

## Caracterización del haz de neutrones de una fuente radiactiva de $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ por medio de contadores proporcionales

Characterization of the neutrons beam of a radioactive source of  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  by mean of proportional counters.

**JAIRO MESA-CHAPARRO**

Físico

M.Sc. en Física

Grupo de Investigación GIMAC

Universidad de Boyacá, Colombia

jaimesa@uniboyaca.edu.co

**DIEGO FIGUEREDO-AMAYA**

Físico

M.Sc. en Metalurgia y Ciencia de los Materiales

Grupo de Investigación GIMAC

Universidad de Boyacá, Colombia

dfigueredo@uniboyaca.edu.co

**OSCAR FABIÁN TEQUITA-VARGAS**

Físico

M.Sc. en Física

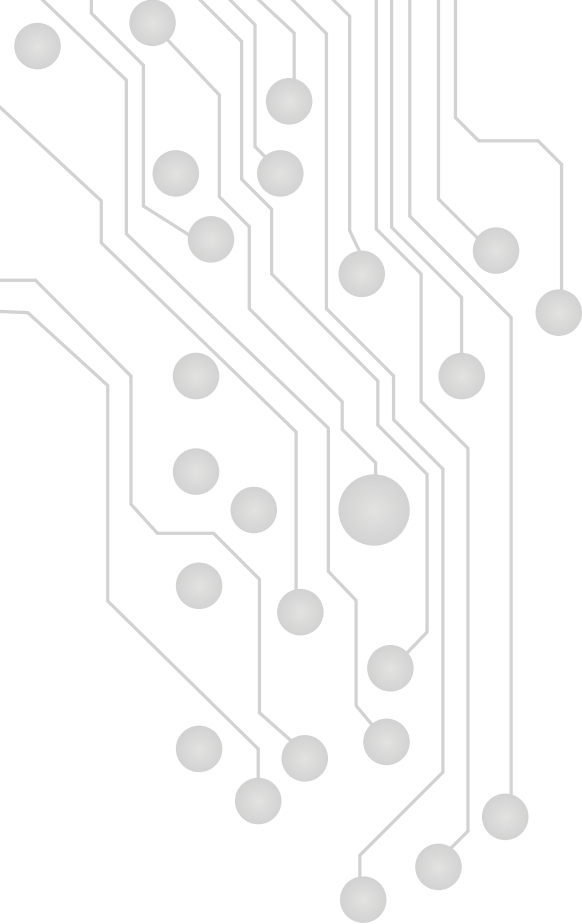
Grupo de Investigación GIMAC

Universidad de Boyacá, Colombia

oftequita@uniboyaca.edu.co

Recibido: 05/12/2018

Aceptado: 20/05/2019



## RESUMEN

En el siguiente trabajo se utilizó una fuente radiactiva de  $^{241}\text{Am-9Be}$  del laboratorio de Metrología de las radiaciones de INGEOMINAS, un cono de sombra hecho de parafina y plomo, un búnquer y un circuito cerrado de televisión. Con base en las dimensiones de la fuente radiactiva, la geometría del contenedor y la forma de salida del haz de radiación, se calculó teóricamente la tasa de dosis equivalente en el punto de calibración. De igual manera, se hicieron medidas directas con el contador proporcional despreciando la radiación dispersa y se compararon los resultados, los cuales arrojaron los parámetros físicos que caracterizan la fuente tales como: actividad, emisión neutrónica, tasa de fluencia y tasa de dosis equivalente.

**Palabras clave:**  $^{241}\text{Am-9Be}$ , Cono de Sombra, Calibración, radiación dispersa.

## ABSTRACT

For the following work, we used a radioactive source  $^{241}\text{Am-9Be}$  the INGEOMINAS' s Radiation Metrology Laboratory, a shadow cone made with paraffin and lead, a irradiation facility and a closed television circuit. Based on the size of the radioactive source, the irradiator geometry and the shape of the output radiation beam, we calculated theoretically the equivalent dose rate at the calibration point. Similarly, direct measurements were made with the proportional counter neglecting scattered radiation and comparing results, which showed the physical parameters characterizing the source such as: activity, neutron emission, flow rate and dose equivalent rate.

**Keywords:**  $^{241}\text{Am-9Be}$ , shadow cone, calibration, scattered radiation.

## INTRODUCCIÓN

El descubrimiento del neutrón ha sido de una importancia primordial para la solución al problema de las masas nucleares. La ausencia de carga eléctrica le permite no ser desviado por los campos eléctricos del núcleo o electrones, lo cual le confiere un poder de penetración muy elevado y la posibilidad de interactuar con la materia de manera distinta a la de las partículas cargadas y a la radiación electromagnética. Dadas las dimensiones ocupadas por los núcleos, estas interacciones tienen una pequeña

Mesa J., Figueredo D., & Tequita O., (2019). Caracterización del haz de neutrones de una fuente radiactiva de  $^{241}\text{Am-9Be}$  por medio de contadores proporcionales. *Revista I3+*, 4(1), 93 - 104 p.

Citar este artículo así:

probabilidad (sección eficaz) y producen, excepto casos particulares, una escasa pérdida de energía, lo que conduce a que sea necesario un gran número de colisiones para que la energía disminuya de una manera significativa, (Leon,W.R. 1994).

El siguiente trabajo tiene como fin efectuar los procedimientos de caracterización del campo de radiación de neutrones de una fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  e implementar métodos de corrección por efectos dispersivos. Dentro de los métodos de corrección por efectos dispersivos, se cuenta con el cono de sombra (CS), el cual sirve para corregir la lectura de un instrumento por efectos de dispersión debido a las interacciones con los neutrones presentes en la sala de irradiación, (Moaad, B.1996).

## METODOLOGÍA

### Conceptos Básicos

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) define tres grupos de magnitudes: las dosimétricas, operacionales y las magnitudes físicas. Las magnitudes dosimétricas definen los límites de dosis (dosis equivalente en un órgano y la dosis efectiva). Estas magnitudes se basan en la dosis equivalente en un punto de un maniquí o del cuerpo y se relacionan con el tipo y energía de la radiación en ese punto. Se pueden calcular a partir de la fluencia en dicho punto, que es la cantidad que se mide mediante los instrumentos, y los correspondientes factores de conversión de tasa de fluencia a tasa de dosis equivalente ambiental mediante la siguiente expresión:

$$H^*(10) = h_{\phi}^*(10)\phi$$

(Ec.1)

donde  $h_{\phi}^*$  es el factor de conversión de fluencia a tasa de dosis equivalente ambiental  $\dot{H}^*(10)$  el cual depende del tipo de fuente y de la energía de los neutrones, (ISO, 1989 ) y (I. A. E, 2000). y  $\phi$  es la tasa de fluencia.

Considerando su actividad y la fluencia de la fuente, la tasa de dosis equivalente específica es posible obtenerse de forma:

$$\dot{H}^*(10) = \dot{H}_E A$$

(Ec.2)

La variable  $\dot{H}_E$  (10) representa la tasa de dosis equivalente específica a 1m de distancia con un valor de  $2 \times 10^{-13} \text{ Sv.s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$  correspondiente a una fuente  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ , cuyo valor se obtiene de las normas internacionales de estandarización (ISO, 1989).

La actividad (A) de una fuente se define como el cociente entre  $dN^+$  y  $dt$ , donde  $dN^+$  es el valor esperado del número de transiciones nucleares espontáneas de un estado energético en un intervalo de tiempo:

$$A = \frac{dN^+}{dt}$$

(Ec.3)

Su emisión neutrónica (B) viene dada como:

$$B = \frac{dN^+}{dt}$$

(Ec.4)

Donde es el valor esperado del número de neutrones emitidos por una fuente en el intervalo de tiempo. Esta magnitud también puede ser determinada en función de la actividad (A) y la emisión neutrónica específica, la cual puede ser atribuida directamente de las normas internacionales de estandarización (ISO, 1989), Agencia Internacional de Energía Atómica ( I.A.E.A, 2000) dependiendo del tipo de fuente por tratar:

$$B = AB_E$$

(Ec.5)

La tasa de fluencia neutrónica específica espectral, debido a neutrones emitidos isotrópicamente por la fuente puntual con una emisión neutrónica espectral a una distancia (ignorando la influencia del material circulante), está dado por:

$$\phi_E = \frac{B}{4\pi r^2}$$

(Ec.6)

## Materiales y Métodos

Para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado una fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  perteneciente al depósito de fuentes de INGEOMINAS. Esta fuente está dentro de las recomendadas por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) para la calibración de detectores de neutrones, lo cual requiere que las magnitudes físicas que la caracterizan sean conocidas. Para llevar a cabo esta caracterización, se ha empleado un sistema de detección basado en un contador proporcional de trifluoro de boro ( $\text{BF}_3$ ), marca LUDLUM Modelo 12-4, el cual se expuso en un punto simétrico al eje del campo de radiación, obteniendo lecturas de tasa de dosis equivalente. A partir de estas lecturas se determinó la actividad de la fuente, la emisión neutrónica específica y la tasa de fluencia de neutrones de la fuente, los cuales son de suma importancia para determinar el factor de calibración de un detector por el método experimental del cono de sombra.

### Proceso de Calibración

Tanto el instrumento de referencia como la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  bajo proceso de calibración, fueron ubicados adecuadamente sobre un soporte rígido a una altura óptima de 1,50 m sobre el suelo y puestos cerca del centro de la sala. El sistema de medidas (detector) se montó sobre un soporte deslizante a lo largo de una guía que permite regular la distancia (fuente-detector) del punto de medida, el cual se sitúa a 100 cm de la fuente y a una altura de 1,50 m. El punto de referencia de la fuente fue el determinado mediante el estudio de la geometría del haz, para el cual se irradiaron películas sensibles a la componente del campo mezclado (neutrones más fotones) que producen una fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ . Las medidas han consistido en irradiar el instrumento de referencia bajo condiciones muy precisas y reproducibles y determinar a continuación un conjunto de medidas conformadas por 25 datos. El valor final de la medida y su incertidumbre para esta configuración determinada, viene dada por el valor medio y la desviación típica del conjunto de medidas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los datos obtenidos durante el proceso de medida con el instrumento de referencia se obtuvo los siguientes parámetros con sus respectivas incertidumbres estadísticas:

Tasa de dosis equivalente ambiental neutrónica, con un valor de a un metro de distancia entre el centro de la fuente y el punto de referencia del detector. A partir de este valor y utilizando la ecuación (2), se determinó experimentalmente la actividad de la fuente bajo calibración el cual tiene un valor de:

$$A = \frac{\dot{H}_e^*(10)}{2 \times 10^{-19} \text{ Sv.s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}} = (2,90 \pm 0,06) \text{ Ci} \quad (\text{Ec.7})$$

La emisión neutrónica de este tipo de fuente viene dada por la ecuación 5; y tratándose de una fuente  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  de energía promedio 4.4 MeV, la emisión neutrónica específica de la fuente ( $B_E$ ), presenta un valor de  $6.6 \times 10^{-5} \text{Bq}^{-1} \text{s}^{-1}$ . Teniendo en cuenta este factor, y la actividad de la fuente, se tiene que la emisión neutrónica de la fuente manifiesta un valor de:

$$B = 6,6 \times 10^{-5} \text{Bq}^{-1} \text{s}^{-1} \times (2,90 \pm 0,06) \text{Ci} = (7,08 \pm 0,14) \times 10^6 \text{s}^{-1}$$

Con el resultado de B y la ecuación 6, se calculó la tasa de fluencia de la fuente a distancia de  $l = 100 \text{cm}$  obteniendo un valor de:  $(56,3 \pm 1,1) \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  a la cual se efectuó su correspondiente corrección por atenuación de neutrones en aire, mediante la siguiente relación.

$$\phi = \frac{(56,3 \pm 1,1) \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}}{e^{(890 \times 10^{-7} \text{cm}^{-1} \cdot 100 \text{cm})}} = (55,8 \pm 1,1) \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

(Ec.8)

El término exponencial expresa la atenuación del haz en el aire, entre la fuente y el detector, siendo  $\Sigma l = 890 \times 10^{-7} \text{cm}^{-1}$  el coeficiente de atenuación lineal en el aire promediado sobre la distribución energética de los neutrones emitidos por la fuente.

Conociendo la actividad y la fluencia de la fuente, la tasa de dosis equivalente neutrónica se puede obtener por los siguientes mecanismos:

Ecuaciones (1), donde  $h_o^* = 391 \mu\text{Svcm}^2$ , es el factor de conversión de fluencia a tasa de dosis equivalente ambiental y  $\phi$  es la tasa de fluencia determinada por la ecuación (3). El valor de  $\dot{H}^*(10)$  es de  $(79,5 \pm 2,0) \mu\text{Sv/h}$ . Empleando la expresión (2), donde  $\dot{H}_{E_s}^*(10)$  es la tasa de dosis equivalente específica a 1 m de distancia con un valor de  $2 \times 10^{-19} \text{Sv.s}^{-1} \text{Bq}^{-1}$  para una fuente de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  de energía promedio de 4.4 MeV, (ISO, 1999). Este valor corresponde a:  $\dot{H}^*(10) = (77,8 \pm 0,2) \mu\text{Sv}$ .

Una vez establecidas las magnitudes físicas que caracterizan nuestra fuente; hemos utilizado el método del cono de sombra para determinar el factor de calibración de un detector de neutrones rápidos del tipo contador proporcional  $^3\text{He}$  NK7 NRM.

El proceso consistió en irradiar el instrumento interponiendo, entre la fuente y el detector, un cono constituido por una parte de hierro y otro de parafina diseñado para que tenga una transmisión neutrónica despreciable; dando de esta forma una estimación de los neutrones dispersos y la diferencia entre la medida con ( ) y sin ( ) el cono corresponden a la radiación directa emitida por la fuente (ver figura 1).

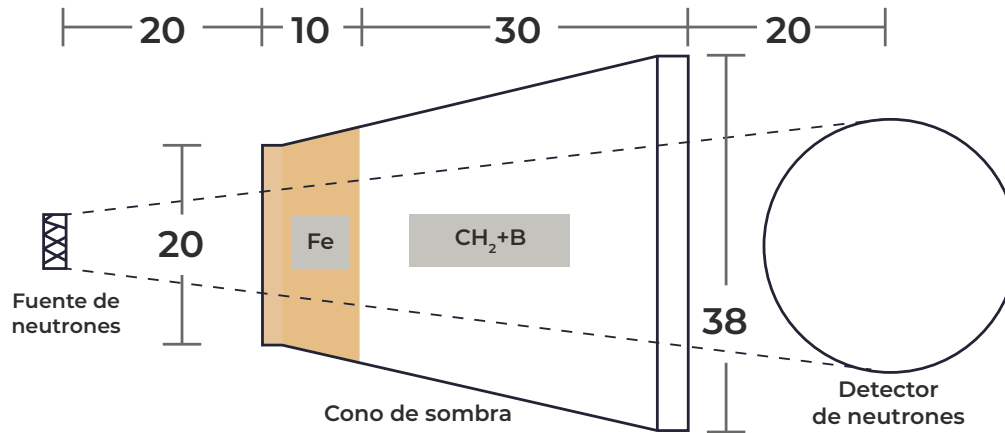


Figura 1: Montaje para la calibración de detectores de área, empleando el método del cono de sombra.

La calibración se puede realizar midiendo  $M_r(l)$  y  $M_s(l)$  a distancias  $l$  empleada por el método, (Simón, S, 2003). Estos conjuntos de datos deben cumplir con el comportamiento gráfico de una función que varía con el inverso del cuadrado de la variable independiente, la cual está dada como:

$$\left[ \frac{M_r(l) - M_s(l)}{F_L} \right] F_A(l) = \frac{k}{l^2} = X$$

(Ec. 9).

La variable  $l$  representa la distancia entre el centro de la fuente y el punto de referencia,  $k$  es la constante característica del ensamble fuente detector,  $F_L$  corresponde al factor de corrección por neutrones en aire en el camino directo entre fuente y detector la cual está representado por:  $F_L = 1 - \frac{1}{l}$ , donde  $l$  representa la corrección por linealidad, que corrige cualquier desviación de linealidad entre la lectura del instrumento y la tasa de dosis equivalente la cual se obtiene empleando la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Esto es  $F_L = \frac{l^2 - 1}{l^2}$ , donde  $l$  es la distancia a 1 m de la fuente, a la cual reportan los laboratorios de calibración la tasa de dosis equivalente ambiental específica,  $M_r$  y  $M_s$  son las distancias a las cuales se calcula las respectivas tasas de dosis equivalentes ambientales.

$l(cm)$	$80\pm 0.1$	$90\pm 0.1$	$100\pm 0.1$	$110\pm 0.1$	$120\pm 0.1$
$R_L(mrem.h^{-1})$	$5,4\pm 0,6$	$4,4\pm 0,6$	$3,5\pm 0,6$	$2,9\pm 0,6$	$2,4\pm 0,6$
$H'_L(10)(mrem/h)$	8,67	6,85	5,55	4,59	3,85

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1: Resultados obtenidos para la determinación del factor de linealidad de un detector de neutrones NK7.

Es la respuesta del detector expuesto al campo de radiación de neutrones y es la tasa de dosis aplicada a las diferentes distancias. En la figura 2 se presentan los resultados gráficos del cual se derivan los resultados estadísticos para determinar el factor de corrección por linealidad.

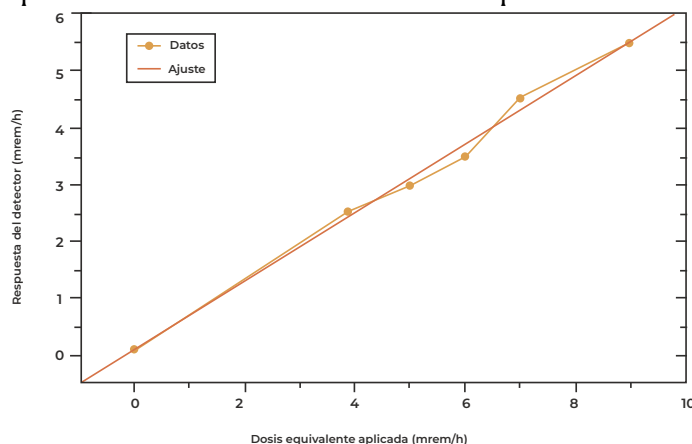


Figura 2: Respuesta del detector de neutrones NK7 NRM bajo calibración, en función de la tasa de dosis equivalente. Datos ajustados por mínimos cuadrados.

Tabla 2: Resultados estadísticos obtenidos para la determinación del factor de linealidad del detector NK7 NRM

En la figura 2 y los parámetros estadísticos se observan los resultados experimentales con el correspondiente ajuste lineal por mínimos cuadrados de los mismos. Teniendo en cuenta que el ajuste de curvas por mínimos cuadrados un valor de correlación ( ) aproximadamente igual a 1 significa que los puntos del ajuste esta sobre la curva ideal; se concluye que el detector bajo calibración responde



linealmente al proceso de detección de neutrones en el rango de calibración. En estas circunstancias, el factor de corrección por linealidad para nuestro detector bajo calibración es de 0,99. En la siguiente tabla 3 se presentan los valores del factor por atenuación de neutrones en aire emitidos por la fuente de  $^{241}\text{Am-9Be}$  con energía promedio de 4,4 MeV.

$l(\text{cm})$	80	90	100	110	120
$F_s(l, E)$	1,007	1,008	1,009	1,010	1,011

Tabla 3: factores de corrección por atenuación de neutrones en aire en el camino directo entre fuente y detector dentro de las distancias de calibración para el detector NK7 NRM.

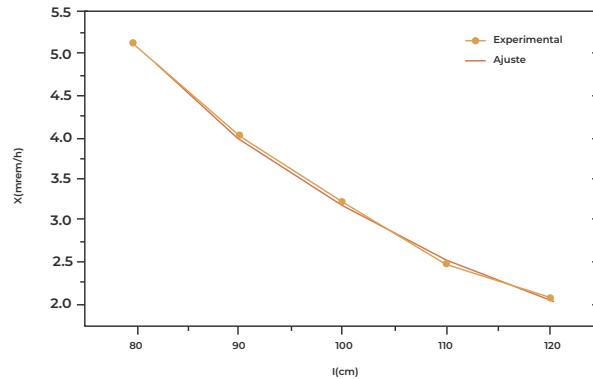
Los valores de la constante de acoplamiento fuente detector, son de suma importancia en el proceso de calibración de detectores de neutrones de área por el método del cono de sombra. Estos valores provienen de las lecturas y correspondientes a la registradas por el detector bajo calibración con y sin el cono de sombra, entre las distancias fuente detector recomendadas por este método. La expresión funcional que permite obtener dichos valores corresponde al lado izquierdo de la ecuación 9 del modelo matemático de calibración del cono de sombra corregida por linealidad y por atenuación de neutrones por el aire en el flujo directo entre la fuente y el detector, (Simón, S, 2003). Dichos valores están resumidos en la tabla 4.

$l(\text{cm})$	$80 \pm 0,1$	$90 \pm 0,1$	$100 \pm 0,1$	$110 \pm 0,1$	$120 \pm 0,1$
$M_T (\text{mrem} \cdot \text{h}^{-1})$	$5,4 \pm 0,6$	$4,4 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,6$	$2,4 \pm 0,6$
$M_S (\text{mrem} \cdot \text{h}^{-1})$	$0,3 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$
$X (\text{mrem} \cdot \text{h}^{-1})$	$5,1 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,5$
$k (\text{mrem} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}) \times 10^4$	$3,3 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,6$	$3,1 \pm 0,7$

Tabla 4: resumen de los valores hallados por la ecuación 9 y valores de constante de acoplamiento fuente detector.

Una representación gráfica de la variable en función de muestra que el conjunto de datos experimentales pertenecen a una relación funcional correspondiente al modelo de la ecuación 9 correspondiente al método del cono de sombra.

Esta representación está dada por la figura 3 donde los conjuntos de valores arbitrarios se ajustaron por mínimos cuadrados ponderados comprobando que estos datos experimentales del método del cono de sombra se comportan según la ley del inverso al cuadrado de la distancia.



Grafica 3: verificación gráfica del comportamiento según la ley del inverso al cuadrado de las distancias, con valores experimentales hallados mediante el método de calibración del cono de sombra.

Hallando un valor promedio de la constante para las 5 distancias, y empleando la siguiente relación se obtiene:

$$R_{\phi} = \frac{4\pi k}{B} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde es la respuesta a fluencia, y B la emisión neutrónica específica de la fuente con un valor de  $(7.08 \pm 0.14) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ . Con un valor promediado de  $(3.18 \pm 0.51) \text{ mrem.h}^{-1} \text{ cm}^2$  de la constante y la ecuación 10 se tiene que la respuesta para el detector de neutrones NK7 es de:

La respuesta a dosis equivalente ambiental se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$R_{II} = \frac{R_{\phi}}{h^*(10)} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde corresponde al valor del factor de conversión de fluencia a dosis equivalente, de  $391 \text{ pSv.cm}^2$  o  $3.91 \times 10^{-5} \text{ mrem.cm}^2$ . Este valor corresponde a:

De estos resultados se puede concluir que el factor de calibración de detector Nk7 bajo prueba de calibración es:

$$N = \frac{1}{R_H} = 2,57 \pm 0,17$$

(Ec. 12).

Factor por el cual todas las lecturas tomadas por este detector deben ser multiplicados.

## CONCLUSIONES

Se logró caracterizar un campo de radiación mixto de una fuente de  $^{241}\text{Am-Be}$  del LSCD de INGEOMINAS permitiendo obtener factores de calibración más representativos de la situación real y evaluar la dosis con menor error. De esta forma fue posible determinar la actividad de la fuente, mediante el cociente entre la tasa de dosis equivalente ambiental neutrónica y la conversión de actividad contenida en tasa de referencia de dosis equivalente específica por unidad de actividad para este tipo de fuente.

En el proceso de calibración de detectores de neutrones en especial con fuentes de  $^{241}\text{Am-Be}$ , las lecturas obtenidas por los detectores en el mayor de los casos presentan incertidumbres, producto de los efectos dispersivos de neutrones en paredes y elementos de la sala de irradiación, lo cual fue necesario implementar el método del cono de sombra como método alternativo para discriminar lecturas, producto de la dispersión. De esta manera se comprobó mediante calibración de un detector de neutrones rápido, que el método del cono de sombra es más general, no tiene restricciones en cuanto al tipo de detector bajo calibración y el muestreo y análisis de datos es sencillo.

## Bibliografía

International Atomic Energy Agency. (1985). Californium-252 in Teaching and Research. California : Technical Reports Series 252.

International Atomic Energy Agency. (2000). Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. California: Safety Reports serial 16.

International Organization for Standardization (ISO). (1989). Neutron Reference Radiations for Calibrating Neutron- Measuring Devices Used for Radiation Protection Purposes and for Determining Their Response as a Function of Neutron Energy. California: International Standard 8529, Part 1 first Edition.

- ISO. (1999). Calibration Fundamentals of Radiation Protection Devices Related to the Basic Quantities. Characterizing the Radiation Field. California : International Standard 8529, parte II First edition.
- Knoll, G. (1985). Radiation Detection and Measurement. New York: Jhon Wiley and Sons.
- Leon, W. (1994). Techniques for Nuclear and Particle Experiments. Berlin Heidelberg: Springer-verlag.
- Moad, B. (s.f.). Espectrometría Neutrónica de las Centrales Nucleares Mediante un Sistema de Esferas de Bornner . Tesis Doctoral. Universidad Autònoma , Barcelona .
- Simòn, S. (2003). Calibración de detectores y haces de Neutrones para su aplicación en Vigilancia Radiológica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.