

Estimación de la incertidumbre en la determinación de lantano en suelos mediante análisis por activación neutrónica instrumental en el reactor nuclear IAN-R1

Uncertainty estimation in the determination of lanthanum in soils by instrumental neutron activation analysis at the nuclear reactor IAN-R1

Diana Carolina Herrera^{1,a)}, David Leonardo Alonso², Oscar Alberto Sierra^{2,3}, Jimmy Alejandro Muñoz², Mary Luz Peña^{2,3}

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 8, 2026

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 1 de septiembre de 2026

Publicado en línea: 10 de octubre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.8.2026.762>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: D. C. Herrera, D. L. Alonso, O. A. Sierra, J. A. Muñoz, y M. L. Peña, «Estimación de la incertidumbre en la determinación de lantano en suelos mediante análisis por activación neutrónica instrumental en el reactor nuclear IAN-R1», *rev. investig. apl. nucl.*, n.º 8, oct. 2026.

Resumen

En este estudio se presentan las actividades realizadas para estimar la incertidumbre asociada a la determinación de la fracción de masa de lantano (La) en matrices de suelo, cuantificada a través de la técnica de análisis por activación neutrónica instrumental (AANI) utilizando el reactor nuclear de investigación IAN-R1. El procedimiento consistió en establecer el mensurando, identificar y cuantificar las fuentes de incertidumbre significativas en cada una de las etapas: 1) preparación de muestras, 2) irradiación de muestras y 3) medición de radiación gamma. La estimación se realizó para dos muestras con tiempos de decaimiento de 7 y 12 días. Los valores de incertidumbre expandida en términos de porcentaje (U) fueron de 3,6 % y 4,4 %, con una probabilidad de cobertura aproximada del 95 % con $k = 2$. Este estudio constituye un avance importante, ya que demuestra la competencia metrológica del laboratorio en el análisis multielemental y, en particular, para la determinación de La en muestras sólidas de origen geológico.

Palabras clave: Activación Neutrónica, Método del comparador, Incertidumbre en la medida, Lantano.

¹ Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá D.C. Colombia

² Grupo de Investigación en Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano, Carrera 50 No 26-20, Bogotá D.C. Colombia

³ Dirección Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano, Laboratorio de Análisis por Activación Neutrónica, Carrera 50

^a Autor para correspondencia: diana.herrera@unad.edu.co

Abstract

This study presents the activities carried out to estimate the uncertainty associated with the determination of the lanthanum (La) mass fraction in soil matrices, by the instrumental neutron activation analysis (INAA) technique at the neutron activation analysis laboratory, employing the IAN-R1 research nuclear reactor. The uncertainty estimation procedure involved defining the measurand, identifying, and quantifying the significant sources of uncertainty at each stage: (1) sample preparation, (2) sample irradiation, and (3) gamma-ray spectrometry measurement. The estimation was performed for two samples with decay times of 7 and 12 days. The expanded uncertainty values, expressed as percentages (U), were 3.6 % and 4.4 %, with a 95 % confidence level ($k = 2$). This work represents a significant step forward, as it demonstrates the laboratory's metrological competence in multielement analysis and, in particular, in the determination of *La* in solid geological samples.

Keywords: Neutron Activation, Comparator method, Measurement uncertainty, Lanthanum.

Introducción

Para la determinación de elementos de tierras raras en suelos, el método relativo de análisis por activación neutrónica instrumental (AANI) se posiciona como una de las técnicas más robustas, destacando por su precisión, exactitud y bajos límites de detección [1–4]. Este método se basa en la irradiación simultánea de las muestras de interés junto con patrones debidamente validados. Dado que para la irradiación de las muestras se requiere un flujo neutrónico mínimo de $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, el procedimiento se debe realizar en un reactor nuclear.

El fundamento del AANI se basa en la transformación nuclear de los isótopos estables de la matriz durante su irradiación, principalmente por captura neutrónica (n, γ) de los isótopos estables presentes en la muestra durante la irradiación. Para que este proceso sea aplicable en el AANI, el producto resultante debe ser un radionucleido cuyo decaimiento involucre la emisión de radiación gamma cuantificable. Dado que la energía de los fotones emitidos es característica para cada radioisótopo, se facilita su identificación; simultáneamente la intensidad de la radiación gamma resulta directamente proporcional a la concentración del elemento químico de interés. Así, el análisis de estos espectros mediante detectores semiconductores especializados permite una caracterización elemental precisa de las muestras. Aunque la preparación de muestras geológicas en AANI es exclusivamente física, exige un riguroso control de calidad. Esto previene la contaminación cruzada por abrasión

del instrumental (Fe, Cr, Co, W) y la pérdida térmica de analitos volátiles (Hg, As, Se), garantizando la exactitud analítica.

Controlando los riesgos asociados a la fase de preparación de muestras, el AANI se consolida como una técnica para el análisis de elementos menores y traza en diversas matrices que requieren alta precisión y exactitud [2, 4]. Particularmente, el potencial de esta técnica para la determinación de elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) en muestras geológicas ha sido ampliamente demostrado en la literatura científica [4–6]. La aplicación del método ha permitido estudiar los procesos de fraccionamiento químico en sistemas geológicos y comprender la evolución de los ciclos sedimentarios [7, 8].

Más allá de las matrices geológicas, el AANI se posiciona actualmente como una herramienta clave para rastrear la movilidad de las tierras raras hacia matrices biológicas complejas. Su capacidad para realizar análisis multielementales a nivel de traza, eludiendo los procesos de digestión química y los consecuentes efectos de matriz, hace de este método la opción para caracterizar perfiles elementales y evaluar la transferencia de estos analitos desde el sustrato geológico hacia el medioambiente [9].

Por otra parte, la determinación de la concentración de elementos de tierras raras, como el Lantano (*La*) en suelos, es de gran importancia debido a su potencial efecto contaminante. Estos elementos pueden ser absorbidos por las plantas alimenticias y, al ingresar en la cadena alimentaria, representar un riesgo para la salud humana. En particular, se ha reportado el deterioro de la función hepática asociado

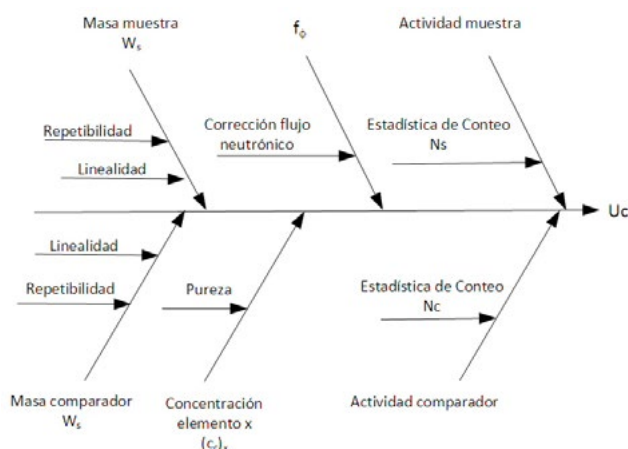
al consumo de alimentos con altas concentraciones de tierras raras [9].

Por ello, establecer un método analítico validado para la determinación de estos elementos en matrices de suelo en Colombia es esencial para la vigilancia ambiental y la prevención de efectos adversos en la salud pública. En este contexto, la validación de la técnica exige el desarrollo de un procedimiento estructurado para la estimación de la incertidumbre de medición. Este parámetro metrológico no solo cuantifica la dispersión de los valores atribuibles al analito, sino que delimita el intervalo de confianza necesario para garantizar la trazabilidad de los resultados; esto permite que los datos obtenidos sean comparables internacionalmente, consolida la calidad del método desarrollado y, cuantifica la calidad de la medida.

En este estudio se presenta el procedimiento que se sigue en el laboratorio de análisis por activación neutrónica (LAAN) para la estimación de la incertidumbre en la medición multielemental de fracción de masa, expresadas en mg/kg, en matrices sólidas de origen geológico. En particular, se aborda la evaluación de la incertidumbre asociada a la medida de fracción de masa de *La*. En el LAAN, las muestras son irradiadas en el reactor nuclear de investigación IAN-R1, el cual, al igual que el laboratorio, es adjunto a la Dirección de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano.

La estimación de la incertidumbre se realizó siguiendo las etapas recomendadas en las Guías de referencia [10, 11]. Primero se estableció el mensurando y se determinó su relación con las magnitudes de entrada. A continuación, las fuentes de incertidumbre asociadas a cada etapa del proceso: 1) preparación de muestras, 2) irradiación de muestras y 3) medición de radiación gamma; se estructuraron en un diagrama de causa-efecto (espina de pescado) ilustrado en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de causa-efecto (espina de pescado) para la identificación y clasificación de las fuentes de incertidumbre en la determinación de lantano (*La*) mediante AANI.



Una vez identificados estos aportes en el diagrama, las fuentes individuales se clasificaron según su naturaleza estadística en componentes de Tipo A o Tipo B. Luego de cuantificar cada componente, se procedió con la propagación analítica para calcular la incertidumbre combinada y, finalmente, determinar la incertidumbre expandida utilizando una probabilidad de cobertura aproximada del 95 %, con $k=2$.

Este estudio se desarrolló en el marco del proceso de validación del método, donde se evaluaron los diferentes parámetros de desempeño como: selectividad, linealidad, reproducibilidad, límite de detección y cuantificación, robustez y la cuantificación de la incertidumbre. Como resultado de este proceso, el LAAN obtuvo la acreditación del método para la determinación de los elementos: Al, As, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Mn, Na, Nd, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, Ti, U, V, Yb, Zn, Zr.

1. Definición del mensurando

El mensurando es la fracción de masa de *La*, en materiales de suelo utilizando la técnica de AANI mediante el método del comparador. Como se indicó previamente el AANI es una técnica de análisis químico multielemental que envuelve dos procesos físicos independientes: excitación nuclear y medida de la radiación inducida [1].

En el método del comparador se irradian simultáneamente una muestra con fracción de masa conocida de los elementos de interés (comparador o estándar), el cual está certificado o validado; y una muestra de la cual no se conoce

su composición. La relación entre la fracción de masa del elemento x y las cantidades de influencia está dada por [1]:

$$c_{s,x} = c_{c,x} \frac{\left(\frac{N}{t_m DCW}\right)_s}{\left(\frac{N}{t_m DCW}\right)_c} f_\phi \quad (1)$$

Donde, los subíndices s y c indican parámetros para la muestra desconocida y el comparador (estándar). Siendo $c_{s,x}$, la fracción de masa de la muestra desconocida del elemento x (mensurando) y $c_{c,x}$ la fracción de masa del elemento x en el material de referencia. Para este estudio el subíndice x es el analito La . Por otra parte, N es el número de cuentas netas a la energía de interés (1596,2 keV) en el espectro de emisión γ . Esta energía corresponde a la línea de emisión gamma principal del radionucleido ^{140}La generado tras la captura neutrónica. Aunque el ^{140}La posee otros picos de desintegración prominentes (tales como 328,8 keV y 487,0 keV), la cuantificación se basó en la línea de 1596,2 keV. Esta elección se fundamenta en su alta probabilidad de emisión absoluta y a que al encontrarse en una región de alta energía se reduce significativamente el fondo, encontrándose libre de interferencias por solapamiento con otros radionucleidos presentes en la matriz de suelo.

El tiempo de conteo de la radiación gamma t_m , D ($D = e^{-\lambda t_d}$) y C ($C = (1 - e^{-\lambda t_m}) / \lambda t_m$) son factores de corrección por decaimiento y conteo; W es la masa total de la muestra. Finalmente f_ϕ , representa el factor de corrección de flujo neutrónico, que cuantifica el gradiente del flujo neutrónico entre la posición de irradiación de la muestra y del comparador.

El factor de corrección del flujo neutrónico se determina como el cociente entre el flujo neutrónico medido con monitores de Al+0,1 %Au (láminas de masa de 5 mg, que se mantiene constante para todos los experimentos) en la posición de la muestra y la posición del comparador. El flujo neutrónico es proporcional al número de cuentas en la energía de 411 keV del ^{198}Au , y depende de otros factores como la sección de eficaz de captura neutrónica, abundancia isotópica, tiempo de irradiación, el período de semidesintegración del ^{140}La , así como la eficiencia de detección, y la estadística de conteo a la energía de emisión del radionucleido de interés.

Empleando el método del comparador y tomando la relación entre los dos flujos, se cancelan todos los términos excepto el número de cuentas registradas para el monitor

ubicado en la posición de la muestra $N_{m,s}$ y para el monitor ubicado en la posición del comparador $N_{m,c}$, obteniendo:

$$f_\phi = \frac{\phi_s}{\phi_c} = \frac{N_{m,s}}{N_{m,c}} \quad (2)$$

Esta relación se cumple, asumiendo que las condiciones de irradiación y geometría de conteo de la radiación gamma de las láminas Al+0,1 %Au son similares.

2. Procedimiento experimental

Como se indicó anteriormente, la metodología en el LAAN comprende tres etapas fundamentales: 1) preparación de la muestra, 2) irradiación y 3) espectrometría gamma. Para la fase de irradiación, las muestras son sometidas al flujo neutrónico del Reactor Nuclear de Investigación IAN-R1 [12], operando bajo los parámetros experimentales descritos en la Tabla 1.

2.1 Descripción

El diseño experimental contempló dos mediciones de espectrometría gamma: la primera a los 7 días, enfocada en los radioisótopos de periodo corto, y la segunda a los 12 días, para los de periodo largo. Específicamente, para el caso de ^{140}La , cuyo periodo de semidesintegración es de 1,7 días, el conteo óptimo corresponde al séptimo día. No obstante, en este trabajo se reportan los resultados de ambas mediciones con fines de comparación y validación.

Para el análisis se seleccionó una masa de 1 g. Esta cantidad cumple con el requerimiento mínimo exigido por ambos materiales de referencia (>250 mg) [14, 15] y garantiza la estadística de conteo suficiente para la medición de los radioisótopos de periodo de semidesintegración largo, sin efectos significativos de autoblandaje.

Tabla 1. Parámetros experimentales y metodología para la determinación de la incertidumbre de la fracción de masa de La en materiales de suelo.

Característica	Valor/Descripción
Técnica	AANI, comparador
Mensurando	Fracción masa La
Masa muestra y comparador	$\approx 1,000$ g
Potencia Reactor IAN-R1	20 kW
Flujo de Neutrones	$\approx 10^{11}$ n cm ⁻² s ⁻¹
Tiempo de Irradiación	4 horas
Monitor Flujo Neutrónico	Al+0,1 %Au ~ 5 mg

Característica	Valor/Descripción
Tiempo de decaimiento	7 y 12 días
Tiempo de lectura muestras	10.800 s
Energía	1596,2 keV

2.2 Preparación de muestras

En la preparación de muestras, el material se homogeniza inicialmente mediante la agitación del frasco contenedor. Dado que los valores de concentración deben reportarse en peso seco, el material se somete a un proceso de secado a 105°C durante cuatro horas. Posteriormente, se traslada a un desecador hasta que alcanza la temperatura ambiente. Luego se procede a pesar y a encapsular en recipientes de polietileno, de tal forma que queden herméticamente sellados. Los viales se distribuyen en una gradilla de polietileno de 20 posiciones. Para garantizar la estanqueidad durante el proceso, el arreglo se envasa al vacío en bolsas plásticas, procediendo luego a su inmersión e irradiación en el Reactor Nuclear IAN-R1. Se analizaron dos réplicas del material de referencia de suelo NIST 2711a (Montana Soil II) [13], utilizando como comparador el NIST 2709a (San Joaquin Soil) [14]. La medición se efectuó utilizando cuatro (4) posiciones de la gradilla: las posiciones 2 y 12 para la primera réplica (muestra-comparador) y las posiciones 3 y 13 para la segunda réplica (comparador-muestra), lo que se puede ver en la Figura 2.

2.3 Irradiación

Con el fin de favorecer las reacciones de captura neutrónica (n, γ), la gradilla con las muestras, patrones y monitores fue ubicada frente al núcleo del reactor nuclear, posición que garantiza mayor uniformidad espacial y la exposición a un flujo neutrónico escalar predominantemente térmico. Los parámetros de operación de irradiación en el reactor nuclear, como la potencia, el valor estimado del flujo neutrónico, así como el tiempo de irradiación de las muestras, se presentan en la Tabla 1.

2.4 Medición de radiación Gamma

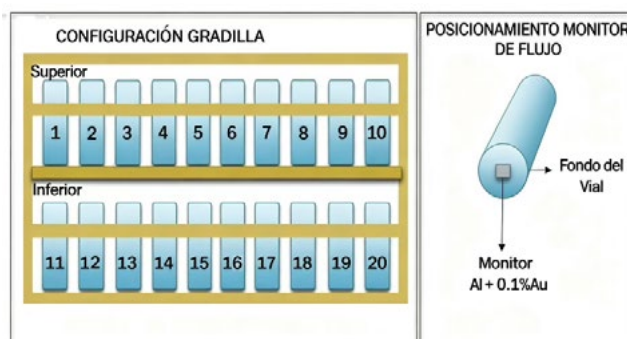
La medición de radiación gamma se realizó utilizando un detector de germanio hiperpuro (HPGe) modelo GC7020, con eficiencia relativa del 70 % a 1,33 MeV (^{60}Co a 25 cm de distancia de la cara del detector) y una resolución en energía de 2,0 keV (FWHM) [16], el cual fue controlado a través del *software* Genie-2000 (Mirion Technologies) configurado

mediante el algoritmo de sumatoria del área integral para el ajuste de picos. La medición de radiación gamma de las muestras se realizó para tiempos de decaimiento de 7 y 12 días (ver Tabla 1).

Las muestras y patrones se midieron en los mismos envases de polietileno utilizados durante la irradiación. Al posicionar los viales a la distancia muestra-detector de 15 mm, se asegura la maximización del ángulo sólido y de la eficiencia. Esto conduce a una estadística de conteo óptima para la mayoría de los elementos de interés, particularmente aquellos con periodos de semidesintegración cortos y bajos niveles de radiación. Asimismo, se evaluó la reproducibilidad del posicionamiento mediante la medición de 10 muestras durante 10 minutos cada una, colocadas por el mismo operador; el coeficiente de variación del número de cuentas obtenido fue inferior al 3 %. Para validar este procedimiento y descartar contaminación proveniente de los envases de polietileno, se irradiaron y analizaron simultáneamente blancos (recipientes vacíos). El análisis de los espectros de los blancos permitió confirmar que la concentración del elemento de interés se encontraba por debajo del límite de detección.

Los monitores de flujo también son analizados mediante espectrometría gamma, empleando un tiempo de conteo de 30 minutos y ubicándolos a una distancia detector-monitor de 50 mm. Esta configuración, aumenta la distancia detector-monitor, respecto a la usada para las muestras, lo que reduce la probabilidad de coincidencias aleatorias (*pile-up*) que puedan afectar la precisión en la medición del flujo neutrónico.

Figura 2. (Izquierda) Configuración de muestras en una gradilla tipo para el proceso de irradiación en el reactor nuclear de investigación IAN-R1. (Derecha) Disposición típica de los monitores de flujo neutrónico en los viales donde se contienen las muestras de suelo.



2.5 Identificación de fuentes de incertidumbre

Para la identificación y cuantificación de las fuentes de incertidumbre, se tomaron como referencia investigaciones independientes desarrolladas por otros autores [17, 18]. Como paso previo a la cuantificación, se elaboró un presupuesto de incertidumbre que abarca las etapas del análisis y las fuentes de incertidumbre presentes en cada una, tal como se ilustra en la Figura 1. Una vez establecido este presupuesto, se clasificó el tipo de componente para determinar si requería una evaluación de tipo A o de tipo B. La evaluación de tipo A se aplicó cuando la magnitud de entrada se obtuvo a partir de mediciones repetidas o del ajuste de datos experimentales mediante el método de mínimos cuadrados. La evaluación de tipo B se empleó cuando la información provenía de fuentes externas al proceso de medición, tales como certificados de calibración con trazabilidad metrológica al Sistema Internacional de Unidades (SI) o a patrones internacionales, así como certificados de materiales de referencia [10, 11].

Con el propósito de evaluar la incertidumbre estándar por componente, se asignó una distribución de probabilidad específica a cada una de las variables de entrada. Para

la evaluación de tipo A, la distribución de probabilidad se determinó a partir del análisis empírico de las mediciones; mientras que para la evaluación de tipo B, dicha distribución se asumió a priori tomando como base la literatura y los estudios de referencia.

A partir de la distribución de probabilidad, se determinó el factor (F), el cual relaciona la desviación estándar σ_s con la incertidumbre estándar u_s del valor promedio de cada componente de la incertidumbre:

$$u_s = F\sigma_s \quad (3)$$

2.6 Cálculo de incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre estándar combinada se determinó mediante la propagación de incertidumbre de la ecuación del modelo matemático (Ecuación 1). Debido a que este modelo para la determinación de la fracción de masa en el AANI relaciona las cantidades de entrada mediante multiplicaciones y divisiones (Ecuación 1), la incertidumbre combinada absoluta se calcula multiplicando el valor de la concentración de La determinada para la muestra por la raíz cuadrada de la suma de las incertidumbres relativas [10, 11]:

$$u(c_{La,s}) = c_{La,s} \sqrt{\left(\frac{u_{ia,R}^2 + u_{ia,L}^2}{W_s}\right)^2 + \left(\frac{u_{ib,R}^2 + u_{ib,L}^2}{W_c}\right)^2 + \left(\frac{u_{ic,P}}{c_{c,x}}\right)^2 + \left(\frac{u_{30,f}(NAu)}{N(Au)_s}\right)^2 + \left(\frac{u_{30,f}(NAu)}{N(Au)_C}\right)^2 + \left(\frac{u_{30,Ns}}{N_s}\right)^2 + \left(\frac{u_{30,Nc}}{N_c}\right)^2 + \left(\frac{u_{30,Ns}}{N_s}\right)^2} \quad (4)$$

Esta relación es válida cuando las cantidades de influencia no están correlacionadas entre sí. De esta manera, al sustituir los valores de las magnitudes de entrada y las incertidumbres estándar asociadas a cada componente (Ecuación 4), se obtiene la incertidumbre combinada para la fracción de masa de La . Finalmente, la incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura, k :

$$U = k u_c \quad (5)$$

Para un nivel de confianza del 95 %, se utiliza el valor $k = 1,98 \approx 2$.

3. Resultados y discusión

3.1 Identificación y cuantificación de las fuentes de incertidumbre

La identificación de las magnitudes de influencia se fundamentó tanto en el modelo matemático (Ecuación 1) como

en la información técnica reportada en la literatura por otros autores [18, 19]. A continuación, se presenta el análisis de las fuentes de incertidumbre correspondientes a cada etapa del procedimiento, así como el método empleado para la cuantificación de cada uno de los componentes de incertidumbre considerados en este trabajo. Las magnitudes de influencia evaluadas se resumen en el diagrama causa-efecto mostrado en la Figura 1.

La información resumida de los resultados de la incertidumbre para cada componente se presenta en la Tabla 2, en la cual se especifica: el tipo de evaluación (A o B) correspondiente a cada cantidad de influencia, la distribución de probabilidad asociada, el factor de multiplicación F , la incertidumbre estándar, y la incertidumbre relativa ($u_{r,i} = u_i / X_i$), expresada en porcentaje.

Etapas 1: Preparación de muestras

Para esta etapa, las magnitudes de influencia relevantes fueron la medición de la masa de la muestra y del compara-

dor, así como la fracción de masa de la masa patrón. Otras magnitudes que pueden afectar esta etapa son las variaciones de masa asociadas a las condiciones ambientales. Por un lado, la humedad relativa influye directamente debido a que los materiales pueden adsorber humedad del ambiente (aumentando su masa aparente) o perderla por evaporación, lo que hace indispensable un proceso de secado previo para alcanzar una masa constante y estable. Por otro lado, las diferencias de temperatura entre la muestra y el interior de la balanza generan corrientes de convección y variaciones en el empuje del aire, desestabilizando la lectura. Para minimizar estos efectos, las muestras se sometieron a un secado previo, seguido de un periodo de aclimatación en un desecador para alcanzar el equilibrio térmico, y todas las mediciones se realizaron en una sala con control de temperatura y humedad relativa. Por otra parte, aunque las variaciones en la abundancia isotópica de las muestras pueden afectar teóricamente su densidad o masa molar, este componente de incertidumbre fue evaluado por otros autores y considerado despreciable [1, 18, 17], por lo que no se tuvo en cuenta en el presente estudio.

La incertidumbre de la masa tiene dos componentes: repetibilidad y linealidad:

- *Repetibilidad*

La incertidumbre debida a la repetibilidad se determina a partir de la desviación estándar de la balanza. A este componente se le asocia una distribución rectangular [11], así la incertidumbre estándar está dada por:

$$u_{1a,R} = \frac{\sigma_R}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

- *Linealidad*

La desviación estándar asociada a la linealidad se da por parte del fabricante de la balanza. A esta contribución se le asocia una distribución rectangular, expresada de la siguiente manera [20]:

$$u_{1a,L} = \frac{\sigma_L}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

donde σ_L es la desviación estándar de la linealidad dada por el fabricante. De esta forma, la incertidumbre de la masa de la muestra está dada por la suma cuadrática de las incertidumbres asociadas a la repetibilidad y la linealidad:

$$u_{1a} = \sqrt{u_{1a,R}^2 + u_{1a,L}^2} \quad (8)$$

La incertidumbre asociada a la masa patrón referencia (u_{1b}) comprende las mismas componentes que la incertidumbre de la masa de la muestra (repetibilidad y linealidad); por lo tanto, la incertidumbre de la masa patrón está dada por:

$$u_{1b} = \sqrt{u_{1b,R}^2 + u_{1b,L}^2} \quad (9)$$

En los métodos analíticos, la pureza del material define la fracción exacta del elemento de interés presente, lo cual es fundamental para calcular su masa real. Para este análisis, la incertidumbre debida a la pureza del lantano (La) en la muestra del comparador ($u_{1c,P}$) se extrajo del certificado de expedición del Material de Referencia Certificado (MRC) [13, 14]. El valor reportado se encuentra en términos de incertidumbre expandida (U), con un factor de cobertura de $k = 2$.

La incertidumbre debida a la pureza de La en la muestra del comparador, se encuentra en el certificado de expedición del material de referencia. El valor de la incertidumbre está en términos de incertidumbre expandida (U), con un factor de cobertura de $k = 2$. Así la incertidumbre de esta componente está dada por:

$$u_{1c,P} = \frac{U_{1c,P}}{2} \quad (10)$$

Etapa 2: Irradiación

Durante el proceso de irradiación se analizaron diversas magnitudes de influencia. Aunque no todas fueron cuantificadas en el cálculo final, su exclusión se respaldó mediante una justificación cuantitativa y apoyada en la literatura de referencia. Las magnitudes analizadas incluyeron: efectos de autoabsorción y dispersión neutrónica; la incertidumbre en el tiempo de irradiación; así como variaciones temporales y espaciales del flujo neutrónico. A continuación, se presenta el análisis de cada una de ellas:

Los efectos de autoabsorción y dispersión neutrónica se consideraron despreciables debido a las propiedades físicas de la matriz analizada (1 g). Si bien las muestras (NIST 2709a [14] y NIST 2711a [13]) contienen elementos con elevadas secciones eficaces de captura neutrónica térmica (como Gd, Sm y Eu), estos se encuentran estrictamente en niveles de trazas (inferiores a 6 mg/kg). Los cálculos demuestran que, a estas concentraciones, la sección eficaz macroscópica de absorción de la geometría de prueba no genera un autoapantallamiento significativo, asegurando que la atenuación global del flujo sea inferior al 1 %.

La incertidumbre en el tiempo de irradiación se considera despreciable debido a que el periodo de exposición (4 horas) hace que los tiempos de tránsito del sistema de inserción (del orden de segundos) representen una fracción estadísticamente insignificante ($< 0,1\%$). Además, dado que los tiempos de decaimiento establecidos para las mediciones son prolongados (7 y 12 días), el análisis está enfocado en radionucleidos con periodos de semidesintegración largos; para estos isótopos, las variaciones de unos pocos segundos o minutos en la manipulación y tránsito de las muestras tienen un impacto matemáticamente nulo en los factores de saturación y decaimiento [1, 18, 17].

Por otra parte, las variaciones temporales y espaciales del flujo neutrónico durante las 4 horas de irradiación fueron mitigadas y corregidas cuantitativamente mediante la inclusión de monitores de flujo integrados en el diseño experimental. Esta evaluación es necesaria dado que las diferencias de posición provocan que la muestra de interés y el comparador no estén expuestos a un flujo neutrónico idéntico. Por lo tanto, se considera el factor de corrección $f\phi$ en la Ecuación 1 y su determinación a través de la Ecuación 2. Teniendo en cuenta la propagación de la incertidumbre para la Ecuación 2, se evaluó la incertidumbre asociada al factor de corrección de flujo, neutrónico $u_{2,f\phi}$, a partir de la siguiente relación:

$$\frac{u_{2,f\phi}}{f\phi} = \sqrt{\left(\frac{u_{2a,f}(N_{Au})}{N_s(Au)}\right)^2 + \left(\frac{u_{2b,f}(N_{Au})}{N_C(Au)}\right)^2} \quad (11)$$

donde, $u_{2a,f}(N_{Au})$ y $u_{2b,f}(N_{Au})$ son las incertidumbres estándar del número de cuentas en el pico de energía de 411 keV del ^{198}Au . Debido a que el número de cuentas es alto (> 100), se asume una distribución Gaussiana, por lo tanto, la incertidumbre se determina como la raíz cuadrada del número de cuentas [19, 21]:

$$u_{2a,b,f}(N_{La}) = \sqrt{N(La)_{a,b}} \quad (12)$$

Etapas 3: Medición de radiación gamma

En esta etapa, existen diversas contribuciones que inciden a la incertidumbre de la determinación de la fracción de masa de La en matrices de suelo. La mayoría de estas contribuciones impactan directamente la estadística de conteo de la actividad de radiación del elemento de interés, tanto en la muestra desconocida como en el comparador.

Las componentes con una contribución baja a la incertidumbre, y que por tanto no se consideran en esta etapa son: el tiempo muerto, el tiempo de decaimiento del isótopo radiactivo, el tiempo de conteo y corrección por el blanco. Cada una de estas componentes, fue analizada cuantitativamente y se determinó que su contribución a la incertidumbre es despreciable, en concordancia con lo reportado en la literatura [1, 18, 17]. A continuación, se detalla la justificación técnica para excluir estas fuentes del análisis, fundamentadas en las condiciones operativas y experimentales propias de este estudio.

Respecto a la incertidumbre debida a las coincidencias aleatorias (*pile-up*), aunque en escenarios de alta actividad pueden superar el 0,2 %, en este estudio se determinaron como despreciables. Esta exclusión se fundamenta experimentalmente en los prolongados tiempos de decaimiento establecidos (7 y 12 días), los cuales redujeron la actividad de los radionucleidos de vida corta en las muestras. En consecuencia, las tasas de conteo en el detector fueron suficientemente bajas, manteniendo un tiempo muerto inferior al 1 %, condición bajo la cual la probabilidad de apilamiento de pulsos es marginal y la corrección electrónica del espectrómetro es plenamente efectiva [1].

El efecto de auto absorción no es significativo para energías de radiación gamma superiores a 100 keV [17]. Dado que la energía utilizada para la determinación de la fracción de masa de La es de 1596,2 keV -muy por encima de dicho umbral-, este efecto no fue considerado en el presente análisis.

Por otra parte, las interferencias espectrales para el fotopico de 1596,2 keV del ^{140}La no son significativas en materiales de suelo. La evaluación analítica de la matriz, respaldada por la composición de los materiales de referencia NIST 2709a y NIST 2711a, indica que la única interferencia teórica en esta región corresponde a la emisión secundaria del ^{154}Eu , con energía de emisión de 1596,5 keV. Sin embargo, la contribución esperada de este fotopico es baja debido a que la concentración de Eu en las muestras es inferior a 1,5 mg/kg, al igual que baja la probabilidad de emisión gamma (1,8 %) y su reducida tasa de producción térmica durante la irradiación, atribuible a su prolongado periodo de semidesintegración (8,59 años). Al contrastar estas limitantes con el alto rendimiento de emisión del ^{140}La (95,4 %), se concluye que el fotopico de 1596,2 keV es espectralmente puro, descartando la necesidad de aplicar correcciones por solapamiento.

Para la determinación de lantano mediante AANI, es imperativo evaluar la interferencia originada por la fisión del uranio, dado que uno de los productos de fisión del ^{235}U es el ^{140}Ba , el cual decae a ^{140}La . Por lo tanto, la fracción de masa de La medida podría incluir un aporte aparente generado por el uranio. Para cuantificar este efecto, se emplea un factor empírico de interferencia (F), cuyo valor conservador establecido en la literatura es de aproximadamente 0,02 mg de La aparente por cada mg de U presente en la muestra [22].

Usualmente, las concentraciones de uranio natural en suelos son inferiores a 5 mg/kg. En contraste, las concentraciones de lantano son significativamente superiores; caracterizaciones detalladas de perfiles de suelos prístinos demuestran que el lantano nativo oscila consistentemente entre 17 y 35 mg/kg, dependiendo del horizonte edáfico [23]. Utilizando los valores del material de referencia certificado NIST 2709a [14] ($C_U = 3,1$ mg/kg y $C_{La} = 23,9$ mg/kg) como modelo representativo de esta asimetría de masa, la contribución aparente se demuestra al multiplicar la concentración de uranio por el factor de interferencia ($3,1$ mg/kg $\times$ 0,02), lo que genera apenas 0,062 mg/kg de lantano aparente. Al evaluar este valor respecto a la concentración real de lantano de la muestra, el cálculo porcentual:

$$\%_{\text{interferencia}} = \left(\frac{0,062}{23,9} \right) \times 100 \approx 0,26\% \quad (13)$$

Esta mínima incidencia se mantiene constante incluso en escenarios geológicos extremos. Evaluaciones recientes en perfiles de meteorización granítica con alta acumulación natural de radionucleidos [24] evidencian que, si bien el uranio puede alcanzar concentraciones medias cercanas a los 30 mg/kg, la afinidad geoquímica provoca que la concentración del lantano aumente proporcionalmente a valores superiores a los 340 mg/kg. Este análisis implica directamente que la interferencia por fisión del uranio no introduce efectos metrológicos adversos en la cuantificación, incluso para contenidos anómalamente altos de lantano (llegando a 340 mg/kg), ya que el aporte aparente se mantiene diluido y por debajo del 0,2 %. Por consiguiente, al demostrar matemáticamente que la contribución del ^{235}U es inferior al umbral crítico del 1 % para las proporciones de masa propias de estas matrices geológicas, dicha interferencia se considera metrológicamente despreciable.

Por otro lado, la estadística de conteo representa la principal fuente de incertidumbre en la etapa de medición de radiación gamma. Al igual que en el caso de la medición de la incertidumbre para el factor de corrección de flujo, esta contribución sigue una distribución Gaussiana, y está dada por la siguiente relación:

$$u_{3a,b}(N_{La})_{s,c} = \sqrt{N(La)_{s,c}} \quad (14)$$

donde $N(La)_{s,c}$, representa el número de cuentas para el pico de energía de 1596,2 keV para la fuente y el comparador, respectivamente.

Finalmente, la contribución atribuible a las diferencias en la geometría de la medición de radiación gamma para la muestra y el comparador se determinó a partir de 10 mediciones realizadas sobre una muestra de 1 g de material de referencia NIST 2711a [14]. Todas las mediciones se llevaron a cabo utilizando la misma geometría y el mismo tiempo de conteo empleado durante las medidas de las muestras y el comparador. La desviación estándar de las mediciones fue de 60 cuentas, así la incertidumbre del promedio se calcula a partir de esta desviación estándar, aplicando la relación:

$$u_{3c} = \frac{\sigma_{3c}}{\sqrt{10}} \quad (15)$$

Tabla 2. Resultados de la estimación de la incertidumbre combinada para La en materiales de suelo con la técnica de Análisis por Activación Neutrónica usando el método del comparador. Se presentan las incertidumbres relativas para cada componente analizada.

u	Variable	Componente Incertidumbre	Tipo A/B, distribución	Factor Multiplicación	Incertidumbre estándar relativa Muestra 1 $\left(\frac{u_i}{\bar{X}_i}\right)$ (%)	Incertidumbre estándar relativa Muestra 2 $\left(\frac{u_i}{\bar{X}_i}\right)$ (%)
$u_{1a,R}$	W_s	Repetibilidad masa muestra	B, Rectangular	$1/\sqrt{3}$	0,006	0,006
$u_{1a,L}$	W_s	Linealidad masa muestra	B, Rectangular	$1/\sqrt{3}$	0,012	0,012
$u_{1b,R}$	W_c	Repetibilidad masa comparador	B, Rectangular	$1/\sqrt{3}$	0,006	0,006
$u_{1b,L}$	W_c	Linealidad masa comparador	B, Rectangular	$1/\sqrt{3}$	0,012	0,012
$u_{1c,P}$	$c_{c,x}$	Pureza del comparador	B, Normal	$1/\sqrt{3}$	0,922	0,922
$u_{2a,f}$	$N(f\phi)_s$	Flujo muestra	A, Normal	1	0,945	1,096
$u_{2b,f}$	$N(f\phi)_c$	Flujo comparador	A, Normal	1	1,004	0,833
$u_{3a,Ns}$	N_s	Estadística conteo muestra	A, Normal	1	0,322	0,718
$u_{3b,Nc}$	N_c	Estadística de conteo Comparador	A, Normal	1	0,731	1,208
u_{3c}	N_s	Geometría conteo	A, Normal	$1/\sqrt{10}$	0,179	0,179
$u_c(c_{La,s})$					1,8	2,2

3.2 Incertidumbre combinada y expandida

Los resultados de la incertidumbre combinada, y la incertidumbre expandida para las muestras 1 y 2 se presentan en la Tabla 3. Para la muestra 1, la incertidumbre combinada es del 1,8 %, mientras que para la muestra 2 es del 2,2 %. Los valores de incertidumbre relativa (en porcentaje) de cada componente se presentan en la Tabla 2.

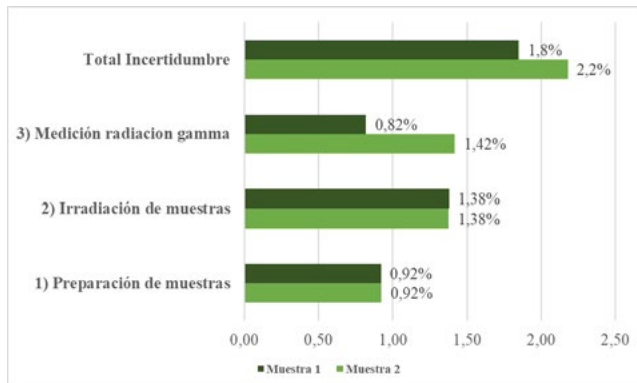
Se observó que, en la muestra 2, la contribución del componente de medición de radiación gamma es considerablemente mayor. Este comportamiento responde a un diseño experimental planificado, cuyo propósito fue evaluar de forma comparativa la influencia del tiempo de enfriamiento en el presupuesto de incertidumbre. Al prolongar el tiempo de decaimiento a 12 días, la actividad del ^{140}La disminuyó de forma predecible, reduciendo las cuentas netas bajo el fotopico y aumentando la incertidumbre asociada. Este escenario contrasta con el de la muestra 1, medida bajo el periodo habitual de 7 días. Esta variación deliberada permitió cuantificar la sensibilidad del modelo metrológico frente al decaimiento del analito, demostrando cuantitativamente cómo la postergación del conteo degrada la calidad de la medida.

Tabla 3. Fracción de masa y sus incertidumbres combinada y expandida, determinadas con un factor de cobertura $k = 2$.

Submuestras	1	2
Fracción de masa La (mg/kg)	41,6	39,0
Incertidumbre combinada absoluta (en porcentaje) mg/kg (%)	0,8 (1,8 %)	0,9 (2,2 %)
Incertidumbre expandida absoluta (en porcentaje) mg/kg (%)	2 (- 3,6 %)	2 (4,4 %)

En la Figura 3 se muestra la contribución de cada etapa a la incertidumbre combinada: 1) preparación de muestras, 2) irradiación de muestras y 3) medición de radiación gamma, considerando las componentes de incertidumbre analizadas para las muestras 1 y 2. Como se observa, la incertidumbre relativa en las dos primeras etapas es igual para ambas muestras: 0,92 % en la preparación de muestras y 1,38 % en la irradiación. En la etapa de medición de radiación gamma, la muestra 1 presenta una incertidumbre de 0,82 %, mientras que en la muestra 2 este valor es de 1,42 %.

Figura 3. Incertidumbre relativa de cada una de las etapas del método de AANI para las dos muestras analizadas.



Analizando la incertidumbre relativa en la etapa de preparación de muestras, se evidencia que el porcentaje asociado a la masa de la muestra y del comparador presenta una contribución de 0,02 % para ambas muestras; este valor representa menos del 0,1 % de la incertidumbre total, siendo consistente con estudios previos [18, 19, 26]. Por otro lado, la componente de incertidumbre debida a la pureza de la muestra es significativa, con un valor 0,92 % para las dos muestras.

Durante la etapa de irradiación de muestras, la corrección de flujo constituye el mayor aporte a la incertidumbre combinada total. Esta componente presenta una incertidumbre relativa del 1,4 %, lo que representa una contribución del 56 % y el 40 % respecto a la incertidumbre total. Cabe destacar que, en contraste con estos resultados, estudios previos en la literatura señalan que dicha contribución no suele ser significativa [1]. Este resultado se debe a que la corrección de flujo se determina a partir de la diferencia entre los flujos medidos por dos monitores, los cuales están ubicados en las posiciones de la muestra y del comparador. La medición de estos monitores se efectuó en un tiempo muy bajo, lo que resultó en una baja estadística de conteo. En este caso, los monitores fueron medidos durante 30 minutos, obteniendo un número total de cuentas del orden de 1×10^4 , lo que implica una incertidumbre del orden de 1 % para cada monitor. Si el tiempo de medición se aumentara cuatro veces, la incertidumbre de esta componente se reduciría aproximadamente a la mitad. Otra posibilidad para disminuir la incertidumbre de esta componente es realizar una caracterización total del reactor y tener un sistema de posicionamiento de alta precisión. Actualmente, se sigue con la caracterización del reactor IAN-R1 utilizando diferentes monitores, lo que en el futuro

permitirá reducir significativamente la incertidumbre asociada a esta componente.

En la etapa de medición de radiación, los componentes analizados en este trabajo fueron la geometría de conteo y la estadística de conteo. Los resultados muestran que la geometría de conteo presenta contribución inferior al 1 % (incertidumbre relativa del 0,18 %). El componente con mayor aporte en esta etapa es la estadística de conteo, con aportes de incertidumbre relativas de 0,80 % y 1,40 %, para las muestras 1 y 2, respectivamente, lo que representa una contribución del 18,6 % y 41,5 % a la incertidumbre total. Una de las posibilidades para reducir la incertidumbre de este componente es realizar la medida de radiación gamma con tiempos de decaimiento menores, con el fin de obtener una mayor estadística de conteo. El objetivo es alcanzar un total cercano 4×10^4 cuentas, lo que permitiría reducir la incertidumbre relativa a aproximadamente 0,5 %. Sin embargo, reducir el tiempo de decaimiento traería como consecuencia la necesidad de evaluar nuevamente los efectos por interferencias de radioisótopos con tiempos de semidesintegración cortos.

Los resultados de estudios previos indican que, en el AANI, el componente con mayor contribución a la incertidumbre suele ser la estadística de conteo asociada a la medición de la actividad de la muestra y del comparador [1, 14]. No obstante, en este trabajo, los resultados muestran que la mayor contribución proviene de la corrección de flujo neutrónico. Como se mencionó, la caracterización completa del flujo neutrónico del reactor reduciría sustancialmente la contribución de esta componente.

4. Conclusiones

Se realizó la estimación de la incertidumbre de la determinación de fracción de masa de *La* en muestras de suelo por medio de la técnica de AANI mediante el método del comparador. Los resultados de la incertidumbre expandida obtenidos fueron de 3,6 % y 4,4 %, para tiempos de decaimiento de 7 y 12 días, con un nivel de confianza del 95 % ($k = 2$). La cantidad de influencia de mayor contribución en la incertidumbre es la corrección de flujo neutrónico, con un valor de 1,38 % para las dos muestras, seguida de la estadística de conteo de la actividad de las muestras con valores de 1,42 % y 0,82 % para tiempos de enfriamiento de 12 y 7 días respectivamente. A partir de estos resultados, se concluye que es prioritaria

rio optimizar la estadística de conteo de los monitores de radiación y ejecutar un estudio sistemático de tiempos de enfriamiento para definir una ventana temporal de medición más eficiente.

Este estudio permitió evaluar las capacidades analíticas del LAAN en cada etapa, lo cual fue de gran importancia para cumplir con los requerimientos de la ISO/IEC 17025:2017 y condujo a la obtención de la acreditación del Laboratorio para el análisis multielemental de: Al, As, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Mn, Na, Nd, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, Ti, U, V, Yb, Zn, Zr, en muestras sólidas de origen geológico [28].

Referencias

- [1] R. R. Greenberg, P. Bode y E. A. d. N. Fernandes, «Neutron activation analysis: A primary method of measurement,» *Spectrochimica Acta Part B*, vol. 66, pp. 193-241, 2011.
- [2] E. Orvini y M. Speziali, «Applicability and Limits of Instrumental Neutron Activation Analysis: State of the Art in the Year 2000,» *Microchemical Journal*, vol. 59, pp. 160-172, 1998.
- [3] International Atomic Energy Agency, «Quality Assurance and Quality Control in Neutron Activation Analysis: A Guide to Practical Approaches,» IAEA, Vienna, 2022.
- [4] A. N. Esen, C. Yildiz, I. Zinicovscaia, y S. Hacıyakupoglu, «Rare earth elements as tracers: A study on post-wildfire effects in soil by neutron activation analysis,» *Nucl. Eng. Technol*, vol. 56, pp. 4671-4678, 2024.
- [5] Glen E Gordon et al, «Instrumental activation analysis of standard rocks with high-resolution γ -ray detectors,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 32, n° 4, pp. 369-396, 1968.
- [6] W. Arafa et al, «Geochemistry of sediments and surface soils from the Nile Delta and lower Nile valley studied by epithermal neutron activation analysis,» *Journal of African Earth Sciences*, vol. 107, pp. 57-64, 2015.
- [7] M. Oddone, S. Meloni y N. Genova, «Neutron activation analysis: a powerful tool for rare-earth elements assay in terrestrial materials,» *Inorganica Chimica Acta*, vol. 94, p. 141, 1984.
- [8] E. Orvini, M. Speziali, A. Salvini y C. Herborg, «Rare earth elements determination in environmental,» *Microchemical Journal*, vol. 67, pp. 97-104, 2000.
- [9] M. L. Astolfi, R. C. Jasan, R. Invernizzi, C. Di Genaro, F. Parrino, M. Rapa, R. Preti, y M. E. Conti, «Bromine and selected rare earth elements in Italian herbal teas by INAA: Exposure assessment,» *J. Food Compos. Anal.*, vol. 148, 2025.
- [10] S. Hacıyakupoglu , A. N. Esen y S. Erenturk, «Experimental parameters optimization of instrumental neutron activation analysis in order to determine selected elements in some industrial soils in Turkey,» *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 101, pp. 24-29, 2014.
- [11] EURACHEM/CITAC, «Quantifying uncertainty in analytical measurement,» 3er Edition, Guide CG4 s.1, 2012.
- [12] International Organization of Standardization (ISO), «Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995),» ISO/IEC Guide 98-3: 2008, Ginebra Suiza, 2008.
- [13] G. Parrado et al, «Improvement of analytical capabilities of neutron activation analysis laboratory at the Colombian Geological Survey,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 1753, n° 080010, pp. 1-7, 2016.
- [14] National Institute of Standards and Technology, *Certificate of Analysis, Standard Reference Material 2709a: San Joaquin Soil.*, U.S. Dept. of Commerce, Gaithersburg, 2009.
- [15] National Institute of Standards and Technology, *Certificate of Analysis, Standard Reference Material 2711a: Montana II Soil*, U.S. Department of Commerce. Gaithersburg, MD, 2009.
- [16] E. A. Mackey, et al., «NIST,» 01 Junio 2010. [En línea]. Available: <https://www.nist.gov/publications/certification-three-nist-renewal-soil-standard-reference-materials-r-element-content-srm>. [Último acceso: 17 07 2026].
- [17] O. Sierra et al, «Characterization of HPGe gamma spectrometric detectors systems for Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) at the Colombian Geological Survey,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 1753, n° 080011, pp. 1-4, 2016.
- [18] J. Kucera, P. Bode y V. Stepanek, «Uncertainty evaluation in instrumental and radio-chemical neutron activation analysis,» *Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements, IAEA-Tecdoc-1401.*, pp. 77-94, 2004.

- [19] J. Kucera, P. Bode y V. Stepanek, «The 1993 ISO Guide to the expression of uncertainty in measurements applied to NAA,» *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, pp. 115-122, 2000.
- [20] E. G. Moreira y M. Saiki, «Uncertainty assessment in instrumental neutron activation analysis of biological materials,» *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 269, n° 2, pp. 377-382, 2006.
- [21] P. Bedregal, «Procedimiento para la determinación de la incertidumbre de la medición en análisis por activación neutrónica, método k_0 ,» *Revista IPEN, institucional*, pp. 60-67, 2002.
- [22] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, United States of America: Wiley, 2010.
- [23] S. Landsberger, «Spectral interferences from Uranium fission in neutron activation analysis,» *Chemical Geology*, vol. 57, pp. 415-421, 1986.
- [24] M. T. Aide, «Evaluation of Rare Earth Element Mine Sites for Environmental Impact,» de *Rare Earth Elements - Emerging Advances, Technology Utilization, and Resource Procurement*, IntechOpen, 2022, pp. 1-17.
- [25] S. Nuchdang, W. Kingkam, C. Phalakornkule, U. Suwanmanee, D. Rattanaphra y P. Laowattanabandit, «Preliminary contamination assessment of rare earth elements (REEs) and radioactivity in soil from Phuket Island, Thailand,» *Journal of Environmental Sciences*, vol. 167, pp. 721-732, 2026.
- [26] L. e. a. Morss, *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements*, 3rd edición ed., Netherlands: Springer, 2006.
- [27] Robson Petroni and Edson G. Moreira, «Practical procedure for method validation in INAA -A tutorial,» de *2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015*, São Paulo, SP, Brazil, 2015.
- [28] International Organization for Standardization, «ISO,» International Organization for Standardization, 1 11 2017. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/66912.html>. [Último acceso: 05 07 2026].