del neutrón y su probabilidad de ser emitido por la fuente (9).



**Figura 27.** Espectro de neutrones rápidos detectados en la formación y espectro teórico arrojado por la fuente de AmBe; con fines comparativos se presenta también el primero multiplicado por  $1 \times 10^7$ .



**Figura 28.** Espectro de neutrones térmicos detectados en la formación caliza irradiada con fuente química continua de AmBe.

Por su parte el flujo de neutrones térmicos en la formación presenta un espectro coherente con lo esperado, con una distribución maxwelliana entre 0 y 1 eV y un pico de detección en los 0.3 eV, por lo que resulta coherente haber considerado los gamma prompt de captura térmica de diferentes elementos existentes en el sistema (6).

### 3.4. Cálculo de la relación C/O en átomos a partir del flujo de neutrones y fotones en la formación

Las relaciones cuantitativas entre los picos del C y del O arrojan valores muy por debajo de los esperados teóricamente, por lo que se puede estimar que algún fenómeno físico no considerado este afectando la medición.

Para obtener relaciones de átomos de carbono respecto a átomos de oxígeno, dichas áreas deben ser corregidas por el flujo de neutrones integrado a partir de la energía umbral para la reacción de scattering inelástico, por la sección eficaz promedio para dicha reacción en el espectro de energía considerado, y por el volumen en donde se encuentren átomos capaces de sufrir tal interacción con los neutrones.

La relación entre todas estas variables se resume en la siguiente ecuación:

$$A \propto N \cdot A \cdot \int_{E_{umbral}}^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma(E) \cdot V \cdot f \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde A es el área del pico,  $\Phi$  es el flujo integrado a partir del umbral de energía de la reacción,  $\sigma$  es la sección eficaz promedio que presenta el núcleo para tal reacción, en el rango de energías considerado, V es el volumen en donde hay átomos de ese elemento y f es un factor de transporte del fotón desde el lugar en donde es generado hasta el lugar en donde es detectado.

Dicho factor f tiene la forma:  $f \propto e^{-\tilde{\Sigma}x}$  (Ec. 3)

en donde:

$$\tilde{\Sigma}x \propto \int_0^x \Sigma(s) ds \quad (\text{Ec. 4})$$

lo cual significa que ese factor de transporte del fotón responde a una exponencial decreciente de base e, en donde el exponente es función de integrar las secciones eficaces macroscópicas totales para un elemento dado, multiplicada por cada uno de los diferenciales de espacio ds recorridos.

Si deseamos calcular las relaciones entre átomos de C respecto de los átomos de O, la ecuación resulta de la siguiente manera:

$$N_c / N_o \propto (A_c \cdot \int_{E_{umbral}}^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma(E) \cdot V_c \cdot f_c) / (A_o \cdot \int_{E_{umbral}}^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma(E) \cdot V_o \cdot f_o) \quad (\text{Ec. 5})$$

De manera tal que la relación entre átomos ( $N_C/N_O$ ) es igual a la relación entre áreas ( $A_C/A_O$ ), multiplicada por un factor

$$F = (f_o / f_c) / (c_o / c_c) \quad (\text{Ec. 6})$$

Para el caso considerado, los umbrales de energía de las reacciones de scattering inelástico del C y del O son de 4.4668 MeV para el primer nivel inelástico del C y 6.3096 para el segundo nivel inelástico del O.

Sin embargo, a los efectos del cálculo del factor de multiplicación F, se tomaron los valores de 4.970 MeV y 6.700 MeV respectivamente, y es a partir de esos valores que se calcularon las secciones eficaces promedio y la integral del flujo de neutrones. Los espectros de variación de la sección eficaz en función de la energía del neutrón (9), para las reacciones de interés, se presentan en la Fig. 29.

A partir de estos espectros es que se calcularon las secciones eficaces promedio y los valores de la integral del flujo a partir del umbral energético de cada reacción, de acuerdo a la siguiente relación:

$$F = \frac{\int_{E_{um}}^{E_{max}} \sigma(E) dE}{\int_{E_{um}}^{E_{max}} \sigma_o(E) dE} \quad (\text{Ec. 7})$$

Esto es la sección eficaz promedio para determinada reacción, integrada entre la energía umbral de dicha reacción y la energía máxima de los neutrones que arroja la fuente.

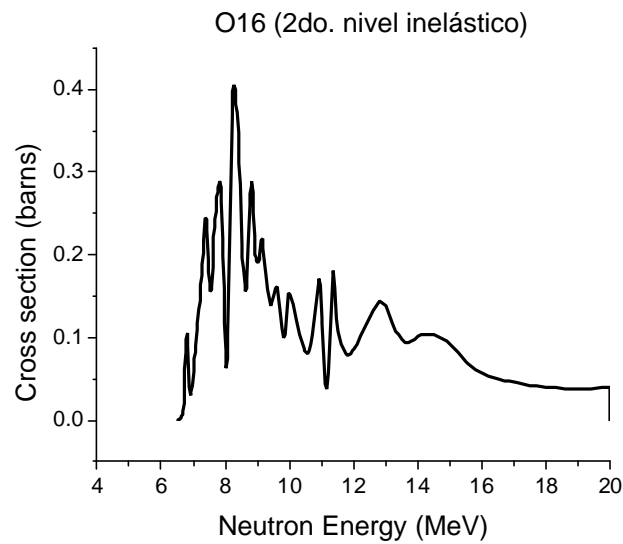
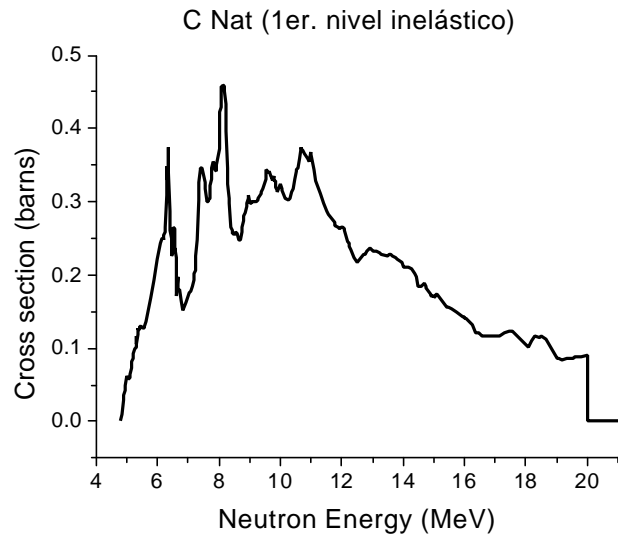
De dichos cálculos se encontraron valores de 0.2316 barns para el primer nivel excitado por scattering inelástico del C, y 0.1486 barns para el segundo nivel excitado del O. Considerando los flujos integrados a partir de las energías umbrales de cada reacción, el factor de multiplicación de las áreas de los picos, sin considerar el cociente entre los factores de transporte ( $f_o / f_c$ ), es igual a:

$$F = 0.368 \times (f_o / f_c)$$

Por otra parte, el mismo factor  $F = (f_o / f_c) / (c_o / c_c)$ , sin considerar el cociente  $f_o / f_c$  de transporte de fotones, integrado en todo el espectro de emisión de la fuente de AmBe (Fig. 25), arroja un valor de:

$$F = 0.384 \times (f_o / f_c)$$

Se evalúa como más aproximado el factor F calculado en función del flujo integrado a partir de la energía umbral de cada reacción, por lo que se asume como factor de multiplicación del cociente de áreas el primer valor estimado.



**Figura 29.** Sección eficaz vs energía del neutrón (9), para las reacciones de scattering inelástico del primer nivel excitado del C (4.439 MeV) y del segundo nivel excitado del O (6.129 MeV).

Se pretende realizar el cálculo de relaciones de átomos C/O a partir de los picos del espectro detectado en la formación, corregido por el factor calculado en función de los ritmos de reacción y del flujo de neutrones en la formación. Esto a los fines de compararlo con las relaciones C/O estimadas de las áreas de picos del espectro colectado en el detector, y del factor de

corrección calculado a partir de los umbrales de energía de cada reacción, evaluados en el espectro de emisión de la fuente de AmBe.

Si ahora el factor de multiplicación  $F = (R_o / R_c)$ , sin tener en cuenta el factor de transporte de fotones, se calcula a partir de los ritmos de reacción de scattering inelástico del carbono y del oxígeno, los cuales son calculados en función del espectro de neutrones rápidos detectados en la formación (Fig.24) y a partir de la expresión:

$$RR = \int_0^{\infty} \phi(E) \Sigma(E) dE \quad (\text{Ec. 8})$$

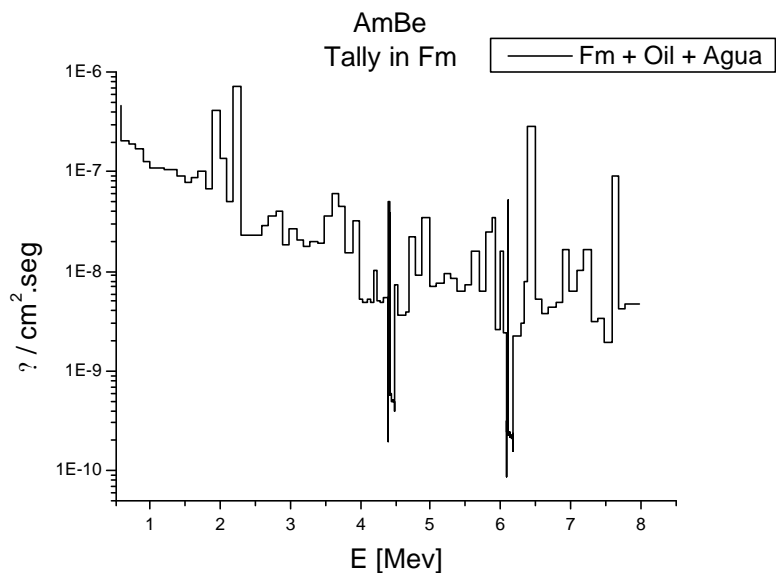
Se obtiene que el ritmo de reacción para el caso del O es de  $3.27 \times 10^{-3}$  reacciones por segundo, mientras que para el caso del C es de  $8.89 \times 10^{-3}$  reacciones por segundo. A partir de estos valores se calcula el factor de multiplicación como

$$F = RR_c / RR_o \quad (\text{Ec. 9})$$

Resultando de esta manera  $F = 0.367 \times (f_o/f_c)$ , valor similar al calculado en función del flujo integrado a partir de los umbrales de reacción, con  $F = 0.368$ . Se pretende ahora utilizar este factor de corrección de áreas estimado en función de los ritmos de reacción, y calcular las relaciones atómicas C/O en el sistema simulado, comparando las mismas con las obtenidas para el sistema teórico total y para la formación caliza en particular.

A los fines de evaluar las diferencias entre las cuentas que llegan al detector y los rayos gamma generados en la formación, se simuló en MCNP el mismo sistema con la formación saturada en agua y petróleo (Oil50), pero con detección de rayos gamma en toda la formación. De esta manera todos los rayos gamma generados en la formación caliza serán contados, esperando evaluar de esta manera las posibles fuentes de los errores observados en el cálculo anterior.



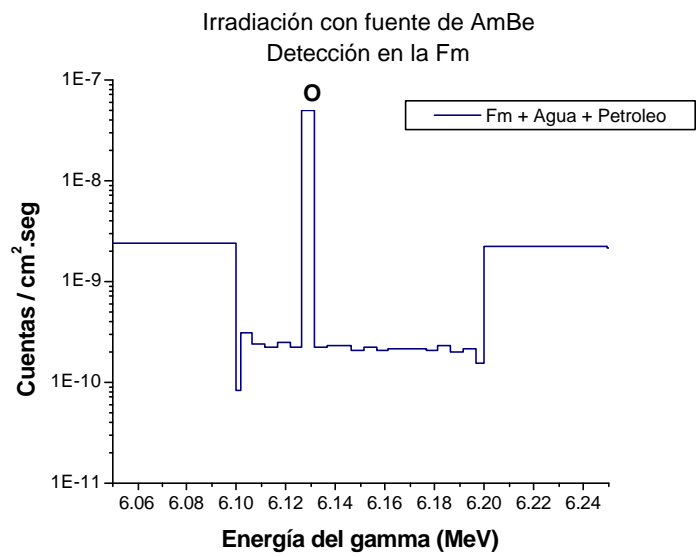
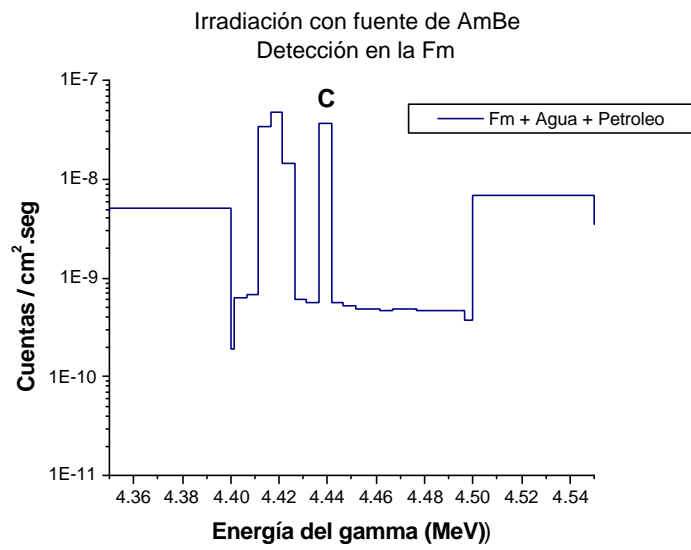


**Figura 30.** Espectro de rayos gamma obtenido al simular la formación caliza saturada en agua y petróleo, con detectores gamma definidos en toda la formación.

En la Fig. 30 se muestra el espectro obtenido de definir un detector gamma en toda la formación caliza irradiada con fuente de AmBe. En este caso se definieron intervalos de energía de 0.1 MeV, mientras que en las ventanas de detección definidas en el rango del C y O, dichos intervalos son de 0.005 MeV (Fig. 31).

Se observa un patrón similar al del espectro obtenido a partir de las cuentas que llegan al detector del sistema anteriormente simulado, con diferencias en los picos de elementos como Fe y Cr, los cuales producen gammas prompt por captura de neutrones térmica y se encuentran principalmente en los materiales estructurales del sistema, tales como el entubado de acero definido en el pozo.

Por su parte los picos de detección definidos por elementos como Si o Ca aparecen con mayor definición en este último espectro respecto del sistema simulado anteriormente, lo cual puede entenderse a partir de asumir que tales elementos se encuentran principalmente en el hormigón y en la formación caliza; esto es, se encuentran en la misma celda definida como detector, en el caso del Ca, o en contacto directo con la misma, en el caso del Si contenido en el hormigón, por lo que es de esperar mayor eficiencia en la detección.



**Figura 31.** Ventanas de detección en los intervalos de energía de los gamma prompt de scattering inelástico del C y O, para detección gamma definida en toda la formación.

A partir de las ventanas de detección definidas entre los 4.4 y 4.5 MeV para el carbono, y los 6.1 y 6.2 MeV para el oxígeno (Fig. 31), y utilizando el factor de corrección de las áreas determinado a partir de los ritmos de reacción y del flujo medido en la formación, se calculó la relación C/O (Tabla 9).

| Area del pico | Fm + Agua + Petroleo |                |               |                         |
|---------------|----------------------|----------------|---------------|-------------------------|
|               | Area Total           | Area del fondo | Area del pico | Corregido por F = 0.367 |
| C             | 1.8437 E-10          | 2.7670 E-12    | 1.8161 E-10   |                         |
| O             | 2.4673 E-10          | 1.0689 E-12    | 2.4566 E-08   |                         |
| C/O           | 0.747 + 0.003        |                | 0.739         | 0.271                   |

**Tabla 9.** Cálculo de la relación C/O a partir del área de los picos, medidas en las ventanas de detección para el rango de energías de los gammas de scattering inelástico del carbono y oxígeno.

Se observa que el cociente entre cuentas/cm<sup>2</sup>.seg del C y cuentas/cm<sup>2</sup>.seg del O arroja un valor de 0.7393 a partir del cálculo de las áreas de los picos. Para obtener la relación entre átomos, dicho cociente es corregido por el factor  $F = 0.3673$ , estimado a partir de los ritmos de reacción para el C y O y en función de las secciones eficaces de las reacciones de scattering inelástico y del flujo de neutrones detectado en la formación.

De esta manera la relación C/O en átomos estimada es entonces igual a 0.2715, la que resulta más aproximado al valor teórico de 0.4596 para la relación C/O en la formación caliza saturada en agua y petróleo, y 0.4008 para el sistema total.

Por otra parte, la relación C/O calculada de esta manera resulta mayor que el valor de 0.0762 obtenido de las cuentas que llegan al detector, por lo que se infiere que puede haber un fenómeno de absorción diferencial de los fotones de 4.439 MeV respecto de los de 6.129 MeV, desde que son generados en la formación hasta que son colectados en el detector.

## **4. CONCLUSIONES**

## 4.1. Conclusiones finales

Las variaciones en la relación de áreas de los picos del carbono y del oxígeno, obtenidas simulando con método Monte Carlo formaciones geológicas irradiadas con fuente de neutrones rápidos, son cualitativamente coherentes con las esperadas.

Por su parte el uso de una fuente de neutrones pulsada permite discriminar los tipos de procesos de interacción de la radiación con la materia que ocurren en el sistema planteado. A partir de relaciones establecidas con ventanas temporales de detección es posible una mayor discretización de los procesos existentes para cada elemento de interés, utilizando este tipo de fuentes pulsadas.

Utilizando una fuente continua de AmBe, la aproximación de la simulación teórica a los resultados experimentales de otros autores, como así también el cálculo del porcentaje de saturación en hidrocarburos  $S_o$ , en función de las relaciones C/O obtenidas de la simulación en MCNP, muestra aproximaciones a la realidad con niveles de incerteza aceptables.

Se observa que no hay contribución de otros elementos del sistema simulado a los picos de scattering inelástico del carbono ni del oxígeno, utilizando este tipo de fuentes químicas para el sistema planteado.

Se verifica que el espectro de neutrones de la fuente sufre modificaciones en la formación, variaciones espectrales vinculadas a procesos de moderación de neutrones. Por otra parte se verifica que el transporte de fotones en la formación es un proceso a tener en cuenta, de manera que si interesa calcular con exactitud la relación de átomos de C a átomos de O, el instrumento deberá ser calibrado en pozos de prueba de composiciones conocidas.

Se comprueba que utilizando fuentes químicas continuas para obtener un perfil C/O, es posible reconocer en el espectro gamma obtenido los diferentes elementos constituyentes del sistema.

Se plantea para análisis posteriores la factibilidad de poder realizar la misma lectura a partir de utilizar un detector real, tal como los centelladores de NaI(Tl) frecuentemente usados en este tipo de herramientas de sondeo, como así también el simular formaciones geológicas de composición más compleja, y verificar la intensidad de fuente necesaria para lograr una buena estadística de la detección.

## **5. BASE DE DATOS DE FORMACIONES GEOLOGICAS PRODUCTIVAS**

## 5.1. Generalidades

En el presente capítulo se presenta una breve recopilación de datos de formaciones geológicas, fluidos saturantes y mineralogías factibles de estar presentes en pozos de exploración por hidrocarburos.

Los mismos corresponden a:

- a. Datos de un testigo lateral del sondeo Los Perales, Las Heras, Santa Cruz (Repsol; Com. Pers.) (7).
- b. Pozos de prueba para ensayos de sondas con fuentes pulsadas (Brafman et al, 1977) (11).
- c. Datos de pozos utilizados comunmente en calibración de sondas neutrónicas (Bravo, J., 2001) (3).
- d. Datos de minerales comunmente presentes en formaciones geológicas típicas de yacimientos petrolíferos (Bravo, J., 2001; JIUNN-IISING CHAO, 1995) (6).
- e. Composición química y mineralogica promedio de rocas sedimentarias e ígneas (Gonzalez Bonorino, 1972) (13).
- f. Formaciones metasedimentarias depositadas en cuencas de margen continental pasivo, procedentes de un área fuente correspondiente a una corteza continental evolucionada, de composición similar a la actual (Cagnoni et al, 1993; Omarini, 1983; Wilner, 1985; Azcurra et al, 2001) (14), (15), (16).

Dicha recopilación se presenta a los fines de sentar precedentes en el armado de una base de datos más completa, con la cual continuar, en posteriores etapas, simulando diferentes litologías productoras de hidrocarburos.

## 5.2. Datos de un testigo lateral del sondeo Los Perales (Santa Cruz)

El presente informe corresponde al estudio petrográfico, diagenético y mineralógico de un testigo lateral perteneciente al sondeo Los Perales (Repsol-YPF; Cuenca del Golfo - Las Heras - Santa Cruz; Comunicación Personal)

SONDEO: MUESTRA: 5

PROF.: 1166,50 mbbp (metros bajo boca de pozo)

CLASIFICACION: ARENITA LITICO-FELDESPATICA

| CLASTOS | MATRIZ | CEMENTO | POROSIDAD |
|---------|--------|---------|-----------|
| 85%     | -      | 10%     | 5%        |

### NATURALEZA DE LOS CLASTOS:

#### **Líticos: 50%**

Volcánicos: frecuentes. Pastas andesíticas

Plutónicos: escasos. Granitos de textura granuda hipidiomorfa.

Sedimentarios: predominantes. Tobas vítreas devitrificadas. Escasas fangolitas y arenitas.

Feldespatos: 30%

Plagioclasas frescas, algunos cristales con zonación, escasas leve a moderadamente sericitizadas.

Cuarzo: 20%

Predominan individuos monocristalinos con extinción recta y ondulosa. Escasos policristalinos.

**TAMAÑO:** arena media a gruesa (0,40-0,70 mm), comunes clastos tamaño arena muy gruesa.

#### **CEMENTO:**

Cemento arcilloso (10%) como relleno de poros

Microcristales de cuarzo?.

Presencia de óxidos.

### **POROSIDAD**

| ABUNDANCIA DE POROS (%) | DIMENSIONES PORALES (mm) |
|-------------------------|--------------------------|
| 0-5 baja                | 0,004 criptoporos        |
| 5-10 moderada           | 0,004-0,062 microporos   |
| 10-15 buena             | 0,062-0,25 mesoporos     |
| 15-20 muy buena         | 0,25-1 macroporos        |
| >20 excelente           | 1-4 megaporos            |

Secundaria.

?? Abundancia: baja.

?? Tamaño: 50% de *microporos* (0,01-0,06 mm); 45% de *mesoporos* (0,07-0,12 mm) y 5% de *macroporos* (0,25-0,30 mm).

?? Selección: moderada.



?? Distribución: heterogénea.

?? Textura: 77% de *intragranular* (A: N-3/4; B: C-7); 20% de *microporosidad* en arcillas y 3% de *móldica*.

### ESTUDIO POR DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X

| Muestra 5<br>Prof : 1166.5 mbbp | Roca<br>total | Fracción Arcilla        |               |                   |
|---------------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------|
| Cuarzo                          | 71            | Smectita                | Abundancia    | 25                |
| Feldespató potásico             |               |                         | Cristalinidad | B                 |
| Plagioclasa                     | 16            | Clorita (*)             | Abundancia    | 50                |
| Arcillas                        | 5             |                         | Cristalinidad | MB                |
| Calcita                         | 3             | Inter<br>Estratificadas | Abundancia    | I-E: 5<br>C-E: 15 |
| Dolomita                        | Tr            |                         | Cristalinidad | M<br>R            |
| Siderita                        |               | Illita                  | Abundancia    | 5                 |
| Analcima                        |               |                         | Cristalinidad | R                 |
| Baritina                        |               | Caolinita               | Abundancia    |                   |
| Otros                           | 5             |                         | Cristalinidad |                   |

(\*) clorita rica en hierro, según metodología de Brown y Brindley (1980).

### REFERENCIAS

|                         |                  |                            |                  |
|-------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| NC: no<br>cuantificable | MB: muy<br>buena | I-E: illita-<br>esmectita  | ab:<br>abundante |
| Tr: trazas              | B: buena         | C-E: clorita-<br>esmectita | Q: cuarzo        |
|                         | R: regular       |                            |                  |
|                         | M: mala          |                            |                  |

**5.3. Composición de pozos de prueba para ensayos de sondas continuas C/O con fuentes pulsadas de 14 MeV (Brafman et al, 1977).**

|                       | Salmuere                  | Oil                      | Quartz Sand                           | Dolomie                             | Argil e                   | Quartz Sand + Oil                      | Sand + salmuere + C | Dolomie + salmuere + C | Sand (82%) + argile (10%) + salmuere + C |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|---------------------|------------------------|--|
|                       | ?=1.10 gr/cm <sup>3</sup> | ?=0.9 gr/cm <sup>3</sup> | ?=2.65 gr/cm <sup>3</sup><br>?= 24.5% | ?=2.87 gr/cm <sup>3</sup><br>?= 15% | ?=2.85 gr/cm <sup>3</sup> | ?=2.224 gr/cm <sup>3</sup><br>?= 24.5% |                     |                        |  |
| <b>C</b>              |                           | 35.207                   |                                       | 13.021                              |                           | 10.623                                 | 8.8                 | 18.62                  | 3.42                                     |
| <b>H</b>              | 9.598                     | 63.628                   |                                       |                                     | 1.297                     | 19.199                                 | 0.98                | 0.87                   | 0.51                                     |
| <b>O</b>              | 76.689                    | 0.7953                   | 53.278                                | 52.062                              | 53.393                    | 46.789                                 | 50.98               | 50.23                  | 52.39                                    |
| <b>Cl</b>             | 8.325                     |                          |                                       |                                     |                           |  | 0.85                | 0.75                   | 0.33                                     |
| <b>Si</b>             |                           |                          | 46.721                                |                                     | 23.852                    | 23.274                                 | 37.84               |                        | 40.98                                    |
| <b>Al</b>             |                           |                          |                                       |                                     | 17.465                    |  |                     |                        | 1.75                                     |
| <b>Ca</b>             |                           |                          |                                       | 21.738                              |                           |  |                     | 18.08                  |  |
| <b>Mg</b>             |                           |                          |                                       | 13.177                              |                           |  |                     | 10.96                  |  |
| <b>Na</b>             | 5.386                     |                          |                                       |                                     |                           |  | 0.55                | 0.49                   | 0.21                                     |
| <b>S</b>              |                           | 0.2784                   |                                       |                                     |                           | 0.0839                                 |                     |                        |  |
| <b>N</b>              |                           | 0.0909                   |                                       |                                     |                           | 0.0274                                 |                     |                        |  |
| <b>Fe2 O3 + TiO 2</b> |                           |                          |                                       |                                     | 3.992                     |  |                     |                        | 0.40                                     |

**5.4. Datos de pozos utilizados comunmente en calibración de sondas neutrónicas (Bravo, J., 2001).**

| Material de calibración | Densidad |
|-------------------------|----------|
| SiO2 (poroso)           | 1.717    |
| SiO2 / CSi (poroso)     | 1.930    |
| CSi (poroso)            | 2.188    |
| AlMg                    | 2.654    |
| CaCO3                   | 2.713    |
| (CaMg)(CO3)2            | 2.846    |
| Diabasa                 | 3.060    |

**5.5. Composición y densidad de minerales comúnmente presentes en formaciones geológicas típicas de yacimientos petrolíferos (Bravo, J., 2001; JIUNN-IISING CHAO, 1995).**

| Mineral            | Densidad        | Composición   |
|--------------------|-----------------|---|
| Cuarzo             | 2.654           | SiO <sub>2</sub>  |
| Calcita            | 2.710           | CaCO <sub>3</sub>   |
| Dolomita           | 2.870           | (CaMg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>   |
| Feldespatopotásico | 2.58            | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   |
| Albita             | 2.6             | NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  |
| Anortita           | 2.8             | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>  |
| Anhidrita          | 2.96            | CaSO <sub>4</sub>   |
| Yeso               | 2.32            | CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O  |
| Halita             | 2.165           | ClNa  |
| Silvita            | 1.98            | ClK   |
| Carnalita          |                 | ClK-MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O  |
| Borax              |                 | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O   |
| Kermita            |                 | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O  |
| Agua dulce         | 1.00            | H <sub>2</sub> O  |
| Oil                | 0.8 – 0.9 – 1.1 | C <sub>n</sub> (CH <sub>2</sub> )   |
| Gas                | 0.20            | C <sub>n</sub> H <sub>(2n+2)</sub>  |
| Agua salada (10%)  | 1.07            | H <sub>2</sub> O.ClNa.ClK   |
| Agua salada (20%)  | 1.146           | H <sub>2</sub> O.ClNa.ClK   |
| Illita             | 2.93            | ((HO) <sub>4</sub> K <sub>x</sub> (Al <sub>4</sub> Fe <sub>4</sub> Mg <sub>4</sub> Mg <sub>6</sub> )(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )O <sub>20</sub> ) (x=1-5) |
| Montmorillonita    | 2.88            | ((HO) <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> )  |
| Caolinita          | 2.609 - 2.96    | ((HO) <sub>8</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )  |
| Clorita            | 2.60 – 2.96     |   |
| Biotita            | 2.70 – 3.10     | (K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> )  |
| Muscovita          | 2.76 – 3.00     | (KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> )   |
| Haloisita          | 2.55 – 2.66     |   |
| Paligorskyta       | 2.29 – 2.36     |   |
| Sepiolita          | 2.08            |   |
| Smectita           |                 |   |
| Antracita          | 1.4 – 1.8       | C   |
| Carbon bituminoso  | 1.2 – 1.5       | C   |
| Lignita            | 0.7 – 1.5       | C   |
| Hierro             |                 | Fe  |
| Ghoetita           |                 | FeO(OH)   |
| Hematita           |                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  |
| Magnetita          | 5,2             | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>  |
| Limolita           |                 | FeO(OH)3H <sub>2</sub> O  |
| Pirita             |                 | FeS <sub>2</sub>  |
| Siderita           |                 | FeCO <sub>3</sub>   |
| Glauconita         |                 |   |
| Pirolusita         |                 | MnO <sub>2</sub>  |
| Manganita          |                 | MnO(OH)   |
| Cinabrio           |                 | HgS   |

5.6. Composición química y mineralógica promedio de rocas sedimentarias e ígneas (Gonzalez Bonorino, 1972). Las rocas sedimentarias son típicamente roca madre o reservorio de hidrocarburos, mientras que rocas ígneas fracturadas pueden ser reservorios potenciales.

| OXIDOS (%)                     | Arenisca | Grauvaca | Lutita | Tillita | Caliza | Chert | Arcillas Pelágicas |
|--------------------------------|----------|----------|--------|---------|--------|-------|--------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 74.3     | 66.7     | 54.8   | 58.9    | 8.2    | 89.9  | 54.9               |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.4      | 0.6      | 0.8    | 0.8     | -      | 0.2   | 0.8                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.5      | 13.5     | 15.9   | 15.9    | 2.2    | 3.7   | 16.6               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.8      | 1.6      | 3.6    | 3.3     | 1.0    | 2.3   | 7.7                |
| FeO                            | 0.9      | 3.5      | 2.9    | 3.7     | 0.7    | -     |                    |
| MnO                            | 0.05     | 0.1      | 0.1    | 0.1     | 0.1    | 0.1   | 2.0                |
| MgO                            | 1.5      | 2.1      | 2.9    | 3.3     | 7.7    | 0.5   | 3.4                |
| CaO                            | 4.9      | 2.5      | 4.7    | 3.2     | 40.5   | 0.3   | 0.7                |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.5      | 2.9      | 1.2    | 2.1     | -      | 0.7   | 1.3                |
| K <sub>2</sub> O               | 1.7      | 2.0      | 3.5    | 3.9     | -      | 0.7   | 2.7                |
| H <sub>2</sub> O               | 2.2      | 2.4      | 5.0    | 3.0     | -      | 1.2   | 9.2                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.1      | 0.2      | 0.15   | 0.2     | 0.1    | 0.9   | 0.7                |
| CO <sub>2</sub>                | 4.4      | 1.2      | 3.7    | 0.6     | 35.5   | -     | -                  |
| S/SO <sub>3</sub>              | 0.5      | 0.3      | 0.3    | 0.1     | 0.1    | -     | -                  |

Composición química promedio de rocas sedimentarias (según Clarke, Vonigradoff, Pettijohn, Goldschmidt, Wedepohl, Landergren)

| OXIDOS (% p/p)                 | Peridotita | Gabro / Basalto | Granodiorita / Andesita | Granito / Riolita |
|--------------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 43.5       | 48.4            | 54.5                    | 72.0              |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.8        | 1.3             | 1.5                     | 0.4               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | .0         | 16.8            | 16.4                    | 13.9              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.5        | 2.6             | 3.3                     | 0.9               |
| FeO                            | 9.8        | 7.9             | 5.2                     | 1.7               |
| MnO                            | 0.2        | 0.2             | 0.1                     | 0.1               |
| MgO                            | 34.0       | 8.1             | 3.8                     | 0.5               |
| CaO                            | 3.5        | 11.1            | 6.5                     | 1.3               |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.6        | 2.3             | 4.2                     | 3.1               |
| K <sub>2</sub> O               | 0.2        | 0.6             | 3.2                     | 5.5               |
| H <sub>2</sub> O               | 0.8        | 0.6             | 0.8                     | 0.5               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.05       | 0.2             | 0.3                     | 0.2               |
| <b>MINERALES (% v/v)</b>       |            |                 |                         |                   |
| Plagioclasa                    | 12         | 56              | 63                      | 30                |
| Cuarzo                         | -          | -               | 2                       | 27                |
| Feldespatos                    | -          | -               | 3                       | 35                |
| Anfibol                        | -          | 1               | 12                      | 1                 |
| Biotita                        | -          | -               | 5                       | 5                 |
| Ortopiroxeno                   | 12         | 16              | 3                       | -                 |
| Clinopiroxeno                  | 12         | 16              | 8                       | -                 |
| Olivino                        | 59         | 5               | -                       | -                 |
| Magnetita                      | 5          | 4               | 3                       | 2                 |
| Ilmenita                       |            |                 |                         |                   |
| Apatita                        | 0.1        | 0.6             | 0.8                     | 0.5               |

Composición química y mineralógica promedio de los principales tipos de rocas ígneas (Gonzalez Bonorino, 1972)

**5.7. Formaciones metasedimentarias precámbricas-cámbricas depositadas en cuencas de margen continental pasivo, procedentes de un área fuente correspondiente a una corteza continental evolucionada de composición similar a la actual (Cagnoni et al, 1993; Omarini, 1983; Wilner, 1985; Azcurra et al, 2001).**

| <b>Cagnoni, Linares, Oстера, Parica, Remesal, 1993; Metasedimentitas Nahuel Niyeu</b> |          |          |        |        |
|---|----------|----------|--------|--------|
| Elemento  | Grauvaca | Grauvaca | Pelita | Pelita |
| <b>Si</b>   | 24.571   | 25.364   | 21.863 | 22.349 |
| <b>Ti</b>   | 0.167    | 0.164    | 0.223  | 0.230  |
| <b>Al</b>   | 5.890    | 5.664    | 7.930  | 7.522  |
| <b>Fe</b>   | 1.115    | 0.978    | 1.858  | 1.668  |
| <b>Mg</b>   | 1.045    | 0.722    | 1.606  | 1.295  |
| <b>Mn</b>   | 0.027    | 0.015    | 0.012  | 0.027  |
| <b>Ca</b>   | 0.155    | 0.075    | 0.061  | 0.139  |
| <b>Na</b>   | 2.451    | 2.095    | 1.769  | 2.223  |
| <b>K</b>  | 1.276    | 1.244    | 2.045  | 1.863  |
| <b>P</b>  | 0.069    | 0.053    | 0.058  | 0.070  |
| <b>O</b>  | 63.236   | 63.626   | 62.573 | 62.612 |

| <b>Omarini, 1983; Willner, 1985; Metasedimentitas Puncoviscana</b> |          |          |        |        |
|--|----------|----------|--------|--------|
| Elemento   | Grauvaca | Grauvaca | Pelita | Pelita |
| <b>Si</b>  | 24.834   | 25.832   | 23.081 | 22.682 |
| <b>Ti</b>  | 0.172    | 0.179    | 0.216  | 0.219  |
| <b>Al</b>  | 5.363    | 4.931    | 6.733  | 7.188  |
| <b>Fe</b>  | 1.352    | 1.052    | 1.636  | 1.808  |
| <b>Mg</b>  | 1.082    | 0.760    | 1.573  | 1.452  |
| <b>Mn</b>  | 0.030    | 0.023    | 0.027  | 0.030  |
| <b>Ca</b>  | 0.438    | 0.576    | 0.319  | 0.203  |
| <b>Na</b>  | 2.187    | 1.764    | 1.865  | 1.426  |
| <b>K</b>   | 1.034    | 0.985    | 1.552  | 2.091  |
| <b>P</b>   | 0.078    | 0.050    | 0.067  | 0.050  |
| <b>O</b>   | 63.430   | 63.848   | 62.931 | 62.851 |

| <b>Azcurra, Otamendi, Fagiano, 2001; Metasedimentitas La Aguada</b> |        |                |        |        |
|---|--------|----------------|--------|--------|
| Elemento  | Vaque  | Vaque lutitica | Vaque  | Arcosa |
| <b>Si</b>   | 25.315 | 23.465         | 26.018 | 25.120 |
| <b>Ti</b>   | 0.207  | 0.241          | 0.086  | 0.045  |
| <b>Al</b>   | 4.937  | 6.034          | 5.218  | 6.400  |
| <b>Fe</b>   | 1.261  | 1.710          | 0.550  | 0.237  |
| <b>Mg</b>   | 1.150  | 1.567          | 0.520  | 0.208  |
| <b>Mn</b>   | 0.021  | 0.030          | 0.012  | 0.006  |
| <b>Ca</b>   | 0.785  | 0.584          | 0.970  | 0.520  |
| <b>Na</b>   | 1.564  | 1.803          | 2.238  | 2.188  |
| <b>K</b>  | 0.993  | 1.545          | 0.520  | 2.082  |
| <b>P</b>  | 0.057  | 0.042          | 0.038  | 0.012  |
| <b>O</b>  | 63.709 | 62.978         | 63.831 | 63.182 |

## **6. APENDICES**

## Apéndice I

En las Tablas A.I.1 y A.I.2 se presentan los resultados de las simulaciones con la fuente continua de AmBe y la fuente pulsada de 14 MeV para diferentes horas de corrida del programa MCNP y para la formación caliza saturada con agua o petróleo.

| FUENTE PUNTUAL CONTINUA DE AmBe |                 |        |                 |        |                     |        |                     |        |
|---------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| HORAS<br>MCNP                   | Fm + AGUA       |        |                 |        | Fm + PETROLEO       |        |                     |        |
|                                 | C               | Error  | O               | Error  | C                   | Error  | O                   | Error  |
| 1                               | 3.85238<br>E-06 | 0.2947 | 1.1094<br>3E-05 | 0.1896 | 3.793<br>16E-<br>06 | 0.3568 | 1.49<br>601<br>E-05 | 0.1782 |
| 2                               | 4.5235E<br>-06  | 0.1953 | 1.3442<br>5E-05 | 0.1205 | 5.840<br>43E-<br>06 | 0.2007 | 1.47<br>840<br>E-05 | 0.1249 |
| 4                               | 4.37793<br>E-06 | 0.1444 | 1.3667<br>1E-05 | 0.0839 | 6.237<br>87E-<br>06 | 0.1360 | 1.72<br>381<br>E-05 | 0.0830 |
| 6                               | 4.24272<br>E-06 | 0.1206 | 1.3804<br>1E-05 | 0.0684 | 6.470<br>70E-<br>06 | 0.1094 | 1.59<br>629<br>E-05 | 0.0702 |
| 12                              | 4.27564<br>E-06 | 0.0844 | 1.2981<br>3E-05 | 0.0494 | 5.596<br>70E-<br>06 | 0.0821 | 1.53<br>911<br>E-05 | 0.0499 |
| 18                              | 4.11703<br>E-06 | 0.0699 | 1.2759<br>2E-05 | 0.0405 | 5.396<br>04E-<br>06 | 0.0686 | 1.53<br>592<br>E-05 | 0.0406 |
| 20                              | 4.05253<br>E-06 | 0.0669 | 1.2722<br>1E-05 | 0.0384 | 5.362<br>86E-<br>06 | 0.0651 | 1.55<br>970<br>E-05 | 0.0383 |
| 30                              | 3.95285<br>E-06 | 0.0553 | 1.2976<br>9E-05 | 0.0313 | 5.401<br>27E-<br>06 | 0.0527 | 1.51<br>971<br>E-05 | 0.0316 |
| 32                              | 3.98742<br>E-06 | 0.0536 | 1.2985<br>5E-05 | 0.0303 | 5.297<br>02E-<br>06 | 0.0515 | 1.51<br>668<br>E-05 | 0.0515 |
| 42                              | 3.96243<br>E-06 | 0.0471 | 1.2907<br>0E-05 | 0.0265 | 5.339<br>63E-<br>06 | 0.0446 | 1.53<br>173<br>E-05 | 0.0266 |
| 52                              | 3.94268<br>E-06 | 0.0423 | 1.2757<br>1E-05 | 0.0240 | 5.439<br>11E-<br>06 | 0.0398 | 1.51<br>393<br>E-05 | 0.0241 |
| 55                              | 3.94658<br>E-06 | 0.0410 | 1.2762<br>8E-05 | 0.0233 | 5.549<br>78E-<br>06 | 0.0384 | 1.49<br>671<br>E-05 | 0.0235 |

**Tabla A.I.1.** Cuentas detectadas en los intervalos de energía del C y O, con su error relativo estimado por MCNP, para formaciones saturadas en petróleo y agua e irradiadas con una fuente continua de AmBe.

A partir de un error relativo ( $\sigma/X$ ) menor al 10% se puede asumir que la convergencia del sistema es buena, por lo que los datos arrojados a la salida del programa son confiables. Por otra parte se observan menores errores relativos para el sistema simulado con fuente continua de AmBe, lo cual puede entenderse a partir de las características de la detección y emisión de partículas definidas en el sistema con fuente pulsada que harían más factible la propagación de errores.

| <b>FUENTE PUNTUAL PULSADA DE 14 MEV (detección en el pulso)</b> |                 |              |                 |              |                 |              |                 |              |
|---|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
|   | <b>AGUA</b>     |              |                 |              | <b>PETROLEO</b> |              |                 |              |
| <b>HORAS MCNP</b>   | <b>C</b>        | <b>Error</b> | <b>O</b>        | <b>Error</b> | <b>C</b>        | <b>Error</b> | <b>O</b>        | <b>Error</b> |
| <b>2</b>  | 5.3762<br>9E-09 | 0.1148       | 1.6364<br>7E-08 | 0.0649       | 5.4231<br>2E-09 | 0.1267       | 1.7430<br>6E-08 | 0.0695       |
| <b>4</b>  | 5.8666<br>5E-09 | 0.0743       | 1.5963<br>9E-08 | 0.0447       | 5.5034<br>1E-09 | 0.0833       | 1.5976<br>9E-08 | 0.0493       |
| <b>6</b>  | 5.2822<br>8E-09 | 0.0389       | 1.6255<br>1E-08 | 0.0220       | 5.8283<br>3E-09 | 0.0402       | 1.6201<br>2E-08 | 0.0242       |
| <b>12</b>   | 5.3352<br>1E-09 | 0.0213       | 1.6295<br>6E-08 | 0.0121       | 5.9419<br>3E-09 | 0.0221       | 1.6371<br>1E-08 | 0.0134       |
| <b>18</b>   | 5.2570<br>0E-09 | 0.0164       | 1.6346<br>0E-08 | 0.0093       | 5.9496<br>4E-09 | 0.0169       | 1.6121<br>0E-08 | 0.0103       |
| <b>20</b>   | 5.2392<br>9E-09 | 0.0154       | 1.6312<br>9E-08 | 0.0087       | 5.9485<br>1E-09 | 0.0159       | 1.6163<br>4E-08 | 0.0097       |
| <b>30</b>   | 5.3246<br>1E-09 | 0.0121       | 1.6372<br>9E-08 | 0.0069       | 6.0027<br>4E-09 | 0.0125       | 1.6122<br>8E-08 | 0.0076       |
| <b>32</b>   | 5.3119<br>5E-09 | 0.0117       | 1.6352<br>8E-08 | 0.0067       | 6.0153<br>6E-09 | 0.0120       | 1.6178<br>0E-08 | 0.0074       |
| <b>42</b>   | 5.3496<br>4E-09 | 0.0100       | 1.6233<br>4E-08 | 0.0058       | 6.0485<br>3E-09 | 0.0103       | 1.6134<br>5E-08 | 0.0063       |
| <b>52</b>   | 5.3522<br>4E-09 | 0.0089       | 1.6219<br>9E-08 | 0.0051       | 6.0503<br>3E-09 | 0.0092       | 1.6016<br>0E-08 | 0.0057       |
| <b>55</b>   | 5.3670<br>1E-09 | 0.0086       | 1.6206<br>9E-08 | 0.0050       | 6.0455<br>4E-09 | 0.0089       | 1.5977<br>9E-08 | 0.0055       |

**Tabla A.I. 2.** Cuentas detectadas en los intervalos de energía del C y O, con su error relativo estimado por MCNP, para formaciones saturadas en petróleo y agua e irradiadas con una fuente pulsada de D-T de 14 MeV.



## Apendice II

En la Tabla A.II.1 se presentan los valores de secciones eficaces, energías de niveles excitados, energías de gammas emitidos, semiperíodos e intensidad porcentual para las posibles reacciones nucleares de interés, ocurridas entre neutrones rápidos y térmicos y elementos presentes en el sistema simulado en MCNP.

La misma fue compilada a partir de bases de datos de Browne et al, 1978 (4), Data Banks of Nuclear Energy Agency, 1993 and 2001 (12), (9), JIUNN-ISING CHAO, 1995 (6), Technical Reports Series N° 357, IAEA, 1993 (7) y Bravo, J. B., 2001 (3).

Para el primer nivel inelástico del  $^{12}\text{C}$  y el segundo nivel inelástico del  $^{16}\text{O}$  se presentan los valores promedio calculados en el espectro de energía de la fuente (9) a partir del umbral de cada reacción,

| Elemento<br>(abundancia<br>isotópica)  | Reacción   | Sigma<br>térmico<br>(mb) | Sigma<br>rápido<br>(mb)                  | Energía de<br>niveles<br>excitados | Energía<br>Del<br>fotón<br>(MeV)                             | T $\frac{1}{2}$ | I%                    |
|--|--|--------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------|-----------------------|
| <b>H</b><br>( $^1\text{H}$ =99.98)   | $^1\text{H}(n, ?)$<br>$^2\text{H}$                     | <b>323</b>               | 0.029                                    | ---                                | <b>2.223</b>   | Prompt          | 100                   |
| <b>C nat</b><br>( $^{12}\text{C}$ =98.9)<br>( $^{13}\text{C}$ =1.1)  | $^{12}\text{C}(n, n', ?)$<br>$^{12}\text{C}$           | —                        | 231.6<br>(9)<br>(9)                      | 4.439<br>7.654<br>10.3             | <b>4.438</b><br><b>7.654</b><br><b>9.64</b>                  | Prompt          | 100                   |
|  | $^{12}\text{C}(n, ?)$<br>$^{13}\text{C}$               | <b>3.28</b>              | 0.0014<br>(1MeV)<br>0.142<br>(10<br>MeV) | 3.088<br>3.684<br>3.854            | <b>1.261</b><br><b>3.683</b><br><b>4.945</b>                 | Prompt          | 29.53<br>32.10<br>100 |
| <b><math>^{16}\text{O}</math></b><br>( $^{16}\text{O}$ =99.76)<br>( $^{17}\text{O}$ =0.04)<br>( $^{18}\text{O}$ =0.20) | $^{16}\text{O}(n, n')$<br>$^{16}\text{O}$              | —                        | (9)<br>148.6<br>(9)<br>(9)               | 6.05<br>6.13<br>6.92<br>7.12       | —<br><b>6.1293</b><br><b>6.919</b><br><b>7.1169</b>          | Prompt          | 100                   |
|  | $^{16}\text{O}(n, ?)$<br>$^{17}\text{O}$               | <b>0.185</b>             | ---                                      | 0.871<br>3.055<br>3.841<br>4.551   | <b>0.870</b><br><b>1.087</b><br><b>2.184</b><br><b>3.271</b> | Prompt          | 100<br>82<br>82<br>18 |
|  | $^{16}\text{O}(n, p)$<br>$^{16}\text{N}$               | —                        | <b>28.7</b><br>(10<br>MeV)               | 0.120<br>0.297<br>0.397            | <b>6.13</b><br><b>7.11</b>                                   | 7.13 s          | 69<br>4.8             |
|  | $^{16}\text{O}(n, n', a)$<br>$^{12}\text{C}$           | —                        | (7)                                      | 4.439<br>7.654<br>9.64             | <b>4.439</b>   | Prompt          | 100                   |
| <b><math>^{40}\text{Ca}</math></b>   | $^{40}\text{Ca}$<br>( $n, n', ?$ )<br>$^{40}\text{Ca}$ | —                        | (7)                                      | 3.352                              | <b>0.7550</b>  | Prompt          | 15                    |
|  |  |                          |  | 3.736                              | <b>1.3456</b>  |                 | 5.5                   |
|  |  |                          |  | 3.904                              | <b>1.3757</b>  |                 | 10                    |
|  |  |                          |  | 4.491                              | <b>3.7369</b>  |                 | 123                   |
|  |  |                          |  | 5.213                              | <b>3.9042</b>  |                 | 100                   |
|  |  |                          |  | 5.249                              | <b>5.250</b>   |                 | 27                    |
|  |  |                          |  | 5.279                              | <b>5.628</b>   |                 | 21                    |
| 5.614  | <b>5.902</b>   |                          | 16                                       |                                    |  |                 |                       |

|  |  |                 |                          |   |  |                  |   |
|--|--|-----------------|--------------------------|---|--|------------------|---|
|  | $^{40}\text{Ca}$ (n,?)<br>$^{41}\text{Ca}$       | <b>430 (9)</b>  | ---                      | 1.943<br>2.010<br>2.462<br>2.575<br>2.605<br>2.670<br>2.883<br>2.959<br>3.049 | <b>1.260</b><br><b>1.725</b><br><b>1.942</b><br><b>2.013</b><br><b>4.418</b><br><b>5.628</b><br><b>5.515</b><br><b>5.900</b><br><b>6.420</b> | Prompt           | 23<br>57<br>100<br>100<br>21<br>70<br>5.9<br>53 |
|  | $^{46}\text{Ca}$ (n,?)<br>$^{47}\text{Ca}$       | <b>419 (9)</b>  | ---                      | (4)   | <b>5.980</b>   |                  | 13.9  |
|  | $^{48}\text{Ca}$ (n,?)<br>$^{49}\text{Ca}$       | <b>1100 (9)</b> | ---                      | (4)   | <b>3.084</b>   | 8.72 m           | 92  |
| <b><math>^{23}\text{Na}</math></b><br>( $^{23}\text{Na}=100$ )   | $^{23}\text{Na}$ (n,<br>n',?) $^{23}\text{Na}$   | —               | (7)                      | 0.440<br>2.076<br>2.391<br>2.640  | <b>0.440</b><br><b>1.6358</b><br><b>2.6401</b>   | Prompt           | 100<br>8.6<br>2.0                               |
|  | $^{23}\text{Na}$ (n, ?)<br>$^{24}\text{Na}$      | <b>518</b>      | 0.134<br>(10<br>MeV)     | (4)   | <b>1.369</b>   | 14.96 h          | 100   |
|  | $^{23}\text{Na}$ (n, ?)<br>$^{24}\text{Na}$      | <b>518</b>      | ---                      | (4)   | <b>3.026</b><br><b>3.098</b>   | Prompt           | 5.7<br>13.8                                     |
|  | $^{23}\text{Na}$ (n, 2n)<br>$^{22}\text{Na}$     | —               | <b>42</b><br>(10<br>MeV) | (4)   | <b>1.275</b>   | 2.60 a           |   |
| <b>Si nat</b><br>( $^{28}\text{Si}= 92.23$ )<br>( $^{29}\text{Si}= 4.67$ )<br>( $^{30}\text{Si}= 3.10$ ) | $^{28}\text{Si}$<br>(n,n',?)<br>$^{28}\text{Si}$ | —               | (7)                      | 1.7789<br>4.6169<br>4.9790  | <b>1.2728</b><br><b>1.7788</b><br><b>2.8379</b>  | Prompt           | 4.2<br>100<br>2.7                               |
|  | $^{28}\text{Si}$ (n, ?)<br>$^{29}\text{Si}$      | <b>160</b>      | ---                      | 1.273<br>2.028<br>2.426<br>3.067<br>3.624                                     | <b>2.092</b><br><b>3.539</b><br><b>4.934</b><br><b>6.380</b><br><b>7.200</b>   | Prompt           | 31<br>68<br>92<br>18<br>11                      |
|  | $^{28}\text{Si}$ (n, p)<br>$^{28}\text{Al}$      | —               | (7)                      | <b>0.030</b><br><b>0.972</b><br><b>1.014</b>                                  | <b>7.724</b><br><b>1.779</b>   | Prompt<br>2.24 m | 100   |
|  | $^{29}\text{Si}$ (n,p)<br>$^{29}\text{Al}$       | —               | (7)                      | <b>1.397</b><br><b>1.753</b><br><b>2.224</b>                                  | <b>1.273</b>   | 6.5 m            |   |

|  |  |  |      |  |   |         |   |
|--|--|--|------|--|---|---------|---|
| <b>Fe nat</b><br>( <sup>54</sup> Fe= 5.8)<br>( <sup>56</sup> Fe= 91.7)<br>( <sup>57</sup> Fe= 2.2)<br>( <sup>58</sup> Fe= 0.28)        | <sup>56</sup> Fe<br>(n,n',?)<br><sup>56</sup> Fe | --   | (12) | <sup>54</sup> Fe 1.4081<br>2.5381<br>2.5613<br>2.9491<br><sup>56</sup> Fe 0.8467<br>2.0850<br>2.6575<br>2.9417<br><sup>57</sup> Fe 0.0144<br>0.1364<br>0.3667<br>0.7064<br>1.0071<br><sup>57</sup> Fe 0.8107<br>2.0765<br>2.6003 | 54Fe<br><b>1.1300</b><br><b>1.1528</b><br><br><b>56Fe</b><br><b>0.8467</b><br><b>1.0374</b><br><br>57Fe<br><b>0.3525</b><br><b>0.3671</b><br><br>58Fe<br><b>0.8103</b><br><b>1.2383</b>                       | Prompt  | 0.39<br>0.14<br><br>100<br>2<br><br>1.6<br>0.54<br><br>0.43<br>10                                   |
|  | <sup>56</sup> Fe (n,?)<br><sup>57</sup> Fe       | <b>2550</b>  | ---  | (4)  | <b>0.810</b><br><b>1.674</b><br><b>6.018</b><br><b>7.632</b><br><b>7.645</b><br><b>9.267</b>  | Prompt  | 100<br>26<br>34<br>100<br>86.2<br>100   |
|  | <sup>56</sup> Fe (n,p)<br><sup>56</sup> Mn       | --   | (12) | ---  | <b>0.847</b>  | 2.578 h | 98.87   |
|  | <sup>57</sup> Fe (n,?)<br><sup>58</sup> Fe       | <b>2425</b>  | ---  | (4)  | <b>1.725</b><br><b>4.218</b><br><b>5.920</b><br><b>7.278</b>  | Prompt  | 21.7<br>23.3<br>33.1<br>20.7  |
|  | Fe (n,?) Fe                                      | <b>2526</b><br><b>2527</b><br><b>2425</b><br><b>1242</b> | ---  | (4)  | <b>2.726</b><br><b>2.781</b><br><b>6.960</b><br><b>7.262</b>  | Prompt  | 10.9<br>5.2<br>15.9<br>17.3   |
| <b><sup>14</sup>N</b>  | <sup>14</sup> N (n,n',?)<br><sup>14</sup> N      | --   | (12) | 2.313<br>3.948<br>4.915<br>5.106<br>5.690<br>5.832   |   |         |   |
|  | <sup>14</sup> N (n,?)<br><sup>15</sup> N         | <b>73</b>  | ---  | (4)  | <b>1.678</b><br><b>1.884</b><br><b>2.520</b><br><b>3.532</b><br><b>3.677</b><br><b>4.508</b><br><b>5.269</b><br><b>5.298</b><br><b>5.553</b><br><b>5.556</b><br><b>6.322</b><br><b>7.299</b><br><b>10.829</b> | Prompt  | 24.8<br>72.7<br>22.8<br>32.9<br>52.7<br>53.1<br>100<br>70.7<br>62.2<br>33.6<br>59.8<br>30.3<br>47.5 |
| <b><sup>32</sup>S</b><br>( <sup>32</sup> S= 95.02)<br>( <sup>33</sup> S= 0.75)<br>( <sup>34</sup> S= 4.21)<br>( <sup>36</sup> S= 0.02) | <sup>32</sup> S (n,?)<br><sup>33</sup> S         | <b>491</b>   | ---  | (4)  | <b>0.841</b>  | Prompt  | 76  |
|  | S (n,?) S  | <b>515</b>   | ---  | (4)  | <b>2.753</b>  | Prompt  | 7.7   |
|  | <sup>36</sup> S (n,?)<br><sup>37</sup> S         | <b>147</b>   | ---  | (4)  | <b>3.103</b>  | 5.0 m   | 94.26   |

|   |  |              |                           |   |  |  |  |  |
|---|--|--------------|---------------------------|---|--|--|--|--|
|   | $^{34}\text{S}(n,p)$<br>$^{34}\text{P}$    | --           | <b>108</b><br>(14<br>MeV) | (4)   | <b>2.127</b>   | 12.4 s   | 152  |  |
|   | $^{32}\text{S}(n,n',?)$<br>$^{32}\text{S}$ | --           | (7)                       | $^{32}\text{S}$ 2.2303<br>3.7785<br>4.2819<br>$^{33}\text{S}$ <b>0.8409</b><br>1.9663<br>2.3125<br>$^{34}\text{S}$ 2.1276<br>3.3032 | <b>1.5481</b><br><b>2.0520</b><br><b>2.1275</b><br><b>2.2302</b><br><b>2.7761</b><br><b>4.2813</b>                                   | Prompt   | 3.2<br>0.5<br>5.6<br>100<br>4.0<br>4.0               |  |
| <b><math>^{52}\text{Cr}</math></b><br>( $^{50}\text{Cr}$ = 4.345)<br>( $^{52}\text{Cr}$ =83.79)<br>( $^{53}\text{Cr}$ = 9.501)<br>( $^{54}\text{Cr}$ = 2.365) | Cr (n,n',?)<br>Cr                          | --           | (12)                      | $^{50}\text{Cr}$ 0.7833<br>1.8811<br>2.9239<br>3.1602   | <b>0.7833</b><br><b>1.0978</b>   | Prompt   | 8.3<br>0.4   |  |
|   |  | --           | (12)                      | $^{52}\text{Cr}$ 1.4342<br>2.3698<br>2.6489<br>2.7679<br>2.9652<br>3.1140   | <b>0.6473</b><br><b>0.7042</b><br><b>0.7442</b><br><b>0.9355</b><br><b>1.2147</b><br><b>1.2897</b><br><b>1.4342</b><br><b>1.5309</b> |  | 2.2<br>3.3<br>1.2<br>8.4<br>1.8<br>5.6<br>100<br>8.8 |  |
|   |  | --           | (12)                      | $^{53}\text{Cr}$ 0.5643<br>1.0065<br>1.2897<br>1.5367<br>1.9742   | <b>0.5302</b><br><b>0.5643</b><br><b>1.0064</b><br><b>1.3337</b>   |  | 2.2<br>8.8<br>9.1<br>9.2                             |  |
|   |  | --           | (12)                      | $^{54}\text{Cr}$ 0.8350<br>1.8237<br>2.6198   | <b>0.8350</b><br><b>0.9887</b>   |  | 4.1<br>0.55  |  |
|   | Cr (n,?) Cr                                | <b>15567</b> | ---                       |   | $^{51}\text{Cr}$<br>(4)  | <b>0.320</b><br><b>0.749</b><br>1.899<br>7.362<br>8.484<br>8.512   | 27.7 d   | 100<br>15<br>17<br>32<br>46  |
|   |  | <b>744</b>   | ---                       |   | $^{53}\text{Cr}$<br>(4)  | 0.563<br>1.008<br><b>1.289</b><br>1.973<br>2.320<br>3.753<br><b>4.667</b><br><b>4.759</b><br>5.231<br><b>5.618</b><br><b>5.966</b><br><b>5.999</b><br><b>6.933</b><br>7.375<br>7.938 | Prompt   | 47<br>50<br>27<br>19<br>12<br>11<br>24<br>13<br>11<br>24<br>18<br>9.3<br>16<br>19<br>100 |

|  |                   |              |                                      |  |  |        |   |
|--|-------------------|--------------|--------------------------------------|--|--|--------|---|
|  |                   | <b>17772</b> | ---                                  | <sup>54</sup> Cr<br>(4)  | 0.834<br>1.784<br>2.239<br>6.645<br>7.099<br><b>8.884</b><br><b>9.718</b>              | Prompt | 52<br>11<br>22<br>20<br>17<br>100<br>32               |
|  |                   | <b>358</b>   | ---                                  | <sup>55</sup> Cr<br>(4)  | 0.565<br>0.908<br>1.474<br>4.771<br>6.004<br>6.246                                     | Prompt | 21<br>14<br>12<br>23<br>24<br>100                     |
| <b>Ni</b><br>( <sup>58</sup> Ni= 68.27)<br>( <sup>60</sup> Ni= 26.10)<br>( <sup>61</sup> Ni= 1.13)<br>( <sup>62</sup> Ni= 3.59)<br>( <sup>62</sup> Ni= 0.91) | Ni (n,n',?)<br>Ni | —            | (12)                                 | <sup>58</sup> Ni<br>1.4543<br>2.4591<br>2.7757<br>2.9035           | 0.9613<br>1.0048<br>1.1617<br>1.3169<br>1.3214<br>1.4486<br><b>1.4542</b><br>1.5837    | Prompt | 3.7<br>12.3<br>3.3<br>2.3<br>8.7<br>9.9<br>100<br>2.6 |
|  |                   | —            | (12)                                 | <sup>60</sup> Ni<br>1.3325<br>2.1587<br>2.2849<br>2.6260           | 0.4671<br>0.8260<br>0.9524<br>1.1731<br>1.2935<br>1.3325<br>2.1589                     | Prompt | 3.2<br>10.7<br>2.8<br>13.3<br>2.0<br>60<br>2.0        |
|  |                   |              | (12)                                 | <sup>61</sup> Ni<br>0.0674<br>0.2829<br>0.6560<br>0.9086<br>1.0151 | <b>0.2830</b><br>0.659   | Prompt | 60<br>2   |
|  |                   |              | (12)                                 | <sup>62</sup> Ni<br>1.1729<br>2.3018<br>2.3363<br>3.1579           | <b>2.3010</b>  | Prompt | 0.95  |
|  |                   | (12)         | <sup>64</sup> Ni<br>1.3457<br>2.2277 | <b>1.3457</b>  | Prompt   | 1.8    |   |
|  | Ni (n, ?) Ni      | <b>4506</b>  | ---                                  | <sup>59</sup> Ni<br>(4)  | 0.877<br>5.817<br>6.584<br>8.121<br><b>8.533</b><br><b>8.999</b>                       | Prompt | 15<br>7<br>5<br>8.8<br>48.3<br>100                    |
|  |                   | <b>2696</b>  | ---                                  | <sup>60</sup> Ni<br>(4)  | 7.367<br>7.516<br>8.069<br>8.192<br>8.263<br>9.102<br>9.227<br>10.053<br><b>11.382</b> | Prompt | 10<br>11<br>16<br>9<br>8<br>43<br>5.7<br>39<br>100    |

|   |  |                              |     |   |  |        |  |
|---|--|------------------------------|-----|---|--|--------|--|
|   |  | <b>2437</b>                  | --- | <sup>61</sup> Ni<br>(4)   | 0.815<br>1.031<br>1.099<br>1.184<br>2.123<br>5.696<br>7.537<br>7.820   | Prompt | 6<br>8<br>5<br>7<br>10<br>11<br>58<br>100  |
|   |  | <b>14061</b>                 | --- | <sup>62</sup> Ni<br>(4)   | 0.875<br>1.128<br>1.163<br>1.172<br>1.220<br>1.985<br>2.084<br>2.097<br>2.301<br>2.345<br>7.326<br>7.703<br>8.551<br>9.422 | Prompt | 18.8<br>9<br>8<br>100<br>6.8<br>5.4<br>5.3<br>9.5<br>13.7<br>6<br>6.3<br>5.3<br>6.1<br>6.6 |
|   |  | (8)                          | --- | <sup>63</sup> Ni<br>(4)   | 5.837<br>6.838   | Prompt | 7.6<br>100   |
|   |  | <b>1480</b>                  | --- | <sup>64</sup> Ni<br>(4)   | 8.311<br>9.655   | Prompt | 14.8<br>100  |
|   |  | (8)                          | --- | <sup>65</sup> Ni<br>(4)   | 0.629  | Prompt | 10.9   |
|   |  | (8)                          | --- | <sup>66</sup> Ni<br>(4)   | 4.661<br>5.419<br>5.854<br>6.293<br>6.580  | Prompt | 5.7<br>5.7<br>13.3<br>26.4<br>100  |
| <sup>55</sup> Mn  | <sup>55</sup> Mn (n,?)<br><sup>56</sup> Mn | <b>13300</b>                 | --- | (4)   | 0.847  | 2.58 h | 99   |
|   | <sup>55</sup> Mn (n,?)<br><sup>56</sup> Mn | <b>13300</b><br><b>12974</b> | --- | (4)   | 3.588<br>4.949<br>7.244<br>7.270   | Prompt | 24.6<br>11.2<br>12<br>19.4   |
| <b>K nat</b><br>( <sup>39</sup> K=93.258)<br>( <sup>40</sup> K=0.0117)<br>( <sup>41</sup> K= 6.730) | K (n,n',?)K                                | —                            | (7) | <sup>39</sup> K<br>2.5229<br>2.8139<br>3.0187<br>3.5972<br><sup>40</sup> K<br>0.0296<br>0.7999<br>0.8916<br>1.6464<br><sup>41</sup> K<br>0.9806<br>1.2933<br>1.5601<br>1.6767 | <sup>39</sup> K<br>0.3469<br>0.7837<br>1.1929<br>1.3133<br><sup>40</sup> K<br>0.9806<br>1.2933                             |        | 8<br>16<br>9<br>12<br>31<br>24   |
|   | <sup>41</sup> K (n,?)<br><sup>42</sup> K   | <b>2050</b>                  | --- | (4)   | 0.770  | Prompt | 51   |

|                        |  |             |            |                              |  |             |                                 |
|------------------------|--|-------------|------------|------------------------------|--|-------------|---------------------------------|
|                        | K (n,?) K                                    | <b>2049</b> | ---        | <b>(4)</b>                   | <b>3.058</b><br><b>3.546</b><br><b>6.999</b>                                 | Prompt      | 5.8<br>10.1<br>5.2              |
|                        | <sup>41</sup> K (n, a)<br><sup>37</sup> Cl   | <b>4.5</b>  | (7)        | (4)                          | <b>1.727</b>   | Prompt      | 10                              |
|                        | <sup>40</sup> K decay                        | —           | ---        | ---                          | <b>1.4608</b>  | 1.28E9<br>y |                                 |
| <b><sup>27</sup>Al</b> | <sup>27</sup> Al (n,?)<br><sup>28</sup> Al   | <b>220</b>  | ---        | (4)                          | <b>3.591</b><br><b>4.259</b><br><b>4.902</b><br><b>7.693</b><br><b>7.724</b> | Prompt      | 15<br>21.9<br>9.6<br>15.1<br>27 |
|                        | <sup>27</sup> Al (n,?)<br><sup>28</sup> Al   | <b>231</b>  | ---        | (4)                          | <b>1.779</b>   | 2.24 m      | 100                             |
|                        | <sup>27</sup> Al(n,n',?)<br><sup>27</sup> Al | —           | <b>840</b> | 0.84376<br>1.01442<br>2.2118 | <b>0.8437</b><br><b>1.0144</b><br><b>1.7208</b><br><b>2.2118</b>             | Prompt      | 60<br>100<br>14<br>52           |
|                        | <sup>27</sup> Al(n,<br>a) <sup>24</sup> Na   | —           | <b>(7)</b> |                              | <b>1.369</b>   | Prompt      |                                 |

**Tabla A3.** Datos de secciones eficaces para neutrones rápidos y térmicos, niveles excitados, energía de gammas, semi-períodos e intensidad porcentual para los elementos presentes y reacciones de interés del sistema sonda-pozo simulado (4), (6), (7), (9), (12).

## **7. BIBLIOGRAFIA**



## 7. BIBLIOGRAFIA

- (1). ZAMONSKY, O., BLAUMANN, H., 2001. *Estimación de la performance de una sonda de perfilaje con fuente de AmBe para la detección de C/O*. División Física de Reactores Avanzados, Departamento de Ingeniería Nuclear, Centro Atómico Bariloche. Análisis previo a propuesta de FONTAR. Inédito.
- (2). MCNP Version 4.B, *Monte Carlo N-Particle Transport Code System*. RSIC Code Package CCC-200.
- (3). BRAVO, J. B., 2001. *Apuntes Seminario Evaluación de Formaciones*. CAB. San Carlos de Bariloche, Rio Negro, Argentina. 14/15 noviembre 2001.
- (4). BROWNE, E., DAIKIRI, J., DOEBLER, R., 1978. *Table of Isotopes, Seventh Edition*. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley. Leader, M. and Shirley, V. (Eds.); 1523 p.
- (5). LESZCZYNSKI, F., 1999. *Apuntes Curso Avanzado de Entrenamiento en el manejo del Programa MCNP4B*. Programa ARCAL RCA/9/033. 1 al 12 de noviembre de 1999. Centro Atómico Bariloche.
- (6). JIUNN-IISING CHAO, 1995. *In situ applications*. Prompt Gamma Neutron Activation Análisis. Alfassi, Z. and Chien Chung (Eds.). 8: 131-157.
- (7). LEMA, M., 2002. Datos de un testigo lateral del sondeo Los Perales, Las Heras, Santa Cruz (Repsol-YPF; Com. Pers.).
- (8). LO RÉ, H., 1988. *El perfilaje de C/O ve capas salteadas*. Actas Simposio de Producción de Hidrocarburos, Bariloche, Rio Negro, Argentina: 14 al 18 de noviembre de 1988; pag. 101-113.
- (9). JANIS. *Nuclear Data Display Program. A New Java-based*. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) / Nuclear Energy Agency – Data Bank. Dr. Ali Nouri; 12, Boulevard des Lies, 92130. Issy-Les-Moulineaux, France.
- (10). IAEA, 1993. *Handbook on Nuclear Data for Borehole logging and Mineral Analysis*. Technical Reports Series N° 357. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1993.
- (11). BRAFMAN, M., GODEAU, A. and LAVERLOCHERE, J., 1977. *Diagraphie neutronique par analyse spectrométrique de l'émission instantanéé des rayonnements gamma de diffusion inélastique et de capture, pouvant etre appliqueé en forages pétroliers*. Nuclear Techniques and Mineral Resources 1977; pag. 42-72. Proceedings of a Symposium, Vienna, 7-10 March 1977. IAEA.

(12). JEF-PC. *A Program for displaying data from the Joint Evaluated File, Driver Program – Nucleus, Version: 01 Nov. 1994.* Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency – Data Bank. 12, Bld des Lies, 92130, Issy-Les-Moulineaux, France.

(13). GONZALEZ BONORINO, F., 1972. *Introducción a la Geoquímica.* Serie de química. Monografía N° 8. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Depto de Asuntos Científicos, Sec. Gral OEA. Fundación Bariloche. Departamento de Recursos Naturales y Energía. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

(14). CAGNONI, M.; LINARES, E., OSTERA, H., PARICA, C., 1993. *Caracterización geoquímica de los Metasedimentos de la Formación Nahuel Niyeu: Implicancias sobre su proveniencia y Marco Tectónico.* Actas XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 1993. I: 281-288.

(15). OMARINI, R. H., DO CAMPO, M., 1993. *Caracterización geoquímica de sedimentitas del límite Precámbrico-Cámbrico en el Noroeste Argentino (Fm Puncoviscana): Consideraciones sobre su procedencia y Ambiente Tectónico.* Actas XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 1993. I: 300-309.

(16). AZCURRA, M., 2001. *Geología, petrología y geoquímica de la Sierra de La Aguada, Departamento Chacabuco, Provincia de San Luis, República Argentina.* Tesis de Licenciatura. Inédito.