



**Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Química
Departamento de Geoquímica
Instituto de Ciencias de la Tierra**



**Determinación de torio y uranio por espectrometría gamma en minerales
pesados de sedimentos del río Arizo, estado Bolívar, Venezuela**

**Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el Br. John
Luis Manrique Carreño para
optar al Título de Licenciado
en Geoquímica.**

Caracas, Abril de 2009

ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “Determinación de torio y uranio por espectrometría gamma en minerales pesados de sedimentos del río Arizo, estado Bolívar, Venezuela”, presentado por el Br. John Luis Manrique Carreño, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciado en Geoquímica.

Prof. Jean Pasquali
Tutor

Prof. Daniel Palacios
Tutor

Prof. Ramón Sifontes
Jurado

Prof. Santiago Marrero
Jurado

AGRADECIMIENTOS

La consecución de este trabajo especial de grado fue gracias a las instituciones que brindaron el apoyo económico, de infraestructura y técnico como son: el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, el Departamento de Oceanografía y Ciencias Costeras del IVIC, Laboratorio de Física Nuclear de la USB, Proyecto Fonacit Río Aro: Diagnostico de la cuenca.

Especial agradecimiento también para mis tutores los profesores Jean Pasquali y el profesor Daniel Palacios, quienes aportaron sus ideas, sus sugerencias y me guiaron para finalizar con excelente termino mi tesis, al profesor Juan Alfonso del IVIC por su apoyo, a los profesores del ICT, a mis compañeros, y los más importantes, mis padres, mis hermanos, toda mi familia, mi novia Aibsel por creer en mi siempre y apoyarme en las buenas y en las malas, mis amigos y a dios, para todos ellos muchísimas gracias, sin ustedes no lo hubiese logrado.

RESUMEN

La siguiente investigación consistió en determinar la actividad de torio y uranio, en algunas muestras de minerales pesados de sedimentos del río Arizo, estado Bolívar, Venezuela, analizando los espectros de radiación gamma obtenidos con un detector de Ge hiperpuro de alta resolución de energía.

El tratamiento físico de las muestras consistió en un cuarteo con el separador de Jones, una separación en 5 fracciones granulométricas de: ($> 500 \mu\text{m}$), 3 ($500\text{-}250 \mu\text{m}$), ($250\text{-}177 \mu\text{m}$), ($177\text{-}125 \mu\text{m}$) y ($< 125 \mu\text{m}$). De cada fracción granulométrica obtenida, se separaron los minerales pesados a través del método hidrodinámico. Los concentrados de minerales pesados obtenidos fueron colocados en envases plásticos sellados y del mismo tamaño, para disminuir los errores correspondientes a la eficiencia geométrica de las muestras. Las mediciones de radiación gamma fueron realizadas con las muestras en esos envases.

Se desarrolló una metodología experimental para el análisis de la radiación gamma natural de este tipo de muestras de minerales pesados utilizando de 4 a 45 gramos de muestra. Se hizo la calibración del espectrómetro gamma en eficiencia, utilizando el material de referencia RGTh-1. Se obtuvo una función matemática de la eficiencia en función de la energía y de la masa, que fue utilizada para determinar la actividad de Pa^{234} , Pb^{214} , Bi^{214} para la serie del U^{238} y de Ac^{228} , Pb^{212} , Bi^{212} y Tl^{208} para la serie del Th^{232} . El error aproximado del método es de 10%.

Con la abundante muestra Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$), de una masa de 98,83 gramos, se hicieron medidas de espectrometría gamma para diferentes valores de masa, con el propósito

de medir la auto absorción de la muestra. Se concluyó que dicho fenómeno no es detectable en las muestras analizadas.

Se separaron las fases minerales con un separador magnético marca Frantz, utilizando corrientes de 0,3, 0,6 y 1,2 Amper. A través del análisis de difracción de rayos X, se identificaron las siguientes fases minerales: ilmenita, hematita, goethita, rutilo, rutilo con niobio, crosita, monacita, circón, torita, xenotima, lipscombite, microclino, tremolita, clinocloro y cuarzo.

Este trabajo sirve como punto de referencia para futuras investigaciones y análisis de materiales con radiación natural, al realizar un análisis isotópico cualitativo y cuantitativo, se podrá aplicar en la resolución de algunos problemas geoquímicos para los estudios de prospección de yacimientos minerales y de geoquímica ambiental en el país.

ÍNDICE DE TEMAS

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: MARCO TEÓRICO	
1.1 Espectrometría gamma	5
1.2 Geología	18
1.2.1 Geología Regional	20
1.2.2 Geología Local	20
1.3 Geoquímica del Torio y del Uranio	22
1.4 Antecedentes	24
Capítulo 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
Capítulo 3: DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59
APÉNDICES	63
APÉNDICE A. Tablas con información de los espectros gammas de las muestras y materiales de referencia analizados	63
APÉNDICE B. Tablas con las actividades medidas de todas las muestras	98
APÉNDICE C. Espectros de difracción de rayos X de las distintas fracciones magnéticas	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Energía, vida media y probabilidad de detección de algunos isótopos hijos del U^{238}	12
Tabla 2. Energía, vida media y probabilidad de detección de algunos isótopos derivados de la serie del ^{232}Th	15
Tabla 3. Masa de las muestras, fracción granulométrica y coordenadas	32
Tabla 4. Masa de los materiales de referencia	33
Tabla 5. Masas de la muestra Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) medidas por espectrometría gamma	34
Tabla 6. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en el espectro del fondo ambiental, señal, energía, área neta, error.	36
Tabla 7. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (5g), señal, energía, área neta, error	38
Tabla 8. Valores de los parámetros a y b de la ecuación de la eficiencia y las energías correspondientes	41
Tabla 9. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en la muestra Aro 46P ($<125\mu\text{m}$), señal, energía, área neta, error, probabilidad de emisión	43
Tabla 10. Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro 46P ($<125\mu\text{m}$)	44
Tabla 11. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Pb^{212} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro 46 P ($<125\mu\text{m}$)	45
Tabla 12. Actividad promedio de Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 58 ($<125\mu\text{m}$)	46

Tabla 13. Actividad promedio de Pa^{234} , Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 102 (250-177 μm)	47
Tabla 14. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 107 (250-177 μm)	48
Tabla 15. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 108 (>500 μm).	48
Tabla 16. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 108 (500-250 μm)	49
Tabla 17. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 108 (250-177 μm)	50
Tabla 18. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 109 (250-177 μm)	50
Tabla 19. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 114 (250-177 μm)	51
Tabla 20. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 114 (<125 μm)	52
Tabla 21. Minerales pesados identificados de las muestras en las fracciones magnéticas y no magnéticas	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Espectrómetro de radiación gamma de alta resolución con detector semiconductor de germanio hiperpuro (HPGe)	6
Fig. 2. Interior del blindaje de plomo para disminuir el nivel fondo de radiactividad ambiental y carcasa de aluminio del detector HPGe	7

Fig. 3. Esquema de la secuencia del análisis mediante la técnica de espectrometría Gamma	8
Fig. 4. Esquema de desintegración de la serie del ^{238}U con tiempos de vida media y las energías de emisiones α en Mega electrón Voltios (MeV)	11
Fig. 5. Esquema de desintegración de la serie del ^{232}Th con tiempos de vida media y las energías de emisiones α en Mega electrón Voltios (MeV)	14
Fig. 6. Esquema de desintegración de la serie del ^{235}U con tiempos de vida media y las energías de emisiones α en Mega electrón Voltios (MeV)	17
Fig. 7. Mapa de la cuenca del río Aro, estado Bolívar	22
Fig. 8. Esquema resumen de la secuencia experimental	31
Fig. 9. Espectro de radiación gamma del fondo ambiental y espectro de radiación gamma de la muestra Aro P 114 (250-177 μm)	37

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Área neta vs. masa de la muestra Aro P 114 (<125 μm) para Pb-214 a 351,99 KeV	35
Gráfico 1.1. Área neta vs. masa de la muestra Aro P 114 (<125 μm) para Bi-214 a 609,32 KeV	35
Gráfico 2. Eficiencia vs. masa Pb-212 a 238,63 KeV	40
Gráfico 3. Punto de corte (a) de las rectas de eficiencia vs. energía (KeV)	41
Gráfica 3.1. Pendiente (b) de las rectas de eficiencia vs. energía (KeV)	42

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Actividad de un isótopo	9
Ecuación 1.1. Eficiencia	10
Ecuación 1.2. Eficiencia del detector	39
Ecuación 2. Ecuación de la recta de la eficiencia	40
Ecuación 2.1. Punto de corte (a) en función de la energía	42
Ecuación 2.2. Pendiente (b) en función de la energía	42
Ecuación 2.3. Formula matemática de la eficiencia en función de la energía y de la masa	42

INTRODUCCIÓN

Los núcleos de algunos elementos químicos son inestables y pueden desintegrarse de forma natural en otros núcleos. Esto significa que se transforman espontáneamente en otros elementos, típicamente emitiendo partículas. Este proceso, conocido como desintegración radiactiva, generalmente resulta en la emisión de partículas alfa y beta provenientes del núcleo. La mayoría de las transformaciones van acompañadas por la emisión de radiación gamma que es una radiación electromagnética, como los rayos X (Dana, 2001). Pero, a diferencia de estos últimos de origen atómico, la radiación gamma es de origen nuclear.

Entre los núcleos inestables naturales se encuentran ^{232}Th , ^{238}U y ^{235}U , cuya desintegración genera las correspondientes series radiactivas que contiene radionucleidos emisores de radiación gamma. Esta radiación puede ser utilizada para identificar y determinar sus concentraciones en rocas, suelos y sedimentos. Los elementos de las series radiactivas naturales se encuentran presentes en minerales como monacita, circón, uraninita, torianita, entre otros, y estos, por su alta densidad y resistencia a la abrasión, se encuentran en la fracción de minerales pesados de algunos sedimentos fluviales (Herrera, 2004).

Recientemente se han colectado muestras de minerales pesados en la cuenca del río Aro, específicamente en el río Arizo y se han determinado semicuantitativamente altas concentraciones de U, Th y Tierras Raras en ellas (Pasquali, 2008).

El uranio es utilizado por países como Francia, Japón, Estados Unidos, Alemania, Suecia, España, China, Rusia, Corea del Norte, Pakistán, India, entre otros, para la generación de energía eléctrica, aprovechando la energía que se libera por fisión de los átomos de ^{235}U .

El torio se utiliza para la datación radiométrica de rocas, en aleaciones con otros metales como tungsteno y potencialmente como combustible nuclear (Palacios, 2007).

En Venezuela son pocas las investigaciones que se han hecho en la determinación de estos elementos en muestras geológicas, a través del análisis por espectrometría gamma de alta resolución con detectores de Ge hiperpuro, por lo que es de utilidad la aplicación de esta técnica, para la determinación cuantitativa de uranio y torio en la fracción de minerales pesados de sedimentos del río Arizo y su posterior uso en muestras similares.

Este trabajo de investigación incluye el desarrollo de una metodología y aplicación para el análisis por espectrometría gamma de algunas muestras de minerales pesados, con el fin de determinar la concentración de uranio y torio y los isótopos radiactivos asociados.

Las muestras de minerales pesados colectados fueron clasificadas en diversos tamaños de granos y concentradas a través del método hidrodinámico. Las principales fases minerales se separaron e identificaron por diversas técnicas, como separación magnética, la lupa binocular y difracción de rayos X.

Para la realización de los análisis cualitativo y cuantitativo de los radionucleidos de interés en las muestras a partir de los espectros gamma, se debió calibrar el espectrómetro gamma en energía y eficiencia. Estos análisis de espectrometría gamma se llevaron a cabo en el Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad Simón Bolívar, bajo la dirección del Profesor Daniel Palacios, quien aportó la ayuda técnica necesaria, así como el Departamento de Oceanografía y Ciencias Costeras del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Se debe indicar que estos análisis requirieron de una preparación teórica previa por parte del

autor, por lo cual se expondrán los fundamentos teóricos de la radiación gamma, su interacción con el medio, su detección y su aplicación, en el análisis de muestras geológicas, específicamente sedimentos fluviales. Estos aspectos se presentarán de manera más detallada en el capítulo de Marco Teórico.

Los resultados obtenidos de estos análisis proporcionaron una valiosa información geoquímica de esos sedimentos. La determinación de uranio y torio, la identificación de fases minerales predominantes y la calibración del espectrómetro gamma, servirán como punto de referencia para futuras investigaciones de materiales análogos sobre su radiación natural.

El objetivo general del trabajo es, estudiar geoquímicamente los elementos torio y uranio, en la fracción de minerales pesados de sedimentos del río Arizo, identificar las fases mineralógicas dominantes y determinar la actividad de éstos elementos químicos. Para lograr la consecución de esta investigación se describen los objetivos específicos los cuales se mencionan a continuación:

1. Identificar las fases minerales presentes en algunas muestras de los concentrados de minerales pesados dentro de la cuenca del río Arizo, estado Bolívar, Venezuela.
2. Calibrar en energía y eficiencia un espectrómetro gamma para el tipo de muestra descrita.
3. Obtener los espectros de radiaciones gamma producidos por las muestras anómalas de minerales pesados provenientes del río Arizo, estado Bolívar.
4. Determinar la actividad de torio y uranio en las fracciones granulométricas dominantes, en sus respectivas fracciones magnéticas y no magnéticas de minerales pesados.

El presente proyecto se lleva a cabo con el conocimiento previo aportado por el análisis por activación de neutrones de unas muestras de minerales pesados colectadas en la cuenca del río Aro del estado Bolívar, Venezuela a través del proyecto FONACIT Río Aro: Diagnostico de la cuenca. Se ha determinado que existe un grupo de muestras anómalas en sus concentraciones de torio y uranio. Para evaluar el posible interés científico y económico que puedan tener las áreas de donde provienen estas muestras es importante determinar la concentración de estos elementos. Al establecer una metodología para calibrar un espectrómetro gamma y obtener un análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras, se está incorporando una poderosa técnica a los estudios de prospección de yacimientos minerales y de geoquímica ambiental.

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el resumen del resultado de una revisión bibliográfica que incluye los conocimientos básicos para entender los fundamentos y alcance del proyecto.

Espectrometría Gamma

La radiactividad fue descubierta en 1896 por Henri Becquerel, cuando realizaba investigaciones de fluorescencia de ciertos compuestos como el uranilsulfato de potasio, el cual era capaz de velar placas fotográficas y su fluorescencia podía atravesar las envolturas en las que se encontraba la placa. Los esposos Curie continuaron con la investigación de Becquerel y descubrieron que el torio tenía la misma propiedad del uranio y la llamaron radiactividad. Luego Ernest Rutherford descubrió que la radiación era un fenómeno compuesto y descubrió las partículas alfa y beta (Friedlander and Kennedy, 1960). Otro investigador P. Villard descubrió un tercer componente de la radiación que era mucho más penetrante que las partículas alfa y beta, que no era desviado por campos eléctricos ni magnéticos, por lo que debía ser una onda electromagnética a la que llamó rayos gamma (Pérez y Héctor, 2001).

La radiactividad es un proceso aleatorio presente en la naturaleza, en el cual un núcleo atómico inestable se desintegra por medio de la emisión de partículas alfa (α), beta (β) o captura electrónica. Después de la desintegración el núcleo resultante puede quedar en un estado excitado, con mayor energía de la que necesita para encontrarse en su estado base. Esta energía extra es liberada emitiendo rayos gamma (γ) característicos del núcleo (Pérez y Héctor, 2001).

Algunos elementos radiactivos, naturales o artificiales, emiten fotones altamente energéticos que son producidos en el núcleo atómico. Éstos son llamados fotones gamma y son característicos del radioisótopo que los produce. Así, mediante el uso de detectores para espectrometría gamma se puede determinar la energía y la intensidad de los fotones incidentes (Friedlander and Kennedy, 1960).

El método de análisis por espectrometría gamma consiste en la obtención de la distribución energética (espectro de energía) de las radiaciones emitidas por una muestra. Para ello se usa un detector que produce una señal (amplitud del pulso del voltaje) proporcional a la energía de la radiación incidente (Palacios, 2007). El equipo a utilizar en la presente investigación (Figura 1) cuenta con un detector semiconductor de germanio hiperpuro (HPGe), el cual permite determinar la energía y la intensidad de las radiaciones gamma producidas por isótopos radioactivos usando una adecuada calibración en energía y eficiencia. En su interior cuenta con un blindaje de plomo para disminuir el nivel de fondo de la radiactividad ambiental (Figura 2).



Figura 1. Espectrómetro de radiación gamma de alta resolución con detector semiconductor de germanio hiperpuro (HPGe).



Figura 2. Interior del blindaje de plomo para disminuir el nivel fondo de radiactividad ambiental y carcasa de aluminio del detector HPGe.

El equipo cuenta con un preamplificador que envía una señal al amplificador, cuya función es adecuar la forma de los pulsos y amplificar el nivel de la señal. Tiene también un sistema analizador de pulsos multicanal (MCA, por sus siglas en ingles), que permite obtener el espectro de energía luego de haberse procesado los pulsos a través de un convertidor análogo digital (ADC, por sus siglas en ingles). El analizador se encarga de obtener y guardar el espectro de la energía de la radiación. El resultado se presenta en un histograma de frecuencias de distribución de energía de fotones detectados.

Un ejemplo de la secuencia del análisis por espectrometría gamma comúnmente usado se presenta en la Figura 3, donde se presentan los pasos a seguir para obtener la información de la actividad de los analitos, al utilizar el programa para adquirir e identificar los espectros Maestro.

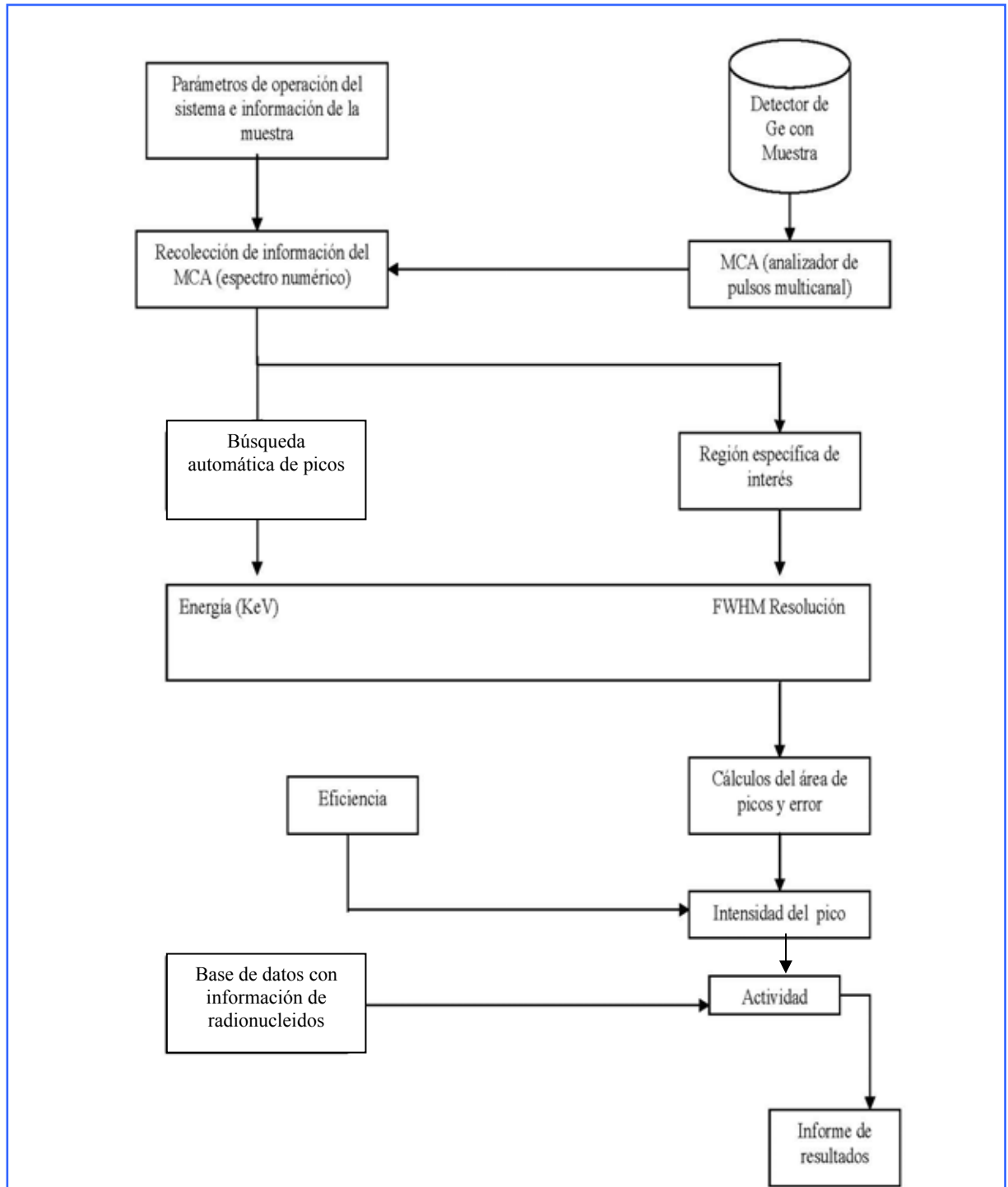


Figura 3. Esquema de la secuencia del análisis mediante la técnica de espectrometría gamma (Loría *et al.*, 2002).

La eficiencia del detector depende de la geometría de la muestra, ya que los rayos gamma provenientes de los procesos de desintegración radiactiva salen en todas direcciones al azar en el tiempo, por lo que no todos los rayos gamma provenientes de la muestra llegan al detector. La eficiencia del detector también depende del proceso de auto absorción en la muestra. Ya que si el espesor o la altura de la muestra en el envase que la contiene es considerablemente alto, puede ocurrir el proceso antes mencionado, en el que un átomo al emitir un fotón o radiación gamma, éste puede ser absorbido por la misma muestra y así no llega a ser detectado.

Existen algunas variables que se deben considerar para calcular la actividad (concentración) de un radionucleido en particular, como la mencionada eficiencia del detector, la masa y la composición de la matriz, parámetros todos que pueden medirse mediante una función empírica que se calcula a partir de los datos de las muestras. La actividad también depende de la energía de la línea utilizada para medir los isótopos y la probabilidad de emisión. Que, junto a la debida calibración, son necesarios para realizar los cálculos de la actividad del isótopo a estudiar.

Para calcular la actividad de un isótopo se utiliza la ecuación 1.

Ecuación 1. Actividad de un isótopo.

$$\text{Actividad (Bq/Kg)} = \frac{(A_m/t_{\text{muestra}})_{\text{para una energía en particular}} - (A_f/t_{\text{fondo}})_{\text{para una energía en particular}}}{\epsilon \cdot m \cdot P_\gamma}$$

donde, A_m es el área neta bajo el pico de interés para una energía determinada en la muestra, A_f es el área neta bajo el pico de interés para una energía determinada en el espectro de fondo, t es el tiempo de conteo, ϵ es la eficiencia del pico de energía total que depende de la

geometría de la muestra, **m** es la masa de la muestra en kilogramos y **P_γ** es la probabilidad de emisión para una energía determinada de un isótopo dado en porcentaje.

Ecuación 1.1. Eficiencia.

$$\varepsilon(E_{\gamma}, m) = \frac{(Am/t_m) - (Af/t_f)}{A \cdot m \cdot P_{\gamma} \cdot t}$$

Todos los elementos encontrados en fuentes naturales con el número atómico mayor a 83 son radiactivos. Ellos pertenecen a las cadenas que constituyen una familia radiactiva o una serie radioactiva. Tres de estas familias incluyen todas las actividades naturales del ²³⁸U, ²³²Th y ²³⁵U (Friedlander and Kennedy, 1960).

El ²³⁸U como la sustancia paternal (isótopo padre), después de sufrir 14 transformaciones o desintegraciones alcanza un producto final estable, el plomo (²⁰⁶Pb). Esta es conocida como la serie de ²³⁸U (Figura 4). En esta serie se encuentran los siguientes radionucleidos: ²³⁸U, ²³⁴Th, ²³⁴Pa, ²³⁴U, ²³⁰Th, ²²⁶Ra, ²²²Rn, ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi, ²¹⁰Po y ²⁰⁶Pb (estable).

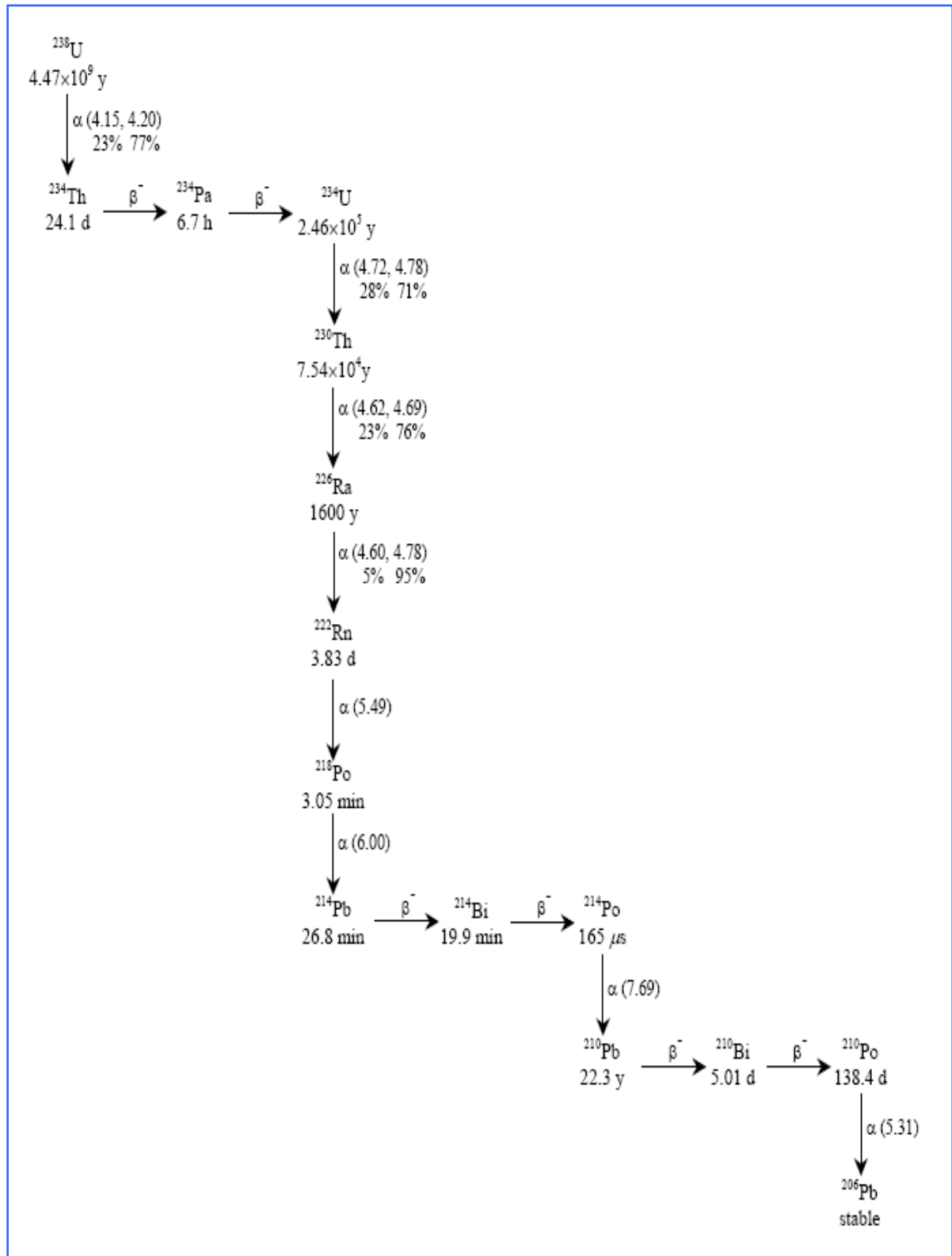


Figura 4. Esquema de desintegración de la serie del ^{238}U con tiempos de vida media y las energías de emisiones α en mega electrón voltios (MeV) (Knoll, 1989).

Algunas de las energías de radiación gamma de radionucleidos de la serie del ^{238}U sus picos característicos con sus probabilidades de emisión (en porcentaje) y sus tiempos de vida media, se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Energía, vida media y probabilidad de emisión de algunos isótopos hijos del U^{238} (Palacios, 2007).

Isótopos	Tiempo de vida media	Energía (KeV) – Probabilidad de emisión (%)
Th^{234}	24,1 días	63,3 (4,47%) 92,38 (2,60%) 92,80 (2,56%)
Pa^{234}	6,75 horas	100 (50%) 700 (24%) 900 (70%)
U^{234}	$2,47 \times 10^5$ años	53,2 (0,123%)
Th^{230}	$8,0 \times 10^4$ años	67,7 (0,373%)
Ra^{226}	1.602 años	186,2 (3,0%)
Rn^{222}	3,23 días	510 (0,76%)
Pb^{214}	26, minutos	242,0 (7,6%) 295,2 (19,2%) 351,9 (37,1%)

Continuación de la tabla 1.		
Bi ²¹⁴	19,7 minutos	609,3 (46,1%) 768,4 (4,89%) 934,1 (3,16%) 1120,3 (15,0%) 1238,1 (5,92%) 1377,7 (4,02%) 1408,0 (2,48%) 1509,2 (2,19%) 1764,5 (15,9%)
Pb ²¹⁰	21 años	46,5 (4,05%)

La serie del ^{232}Th luego de la desintegración alcanza un producto final estable, el plomo (^{208}Pb) (Figura 5). En esta serie se encuentran los siguientes radionucleidos: ^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl y ^{208}Pb (estable).

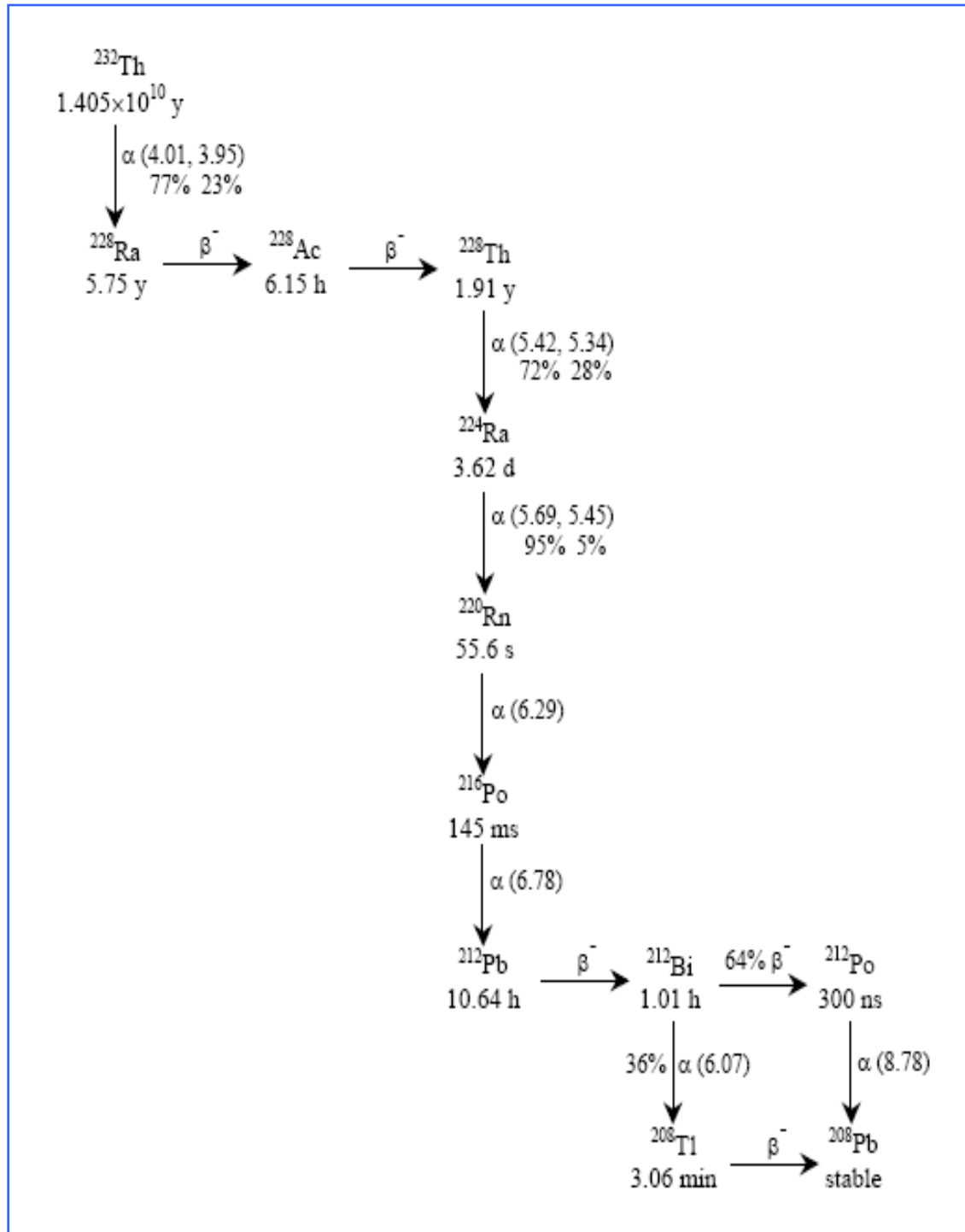


Figura 5. Esquema de desintegración de la serie del ^{232}Th con los tiempos de vida media y

las energías de emisiones α en mega electrón voltios (MeV) (Knoll, 1989).

Algunas energías de radiación gamma, sus picos característicos con las probabilidades de emisión en porcentaje y sus tiempos de vida media, se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Energía, vida media y probabilidad de emisión de algunos isótopos de la serie del Th^{232} (Palacios, 2007).

Isótopos	Tiempo de vida media	Energía (Kev) – Probabilidad de emisión (%)
Th^{232}	$1,405 \times 10^{10}$ años	63,8 (0,267%)
Ac^{228}	6,13 horas	57,7 (0,487%)
		129,0 (2,42%)
		209,3 (3,88%)
		270,2 (3,43%)
		328,0 (2,95%)
		338,3 (11,3%)
		463,0 (4,44%)
		794,9 (4,36%)
		911,2 (26,6%)
		964,8 (5,11%)
		969,0 (16,2%)
		1588,2 (3,27%)
Ra^{224}	3,64 días	241,0 (3,97%)
Pb^{212}	10,64 horas	238,6 (43,6%)

		300,0 (3,34%)
Bi^{212}	60,6 minutos	727,3 (6,65%)
Tl^{208}	3,1 minutos	277,4 (6,31%)
		510,77 (22,6%)
		583,2 (84,5%)
		860,6 (12,4%)

Continuación de la tabla 2.

La tercera serie es la del ^{235}U que, igualmente luego de la desintegración de los elementos radioactivos que la componen, alcanza un producto final estable, el plomo (^{207}Pb) (Figura 6). En esta serie se encuentran los siguientes radionúclidos: ^{235}U , ^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ac , ^{227}Th , ^{223}Fr , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Po , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{211}Po , ^{207}Tl y ^{207}Pb (estable) (Friedlander and Kennedy, 1960).

Las tablas de las series de desintegración del U^{238} y Th^{232} , solamente incluyen aquellos emisores gamma con probabilidades mayor a 2%, que van hacer utilizados en los cálculos de la actividad.

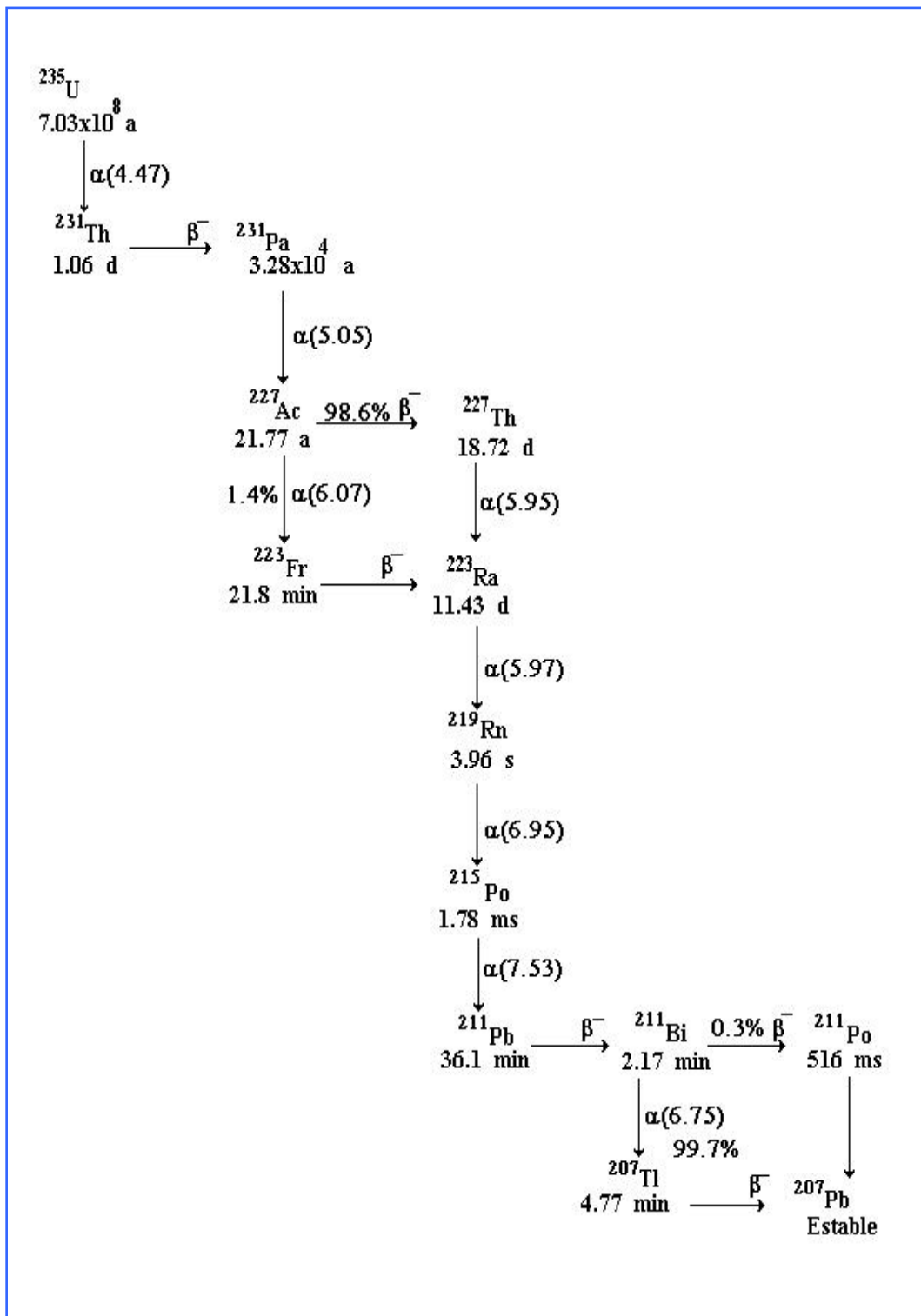


Figura 6. Esquema de desintegración de la serie del ^{235}U con tiempos de vida media y las energías de emisiones α en mega electrón voltios (MeV) (Knoll, 1989).

El uranio natural está formado por tres isótopos: ^{238}U , ^{235}U y ^{234}U . De cada gramo de uranio natural el 99,28 % de la masa es ^{238}U , el 0,71% ^{235}U y 0,005% ^{234}U . La relación natural Uranio-238/Uranio-235 es constante en toda la Tierra y el resto de los planetas del Sistema Solar y según (Powell *et al.*, 2007) es aproximadamente 21:1.

Geología

Seguidamente se describirá la zona de estudio de donde provienen las muestras que van hacer analizadas por espectrometría gamma, haciendo énfasis en la descripción geológica del área de estudio.

Geología Regional

El escudo de Guayana se encuentra al sur de Venezuela, ocupando algo más del 46% de la superficie del país y es el área con las rocas más antiguas de Venezuela, con edades que pueden alcanzar hasta 3.400 millones de años. Un ejemplo de este tipo de rocas son los cinturones verdes de las Provincias Geológicas Pastora e Imataca que, según (Mendoza, 2000), posee un potencial considerable en recursos minerales como hierro, bauxita, oro, entre otros. Las otras provincias geológicas que pertenecen a este escudo son Roraima y Cuchivero.

La provincia de Imataca (Mendoza, 2000) se encuentra formada litológicamente por gneises y granulitas félsicas (60% - 75%), anfíbolitas y granulitas máficas y ultramáficas (15% - 20%) y cantidades menores de formaciones bandeadas de hierro (BIF), charnokitas, anortositas y granitos intrusivos más jóvenes y remanentes erosionales de cinturones de rocas verdes.

Se realizaron dataciones en gneises por Rb/Sr y Pb/Pb arrojando edades de 3.700 – 3.400 millones de años (Montgomery, 1969, en Mendoza, 2000) y en la migmatita de La Ceiba 2.800 – 2.700 millones de años. Texeira y otros, 1999 dataron por Sm-Nd la incorporación de material del manto a la corteza en el Complejo de Imataca, entre 3.230 – 3.000 millones de años.

La Provincia de Pastora, se extiende desde la falla del Guri al Norte hasta las proximidades del Parque Nacional Canaima al Sur. Limita al Este con la Zona en Reclamación del Esequibo y al Oeste con el río Caura. Está formada por cinturones de rocas verdes (CRV) estrechos, más antiguos, tectonizados, tipo Carichapo y CRV, más anchos, jóvenes, menos tectonizados y metamorfizados, como el de Botanamo. También se encuentran complejos graníticos sódicos, como el Complejo de Supamo (Mendoza, 2000). La edad de las rocas graníticas del Complejo de Supamo, intrusivas en CRV tipo Grupo Carichapo dieron edades por U-Pb en circones entre 2.800 a 2.600 millones de años (Gaudette y Olsewski, 1978, en Mendoza, 2000). En esta provincia se encuentran los yacimientos auríferos más importantes del país.

Cuchivero es la tercera provincia geológica más antigua, está formada por rocas volcánicas félsicas, comagmáticas con granitos, rocas sedimentarias depositadas sobre un basamento de CRV y granitos sódicos. Alberga las intrusiones de la carbonatita de Cerro Impacto, los lamprofidos y las kimberlitas eclogíticas de Guaniamo. Esta provincia se encuentra aflorando al Oeste del río Caura, en contacto discordante con las provincias de Pastora e Imataca, las cuales afloran al Este del río Caura. Está compuesta a su vez por el Grupo Suapure (Granito de Pijiguao y Granito de Parguaza). Dataciones en los granitos de

Santa Rosalía y San Pedro por el método de Rb/Sr, dan una edad de 1.880 +/- 88 millones de años (Sidder y Mendoza, 1995, en Mendoza, 2000).

Roraima es la provincia más joven con edades de 1.730 +/- 120 millones de años, obtenidas en tobas de Canaima por el método de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Sidder y Mendoza, 1995, en Mendoza, 2000). Se extiende en Venezuela desde los límites del Parque Nacional Canaima, hasta Santa Elena de Uairén y, desde el río Venamo, hasta las proximidades del río Paragua. Está compuesta por rocas sedimentarias del Grupo Roraima, con diabasas y rocas gabronoríticas cuarcíferas a dioríticas cuarcíferas. Se divide el Grupo Roraima en cuatro formaciones según Reid, (1974, en Mendoza, 2000), Uairén, Kukenán, Uaimapué y Matauí; constituidas principalmente por areniscas, lutitas y por algunas tobas, jaspes y arcosas (Mendoza, 2000).

La cuenca del río Aro se encuentra en la zona norte central del estado Bolívar, en la cual afloran las provincias geológicas de Imataca y Cuchivero pertenecientes al escudo Guayanés, antes descritas. A continuación se presenta con más detalle la geología de la zona de estudio.

Geología Local

La cuenca del río Aro se encuentra entre las cuencas de los ríos Caroní, al Este y Caura, al Oeste, entre las coordenadas de 63° 15' y 64° 30' aproximadamente, de longitud oeste y 6° 25' y 8° 00' de latitud norte (Figura 7). Posee un área de cerca de 14.000 km² y está conformada por el río Aro como su colector principal, con una longitud de más de 200 km hasta su desembocadura en el río Orinoco. En su recorrido recibe varios tributarios como los

ríos Guaigua, Arizo y Chorro Macho por la margen izquierda y los ríos Carapo, Caño Azul por la margen derecha (Sifontes, 2003).

En cuanto a la litología de la zona, Sifontes en el 2003 describe un conjunto de rocas consistentes principalmente de gneises cuarzo-feldespático-biotíticos, en parte granatíferos, generalmente de grano medio pero, en ocasiones, se observan segregaciones de grano grueso, de fase pegmatítica. Asociados a los gneises se detectaron varios cuerpos granitoides como el granito del Aro (cerca del puente sobre el río Aro, por ejemplo).

En este sector también afloran rocas máficas (meta-basitas), que se encuentran intercaladas con los gneises. Son rocas anfibolíticas, de color verde oscuro y grano fino. En ciertos lugares se ven con un aspecto de tobas al encontrarse interdigitadas con los gneises ya mencionados (Sifontes, 2003). Específicamente en la zona de estudio del río Arizo, fueron observados horizontes de rocas migmatíticas (Sifontes, 2003).

Todas las rocas antes descritas, que afloran al norte de la cuenca del río Aro, en su mayoría son típicas de la Provincia de Imataca (Chase, 1965, Dougan, 1972, en Sifontes, 2003). Sin embargo en la localidad del hato La Vergareña, situado mucho más al sur, aparecen rocas de origen volcánico, levemente metamorfizadas, conformadas por tobas de lapilli de composición félsica, que pueden corresponder a la Formación Caicara de la Provincia de Cuchivero (Sifontes, 2003).

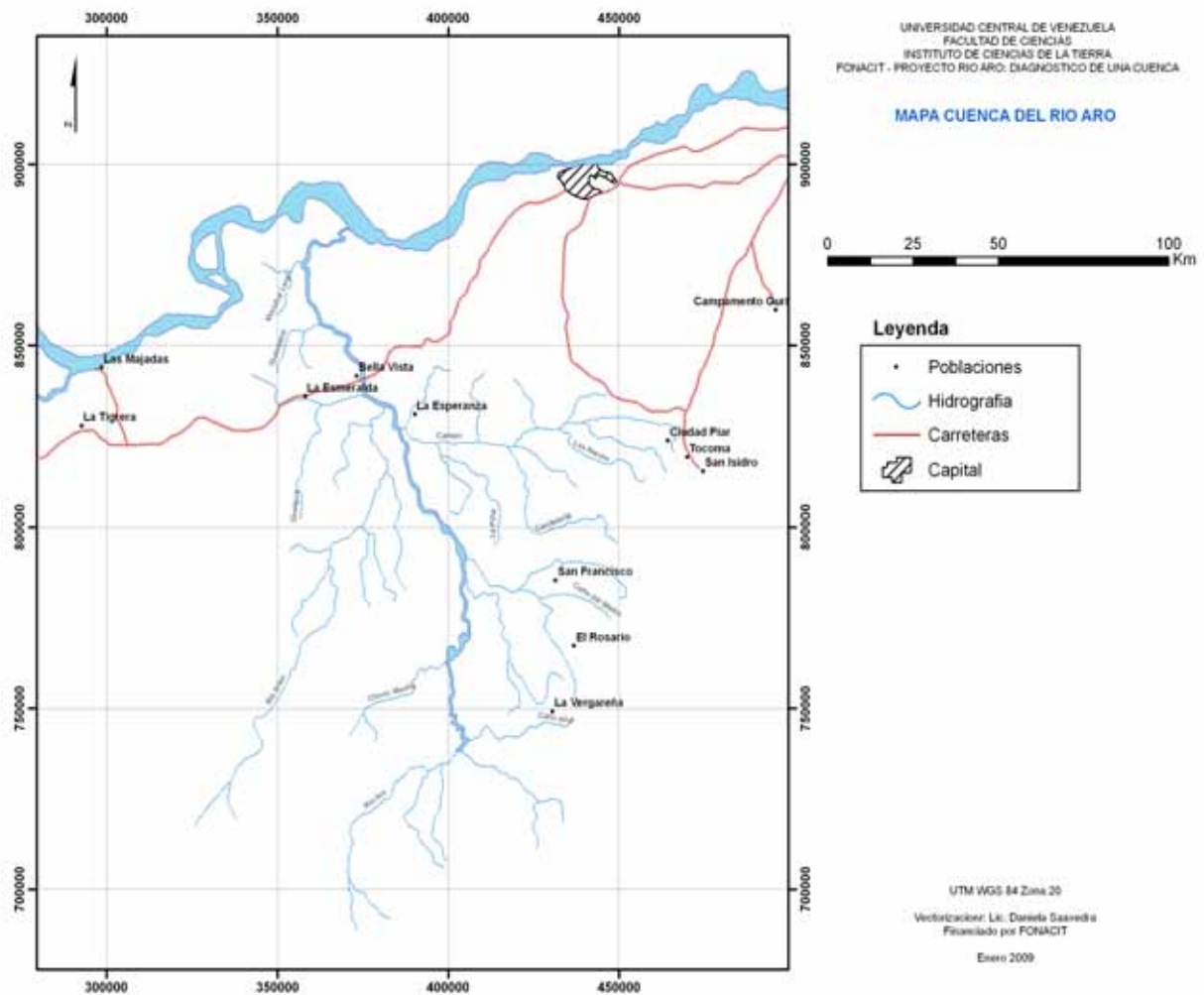


Fig. 7. Mapa de la cuenca del río Aro, estado Bolívar

Geoquímica del Torio y el Uranio

El uranio y el torio por lo general se encuentran juntos en los minerales de una roca, debido a la semejanza en sus radios iónicos (Asfahani, 2007).

La abundancia promedio de uranio y torio en la corteza continental es 2,7 ppm y 9,6 ppm, respectivamente (Taylor, 1964, en Powell *et al.*, 2007). La relación U/Th puede ser aproximadamente constante en el mismo tipo de roca o unidad geológica, en un ambiente relativamente cerrado (Asfahani, 2007).

El torio típicamente se encuentra como Th (IV), que tiene una solubilidad baja y tiende a adsorberse muy fuertemente a las superficies sólidas de los minerales. La concentración acuosa de torio es inhibida por la formación de minerales de Th escasamente solubles, como sus silicatos (Neck y Kim, 2001, en Powell *et al.*, 2007).

El torio es esencialmente insoluble ($<1 \times 10^{-4}$ ppb) (Kaufman, 1969, en Yeager *et al.*, 2002), en el agua superficial y no sufre cambios del estado de oxidación en condiciones normales de Eh-pH (Ivanovich y Harmon, 1982, en Yeager *et al.*, 2002). Cuando ocurre la meteorización de los minerales que lo contienen, tiende a absorberse fuertemente sobre las partículas suspendidas y así, casi exclusivamente, es transportado junto con la materia particulada en los ríos (según Ivanovich y Harmon, 1992, en Yeager *et al.*, 2002).

El uranio se encuentra naturalmente en los estados de oxidación U (IV), y U (VI). Como ión uranilo UO_2^{+2} . El uranio es relativamente móvil en la superficie y puede migrar hasta que encuentre condiciones reductoras. En este punto, la reducción de U (VI) puede conducir a la precipitación de minerales de uranio como uraninita, coffinita, o brannerita (Finch y Murakami, 1999, en Powell *et al.*, 2007).

La mayoría de las rocas contienen solamente algunas partes por millón de uranio. Las fosforitas, las rocas ígneas, como los granitos y pegmatitas, generalmente tienen una concentración más alta de uranio, mientras se encuentran concentraciones inferiores en rocas sedimentarias como las calizas (Cuculic, 2006).

La radiactividad natural depende principalmente de las condiciones geológicas locales, y esto está relacionado especialmente con los tipos de rocas. El uranio y el torio son los elementos que más contribuyen a la radiactividad natural terrestre. Todos los elementos de las series de desintegración del U y el Th, son incompatibles con los principales minerales formadores de rocas, como el cuarzo, olivino y piroxeno. Sin embargo son más compatibles en fases minerales accesorias, como circón y esfena y aún pueden formar parte de algunas fases, como, por ejemplo, Th en chevkinita y la alanita (Blundy y Wood, 2003, en Orgun *et al.*, 2006).

El torio y el uranio pueden encontrarse en fases minerales como óxidos, ejemplo uraninita, silicatos como torita o uranotorita y también pueden estar presentes como sustituciones elementales de elementos como circonio, tierras raras, itrio, en otros minerales como: monacita, xenotima, circón. Esto se debe a que el radio iónico de estos elementos es muy similar y se producen sustituciones que no afectan la estabilidad de las redes cristalinas.

Seguidamente se hablará sobre los antecedentes de esta investigación, haciendo una breve revisión de algunos trabajos previos realizados en la cuenca del río Aro y de algunos trabajos hechos en base a la técnica de espectrometría gamma, tanto a nivel internacional como a nivel nacional, los cuales servirán de fuente de información para llevar a cabo la metodología experimental del presente trabajo.

Antecedentes

Existen varios autores que han realizado trabajos de investigación en el área de geología y geoquímica, dentro de la cuenca del río Aro. También se nombrarán algunos trabajos relacionados con la prospección de uranio y torio en Venezuela.

Herrera (2004), caracterizó geoquímicamente los minerales pesados de muestras provenientes de la cuenca del río Aro. Utilizó el método hidrodinámico para separar los minerales pesados, así como también hizo una separación en fracciones magnéticas y análisis por difracción de rayos X, para la identificación de las fases minerales predominantes. Obtuvo que los minerales dominantes eran, ilmenita, hematita, magnetita y circón. También concluye que los sedimentos de los drenajes de los ríos Arizo, Guaigua y Hato Sucio, presentan una composición mineralógica que los hace dignos de estudio, para la prospección de yacimientos minerales.

Leonzi (1984) realizó un estudio de prospección geoquímica de uranio en la región del Baúl, en el estado Cojedes. Utilizó muestras de suelos, en las que realizó análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar la concentración de U y Th, cuyos valores, para el caso del uranio, fue de entre 9 y 38 ppm. En su estudio se pudo establecer la proximidad de una fuente de estos elementos localizada en las rocas graníticas, metasedimentarias y volcánicas que afloran en la zona. Estableció las fases minerales en donde ellos se encuentran, que fueron, uranotorita, torita, torianita, circón, monacita, alanita y esfena.

Pasquali (2006), realizó un estudio geoquímico en la zona de la cuenca del río Aro, donde varias muestras de minerales pesados, fueron analizadas por la técnica de análisis por activación de neutrones. Estas mediciones arrojaron datos anómalos en la concentración de algunos elementos como tierras raras, uranio y torio.

A nivel internacional, se han publicado muchos trabajos relacionados con la radiación gamma en muestras de origen natural como sedimentos y rocas, entre ellos se mencionaran los siguientes.

Cuculic *et al.*, (2005) determinaron la concentración (actividad) de uranio en sedimentos y aguas del río Krka en Croacia. Realizaron medidas de radiación gamma. Las muestras de los sedimentos fueron secadas a una temperatura de 106°C por 24 horas, y luego fueron envasadas y selladas por un tiempo de 4 semanas, para establecer el equilibrio entre el ^{226}Ra , ^{222}Rn y el ^{214}Bi . La actividad de ^{238}U en los sedimentos fue de 485 +/- 16 Bq/Kg.

Orgun *et al.*, (2006), analizaron los radionucleidos de origen natural y antrópico, en rocas y arenas de playas de la región Ezine, al oeste de Anatolia en Turquía. Los isótopos analizados fueron: ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K en granitos, rocas volcánicas y metamórficas, a través del ICP acoplado a Masas. Para las muestras de sedimentos se obtuvieron sus resultados por espectrometría gamma utilizando un detector de germanio hiperpuro. En este caso, los minerales con mayores concentraciones de Th y U fueron, circón, alanita, monacita, torita, uranotorita y apatito.

Otros autores que realizaron investigaciones en el campo de la radiación gamma en muestras naturales fueron Powell *et al.*, (2007), quienes determinaron la actividad de los radionucleidos primordiales en los sedimentos del río Reedy en Simpsonville, Carolina del Sur, Estados Unidos. Usando un espectrómetro gamma HPGe cuantificaron un rango de actividad del ^{238}U cuyos valores oscilan entre 11,1 y 74,2 Bq/kg en los sedimentos. El tratamiento físico de las muestras consistió en secarlas a 110°C y analizar la fracción de $< 2\text{mm}$, tomando una masa de 225g aproximadamente. Dejaron selladas las muestras por más de 28 días para lograr el equilibrio secular entre ^{226}Ra y ^{222}Rn .

Yeager *et al.*, (2002), calcularon la actividad de ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{228}Ra y ^{228}Th , en muestras de aluviones al Sur de Argentina. Utilizaron un espectrómetro gamma HPGe, con un analizador multicanal. Las muestras fueron secadas entre 70 y 80°C por 24 horas. Luego fueron selladas por 20 días para establecer el equilibrio secular y así poder medir la actividad del ^{228}Ra vía actividad del ^{228}Ac ($E_{\gamma} = 911 \text{ KeV}$) y del ^{226}Ra vía la actividad del ^{214}Pb ($E_{\gamma} = 352 \text{ KeV}$).

Pérez Moreno *et al.*, (2002), realizaron un trabajo sobre un método de calibración, de un detector de germanio para espectrometría gamma, en el que obtienen una ecuación de la eficiencia del detector en función de la energía y de la geometría de las muestras, cuyos volúmenes eran variables.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El tratamiento físico de las muestras consistió en un cuarteo con el separador de Jones, del cual se obtuvo una alícuota de cada muestra (aproximadamente 300 g) y una muestra testigo. Esto se hace con la finalidad de homogeneizar y reducir el tamaño de la muestra. Posteriormente la alícuota se separó en 5 fracciones granulométricas de: ($> 500 \mu\text{m}$), 3 ($500-250 \mu\text{m}$), ($250-177 \mu\text{m}$), ($177-125 \mu\text{m}$) y ($< 125 \mu\text{m}$). Esto se llevó a cabo en unos tamices de acero inoxidable.

De cada fracción granulométrica obtenida, se separaron los minerales pesados a través del método hidrodinámico; el cual realiza el proceso de separación de los minerales por su gravedad específica y equivalente hidráulico, que opera naturalmente en los ríos y el cual se ha demostrado es eficiente en la separación de minerales pesados. Los minerales pesados de cada fracción fueron secados en una estufa por un tiempo de aproximadamente 1 día, a una temperatura de aproximadamente 100°C .

Los concentrados de minerales pesados obtenidos en el paso anterior fueron colocados en envases plásticos sellados y del mismo tamaño, para disminuir los errores correspondientes a la eficiencia geométrica de las muestras. Se procedió a calibrar el espectrómetro gamma en los parámetros de energía y eficiencia. Se obtuvieron los espectros gammas de 10 muestras con diferentes masas: ARO 46-P ($<125\mu\text{m}$), ARO P-58 ($<125\mu\text{m}$), ARO P 102 ($250-177 \mu\text{m}$), ARO P 107 ($250-177 \mu\text{m}$), ARO P 108 ($>500\mu\text{m}$), ARO P 108 ($500-250 \mu\text{m}$), ARO P 108 ($250-177 \mu\text{m}$), ARO P 109 ($250-177 \mu\text{m}$), ARO P 114 ($250-177 \mu\text{m}$); y la muestra ARO P 114 ($<125\mu\text{m}$) al obtenerse mayor cantidad en la separación con el hidrodinámico, se midió a diferentes masas: 5g, 10g, 15g, 20g, 25g, 30g, 35g y 40g, con la finalidad de analizar el comportamiento del equipo en cuanto a la detección, variando la masa de una misma muestra

y determinar el posible efecto de auto absorción de la muestra. Los valores de las masas y otros parámetros físicos de las muestras, se pueden ver en el capítulo de datos y análisis de resultados tabla 3.

Para la calibración de energía se utilizaron fuentes patrones en forma de disco de la Ameshan, los cuales se colocaron directamente sobre el detector. La conversión de canales en energía se realizó relacionando los canales de los centroides de los picos de absorción total con las energías gamma de las fuentes utilizadas (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{113}Ba). Esos datos se introdujeron en el programa Maestro que realizó la calibración automáticamente.

Para la calibración en eficiencia, se utilizó un material de referencia certificado que contiene radionucleidos cuyos picos de energías están cercanos a los de los analitos a determinar en las muestras, y cuya matriz (densidad y composición) fue similar a la de las muestras a estudiar. Este material de referencia fue el RG-Th, el cual es una mena (Palacios, 2007). Fue colocado igualmente en el mismo tipo de envase de plástico que el utilizado para las muestras, con diámetro interno de 4,8cm. Se midieron diferentes masas del patrón: 5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g, 30 g, 35 g y 40 g, con el fin de obtener una expresión matemática de la eficiencia en función de la energía y la masa y, con esta función, poder luego calcular la eficiencia y la actividad de los isótopos de interés en las distintas muestras, cuyas masas variaron entre 5 g y 40 g.

Para calcular los niveles de concentración de actividad de los radionúclidos de interés, se midió la radiación gamma emitida por las muestras a través de un espectrómetro gamma con un detector coaxial tipo P de germanio hiperpuro de alta resolución de marca ORTEC,

descrito en los fundamentos teóricos. Se identificaron los picos de interés por sus energías y sus correspondientes series de desintegración. En la serie del U^{238} se detectaron Th^{234} , Pa^{234} , Bi^{214} y Pb^{214} y en la serie del Th^{232} se usaron Ac^{228} , Pb^{212} , Bi^{212} y Tl^{208} .

Se extrajeron los datos de los picos de los isótopos antes mencionados, que incluyen los parámetros de: intensidad, energía expresada en KeV, área bajo el pico, error, conteos netos, los cuales son utilizados para calcular la actividad de estos radionucleidos en las distintas muestras, además de la masa, la probabilidad de la línea de energía y la masa del patrón, ecuación 1.1. El promedio de las actividades de estos isótopos, será la actividad del isótopo inicial (padre), en el caso de que se encuentren en equilibrio secular.

Todos estos espectros fueron adquiridos a través del programa Maestro. Este último cuenta con una base de datos digital de energías, vidas medias, entre otros, para las radiaciones gamma.

Luego de realizar todos los análisis por espectrometría gamma a las muestras, éstas se separaron en sus fracciones magnéticas y no magnéticas con el separador magnético Frantz, utilizando varios valores de amperaje (3, 6 y 12 Amper). Seguidamente se identificaron las fases minerales predominantes de todas las fracciones obtenidas por la técnica de difracción de rayos X.

Toda la metodología experimental se presenta a continuación resumida en un diagrama de flujo (Figura 8).

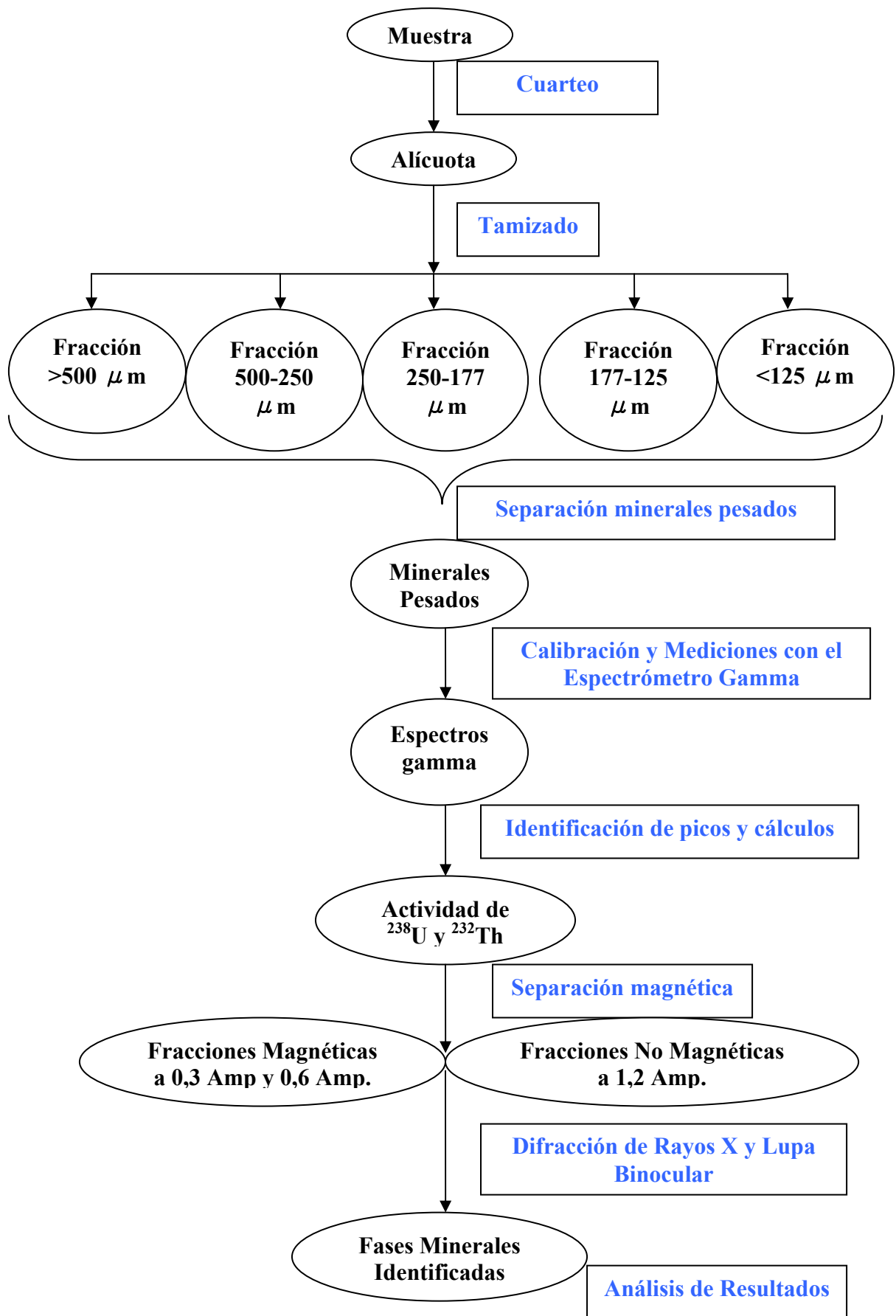


Figura 8. Esquema resumen de la secuencia experimental.

DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los datos de las muestras utilizadas en el presente proyecto geoquímico resumiendo en algunas tablas los parámetros de interés como: masa de la muestra, masa del patrón. También se presentan datos de los espectros como: intensidad de los picos de los isótopos de las series de desintegración y sus energías, área neta bajo el pico de energía total, error, probabilidades de las líneas de energía, concentración de los analitos y las fases minerales identificadas en las diferentes fracciones magnéticas de los minerales pesados por difracción de rayos X.

En la tabla 3, se presentan las características de las muestras a estudiar, incluyendo las ubicaciones donde fueron tomadas.

Tabla 3. Masa de las muestras, fracción granulométrica y coordenadas.

Muestra	Fracción (µm)	Masa (g) +- 0,01g	Coordenadas	Referencia
ARO 46 P	<125	35,67	399891 E 735095 N	Río Aro
ARO P 58	<125	33,23	451733 E 829581 N	Quebrada del río Carapo
ARO P 102	250-177	4,18	365720 E 789097 N	Quebrada de Arizo
ARO P 107	250-177	11,47	374990 E 800476 N	Quebrada Coro Coro de Arizo
ARO P 108	>500	7,73	378132 E 806995 N	Quebrada Aimara de Arizo
ARO P 108	500-250	13,33	378132 E 806995 N	Quebrada Aimara de Arizo
ARO P 108	250-177	15,50	378132 E 806995 N	Quebrada Aimara de Arizo

ARO P 109	250-177	38,66	377974 E 809433 N	Quebrada Agua Fría de Arizo
ARO P 114	250-177	38,13	377784 E 829756 N	Puerto del Arizo
ARO P 114	<125	99,83	377784 E 829756 N	Puerto del Arizo

Continuación de la tabla 3.

Tabla 4. Masa de los materiales de referencia.

Material de referencia	Masa (g) +- 0.0001g
RGTh-1 (5g)	5,0115
RGTh-1 (10g)	10,0991
RGTh-1 (15g)	15,0652
RGTh-1 (20g)	20,0087
RGTh-1 (25g)	25,0549
RGTh-1 (30g)	30,1622
RGTh-1 (35g)	35,0171
RGTh-1 (40g)	40,0315

Se midió el material de referencia de mena RGTh-1 en varios valores de masas, para determinar la eficiencia del detector al variar la masa, y así poder obtener una expresión matemática que sea utilizada para el cálculo de las actividades de Th y U de las muestras.

Hay que destacar que se utilizó el RGTh-1 por presentar mayor cantidad de emisores gamma con mayor cantidad de líneas y la garantía de que la serie esta en equilibrio secular

por lo que se puede asignar la misma actividad a todos los radionucleidos de la serie con excepción del Tl^{208} el cual su actividad es un 36% del Bi^{212} .

Tabla 5. Masas de la muestra Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) que fue utilizada para las mediciones de radiación gamma.

Muestra	Masa (g) $\pm 0,0001\text{g}$
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (5g)	5,0059
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (10g)	10,0431
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (15g)	15,0180
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (20g)	20,0803
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (25g)	25,0657
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (30g)	30,0254
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (35g)	35,0675
Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$) (40g)	40,0277

Con la abundante muestra Aro P 114 ($<125\mu\text{m}$), de una masa de 98,83 gramos, se hicieron medidas de espectrometría gamma para diferentes valores de masa, con el propósito de medir la auto absorción de la muestra. La necesidad de este estudio se debe a que en las diferentes muestras se obtuvieron masas muy variables desde 4 gramos hasta 40 gramos aproximadamente. Se realizaron cálculos y gráficas para ver si existía lo que se conoce como saturación, es decir, que a medida que la masa de una muestra incrementa y con ello la altura que ocupa en el envase de medición, también aumenta el área bajo el pico de interés o área neta (cuentas), hasta que llega a un valor en el cual la relación masa/señal pierde su proporcionalidad, y es cuando se está produciendo el proceso físico de auto absorción. En él parte de la energía emitida por la muestra, debido al espesor de la misma, es absorbida por si misma, sin que llegue a ser detectada.

Con las siguientes gráficas que a continuación se presentan se considera que en dichas muestras el proceso antes mencionado no es detectable, ya que se observan tendencias lineales que no llegan a puntos de saturación o de inflexión.

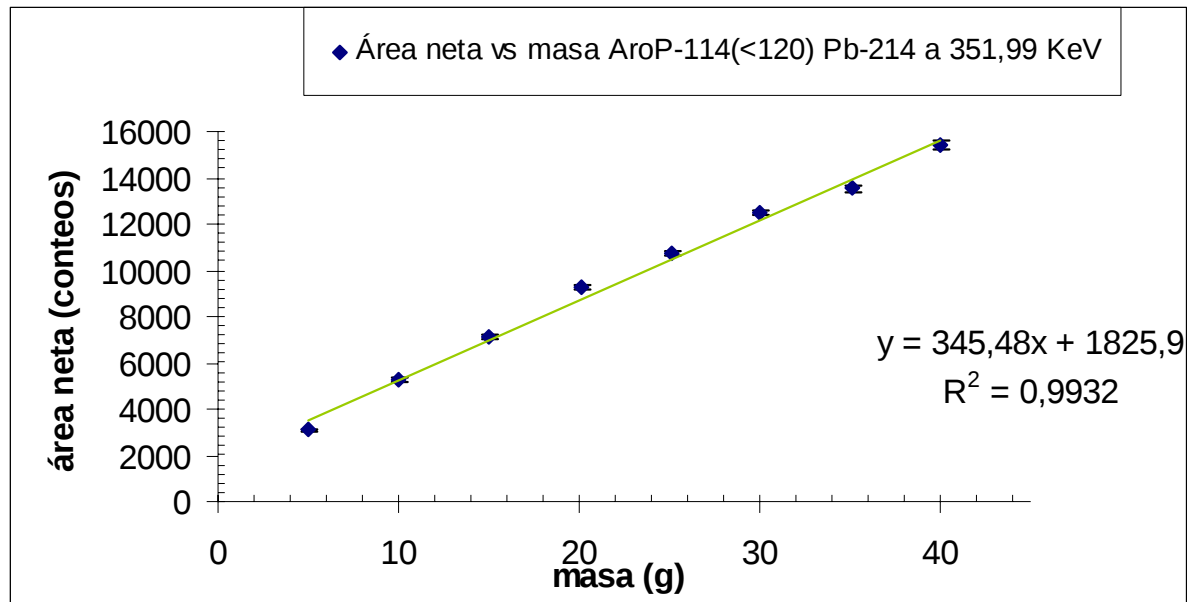


Gráfico 1. Área neta vs. masa de la muestra Aro P 114 (<125µm) para Pb-214 a 351,99 KeV.

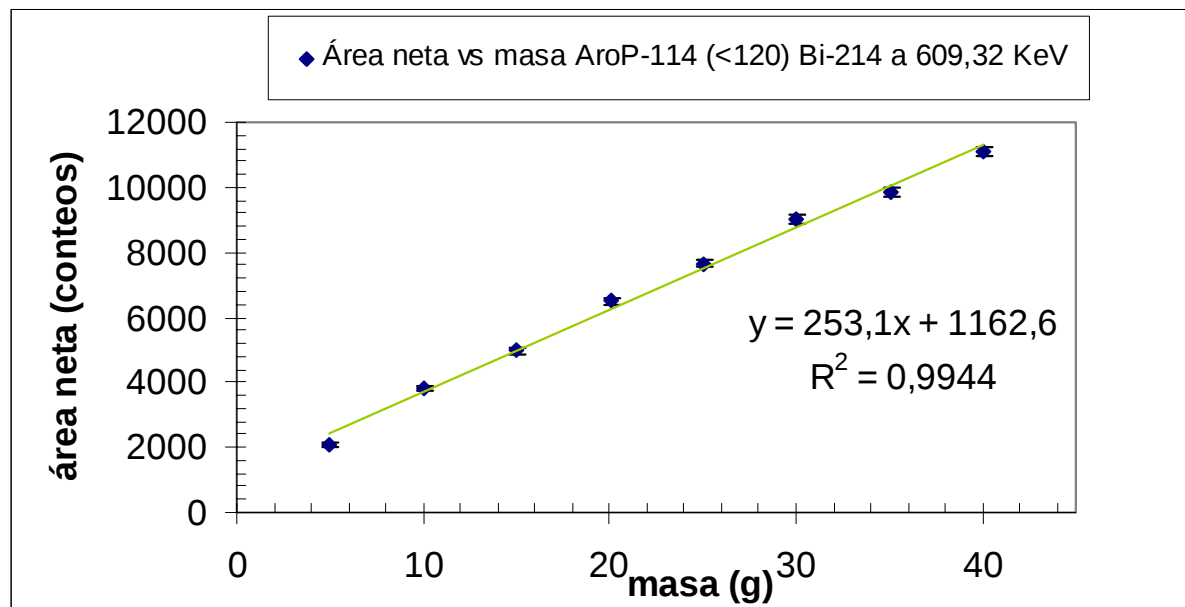


Gráfico 1.1. Área neta vs. masa de la muestra Aro P 114 (<125µm) para Bi-214 a 609,32 KeV.

Todas las graficas y tablas correspondientes a las radiaciones gammas de la muestra Aro P 114 (<125μm) se pueden observar en el apéndice A.

Se puede observar que en todas las gráficas existe una dependencia lineal del área neta del pico de conteo con la masa. Esto quiere decir que a medida que aumenta la masa de la muestra, mayor será el área neta de los picos de energía. Para todas las gráficas se realizaron líneas de tendencias, cuyas ecuaciones se presentan en cada caso con su respectivo coeficiente de correlación R^2 , los cuales son aproximadamente 0,99. Esto indica una correlación lineal entre las variables ya mencionadas. En ninguna de las gráficas se observa un punto de inflexión, es decir, no se reconocen zonas de saturación.

Se pudo determinar, que la muestra Aro P 114 (<125μm), no presenta el proceso físico de auto absorción a las condiciones que se hacen las medidas. Esto permite determinar las actividades de U y Th en las demás muestras, sin corregir por auto absorción, ya que esta muestra es muy similar en composición y densidad al resto de las muestras estudiadas.

Tabla 6. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en el espectro del fondo ambiental, señal, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	86	70
Pb-212	238,63	1664	65
Tl-208	277,36	70	65
Pb-212	300,09	172	61
Ac-228	338,40	647	58
Tl-208	510,72	2184	76

Tl-208	583,14	980	60
Tl-208	860,47	34	45
Ac-228	911,07	758	49
Ac-228	968,90	513	45
Ac-228	1630,40	28	25
Tl-208	2614,47	671	37
K-40	1460,75	2227	53

Continuación tabla 6.

El espectro de radiación gamma del fondo ambiental tomado (figura 9), es utilizado para restar los conteos netos del fondo de los conteos netos de los patrones y muestras, para así obtener solo el área neta provenientes de los patrones y de las muestras.

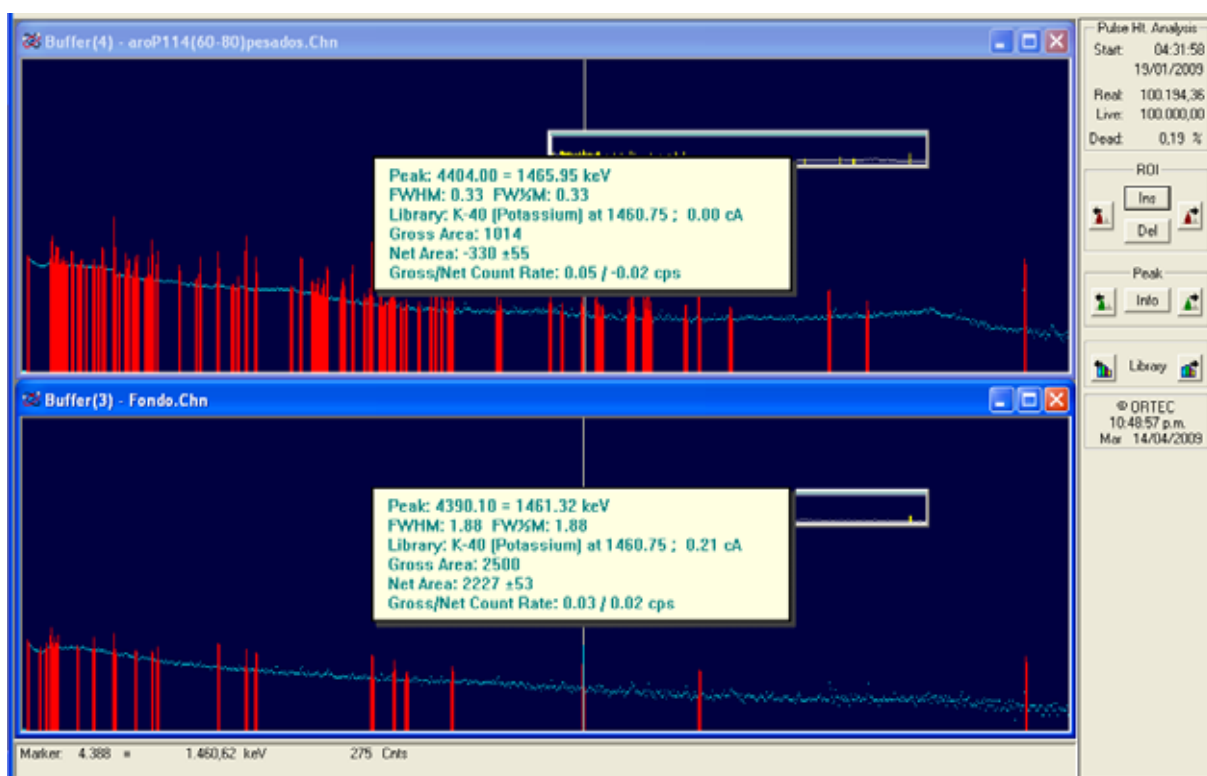


Figura 9. Espectro de radiación gamma del fondo ambiental y espectro de radiación gamma de la muestra Aro P 114 (250-177 μ m).

Se puede observar el espectro de radiación gamma del fondo ambiental en la parte inferior de la figura anterior, el cual no contiene varios picos de energía que si se detectan en las muestras. En el caso del isótopo de K^{40} , este no es detectado en ninguna de las muestras ya que presenta valores menores al fondo. El tiempo de detección de dicho espectro fue de 100.000 segundos y el tiempo de medición de la muestra Aro P 114 (250-177 μ m) fue de 20.000 segundos (parte superior de la figura 9).

A continuación se presenta una de las tablas con los datos relacionados a los patrones medidos con diversas masas, que fueron utilizados para calcular la eficiencia del detector, el resto de dichas tablas se encuentran en el apéndice A.

Tabla 7. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (5g), señal, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	2014	90
Ac-228	209,40	3178	99
Pb-212	238,63	24154	192
Ac-228	270,30	2150	82
Tl-208	277,36	1254	76
Pb-212	300,09	1750	68
Ac-228	338,40	6906	104
Tl-208	583,14	10560	118
Ac-228	772,10	333	51
Tl-208	860,47	1280	56
Ac-228	911,07	7714	96

Ac-228	1495,80	No se detecto	
Ac-228	1630,40	337	29
Tl-208	2614,47	3730	71

Continuación tabla 7.1

Se calculó la eficiencia para cada línea de energía y para cada material de referencia RGTh-1 (5g, 10g, 15g, 20g, 25g, 30g, 35g y 40g), utilizando la ecuación 1.1 antes mencionada en el marco teórico. Para dicho cálculo se tomo la actividad de las líneas de energías de los isótopos del Th-232.

Ecuación 1.2. Eficiencia del detector

$$\varepsilon = \frac{(A_m/t_m) \text{ para una energía en particular} - (A_f/t_f) \text{ para una energía en particular}}{\text{Actividad (Bq/Kg)} \cdot m \cdot P_\gamma}$$

El tiempo de medición utilizado para los patrones fue de 60.000 segundos y para el espectro de fondo, se midió en un tiempo de 100.000 segundos. La actividad del Th-232 y los isótopos de su serie de desintegración reportada para el patrón es igual a 3250 Bq/Kg, suponiendo el equilibrio secular, es decir, que la actividad del Th²³² es igual a la actividad de Ac²²⁸y Pb²¹². Para el Tl²⁰⁸ es un 36% de la misma, ya que según el esquema de desintegración de la serie del Th²³² (figura 5), solamente el 36% del Bi²¹² se desintegra a Tl²⁰⁸ mientras que el resto (64%) se desintegra a Po²¹².

Las tablas de las eficiencias calculadas de los materiales de referencia, para las respectivas líneas de energía, con los cuales se realizaron las graficas de eficiencia vs. masa,

siguiendo el trabajo realizado por la metodología de Pérez 2002, se pueden ver en el apéndice A.

Se presentan la serie de gráficas obtenidas para las eficiencias calculadas vs. masa, con las cuales se observa una tendencia lineal entre los datos, que corresponden a una dependencia entre las variables.

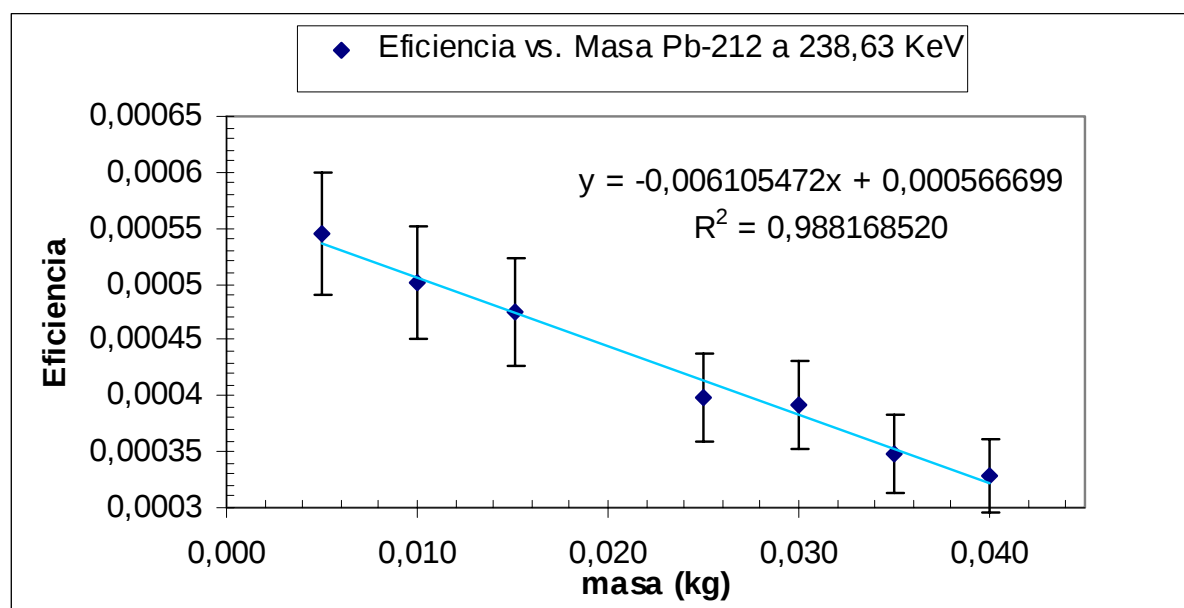


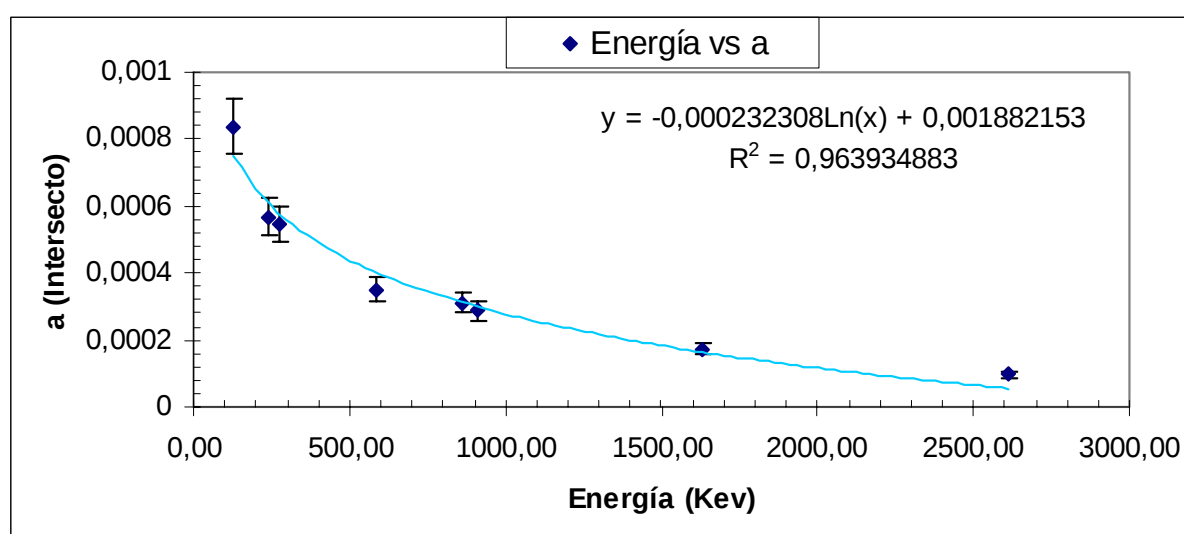
Gráfico 2. Eficiencia vs. masa Pb-212 a 238,63 KeV.

Con todas las ecuaciones de líneas de tendencias que corresponden a ecuaciones de primer grado del tipo: $Ef = a + bX$ (ecuación 2), donde “a” es el punto de corte, “b” es la pendiente de la gráfica y X es la masa del patrón, se procedió a realizar las gráficas de “a” vs. energía y “b” vs. energía, de tal manera que al graficar estas variables, se pudo determinar una dependencia entre la eficiencia y la energía, además de obtener dos ecuaciones (una para a y otra para b) en función de la energía. Estas, al ser sustituidas en la ecuación de Ef., se llegó a una expresión matemática de la eficiencia en función de la energía y de la masa, que será utilizada más adelante.

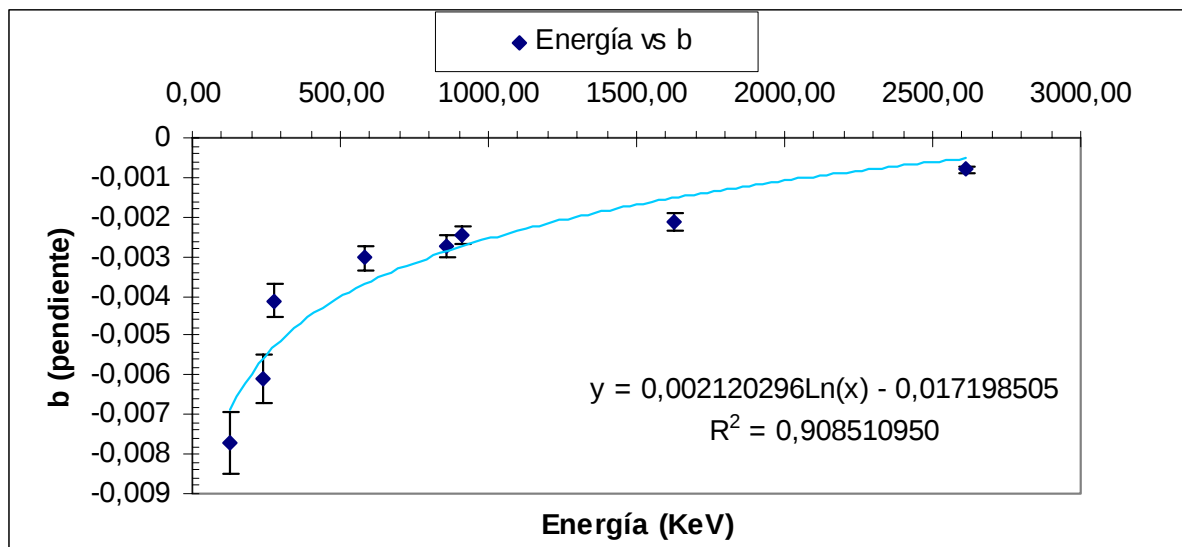
A continuación se presenta una tabla donde se encuentran los valores de los parámetros a y b de las ecuaciones de tendencias antes mencionadas y la energía correspondiente, que fueron graficados (gráfica 3 y gráfica 3.1).

Tabla 8. Valores de los parámetros a y b de la ecuación de la eficiencia y las energías correspondientes.

Elemento	Energía (KeV)	a	b
Ac-228	129,10	0,000838459	-0,007732271
Pb-212	238,63	0,000566699	-0,006105472
Tl-208	277,36	0,000544799	-0,004116776
Tl-208	583,14	0,000351459	-0,00303115
Tl-208	860,47	0,000312056	-0,002735162
Ac-228	911,07	0,000287869	-0,002458088
Ac-228	1630,40	0,000174012	-0,002118685
Tl-208	2614,47	0,000095409	-0,00080179



Gráfica 3. Punto de corte (a) de las rectas de eficiencia vs. energía (KeV).



Gráfica 3.1. Pendiente (b) de las rectas de eficiencia vs. energía (KeV).

Para las gráficas anteriores se tomó en cuenta un error aproximado del 10%, el cual es un error típico de las mediciones de espectrometría gamma

Ecuación 2.1. Punto de corte (a) en función de la energía.

$$a = -0,000232308 \ln(x) + 0,001882153$$

Ecuación 2.2. Pendiente (b) en función de la energía.

$$b = 0,002120296 \ln(x) - 0,017198505$$

Luego a y b se sustituyen en la ecuación 2, y se obtiene:

$$Ef = (-0,000232308 \ln (E/E_0) + 0,001882153) + (0,002120296 \ln (E/E_0) - 0,017198505) \cdot (m/m_0) \text{ (ecuación 2.3)}$$

Donde, E = energía en KeV, $E_0 = 1 \text{ KeV}$, m = masa en kg. y m_0 es 1kg.

Seguidamente se presentan todos los datos de los isótopos de interés detectados por espectrometría gamma en algunas de las muestras, las demás tablas se pueden encontrar en el apéndice A.

Tabla 9. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en la muestra Aro 46P (<125 μ m), señal, energía, área neta, error, probabilidad de emisión.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta	Error +-	Probabilidad Emisión (%)
Pb-214	351,99	18281	164	37,10
Bi-214	609,32	12897	144	46,10
Bi-214	934,05	619	62	3,16
Bi-214	1120,28	2493	77	15,00
Bi-214	1238,11	939	56	5,92
Bi-214	1377,65	686	56	4,02
Bi-214	1729,60	527	40	3,04
Bi-214	1764,51	2367	59	15,90
Bi-214	2204,12	608	42	4,99
Ac-228	129,10	6069	154	2,92
Ac-228	209,40	11072	175	4,50
Pb-212	238,63	142955	438	43,60
Ac-228	270,30	8190	139	3,43
Ac-228	463,00	6827	120	4,44
Tl-208	510,72	10501	141	22,60
Tl-208	583,14	37878	216	84,50
Ac-228	794,80	4360	93	4,84
Tl-208	860,47	4850	94	12,40
Ac-228	911,07	27556	177	26,60
Bi-212	1620,56	1136	50	2,75
Tl-208	2614,47	11904	127	100,00

Las siguientes tablas contienen las actividades calculadas de los isótopos hijos detectados por espectrometría gamma, de las series del U^{238} y Th^{232} . El resto de las tablas se pueden ver en el apéndice B.

Tabla 10. Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro 46P (<125 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351,99	1954,78	195,48
Bi-214	609,32	1464,86	146,49
Bi-214	934,05	1393,21	139,32
Bi-214	1120,28	1381,78	138,18
Bi-214	1238,11	1453,83	145,38
Bi-214	1377,65	1756,26	175,63
Bi-214	1729,60	2416,60	241,66
Bi-214	1764,51	2070,09	207,01
Bi-214	2204,12	2729,66	272,97
Ac-228	129,10	5728,50	572,85
Ac-228	209,40	7995,38	799,54
Pb-212	238,63	11159,46	1115,95
Ac-228	270,30	8552,16	855,22
Ac-228	463,00	7019,67	701,97
Tl-208	510,72	2140,14	214,01
Tl-208	583,14	2307,50	230,75
Ac-228	794,80	5678,25	567,83
Tl-208	860,47	2607,84	260,78
Ac-228	911,07	7185,15	718,51
Bi-212	1620,56	5228,10	522,81
Tl-208	2614,47	4605,93	460,59

Continuación tabla xx.

Tabla 11. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Pb^{212} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro 46 P ($<125 \mu m$).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	1955	195
Promedio Bi-214	1833	183
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	7027	703
Promedio Pb-212	11159	1116
Promedio Bi-212	5228	523
Promedio Tl-208	2915	292

La actividad promedio detectada para los isótopos de la serie del Th^{232} en la muestra Aro 46P ($<125 \mu m$), indica que no existe equilibrio secular en esta serie. Sin embargo al tomar en cuenta que el Bi^{212} se desintegra en un 36% en Tl^{208} y se calcula su actividad a partir de este ultimo, se obtiene que la actividad es aproximadamente igual al del Ac^{228} , por lo que si se encuentra en equilibrio secular la serie. Hay que indicar que en el caso de la serie del U^{238} se detectó el isótopo Th^{234} , pero no se pudo calcular su actividad porque su línea de energía (63,29 KeV) esta por debajo de la curva de calibración.

También se detectó U^{235} y Ra^{226} , pero estos isótopos presentan líneas de energías muy cercanas de 185,72 y 185,99 KeV respectivamente, por lo que estos picos en los espectros se solapan. Debido a esto no se pudo calcular la actividad de dichos isótopos en las muestras que lo contienen.

Tabla 12. Actividad promedio de Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 58 ($<125 \mu\text{m}$).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Bi-214	60	6
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	147	15
Promedio Tl-208	62	6

Los isótopos detectados por espectrometría gamma de la muestra Aro P 58 que fueron utilizados para calcular su actividad son, el Bi^{214} , el Ac^{228} y el Tl^{208} , esto se debe a que varios de los isótopos detectados presentan una tasa de conteos menor a la tasa de conteos del espectro del fondo ambiental, lo que indica, que la concentración de U^{238} y Th^{232} en esta muestra es muy bajo y no pueden ser detectados todos los isótopos de las respectivas series, por su baja estadística de conteos. Esto corresponde con lo descrito por Pasquali en el 2006, que indica que esta muestra presenta valores bajos de dichos elementos, en comparación con el resto de las muestras analizadas.

Tabla 13. Actividad promedio de Pa^{234} , Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 102 ($250\text{-}177 \mu\text{m}$).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pa-234	2833	283
Promedio Pb-214	1388	139
Promedio Bi-214	1242	124
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	14262	1426

Promedio Tl-208	5480	548
-----------------	------	-----

En la muestra Aro P 102 (250-177 μ m), se pudo detectar el Pa²³⁴ que es un isótopo hijo del Th²³⁴, primer radinucleido hijo de la serie, que al ser comparada su actividad con el Bi²¹⁴, se determina que la serie del U²³⁸ no se encuentra en equilibrio secular. Otra posible hipótesis para que no exista equilibrio en dicha serie, es que el uranio este siendo lixiviado del sistema, ya que por las condiciones oxidantes del ambiente de sedimentación el uranio es móvil. También puede estar ocurriendo que el Rn²²² otro isótopo producto de desintegración, este siendo removido del sistema por fugacidad y se este rompiendo el equilibrio secular en esta serie (Edsfeldt, 2001).

Para la serie del Th²³² se puede decir que se encuentra en equilibrio secular, ya que las actividades de dos isótopos de la serie, el Ac²²⁸ y el Bi²¹² son iguales al tomar en cuenta la actividad del Tl²⁰⁸.

Tabla 14. Actividad promedio de Pb²¹⁴, Bi²¹⁴, Ac²²⁸ y Tl²⁰⁸ en la muestra Aro P 107 (250-177 μ m).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	408	41
Promedio Bi-214	366	37
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	903	90
Promedio Tl-208	292	29

En el caso de la muestra Aro P 107 (250-177 μm), solo se pudo calcular la actividad promedio para el caso de la serie del U^{238} , de los isótopos Pb^{214} y Bi^{214} , quienes no difieren en sus valores al tomar en cuenta el error del 10%, con esta información no se puede determinar si existe o no equilibrio secular en esa serie. Para el caso de la serie del Th^{232} , si hay equilibrio secular.

Tabla 15. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 108 (>500 μm).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	1327	133
Promedio Bi-214	1179	118
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	8893	889
Promedio Tl-208	3238	324

De igual forma que la muestra anterior, en esta, no se puede determinar si hay equilibrio secular en la serie del U^{238} , y para la serie del Th^{232} , se ve claramente según los valores promedios de las actividades que se encuentra en equilibrio secular tomando en consideración lo antes explicado.

Tabla 16. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 108 (500-250 μm).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	2164	216

Promedio Bi-214	2026	203
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	17798	1780
Promedio Bi-212	11089	1109
Promedio Tl-208	7510	751

Continuación de tabla 16.

Según las actividades promedios calculadas para la serie del Th^{232} en la muestra Aro P 108 (500-250 μm), esta si se encuentra en equilibrio secular. Para la serie del U^{238} no se puede determinar el equilibrio secular, si se puede notar que la actividad del Pb^{214} y el Bi^{214} son iguales. Esto ocurre también para la fracción de 250 a 177 μm (tabla 17).

Tabla 17. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} y Tl^{208} en la muestra Aro P 108 (250-177 μm).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	2200	220
Promedio Bi-214	2022	202
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	19312	1931
Promedio Tl-208	6929	693

Se ha determinado que para todas las fracciones granulométricas de la muestra Aro P 108, que existe equilibrio secular para la serie del Th^{232} y no se puede determinar esto para la serie del U^{238} , lo que brinda una información más amplia acerca de los procesos geoquímicos que ocurren en dicha muestra, ya que en diversos tamaños de granos ocurre el

mismo fenómeno de no poder determinar la concentración de U^{238} . Esto se puede deber a que el uranio presente en los minerales pueda estar siendo disuelto en el agua, debido a condiciones oxidantes del medio, lo que rompería el equilibrio secular de la serie.

Tabla 18. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra

Aro P 109 (250-177 μm).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	393,59	39,36
Promedio Bi-214	471,54	47,15
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	1249	125
Promedio Bi-212	822	82
Promedio Tl-208	538	54

De manera similar que las muestras anteriores se determina que existe equilibrio secular en la serie del Th^{232} y en el caso de la serie del U^{238} , no se puede determinar, al no detectar el Th^{234} .

También ocurre el mismo comportamiento para la muestra Aro P 114 (250-177 μm) (tabla 19), que los isótopos hijos del Th^{232} presentan una mayor estadística de conteos, por lo que se pueden determinar más líneas de energías del Ac^{228} y el Tl^{208} , lo que corresponden a isótopos que se encuentran al principio y al final de la serie de desintegración respectivamente.

Tabla 19. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 114 (250-177 μm).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	1955	196
Promedio Bi-214	1779	178
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	12651	1265
Promedio Bi-212	8004	800
Promedio Tl-208	5288	529

Para la fracción menor a 125 μm de la muestra Aro P 114, se hicieron los cálculos de la actividad, para la submuestra de 35 gramos, esta se tomo al azar. El equilibrio secular no se puede determinar de igual forma para la serie del U^{238} y para la serie del Th^{232} , este si ocurre. Al comparar dichos valores con la fracción de 250-177 μm , se observa que estos son menores.

Tabla 20. Actividad promedio de Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Bi^{212} y Tl^{208} en la muestra Aro P 114 (<125 μm).

Serie: Uranio-238	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Pb-214	1455	145
Promedio Bi-214	1402	140
Serie: Torio-232	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Promedio Ac-228	5579	558
Promedio Bi-212	3510	351

Promedio Tl-208	2491	249
-----------------	------	-----

Continuación tabla 20.

La metodología aplicada en esta investigación de espectrometría de radiaciones gamma, puede ser utilizada para hacer mediciones de materiales naturales y en la resolución de problemas geoquímicos, ya que puede ser usada junto con otras técnicas para métodos de prospección geoquímica de sedimentos fluviales de minerales pesados, aplicaciones de geoquímica ambiental e inferencias de procesos geoquímicos como por ejemplo:

Según Pasquali, 2006, en el curso medio del río Arizo hay un sector de baja pendiente en donde se han depositado aluviones dominados por arcillas, con algo de cuarzo. Estos depósitos sedimentarios son extensos y pudieran constituirse en un blanco económico. Al medir la radiación gamma total del material, se puede indicar si dichas arcillas pueden ser aptas o no para la elaboración de ladrillos y bloques, tomando en cuenta que no sea mayor que la permitida legalmente para una vivienda. Por otro lado al analizar los isótopos de las series radiactivas y establecer la existencia, o no existencia, de un equilibrio secular, se puede inferir, por ejemplo, si el uranio contenido en los materiales está siendo concentrado o lixiviado en los aluviones a través del tiempo; de igual forma para el caso del torio se puede razonar similarmente. Esto, a su vez, permite detectar la presencia o efectividad de un proceso geoquímico difícil de detectar con otras metodologías.

La tabla 21, presenta los principales minerales pesados identificados por análisis de difracción de rayos X de las muestras estudiadas, para las fracciones magnéticas y fracciones no magnéticas.

Tabla 21. Minerales pesados identificados de las muestras en las fracciones magnéticas y no magnéticas.

Muestra	Tamaño (μm)	Minerales en fracciones magnéticas	Minerales en fracciones no magnéticas
ARO 46-P	<125 μm	Ilmenita, hematita, lipscombite, rutilo de niobio y crossite.	Monacita, circón, xenotima y cuarzo
ARO 58-P	<125 μm	Ilmenita, hematita, goethita y cuarzo.	Microclino, cuarzo, circón y clinocloro.
ARO P 102	250-177 μm	Ilmenita.	Monacita, circón y cuarzo.
ARO P 107	250-177 μm	Ilmenita y hematita.	Monacita, circón y cuarzo.
ARO P 108	>500 μm	Ilmenita.	Monacita, circón, torita y cuarzo.
ARO P 108	500-250 μm	Ilmenita.	Monacita, circón y cuarzo.
ARO P 108	250-177 μm	Ilmenita.	Monacita, circón y cuarzo.
ARO P 109	250-177 μm	Ilmenita.	Monacita, circón y cuarzo.
ARO P 114	250-177 μm	Ilmenita.	Monacita, circón y cuarzo.
ARO P 114	<125 μm	Ilmenita y rutilo.	Monacita, tremolita, circón y cuarzo.

En el apéndice C, se encuentra una tabla con las formulas químicas de las fases minerales determinadas, tomadas de la base de datos del laboratorio de difracción de rayos X, así como los espectros de difracción correspondientes.

Los elementos Th y U se pueden encontrar en la mayoría de los minerales identificados de las fracciones no magnéticas de los minerales pesados, como Th^{+4} y U^{+4} , sustituyendo a elementos químicos tales como: Zr, Y, Tierras Raras (Ce, La), en la red cristalina. Es un proceso de sustitución iónica por tener un radio muy similar, y no se trata de procesos de adsorción. Estas fases minerales son resistentes, es decir, son resistentes a la meteorización química y física, por lo que el uranio y el torio se mantienen en el mineral (Herrera, 2004).

También el uranio y el torio pueden encontrarse en los minerales magnéticos tipo ilmenita, rutilo, entre otros, como sustituciones de elementos como el hierro, por lo que la actividad determinada de los isótopos hijos de cada serie, pueden ser la suma de las actividades de estos elementos en ambos tipos de minerales y en la gama de minerales intermedios magnéticamente (Pasquali, 2006).

Las posibles fugas de estos elementos y su posterior movilidad en el caso del uranio como UO_2^{2+} (U^{+6}), y del torio formando óxidos, pueden deberse a la desestabilización de la red cristalina por procesos de desintegración radiactiva, ya que se forman elementos incompatibles en los minerales con radios iónicos distintos como por ejemplo, plomo, tántalo, bismuto, o gases nobles como el radón, que son producto de las series de desintegración del uranio y el torio (Palacios, 2007).

Según la mineralogía encontrada en los sedimentos del río Arizo, que el origen de los minerales puede ser una roca pegmatita y/o rocas metamórficas, ya que minerales similares con concentraciones anómalas de uranio y torio, fueron encontrados por Leonzi en 1984, en suelos de la región de El Baúl, producto de la alteración de rocas ígneas ricas en U y Th.

Los principales minerales encontrados fueron: circón, monacita y óxidos de uranio y torio. Estos minerales igualmente fueron determinados en las muestras de minerales pesados analizados en esta investigación. En la muestra Aro - 46 P, se determinó, por análisis de difracción de rayos X, una fase mineral llamada Lipscombite que es un hidroxifosfato de hierro, que fue reportado por Colombo y colaboradores en el 2007, en rocas pegmatíticas en Argentina, lo que lleva a señalar este posible origen para las muestras analizadas, ya que este mineral no es común y, según estos autores, es típico de este tipo de litologías.

Hay que mencionar que el cuarzo determinado por análisis de difracción de rayos X, en las muestras analizadas, se puede encontrar debido a que el método de separación hidrodinámico, no es 100% efectivo, por lo que esta fase mineral se mezcla con las fracciones no magnéticas de los minerales pesados, además se encuentra en diversos tamaños de granos.

CONCLUSIONES

- Los isótopos detectados a través de la técnica de espectrometría gamma en las muestras analizadas fueron: Pa^{234} , Pb^{214} , Bi^{214} para la serie del U^{238} y para la serie del Th^{232} fueron: Ac^{228} , Pb^{212} , Bi^{212} y Tl^{208} , pudiendo calcular su actividad luego de realizar la debida calibración en energía y eficiencia.
- Se determinó que la serie del Th^{232} si se encuentra en equilibrio secular en las muestras de minerales pesados analizadas. No se pudo determinar la actividad del U^{238} al no poder establecer la existencia del equilibrio secular en la serie, para todas las muestras.
- Los espectros gamma de las muestras de minerales pesados analizados, arrojan diferencias con el espectro de fondo porque presentan mayor cantidad de picos de isótopos de interés y mayor estadística de conteo, es decir, se determinaron picos de energías en las muestras que no fueron determinados en el espectro de fondo, lo que indica que estas líneas de energía y sus isótopos productores son originados solamente por las muestras y no se encuentran en la radiación ambiental.
- Al establecer una metodología y una expresión matemática de la eficiencia en función de la energía y de la masa, se está brindando un aporte a futuras investigaciones, que utilicen muestras muy similares de minerales pesados y con un rango de masas correspondientes entre 5 a 40 gramos, que fue lo que se utilizó para esta investigación.
- Se estableció que en las muestras analizadas no se produce el fenómeno físico de auto absorción, por lo menos en el rango de 5 a 40 gramos, lo que establece que no se debe

hacer la corrección por auto absorción de las muestras, en los cálculos de la actividad de los isótopos detectados.

- Una de las ventajas del análisis por espectrometría gamma es que no destruye la muestra, lo que puede servir para realizar otras mediciones químicas en las mismas muestras.
- Las principales fases minerales encontradas en las muestras de minerales pesados analizadas están constituidas principalmente por dos grupos, los minerales magnéticos conformados por óxidos de hierro y titanio principalmente como, ilmenita, rutilo, magnetita, hematita, goethita, lipscombite y crocoíta; y los minerales no magnéticos en su mayoría fosfatos de tierras raras, torio y uranio como monacita y xenotima; óxidos de circonio y torio como circón y torita; feldespato como microclino y otros minerales como tremolita, clinocloro y cuarzo.
- Los minerales determinados son ricos en elementos de las tierras raras, circonio, torio, uranio, hierro, titanio, calcio y magnesio. Esto hace que sean de interés para estudios futuros de prospección geoquímica en la zona del río Arizo y su cuenca, ya que son elementos químicos de alto valor económico en la actualidad, en especial el uranio, el, las tierras raras y el titanio.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la comunidad científica en el área de Geoquímica el uso de la técnica de espectrometría gamma, ya que se pueden realizar análisis isotópicos cualitativos y cuantitativos de muestras naturales, que pueden servir para resolver problemas en diversas líneas de investigación como prospección geoquímica, geoquímica ambiental y química analítica aplicada a geoquímica.
- Se pueden realizar análisis de espectrometría gamma más detallados de las fracciones granulométricas y de las fracciones magnéticas, al obtener una mayor proporción de masa de muestras de concentrados de minerales pesados.
- Se sugiere medir a través de la técnica de espectrometría gamma muestras con un rango de masas mayor a 40 gramos, para poder determinar si puede ocurrir el proceso físico de auto absorción de las muestras, ya que en el presente trabajo solo se pudo analizar muestras con un valor de masa de aproximadamente 40 gramos, y al realizar las gráficas de área neta vs. la masa, solo se observa una tendencia lineal y no un punto de inflexión en la mayoría de dichas gráficas.
- Se recomienda hacer análisis químicos en las muestras de minerales pesados para comparar los valores de concentración de uranio y torio, así como de realizar análisis de ICP acoplado a masas, para determinar la concentración de los radionúclidos analizados por espectrometría gamma.

BIBLIOGRAFÍA

- Asfahani, J., Aissa M. and Al-Hent R, Uranium migration in a sedimentological phosphatic environment in Northern Palmyrides, Al-Awabed área, Syria, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 65 pp. 1078-1086, 2007.
- Colombo, F., Pannunzio, E., Gay, H., Lira, R. y Dorais, M, Barbosalita y lipscombite en Cerro Blanco, Córdoba (Argentina): descripción y génesis de fosfatos secundarios en pegmatitas con triplita y apatita, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 24, núm. 1. pp. 120-130, 2007.
- Cuculic, V., Cukrov, N., Barisic, D. and Mlakar M, Uranium in sediments, mussels and seawater of the Krka river estuary, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 85 pp. 59-70, 2006.
- Dana, J. D., Manual de mineralogía, ^{4ta}Ed, *Editorial Reverté, S.A.* vol. 1 y 2. 2001.
- Diccionario Enciclopédico Vox, Mineralogía-Geología, *Circulo de Lectores, S.A.* España, 1980.
- Edsfeldt, Cecilia, The radium distribution in some swedish soils and its effect on radon emanation, Division of Engineering Geology, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.

- Friedlander, G. and Kennedy J, Nuclear and Radiochemistry, *John Wiley and Sons*. 1960.
- Herrera G, María A, Caracterización geoquímica de los minerales pesados provenientes de la cuenca del río Aro, estado Bolívar, Venezuela, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 2004.
- Jiménez M, Yalimay M, Cartografía geoquímica de las cuencas de los ríos Caura y Aro, a través de los sedimentos fluviales, con fines prospectivos, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 2004.
- Knoll, Glenn F., Radiation detection and measurements, ^{2st}Ed, *John Wiley and Sons*. 1989.
- Leonzi L, Luisa M, Prospección geoquímica de uranio en la región del Baúl, estado Cojedes, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 1984.
- Loría, L. G., Jiménez, R. y Bobadilla, M, Análisis por espectrometría gamma de fertilizantes de uso en Costa Rica, *Agronomía Costarricense*, vol. 26(1) pp. 25-32, 2002.
- Mendoza S, Vicente, Evolución geotectónica y recursos minerales del escudo de Guayana en Venezuela (y su relación con el escudo Sudamericano), Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad de Oriente, Venezuela, 2000.

- Orgun, Y., Altinsoy, N., Sahin, S. Y., Gungor, Y., Gultekin, A. H., Karahan, G. and Karacik, Z, Natural and anthropogenic radionuclides in rocks and beach sands from Ezine region (Canakkale), Western Anatolia, Turkey, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 65 pp. 739-747, 2007.
- Palacios D., Alfonso J., Barros H., LaBrecque J., Perez Karla, Lossada M., Asemi-empirical approach to determine gamma activities (Bq kg^{-1}) in environmental cylindrical samples, *Radiation Measurements*, vol. 43 (1) pp. 77-84, 2007.
- Pasquali Z, Jean, Análisis de algunas muestras de minerales pesados por activación de neutrones de la cuenca del río Aro, Proyecto FONACIT Río Aro: Diagnostico de la cuenca. Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 2006.
- Pérez F, Héctor E, Caracterización del contenido radioactivo gamma del suelo de la costa sur de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001. En Internet se puede consultar en: http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/hector_p/tesis.html.
- Pérez Moreno, J.P., San Miguel, E., Bolívar, J. y Aguado, J., A comprehensive calibration method of Ge detectors for low level gamma spectrometry measurements, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, section A. 491, pp. 152-162, 2002.

- Powell, Brian A., Hughes, Lara D., Soreefa, A., Falt, D., Wall, M and DeVol, T, Elevated concentrations of primordial radionuclides in sediments from the Reedy River and surrounding creeks in Simpsonville, South Carolina, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 94 pp. 121-128, 2007.
- Sifontes G, Ramón S, Informe geológico del río Aro (Diagnóstico de la Cuenca), Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 2003.
- Texeira, W., Tassinari, CC.G., Szabó, G.A.L., Mondin, M., Sato. K, Santos, A.P. Siso, C.S., Nd isotopic constraints on the protolith age of The Archean Imataca Complex, Venezuela. En: 31 Int. Geol. Congress, Río de Janeiro, Brasil, Agosto 2000.
- Yeager, K. M., Santschi, P. H., Phillips, J.D. and Herbert, B. E, Sources of alluvium in a coastal plain stream based on radionuclide signatures from the ^{238}U and ^{232}Th decay series, *Water Resources Research*, vol. 38 (11) pp. 1242, 2002.

APÉNDICES

Apéndice A. Tablas con información de los espectros gammas de las muestras y materiales de referencia analizados.

Tabla 5.1. Muestra Aro P 114 (<125µm) para Th-234 a 63,29 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	331	61
10,0431	451	79
15,0180	506	91
20,0803	756	102
25,0657	683	110
30,0254	804	118
35,0675	911	124
40,0277	699	131

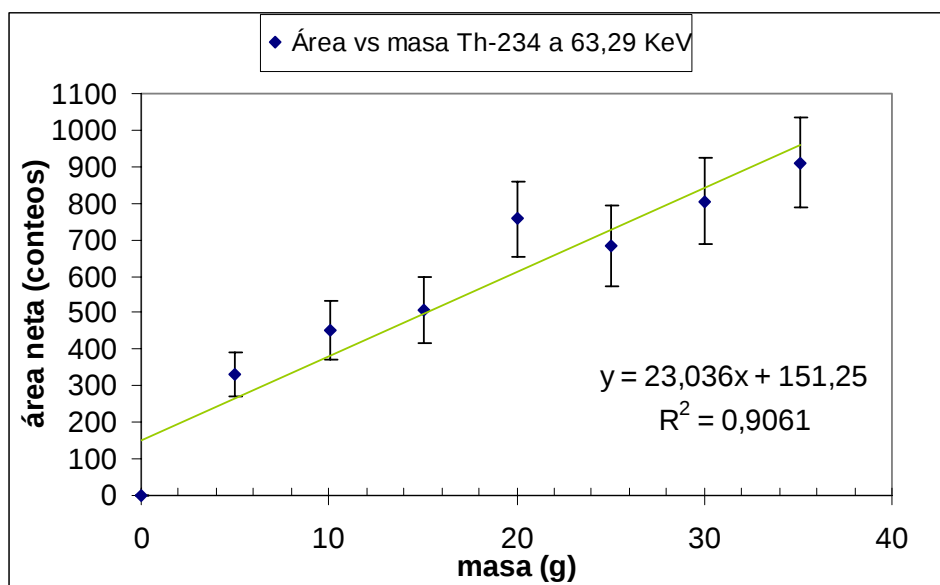


Gráfico 1.1. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114 (<125µm) para Th-234 a 63,29 KeV.

Tabla 5.2. Muestra Aro P 114 (<125µm) para Th-234 a 114,50 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	260	58
10,0431	413	73
15,0180	811	85
20,0803	1075	97
25,0657	1164	105
30,0254	1200	114
35,0675	1257	123
40,0277	1515	130

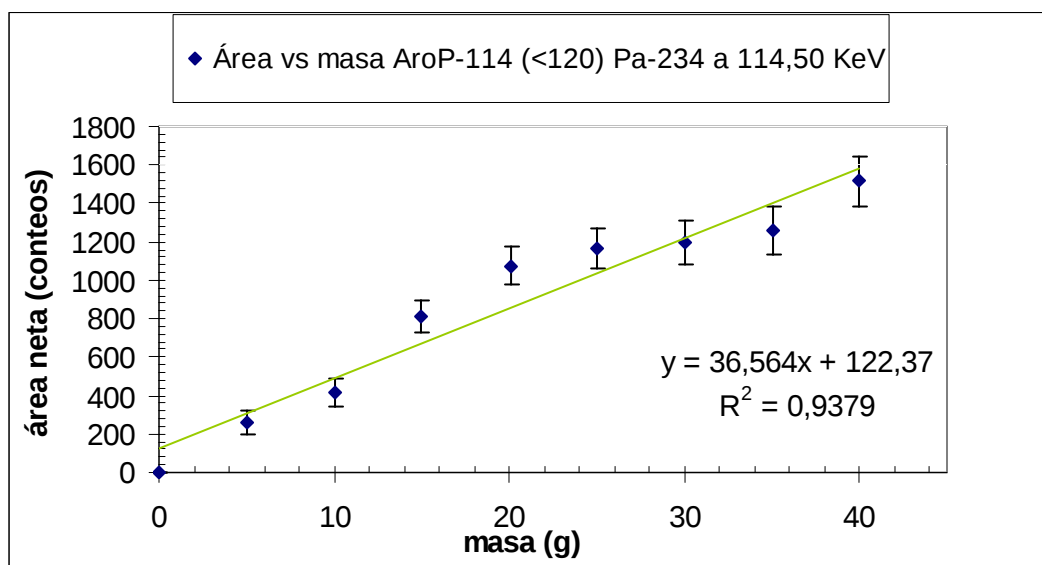


Gráfico 1.2. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114 (<125µm) para Pa-234 a 114,50 KeV.

Tabla 5.3. Muestra Aro P 114 (<125µm) para Pb-214 a 351,99 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	3099	69
10,0431	5257	89
15,0180	7104	102
20,0803	8287	117
25,0657	10726	126
30,0254	12487	137
35,0675	13532	143
40,0277	15417	152

Tabla 5.4. Muestra Aro P 114 (<125µm) para Bi-214 a 609,32 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	2070	60
10,0431	3833	79
15,0180	4970	89
20,0803	6489	103
25,0657	7647	112
30,0254	9019	121
35,0675	9845	129
40,0277	11070	135

Tabla 5.5. Muestra Aro P 114 (<125μm) para Bi-214 a 1764,51 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	468	25
10,0431	693	32
15,0180	973	37
20,0803	1134	42
25,0657	1440	45
30,0254	1635	49
35,0675	1832	54
40,0277	2087	55

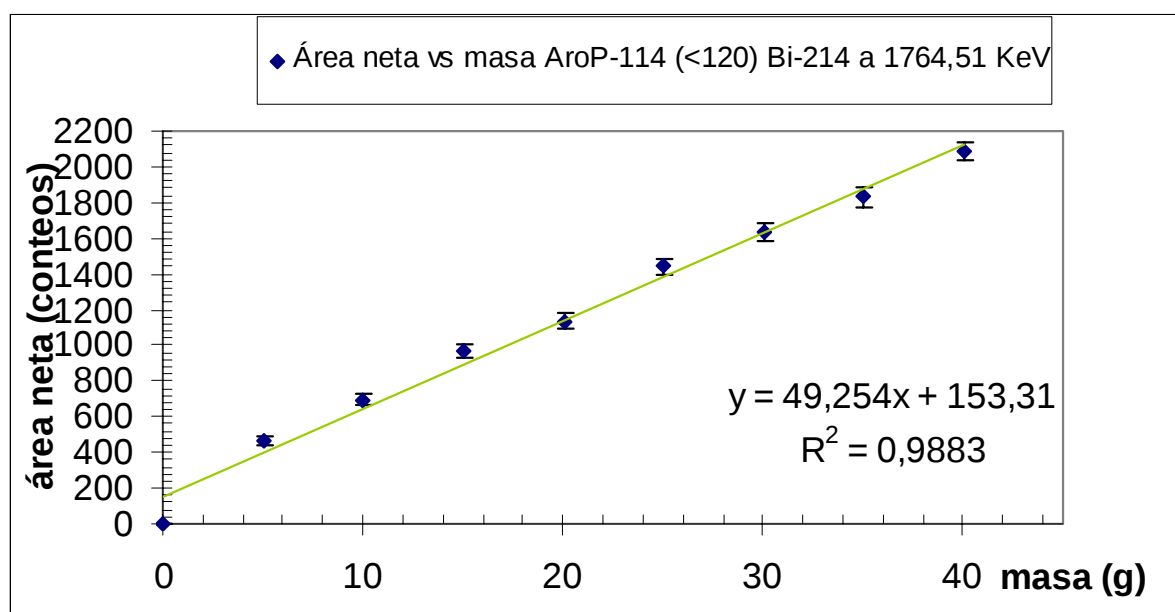


Gráfico 1.3. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114(<125μm) para Bi-214 a 1764,51 KeV.

Las siguientes tablas y gráficas corresponden a las líneas de energía de la serie de desintegración del Th-232.

Tabla 5.6. Muestra Aro P 114 (<125μm) para Ac-228 a 209,40 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	1961	73
10,0431	3410	96
15,0180	4693	111
20,0803	6005	127
25,0657	6873	139
30,0254	8115	150
35,0675	9088	161
40,0277	9982	170

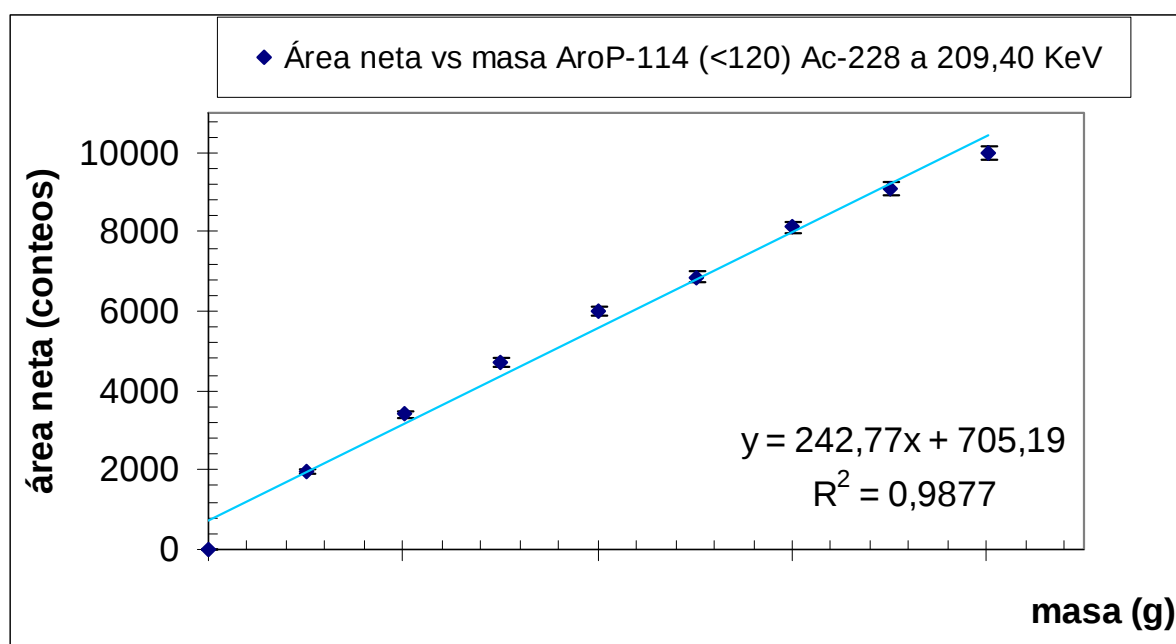


Gráfico 1.4. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114(<125μm) para Ac-228 a 209,40 KeV.

Tabla 5.7. Muestra Aro P 114 (<125µm) para Tl-208 a 277,36 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	No se detecto	
10,0431	1257	70
15,0180	1745	81
20,0803	2353	93
25,0657	2901	101
30,0254	3316	108
35,0675	3683	116
40,0277	4340	124

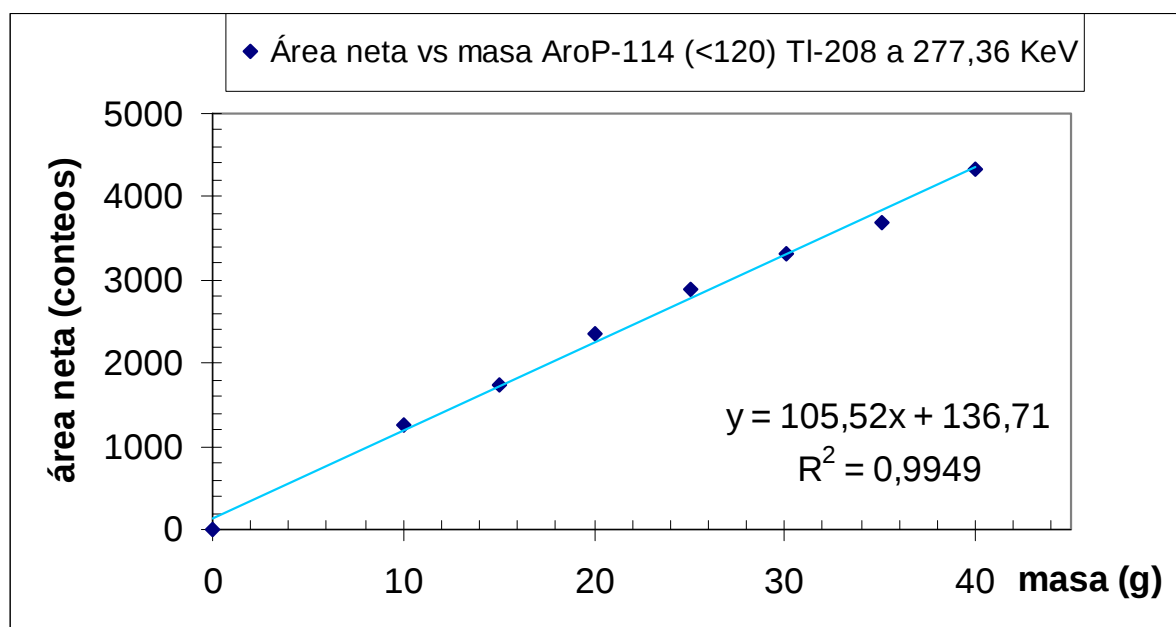


Gráfico 1.5. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114(<125µm) para Tl-208 a 277,36 KeV.

Tabla 5.8. Muestra Aro P 114 (<125µm) para Tl-208 a 583,14 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	6310	89
10,0431	11287	120
15,0180	15460	139
20,0803	20396	158
25,0657	23970	172
30,0254	27949	187
35,0675	31176	197
40,0277	35387	209

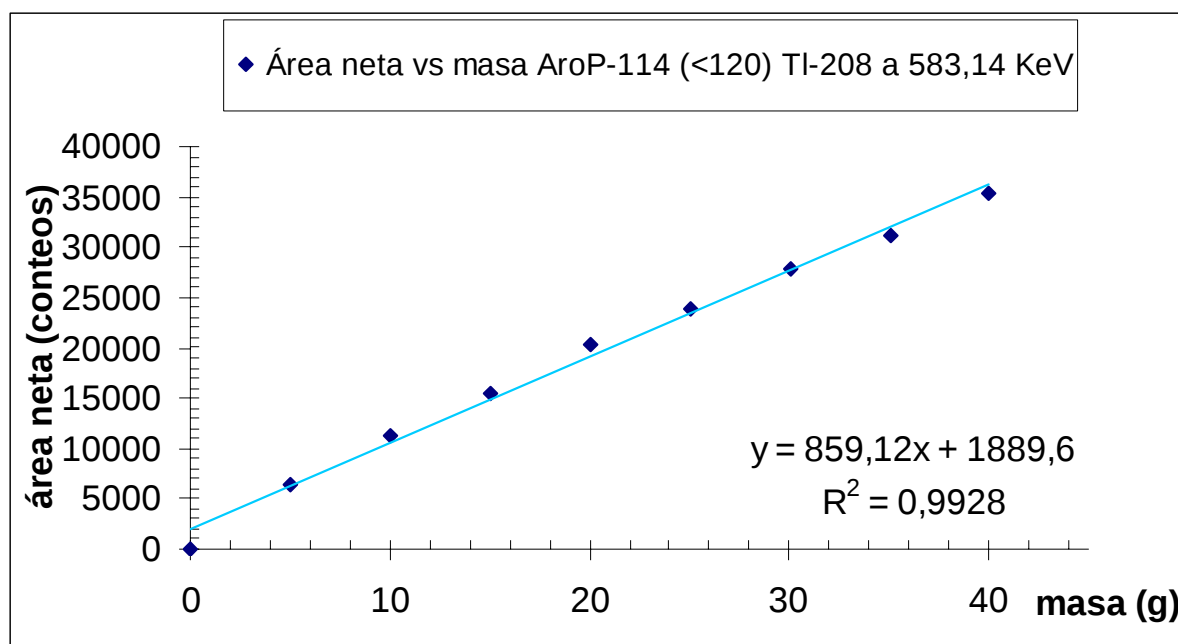


Gráfico 1.6. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114(<125µm) para Tl-208 a 277,36 KeV.

Tabla 5.9. Muestra Aro P 114 (<125μm) para Tl-208 a 860,47 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	836	40
10,0431	1406	53
15,0180	1931	60
20,0803	2408	69
25,0657	2960	74
30,0254	3400	81
35,0675	3896	84
40,0277	4346	89

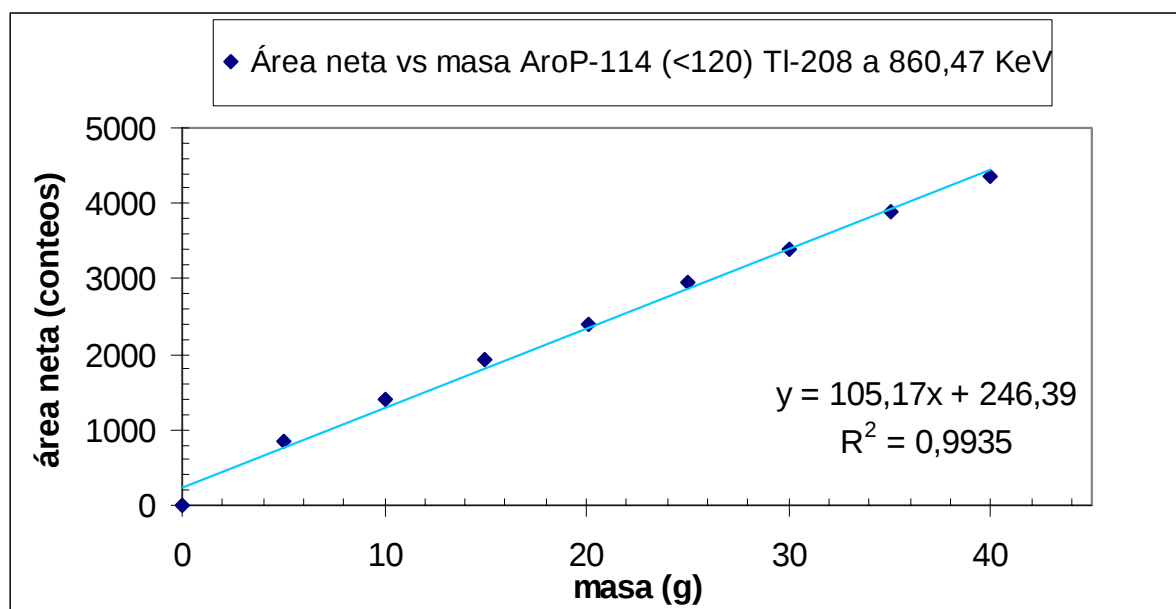


Gráfico 1.7. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114(<125μm) para Tl-208 a 860,47 KeV.

Tabla 5.10. muestra Aro P 114 (<125µm) para Tl-208 a 2614,47 KeV.

Masa (g) +/- 0,0001	Área neta (Conteos)	Error +/-
5,0059	1108	50
10,0431	1865	66
15,0180	2303	77
20,0803	3273	88
25,0657	3977	96
30,0254	4697	104
35,0675	5387	109
40,0277	5827	116

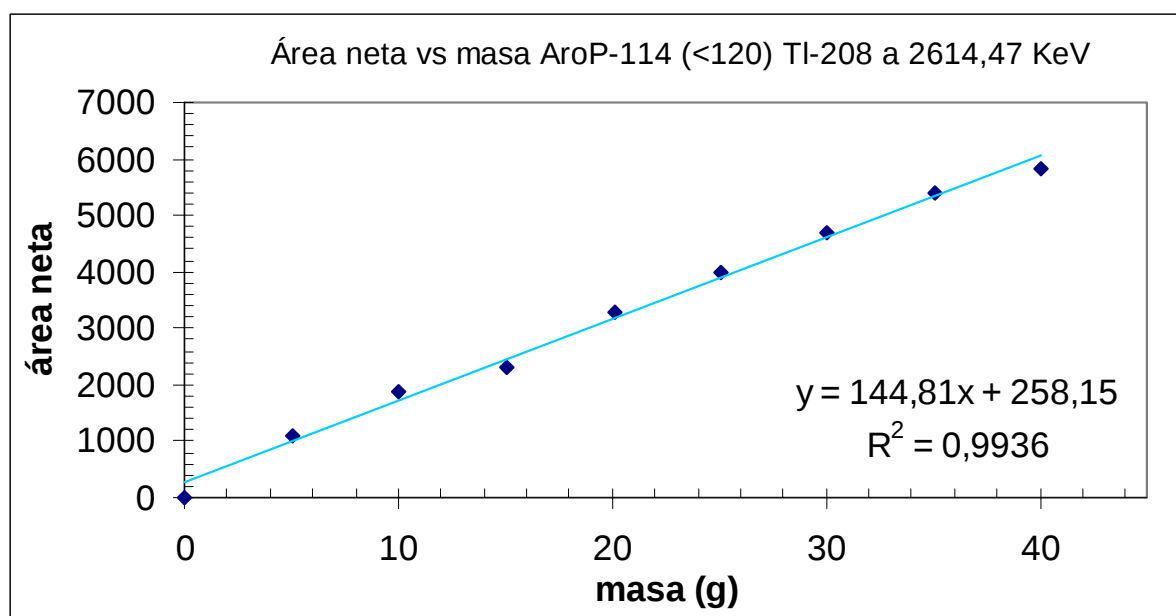


Gráfico 1.8. Área neta vs masa de la muestra Aro P 114(<125µm) para Tl-208 a 2614,47 KeV.

Tabla 7.1. Parámetros de los isótopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (10g), señal, energía, área neta, error

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta	Error +/-
Ac-228	129.10	1957	85
Ac-228	209.40	3410	96
Pb-212	238.63	19009	195
Ac-228	270.30	2461	77
Tl-208	277.36	1257	70
Pb-212	300.09	2291	66
Ac-228	328.00	1592	59
Ac-228	338.40	7507	103
Ac-228	409.40	978	64
Ac-228	463.00		67
Tl-208	510.72	3326	81
Tl-208	583.14	11287	120
Ac-228	772.10	170	24
Bi-212	785.42	249	26
Ac-228	794.80	1315	52
Tl-208	860.47	1406	53
Ac-228	911.07	7990	96
Ac-228	964.60	1109	47
Ac-228	968.90	3564	71
Ac-228	1587.90	516	40
Bi-212	1620.56	310	27

Ac-228	1630.40	348	27
Tl-208	2614.47	1865	66

Tabla 7.2. Parametros de los isotopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (15g), pico, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	5087	131
Ac-228	209,40	8097	146
Pb-212	238,63	62027	307
Ac-228	270,30	5679	117
Tl-208	277,36	3196	109
Pb-212	300,09	4896	101
Ac-228	338,40	19218	193
Tl-208	583,14	27845	185
Ac-228	772,10	956	72
Tl-208	860,47	3389	83
Ac-228	911,07	20040	155
Ac-228	1495,80	488	39
Ac-228	1630,40	842	38
Tl-208	2614,47	8872	110

Tabla 7.3. Parametros de los isotopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (20g), pico, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	8113	255
Ac-228	209,40	12017	175
Pb-212	238,63	85779	367
Ac-228	270,30	8491	138
Tl-208	277,36	5278	127
Pb-212	300,09	7037	113
Ac-228	338,40	24255	176
Tl-208	583,14	41135	224
Ac-228	772,10	1606	85
Tl-208	860,47	5074	95
Ac-228	911,07	28940	180
Ac-228	1495,80	658	38
Ac-228	1630,40	1179	45
Tl-208	2614,47	13067	135

Tabla 7.4. Parametros de los isotopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (25g), pico, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	5323	119
Ac-228	209,40	12017	175

Pb-212	238,63	85779	367
Ac-228	270,30	8491	138
Tl-208	277,36	5278	127
Pb-212	300,09	7619	126
Ac-228	338,40	20936	170
Tl-208	583,14	41135	224
Ac-228	772,10	1606	85
Tl-208	860,47	5074	95
Ac-228	911,07	29476	184
Ac-228	1495,80	1011	73
Ac-228	1630,40	1117	44
Tl-208	2614,47	13479	134

Tabla 7.5. Parametros de los isotopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (30g), pico, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	8530	169
Ac-228	209,40	13760	189
Pb-212	238,63	100952	394
Ac-228	270,30	9798	148
Tl-208	277,36	5390	137
Pb-212	300,09	8489	141
Ac-228	338,40	27900	190
Tl-208	583,14	47151	240

Ac-228	772,10	1827	89
Tl-208	860,47	5663	102
Ac-228	911,07	33915	193
Ac-228	1495,80	764	41
Ac-228	1630,40	780	42
Tl-208	2614,47	15132	143

Tabla 7.6. Parametros de los isotopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (35g), pico, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	9587	303
Ac-228	209,40	15098	197
Pb-212	238,63	104792	407
Ac-228	270,30	10568	154
Tl-208	277,36	6471	142
Pb-212	300,09	9397	138
Ac-228	338,40	16403	185
Tl-208	583,14	51680	250
Ac-228	772,10	1957	94
Tl-208	860,47	6307	106
Ac-228	911,07	36222	200
Ac-228	1495,80	1290	81
Ac-228	1630,40	1435	53
Tl-208	2614,47	16915	151

Tabla 7.7. Parametros de los isotopos radiactivos encontrados en el material de referencia RGTh-1 (40g), pico, energía, área neta, error.

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Ac-228	129,10	11275	305
Ac-228	209,40	14415	164
Pb-212	238,63	112983	430
Ac-228	270,30	11824	164
Tl-208	277,36	7154	149
Pb-212	300,09	9890	142
Ac-228	338,40	37537	271
Tl-208	583,14	58102	266
Ac-228	772,10	2291	97
Tl-208	860,47	7104	111
Ac-228	911,07	40936	214
Ac-228	1495,80	1531	93
Ac-228	1630,40	3433	130
Tl-208	2614,47	18927	161

Tabla 8.1. Eficiencia calculada de los patrones para Ac-228 a 129,10 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Ac-228	129.10	0,005	0,000831702
Ac-228	129.10	0,010	0,000735622
Ac-228	129.10	0,015	0,000706654
Ac-228	129.10	0,020	0,000854143

Ac-228	129.10	0,025	0,000451197
Ac-228	129.10	0,030	0,000602529
Ac-228	129.10	0,035	0,00058045
Ac-228	129.10	0,040	0,000594586

Tabla 8.2. Eficiencia calculada de los patrones para Ac-228 a 209,40 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Ac-228	209,40	0,005	0,00072433
Ac-228	209,40	0,010	0,000679316
Ac-228	209,40	0,015	0,000611083
Ac-228	209,40	0,020	0,000684729
Ac-228	209,40	0,025	0,000547783
Ac-228	209,40	0,030	0,000522697
Ac-228	209,40	0,035	0,000491591
Ac-228	209,40	0,040	0,000410684

Tabla 8.3. Eficiencia calculada de los patrones para Ac-228 a 270,30 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Ac-228	270.30	0,005	0,000642895
Ac-228	270.30	0,010	0,00061673
Ac-228	270.30	0,015	0,000562298
Ac-228	270.30	0,020	0,000634746
Ac-228	270.30	0,025	0,000507797
Ac-228	270.30	0,030	0,000488301

Ac-228	270.30	0,035	0,000451436
Ac-228	270.30	0,040	0,000441953

Tabla 8.4. Eficiencia calculada de los patrones para Tl-208 a 277,36 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia	Eficiencia / 0,36
Tl-208	277,36	0,005	0,000191243	0,000531229
Tl-208	277,36	0,010	0,000185247	0,000514574
Tl-208	277,36	0,015	0,000164792	0,000457756
Tl-208	277,36		0,000206548	0,000573745
Tl-208	277,36	0,025	0,000166564	0,000462678
Tl-208	277,36	0,030	0,000141749	0,000393747
Tl-208	277,36	0,035	0,00014492	0,000402555
Tl-208	277,36	0,040	0,000141105	0,000391957

Tabla 8.5. Eficiencia calculada de los patrones para Pb-212 a 300,09 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Pb-212	300,09	0,005	0,000505696
Pb-212	300,09	0,010	0,00052062
Pb-212	300,09	0,015	0,000487339
Pb-212	300,09	0,020	0,0005437
Pb-212	300,09	0,025	0,000461588
Pb-212	300,09	0,030	0,000434464
Pb-212	300,09	0,035	0,00041223
Pb-212	300,09	0,040	0,000383706

Tabla 8.6. Eficiencia calculada de los patrones para Tl-208 a 583,14 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia	Eficiencia / 0,36
Tl-208	583,14	0,005	0,000121038	0,000336216
Tl-208	583,14	0,010	0,000116292	0,000323033
Tl-208	583,14	0,015	0,000109549	0,000304304
Tl-208	583,14		0,000123037	0,000341771
Tl-208	583,14	0,025	9,843E-05	0,000273417
Tl-208	583,14	0,030	9,41951E-05	0,000261653
Tl-208	583,14	0,035	8,85918E-05	0,000246088
Tl-208	583,14		8,72614E-05	0,000242393

Tabla 8.7. Eficiencia calculada de los patrones para Tl-208 a 860,47 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia	Eficiencia / 0,36
Tl-208	860,47	0,005	0,000107658	0,00029905
Tl-208	860,47	0,010	0,000104855	0,000291263
Tl-208	860,47	0,015	9,59133E-05	0,000266426
Tl-208	860,47	0,020	0,000108419	0,000301163
Tl-208	860,47	0,025	8,6735E-05	0,000240931
Tl-208	860,47	0,030	8,06695E-05	0,000224082
Tl-208	860,47	0,035	7,70085E-05	0,000213913
Tl-208	860,47	0,040	7,58974E-05	0,000210826

Tabla 8.8. Eficiencia calculada de los patrones para Ac-228 a 911,07 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Ac-228	911,07	0,005	0,0002799
Ac-228	911,07	0,010	0,000260636
Ac-228	911,07	0,015	0,000250055
Ac-228	911,07	0,020	0,000274583
Ac-228	911,07	0,025	0,000223799
Ac-228	911,07	0,030	0,000215026
Ac-228	911,07	0,035	0,000197016
Ac-228	911,07	0,040	0,000195109

Tabla 8.10. Eficiencia calculada de los patrones para Ac-228 a 1630,40 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Ac-228	1630.40	0,005	0,00016503
Ac-228	1630.40	0,010	0,000152609
Ac-228	1630.40	0,015	0,000143697
Ac-228	1630.40	0,020	0,000151913
Ac-228	1630.40	0,025	0,000113408
Ac-228	1630.40	0,030	6,70017E-05
Ac-228	1630.40	0,035	0,00010442
Ac-228	1630.40	0,040	0,00022117

Tabla 8.11. Eficiencia calculada de los patrones para Tl-208 a 2614,47 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia	Eficiencia / 0,36
Tl-208	2614,47	0,005	3,41272E-05	0,0000948
Tl-208	2614,47	0,010	3,13815E-05	8,71709E-05
Tl-208	2614,47	0,015	2,87635E-05	7,98985E-05
Tl-208	2614,47	0,020	3,24728E-05	9,02023E-05
Tl-208	2614,47	0,025	2,68234E-05	7,45094E-05
Tl-208	2614,47	0,030	2,51785E-05	6,99402E-05
Tl-208	2614,47	0,035	2,4194E-05	6,72055E-05
Tl-208	2614,47	0,040	2,37492E-05	6,59701E-05

Tabla 8.11. Eficiencia calculada de los patrones para Pb-212 a 238,63 KeV

Elemento	Energía (KeV)	masa (kg)	Eficiencia
Pb-212	238,63	0,005	0,000544709
Pb-212	238,63	0,010	0,000500478
Pb-212	238,63	0,015	0,000475374
Pb-212	238,63	0,020	0,000498592
Pb-212	238,63	0,025	0,000398874
Pb-212	238,63	0,030	0,000391883
Pb-212	238,63	0,035	0,000348804
Pb-212	238,63	0,040	0,000329289

Las siguientes gráficas corresponden a los parámetros de eficiencia y masa.

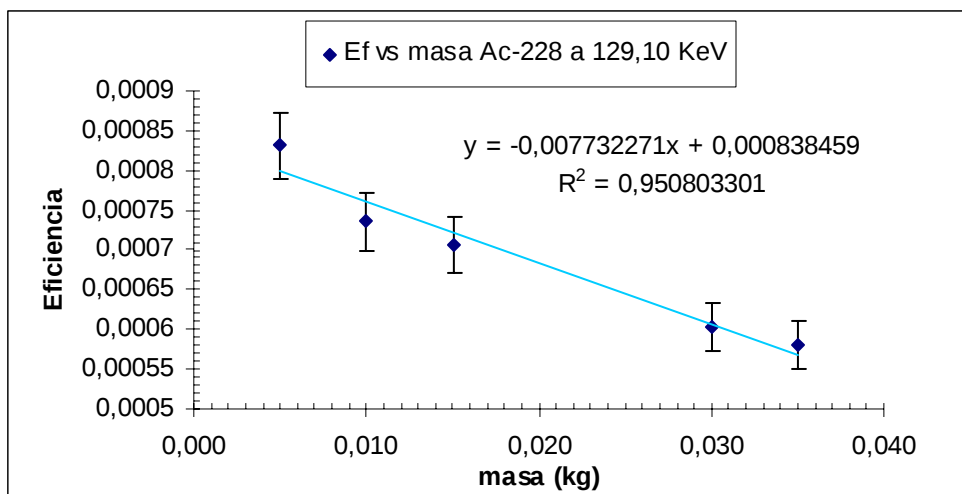


Gráfico 2.1. Eficiencia vs. masa Ac-228 a 129,10 KeV.

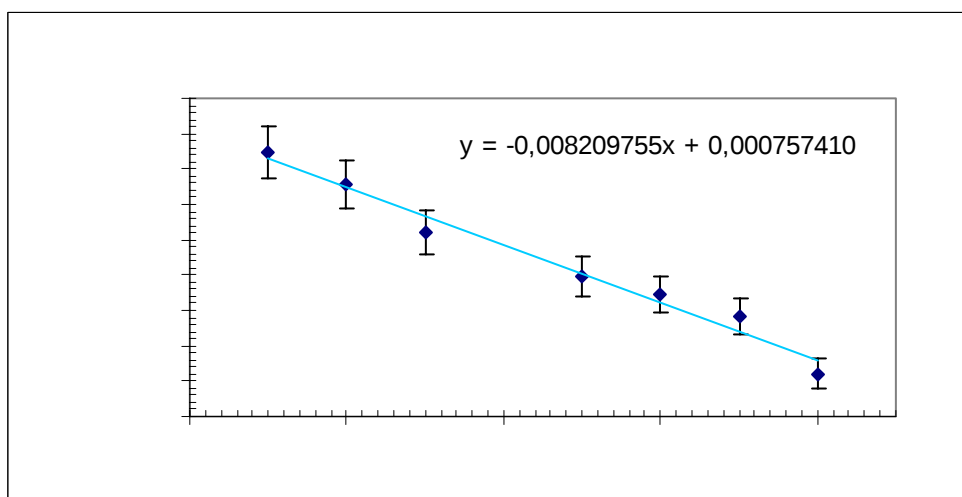


Gráfico 2.2. Eficiencia vs. masa Ac-228 a 209,40 KeV.

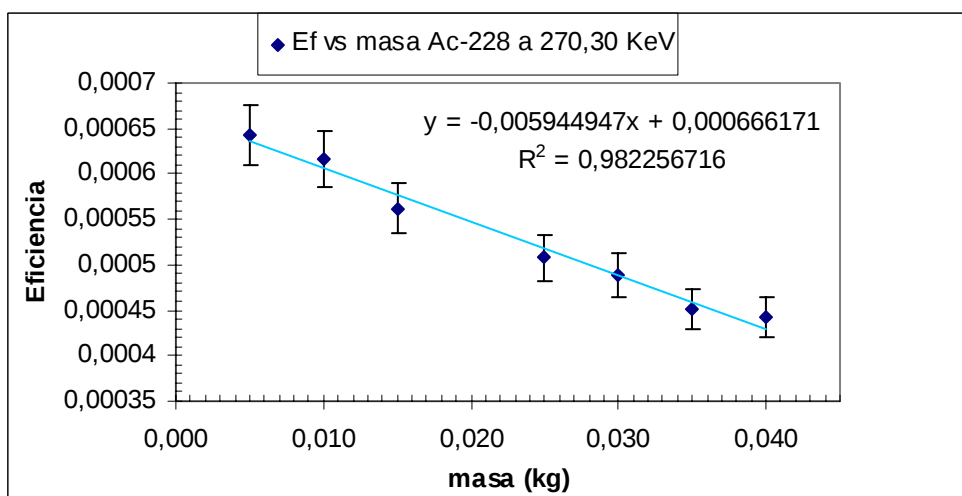


Gráfico 2.3. Eficiencia vs. masa Ac-228 a 270,30 KeV.

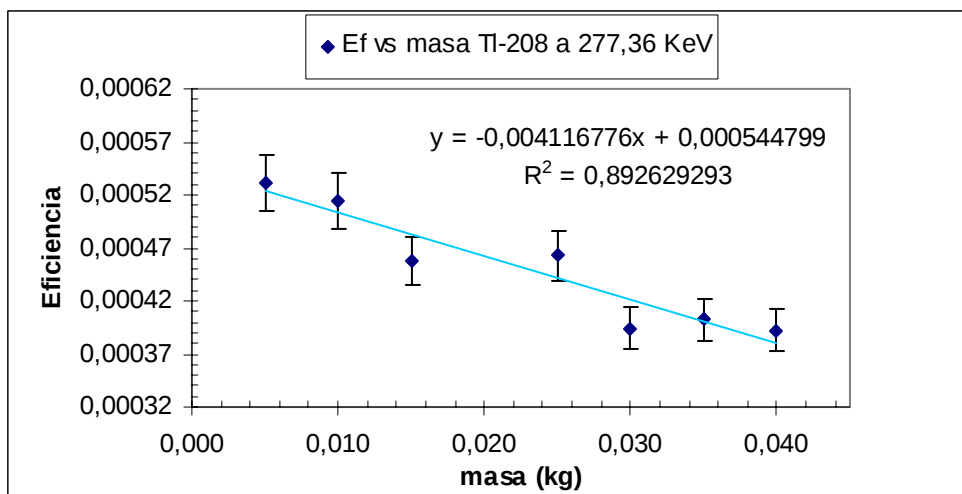


Gráfico 2.4. Eficiencia vs. masa Tl-208 a 277,36 KeV.

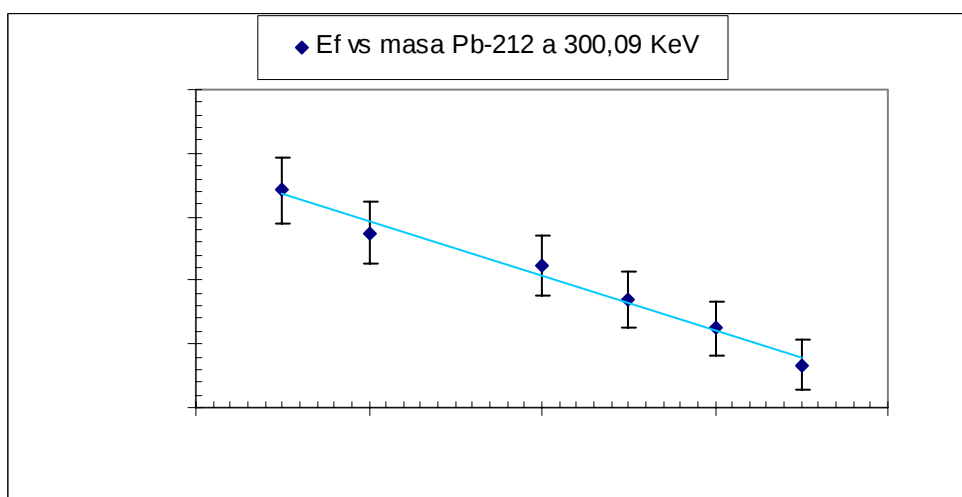


Gráfico 2.5. Eficiencia vs. masa Pb-212 a 300,09 KeV.

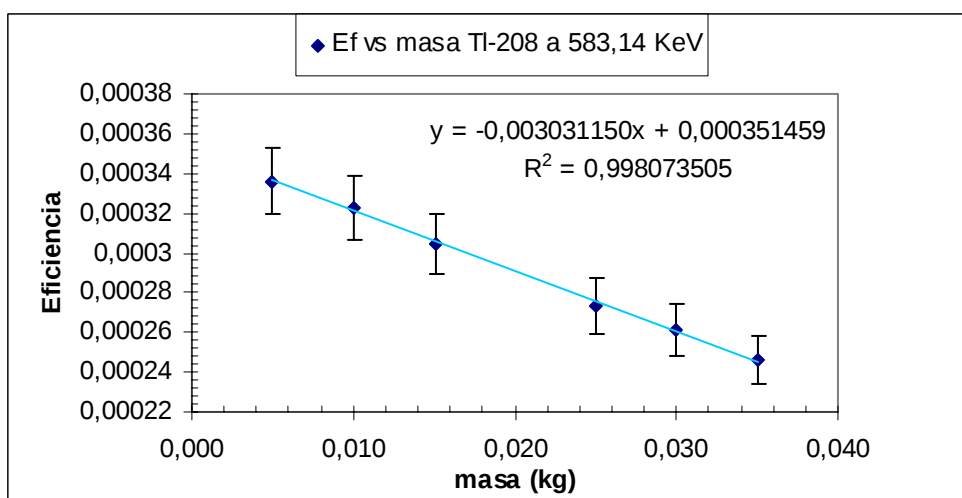


Gráfico 2.6. Eficiencia vs. masa Tl-208 a 583,14 KeV.

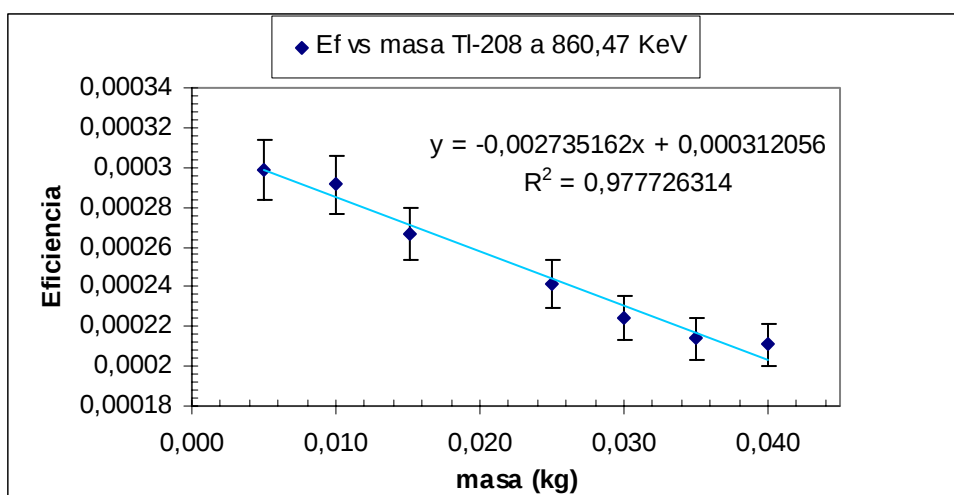


Gráfico 2.7. Eficiencia vs. masa Tl-208 a 860,47 KeV.

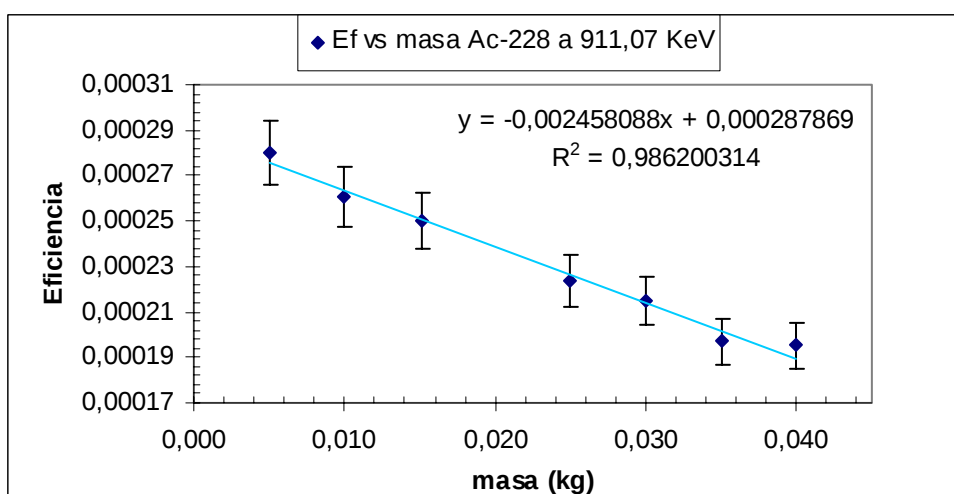


Gráfico 2.8. Eficiencia vs. masa Ac-228 a 911,07 KeV.

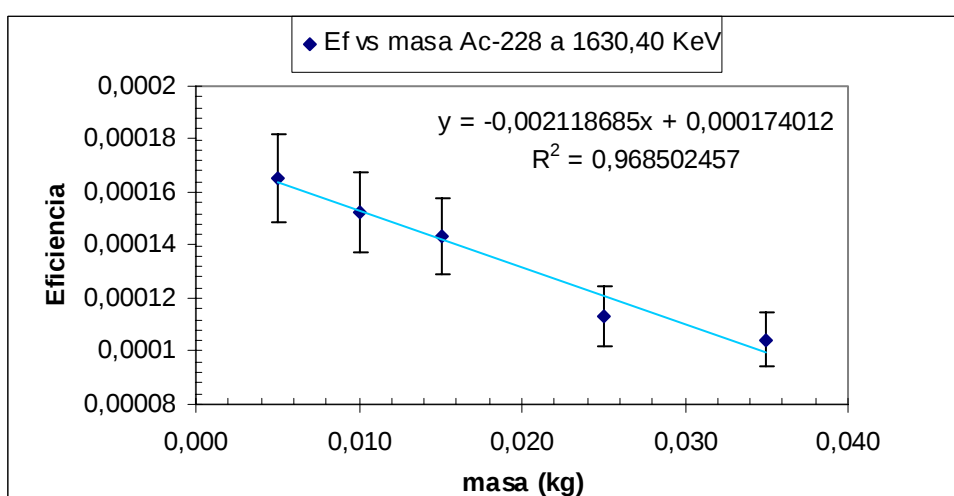


Gráfico 2.9 Eficiencia vs. masa Ac-228 a 1630,40 KeV.

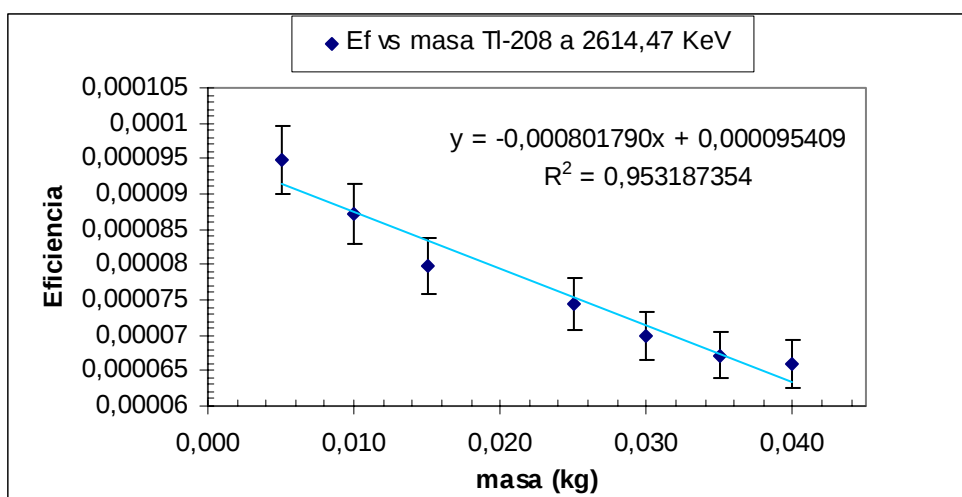


Gráfico 2.10. Eficiencia vs. masa Tl-208 a 2614,47 KeV.

Tabla 9.1 Aro P 58 (<125 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	155	37
Th-234	92.80	200	24
Pa-234	186.00	387	39
Pb-214	295.22	280	31
Pb-214	351.99	593	35
Bi-214	609.32	410	32
Bi-214	1120.28	103	19
Bi-214	1764.51	122	15
Ac-228	209.40	173	42
Pb-212	238.63	2201	57
Ac-228	270.30	225	34
Pb-212	300.09	115	22
Ac-228	328.00	131	30
Ac-228	338.40	699	37

Ac-228	463.00	153	28
Tl-208	510.72	600	39
Tl-208	583.14	933	40
Tl-208	860.47	144	23
Ac-228	911.07	710	32
Ac-228	964.60	90	16
Ac-228	968.90	282	23
Tl-208	2614.47	432	26

Tabla 9.2 Aro P 102 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	678	129
Pb-214	74.81	4587	114
Pa-234	99.70	2231	127
Pa-234	114.50	1681	122
Ra-226	185.99	2624	119
Pb-214	241.92	253	51
Pb-214	295.22	4098	113
Pb-214	351.99	6978	119
Pa-234	754.80	1101	81
Pa-234	780.80	303	50
Pa-234	793.60	3830	90
Pa-234	831.10	386	50
Bi-214	1120.28	922	64

Bi-214	1509.19	167	41
Bi-214	1764.51	1057	45
Ac-228	129.10	6541	231
Ac-228	209.40	10282	160
Pb-212	238.63	67995	309
Ac-228	328.00	4918	99
Ac-228	338.40	23122	213
Tl-208	583.14	34065	205
Ac-228	772.10	959	51
Bi-212	785.42	596	44
Tl-208	860.47	4143	92
Ac-228	911.07	23652	165
Ac-228	1459.20	1609	59
Ac-228	1495.80	579	38
Ac-228	1587.90	1656	54
Ac-228	1587.90	378	33
Bi-212	1620.56	846	40
Bi-212	1620.56	88	23
Ac-228	1630.40	798	38
Tl-208	2614.47	10770	121

Tabla 9.2 Aro P 107 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	230	56

Pa-234	114.50	176	51
Pb-214	295.22	2196	107
Pb-214	351.99	2686	64
Bi-214	609.32	1858	56
Bi-214	1764.51	436	24
Ac-228	209.40	769	63
Tl-208	277.36	409	49
Ac-228	338.40	1991	61
Tl-208	583.14	2970	67
Tl-208	860.47	365	36
Ac-228	911.07	2349	54
Tl-208	2614.47	633	37

Tabla 9.2 Aro P 108 (>500 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	828	112
Pa-234	114.50	1116	104
Pb-214	351.99	7703	114
Bi-214	609.32	5637	104
Bi-214	1764.51	1050	42
Ac-228	209.40	7366	138
Tl-208	277.36	3052	102
Pb-212	300.09	8869	214
Ac-228	338.40	16674	183

Tl-208	583.14	24595	174
Tl-208	860.47	3265	76
Ac-228	911.07	18044	173
Tl-208	2614.47	7625	103

Tabla 9.3 Aro P 108 (500-250 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	1317	199
Pb-214	74.81	9851	208
Pa-234	99.70	6357	202
Pa-234	114.50	3962	193
Pb-214	241.92	438	120
Pb-214	295.22	11449	161
Pb-214	351.99	19883	192
Bi-214	609.32	14108	178
Pa-234	754.80	2675	128
Bi-214	768.36	837	76
Pa-234	780.80	1156	73
Pa-234	831.10	1217	79
Bi-214	934.05	731	85
Bi-214	1120.28	2481	98
Bi-214	1377.65	369	38
Bi-214	1407.98	941	127
Bi-214	1509.19	1026	90

Bi-214	1729.60	585	54
Bi-214	1764.51	2524	72
Bi-214	2204.12	550	57
Ac-228	129.10	18015	368
Ac-228	209.40	27502	260
Pb-212	238.63	200960	567
Ac-228	270.30	19651	207
Tl-208	277.36	11259	188
Pb-212	300.09	16715	172
Ac-228	328.00	13752	160
Ac-228	338.40	48845	261
Ac-228	409.40	7966	170
Tl-208	583.14	94160	338
Tl-208	763.30	1251	93
Ac-228	772.10	2251	77
Bi-212	785.42	910	55
Ac-228	794.80	10630	143
Tl-208	860.47	11785	143
Ac-228	911.07	67876	277
Ac-228	1459.20	1988	79
Ac-228	1495.80	1545	58
Ac-228	1587.90	4323	88
Ac-228	1587.90	1217	57
Bi-212	1620.56	2356	76

Ac-228	1630.40	2948	74
Tl-208	2614.47	28620	198

Tabla 9.4 Aro P 108 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	1342	178
Pa-234	114.50	3340	172
Pb-214	351.99	17195	174
Bi-214	609.32	12061	160
Bi-214	1764.51	2340	63
Ac-228	209.40	22214	232
Tl-208	277.36	8973	168
Pb-212	300.09	24369	338
Ac-228	338.40	50107	307
Tl-208	583.14	73306	299
Tl-208	860.47	9233	126
Ac-228	911.07	53961	292
Tl-208	2614.47	22469	175

Tabla 9.5 Aro P 109 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Th-234	63.29	548	93
Pb-214	74.81	1630	74
Pa-234	99.70	748	93

Ra-226	185.99	2623	99
Pb-214	241.92	699	70
Pb-214	295.22	4501	90
Pb-214	351.99	7928	111
Bi-214	609.32	5844	98
Pa-234	754.80	351	58
Bi-214	768.36	362	42
Pa-234	780.80	138	33
Pa-234	831.10	219	39
Bi-214	1120.28	1358	53
Bi-214	1377.65	323	38
Bi-214	1407.98	217	33
Bi-214	1729.60	304	27
Bi-214	1764.51	1161	41
Bi-214	2204.12	318	28
Ac-228	129.10	2281	104
Ac-228	209.40	3920	118
Pb-212	238.63	28827	218
Ac-228	270.30	3083	94
Tl-208	277.36	1806	87
Ac-228	328.00	2356	85
Ac-228	338.40	9132	119
Tl-208	583.14	14262	137
Tl-208	763.30	223	42

Ac-228	772.10	273	33
Bi-212	785.42	313	31
Ac-228	794.80	1588	62
Tl-208	860.47	1684	64
Ac-228	911.07	10204	111
Ac-228	1459.20	995	49
Ac-228	1495.80	285	29
Ac-228	1587.90	719	38
Ac-228	1587.90	142	22
Bi-212	1620.56	371	36
Ac-228	1630.40	398	31
Tl-208	2614.47	4696	81

Tabla 9.6 Aro P 114 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta (Conteos)	Error +/-
Pb-214	74.81	5768	168
Pa-234	99.70	3717	180
Pa-234	114.50	2758	175
Pa-234	186.00	4814	174
Pb-214	241.92	579	105
Pb-214	295.22	9686	143
Pb-214	351.99	18887	181
Bi-214	609.32	13425	165
Pa-234	754.80	2133	110

Bi-214	768.36	952	69
Pa-234	780.80	689	68
Pa-234	793.60	7877	123
Pa-234	831.10	823	70
Bi-214	934.05	562	76
Bi-214	1120.28	2574	88
Bi-214	1377.65	446	70
Bi-214	1407.98	351	56
Bi-214	1509.19	235	36
Bi-214	1509.19	110	21
Bi-214	1729.60	577	46
Bi-214	1764.51	2483	66
Bi-214	1847.44	308	46
Bi-214	2204.12	582	50
Ac-228	129.10	11928	341
Ac-228	209.40	19660	233
Pb-212	238.63	139009	475
Ac-228	270.30	14465	182
Tl-208	277.36	8024	166
Pb-212	300.09	7030	116
Ac-228	328.00	9764	140
Ac-228	338.40	34481	221
Tl-208	583.14	68685	290
Tl-208	763.30	955	87

Ac-228	772.10	1319	60
Bi-212	785.42	635	48
Tl-208	860.47	8591	124
Ac-228	911.07	49591	238
Ac-228	1495.80	1129	54
Ac-228	1587.90	3195	76
Ac-228	1587.90	854	52
Bi-212	1620.56	1796	65
Ac-228	1630.40	1894	59
Tl-208	2614.47	22009	171

Tabla 9.7 Aro P 114 (<125 μ m) (35 gramos).

Elemento	Energía (KeV)	Área Neta	Error +/-
Th-234	63.29	911	124
Pb-214	74.81	3520	104
Pa-234	99.70	1891	125
Pa-234	114.50	1257	123
Pa-234	186.00	3766	127
Pb-214	241.92	961	94
Pb-214	295.22	8148	122
Pb-214	351.99	13532	143
Bi-214	609.32	9845	129
Pa-234	754.80	859	77
Bi-214	768.36	773	56

Pa-234	780.80	366	48
Bi-214	1120.28	2146	68
Bi-214	1407.98	268	42
Bi-214	1509.19	170	28
Bi-214	1509.19	107	17
Bi-214	1509.19	170	28
Bi-214	1509.19	107	17
Bi-214	1729.60	420	36
Bi-214	1764.51	1832	54
Ac-228	129.10	5280	236
Ac-228	209.40	9088	161
Pb-212	238.63	61222	307
Ac-228	270.30	6608	126
Tl-208	277.36	3683	116
Pb-212	300.09	5464	102
Ac-228	328.00	4692	102
Ac-228	338.40	18429	156
Ac-228	409.40	2746	103
Tl-208	583.14	31176	197
Tl-208	763.30	486	56
Ac-228	772.10	558	41
Bi-212	785.42	628	44
Ac-228	794.80	3483	84
Tl-208	860.47	3896	84

Ac-228	911.07	22382	158
Ac-228	1495.80	465	33
Ac-228	1587.90	1622	53
Ac-228	1587.90	293	29
Bi-212	1620.56	756	47
Ac-228	1630.40	968	44
Tl-208	2614.47	9956	116

Apéndice B. Tablas con todas las actividades calculadas de las muestras

Tabla 10.1 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 58 (<125 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Bi-214	1120.28	59,29774924	5,929774924
Ac-228	209.40	129,7934089	12,98
Ac-228	270.30	244,0960431	24,41
Ac-228	328.00	179,1136556	17,91
Ac-228	338.40	18,81595199	1,88
Ac-228	463.00	163,4344578	16,34
Tl-208	860.47	61,52635025	6,15

Tabla 10.2 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 102 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pa-234	114.50	2833,2634	283,33

Ra-226	185.99	3439,4937	343,95
Pb-214	351.99	1387,8826	138,79
Bi-214	1120.28	1015,3379	101,53
Bi-214	1764.51	1468,0058	146,80
Ac-228	129.10	12236,08596	1223,61
Ac-228	209.40	14786,79917	1478,68
Ac-228	338.40	15763,81445	1576,38
Tl-208	583.14	4078,961292	407,90
Tl-208	860.47	4413,800455	441,38
Tl-208	2614.47	7947,310552	794,73

Tabla 10.3 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 107 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351.99	408,3730	40,84
Bi-214	609.32	285,6400	28,56
Bi-214	1764.51	445,4012	44,54
Ac-228	209.40	866,1885	86,62
Tl-208	277.36	355,1515	35,52
Ac-228	338.40	975,9482	97,59
Tl-208	583.14	255,4149	25,54
Tl-208	860.47	297,6013	29,76
Ac-228	911.07	866,4267	86,64
Tl-208	2614.47	259,9347	25,99

Tabla 10.4 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 108
($>500 \mu\text{m}$).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351.99	1327,27	132,73
Bi-214	609.32	1016,04	101,60
Bi-214	1764.51	1341,93	134,19
Ac-228	209.40	8893,07	889,31
Tl-208	277.36	2814,49	281,45
Tl-208	583.14	2475,87	247,59
Tl-208	860.47	2922,75	292,28
Tl-208	2614.47	4740,60	474,06

Tabla 10.5 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 108 (500- $250 \mu\text{m}$).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351.99	2163,5756	216,36
Bi-214	609.32	1624,0749	162,41
Bi-214	934.05	1685,9777	168,60
Bi-214	1120.28	1408,5219	140,85
Bi-214	1729.60	2733,1558	273,32
Bi-214	1764.51	2187,4914	218,75
Bi-214	2204.12	2516,4447	251,64
Ac-228	129.10	17468,28	1746,83
Ac-228	209.40	20379,37	2037,94

Ac-228	270.30	19155,38	1915,54
Ac-228	794.80	14190,45	1419,05
Bi-212	1620.56	11088,72	1108,87
Tl-208	277.36	6415,83	641,58
Tl-208	583.14	5888,09	588,81
Tl-208	860.47	6496,11	649,61
Tl-208	2614.47	11239,53	1123,95

Tabla 10.6 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 108 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351.99	2200,42	220,04
Bi-214	609.32	1634,20	163,42
Bi-214	1764.51	2410,58	241,06
Ac-228	209.40	19312,32	1931,23
Tl-208	277.36	5999,84	599,98
Tl-208	583.14	5379,20	537,92
Tl-208	860.47	5971,87	597,19
Tl-208	2614.47	10366,94	1036,69

Tabla 10.7 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 109 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Ra-226	185.99	1198,06	119,81

Pb-214	351.99	393,59	39,36
Bi-214	609.32	304,01	30,40
Bi-214	1120.28	362,08	36,21
Bi-214	1377.65	397,84	39,78
Bi-214	1407.98	444,39	44,44
Bi-214	1729.60	668,64	66,86
Bi-214	1764.51	436,44	43,64
Bi-214	2204.12	687,42	68,74
Ac-228	129.10	1022,61	102,26
Ac-228	209.40	1361,26	136,13
Ac-228	270.30	1408,54	140,85
Ac-228	328.00	1309,17	130,92
Ac-228	338.40	1398,37	139,84
Ac-228	794.80	994,74	99,47
Ac-228	911.07	1248,63	124,86
Bi-212	1620.56	821,58	82,16
Tl-208	277.36	476,06	47,61
Tl-208	583.14	408,49	40,85
Tl-208	860.47	432,62	43,26
Tl-208	2614.47	835,51	83,55

Tabla 10.8 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 114 (250-177 μ m).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351.99	1955,37	195,54
Bi-214	609.32	1476,81	147,68
Bi-214	934.05	1224,53	122,45
Bi-214	1120.28	1381,21	138,12
Bi-214	1377.65	1105,55	110,56
Bi-214	1407.98	1446,61	144,66
Bi-214	1729.60	2553,93	255,39
Bi-214	1764.51	2106,43	210,64
Bi-214	1847.44	2185,98	218,60
Bi-214	2204.12	2531,57	253,16
Ac-228	129.10	10911,94	1091,19
Ac-228	209.40	13740,82	1374,08
Ac-228	270.30	13301,08	1330,11
Bi-212	1620.56	8004,00	800,40
Tl-208	277.36	4316,54	431,65
Tl-208	583.14	4059,66	405,97
Tl-208	860.47	4474,50	447,45
Tl-208	2614.47	8301,29	830,13

Tabla 10.9 Actividad de los isótopos de interés detectados en la muestra Aro P 114

(<125 μ m) (35 gramos).

Elemento	Energía (KeV)	Actividad (Bq/kg)	Error +/-
Pb-214	351.99	1454,95	145,49
Bi-214	609.32	1123,26	112,33
Bi-214	1120.28	1199,98	120,00
Bi-214	1407.98	1150,82	115,08
Bi-214	1729.60	1936,48	193,65
Bi-214	1764.51	1599,87	159,99
Ac-228	129.10	5026,08	502,61
Ac-228	209.40	6621,17	662,12
Ac-228	270.30	6333,83	633,38
Ac-228	409.40	5336,66	533,67
Ac-228	794.80	4576,34	457,63
Bi-212	1620.56	3509,86	350,99
Tl-208	277.36	2061,00	206,10
Tl-208	583.14	1913,96	191,40
Tl-208	860.47	2112,73	211,27
Tl-208	2614.47	3876,12	387,61

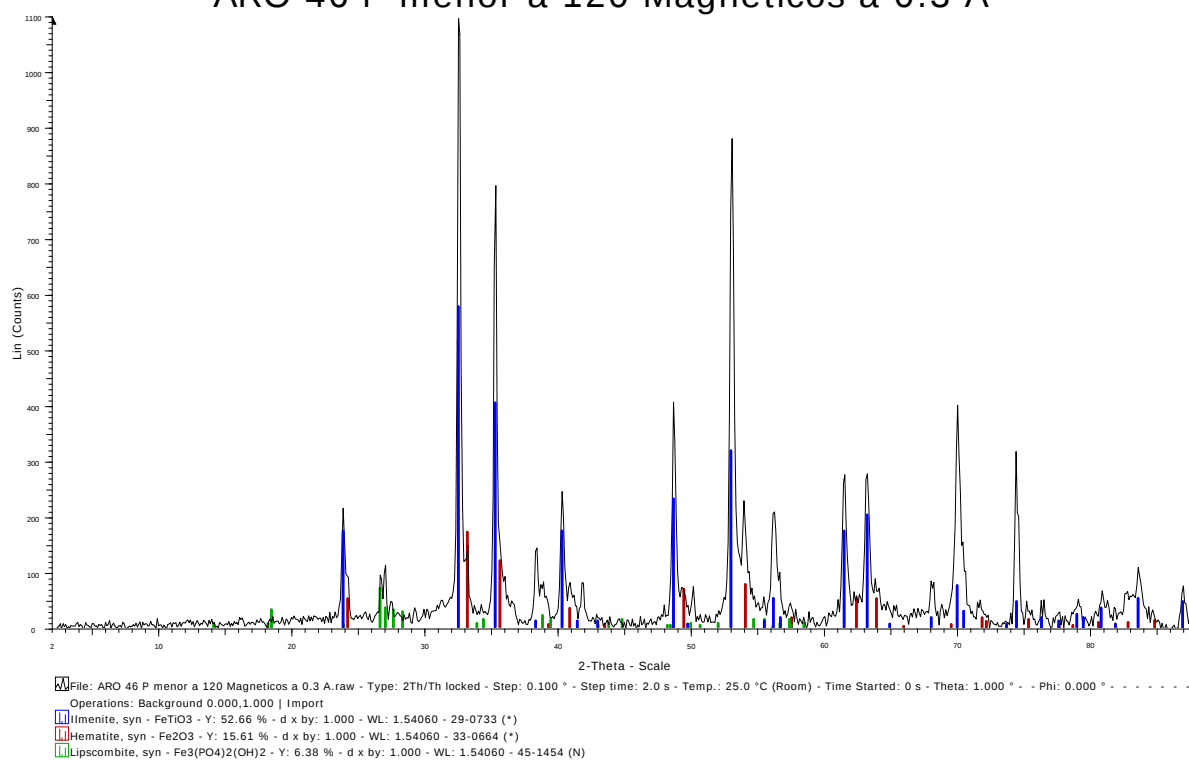
Apéndice C. Espectros de difracción de rayos X de las distintas fracciones magnéticas

Tabla 21.1. Formulas químicas de las fases minerales determinadas tomadas de la base de datos del laboratorio de difracción de rayos X

Fase Mineral	Formula Química
Ilmenita	FeTiO_3
Hematita	Fe_2O_3
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Rutilo	TiO_2
Rutilo niobio	$(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Fe})\text{O}_2$
Lipscombite	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$
Monacita	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})\text{PO}_4$
Xenotime	YPO_4
Circón	ZrSiO_4
Torita	ThSiO_4
Microclino	KAlSi_3O_8
Crosite	$\text{Na}_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20} \cdot 2(\text{OH})_2$
Clinocloro	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Cr})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Tremolita	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22} \cdot 2(\text{OH})_2$
Cuarzo	SiO_2

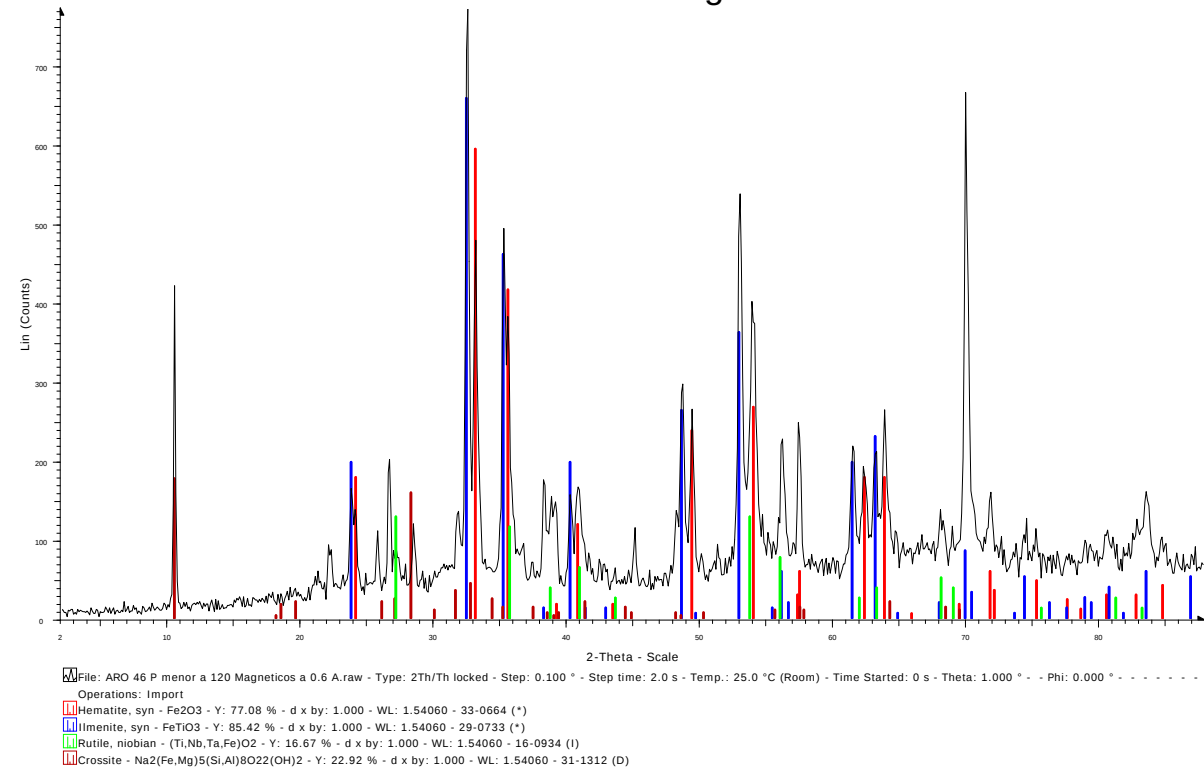
ARO 46 P (<125 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

ARO 46 P menor a 120 Magnéticos a 0.3 A



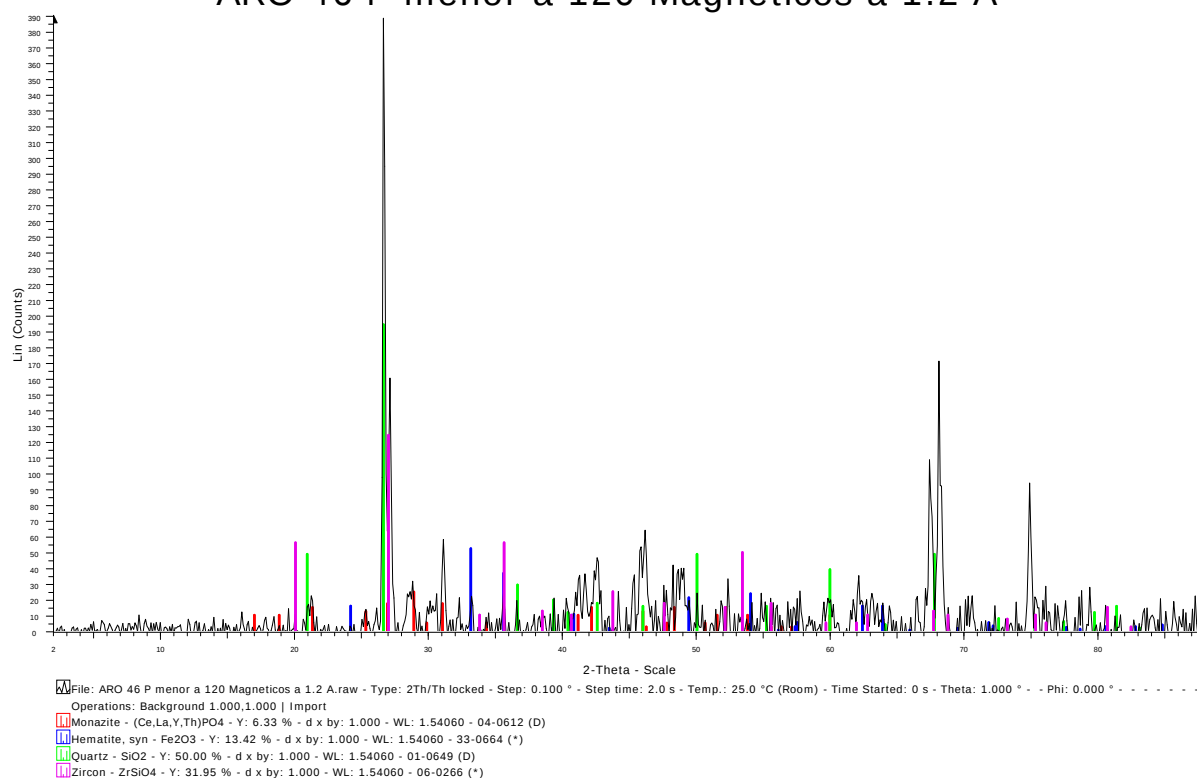
ARO 46 P (<125 μm) Magnéticos a 0,6 Amp.

ARO 46 P menor a 120 Magneticos a 0.6 A



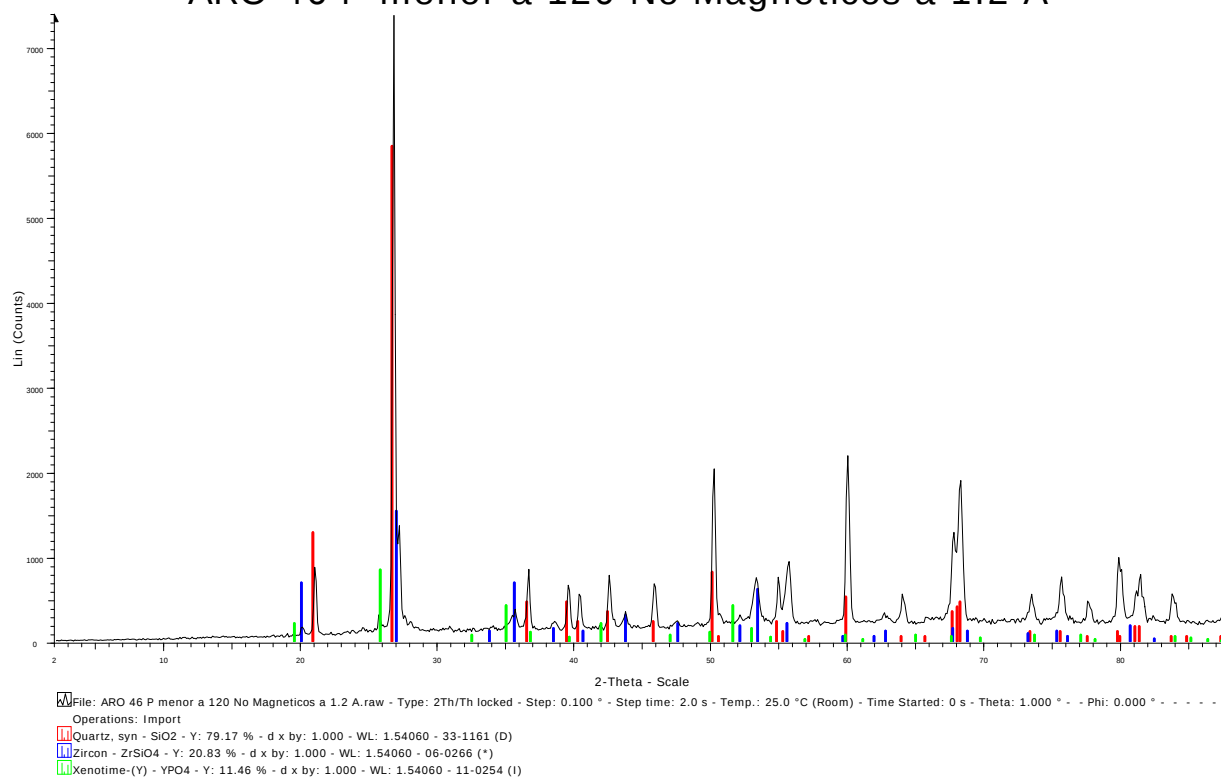
ARO 46 P (<125 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

ARO 46 P menor a 120 Magneticos a 1.2 A

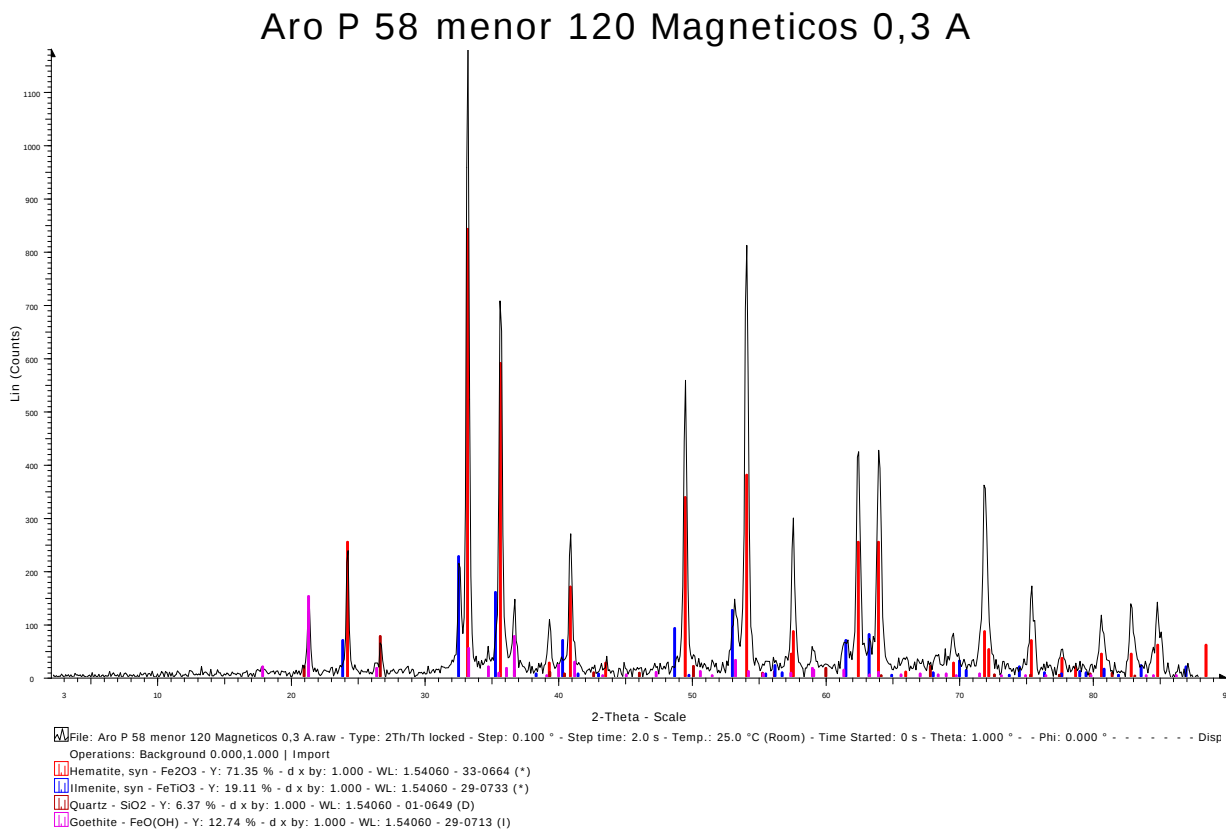


ARO 46 P (<125 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

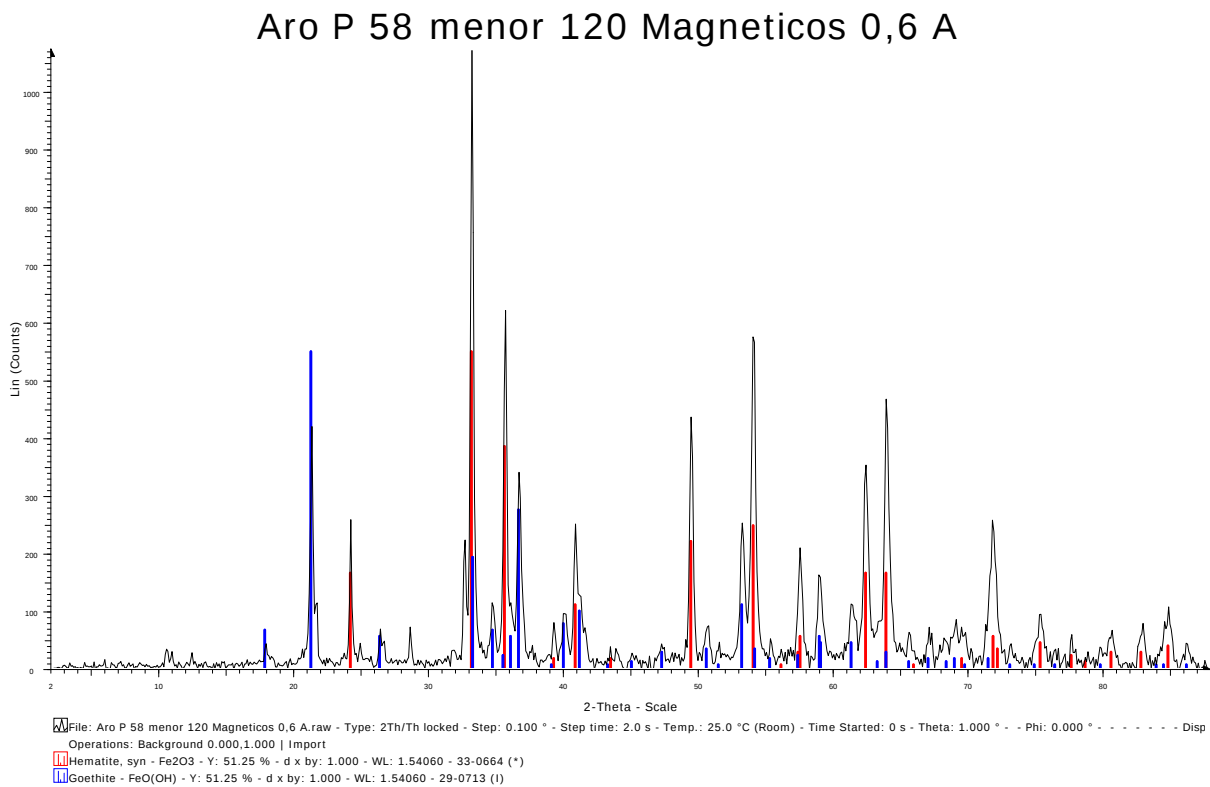
ARO 46 P menor a 120 No Magneticos a 1.2 A



ARO P 58 (<125 µm) Magnéticos a 0,3 Amp.

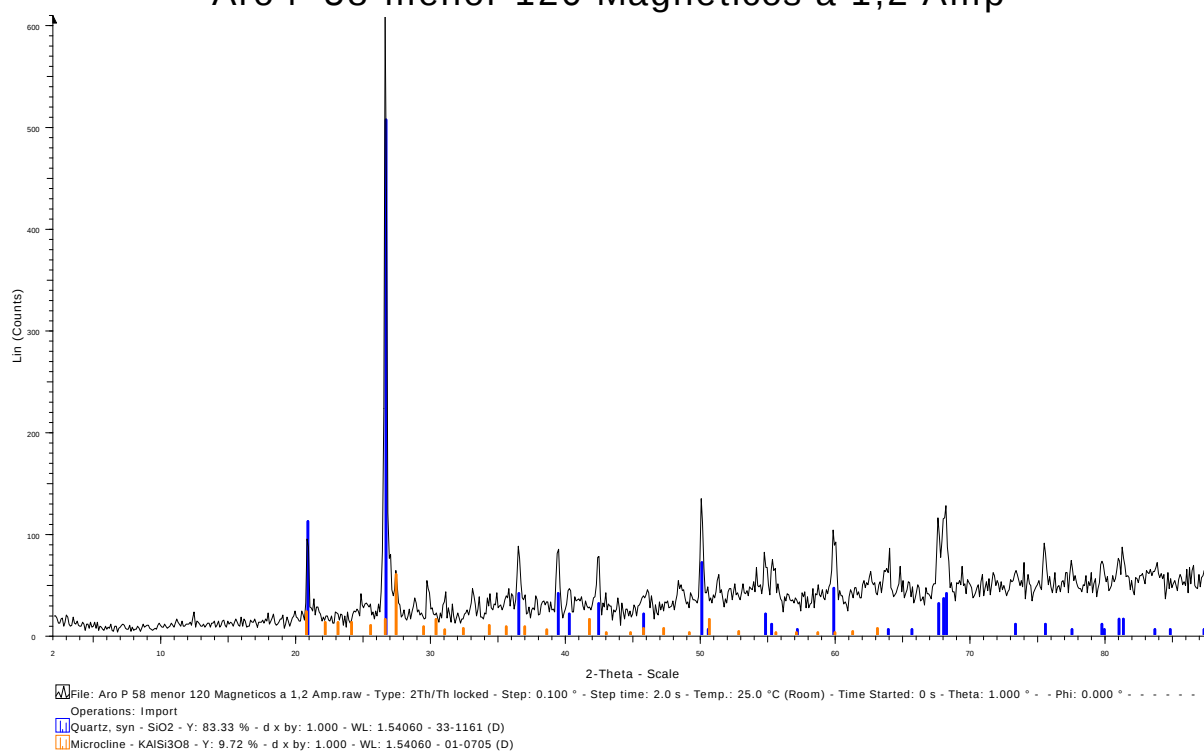


ARO P 58 (<125 μm) Magnéticos a 0,6 Amp.



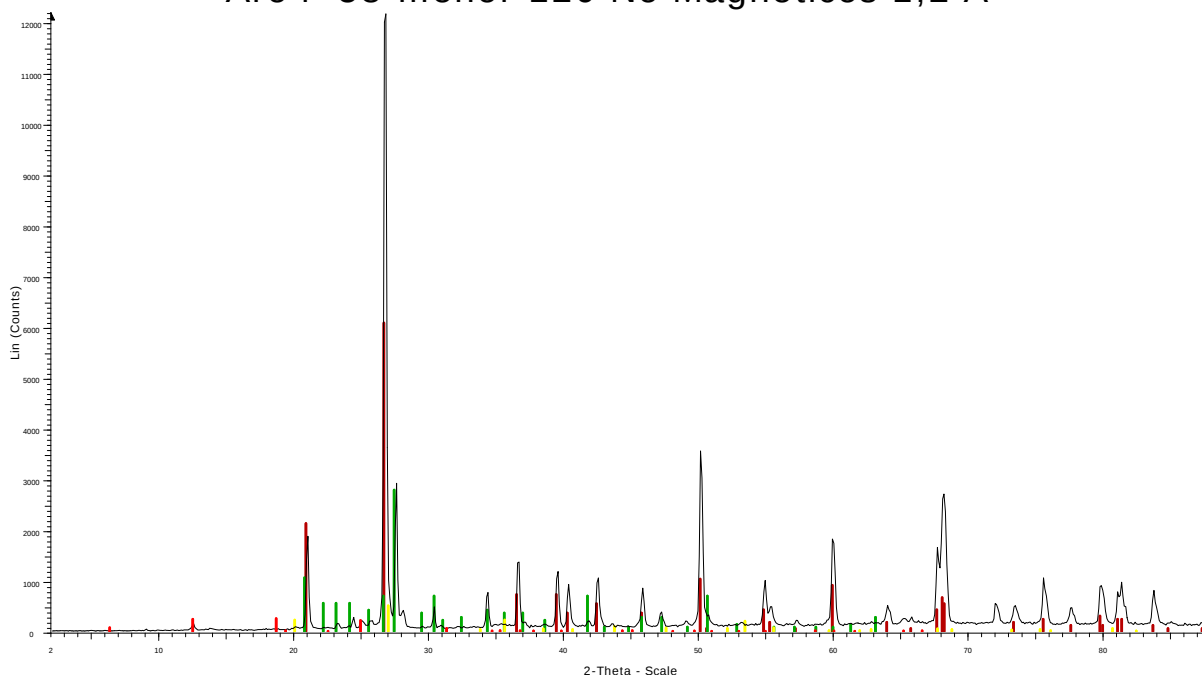
ARO P 58 (<125 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 58 menor 120 Magneticos a 1,2 Amp



ARO P 58 (<125 µm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 58 menor 120 No Magneticos 1,2 A



File: Aro P 58 menor 120 No Magneticos 1,2 A.raw - Type: 2Th/Th locked - Step: 0.100 ° - Step time: 2.0 s - Temp.: 25.0 °C (Room) - Time Started: 0 s - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.000 ° - - - - - [

Operations: Import

Quartz, low - SiO₂ - Y: 50.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 05-0490 (D)

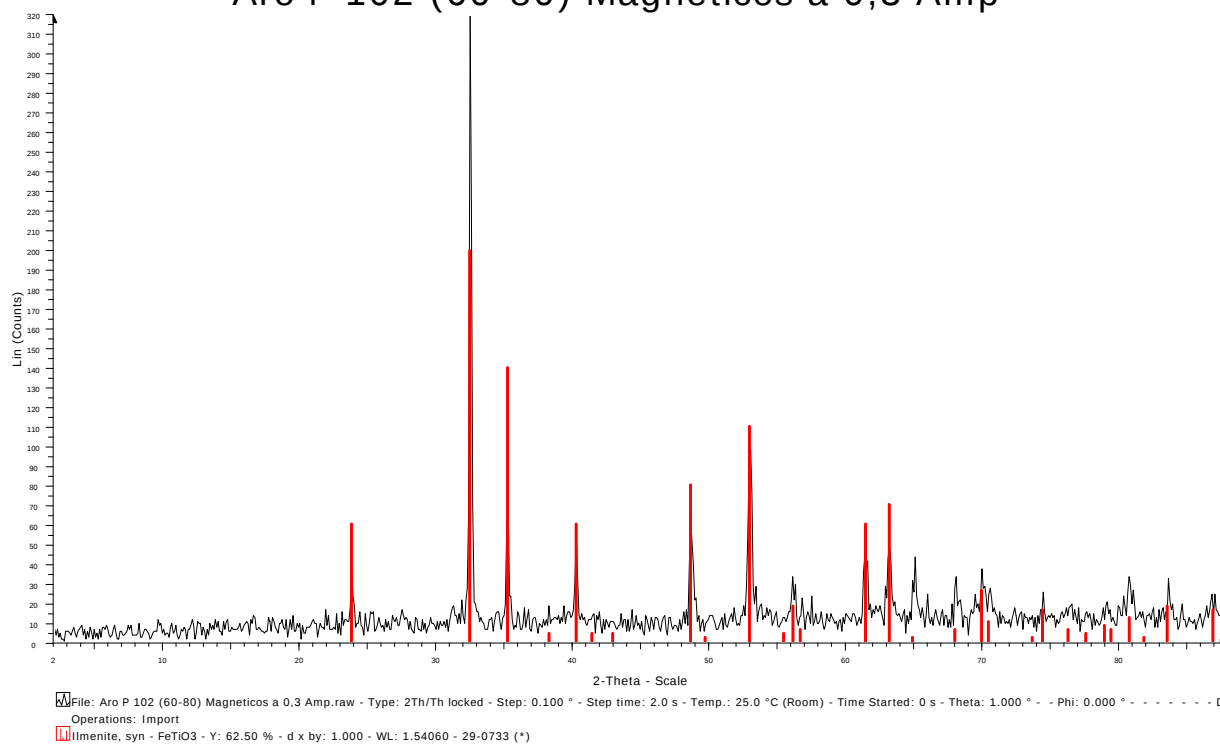
Microcline - KAlSi₃O₈ - Y: 22.92 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 01-0705 (D)

Zircon - ZrSiO₄ - Y: 4.17 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 06-0266 (*)

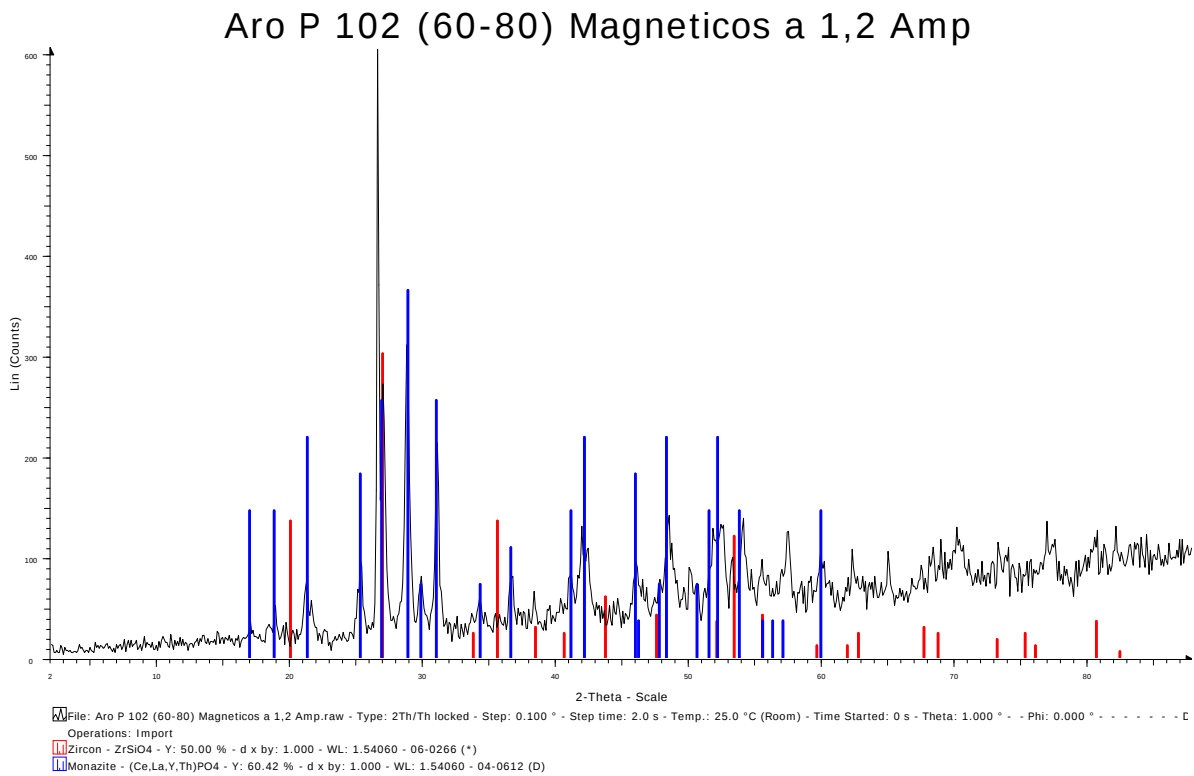
Clinochlore - (Mg,Fe,Al)₆(Si,Cr)₄O₁₀(OH)₈ - Y: 2.08 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 12-0185 (D)

ARO P 102 (250-177 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 102 (60-80) Magnéticos a 0,3 Amp

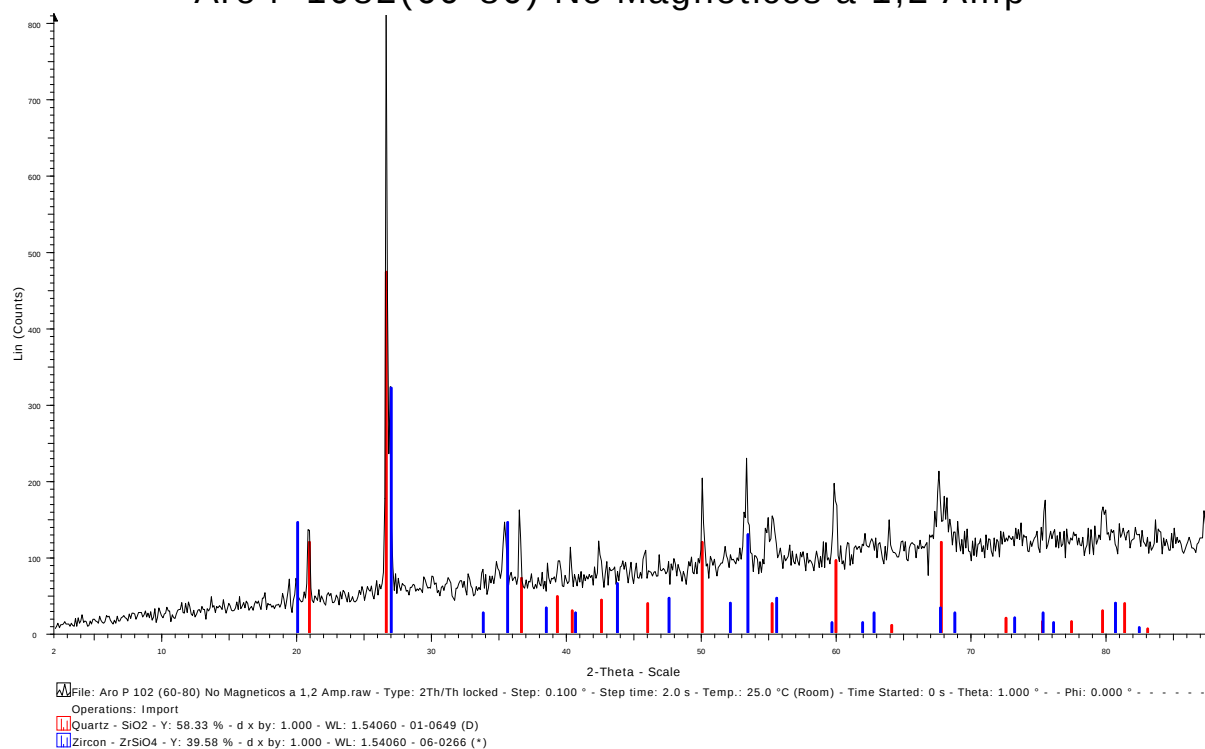


ARO P 102 (250-177 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.



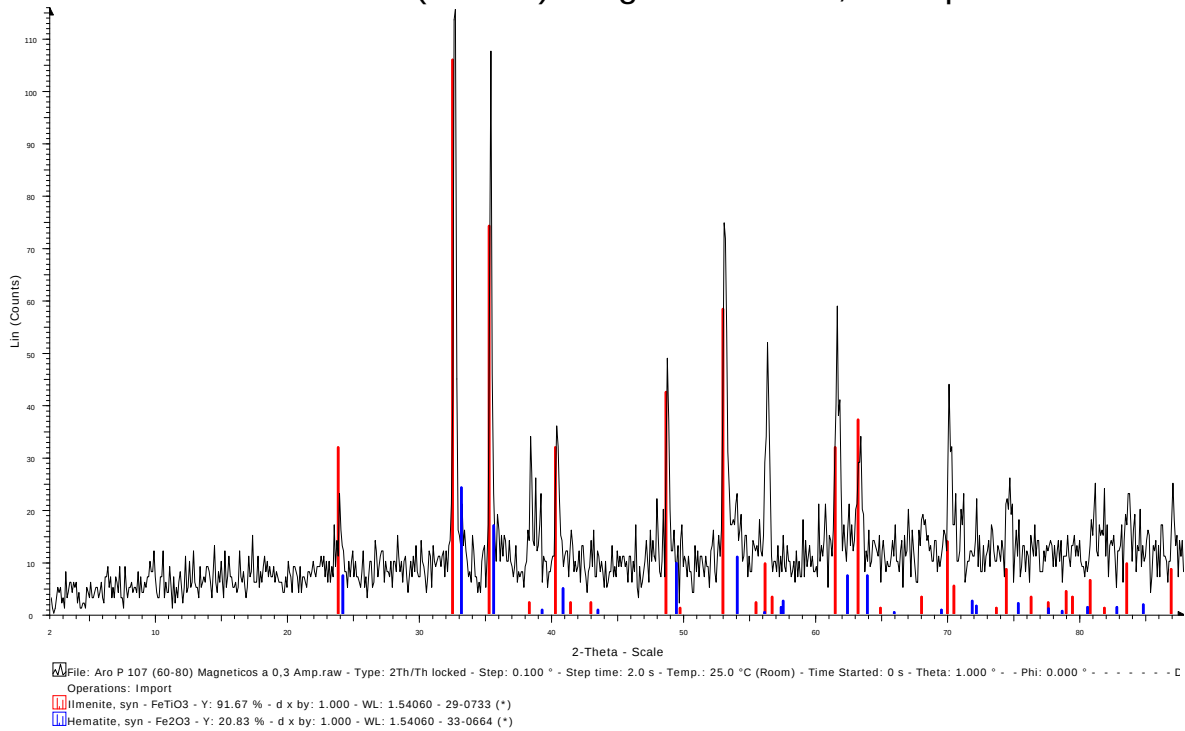
ARO P 102 (250-177 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 1082(60-80) No Magnéticos a 1,2 Amp



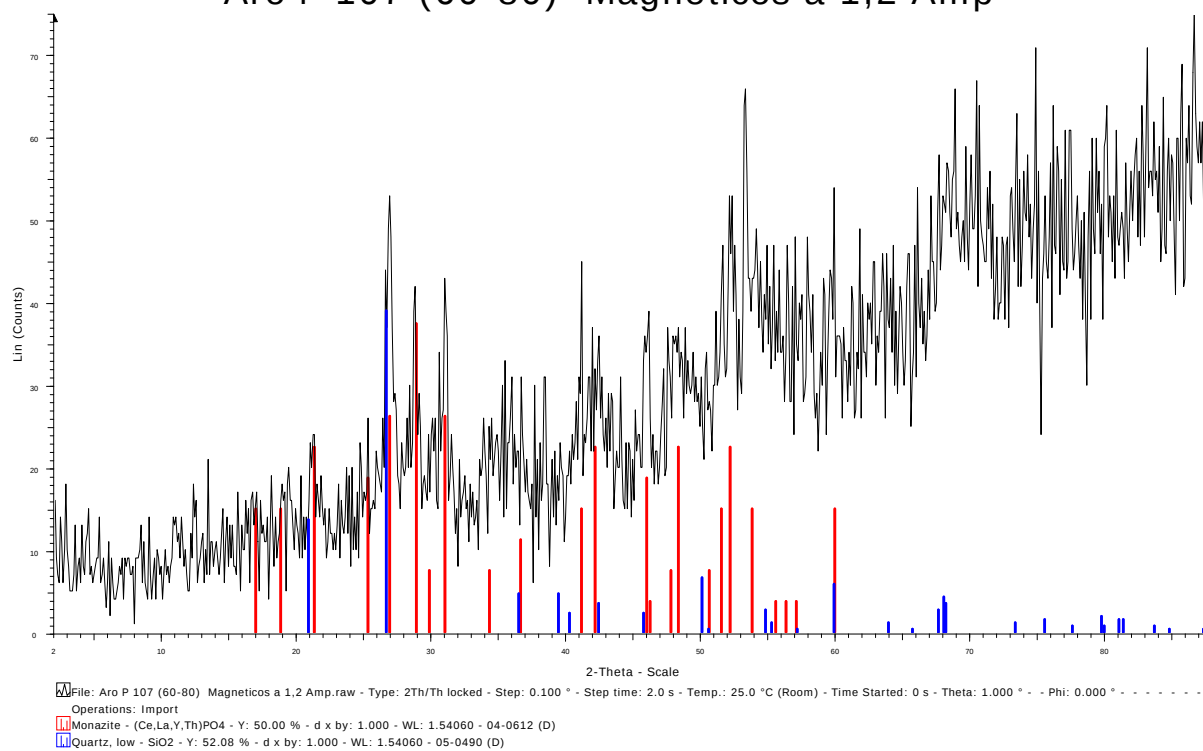
ARO P 107 (250-177 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 107 (60-80) Magneticos a 0,3 Amp



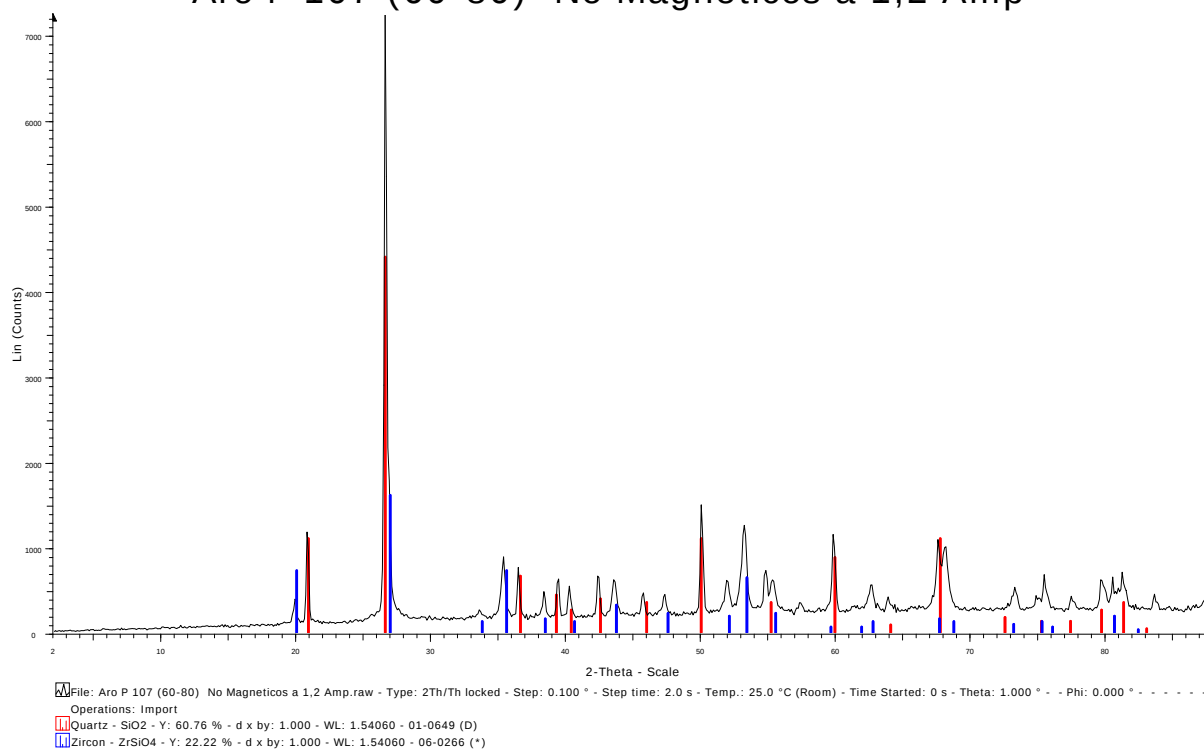
ARO P 107 (250-177 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 107 (60-80) Magnéticos a 1,2 Amp

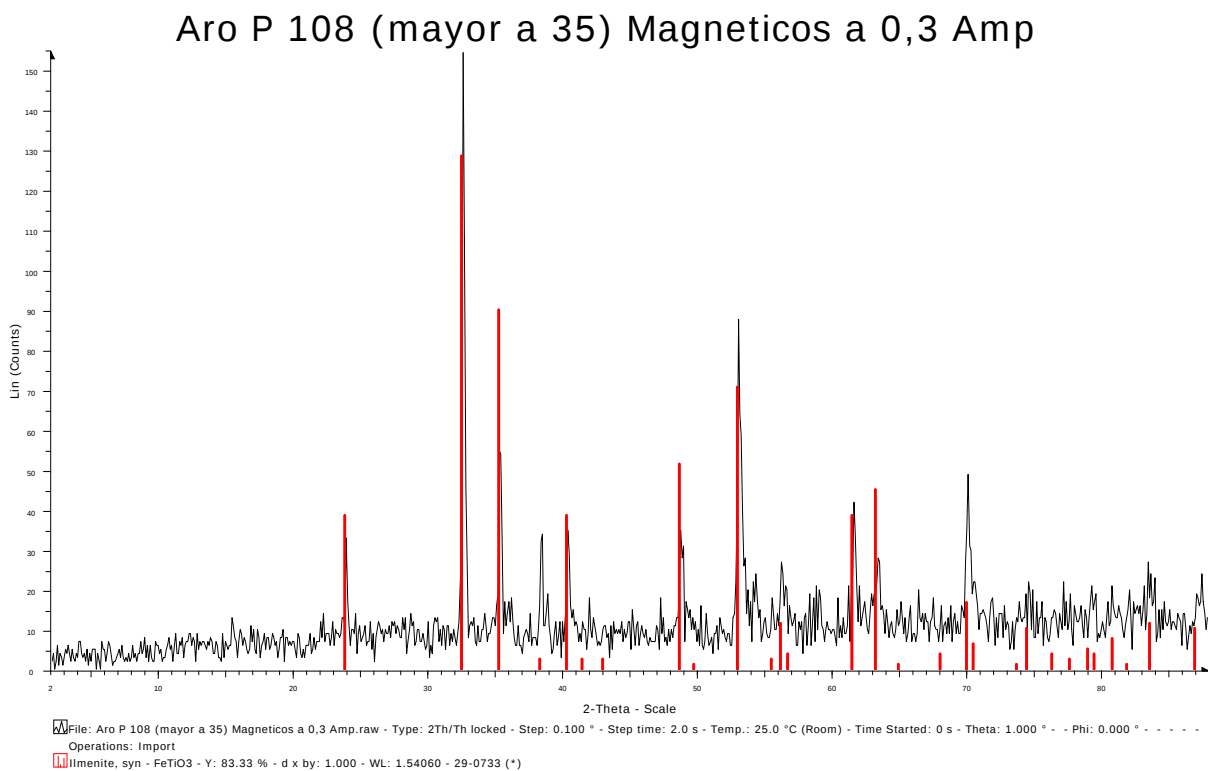


ARO P 107 (250-177 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 107 (60-80) No Magneticos a 1,2 Amp

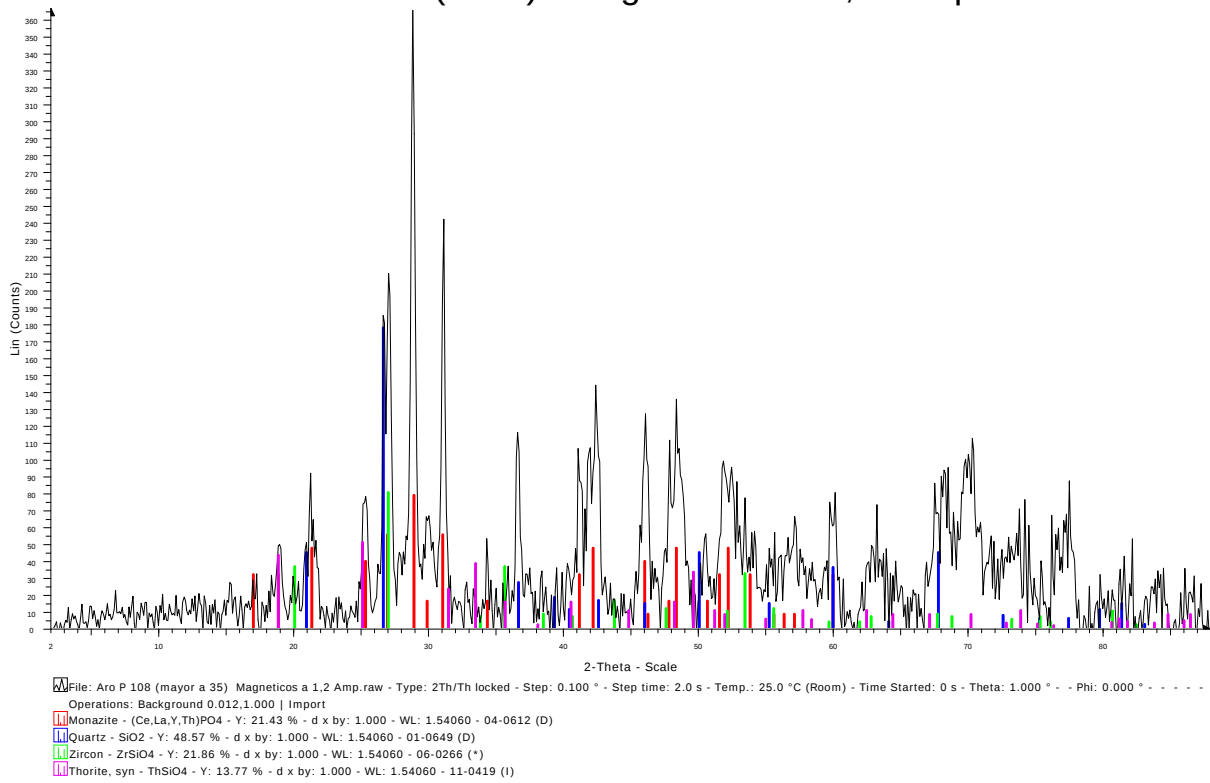


ARO P 108 (>500 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.



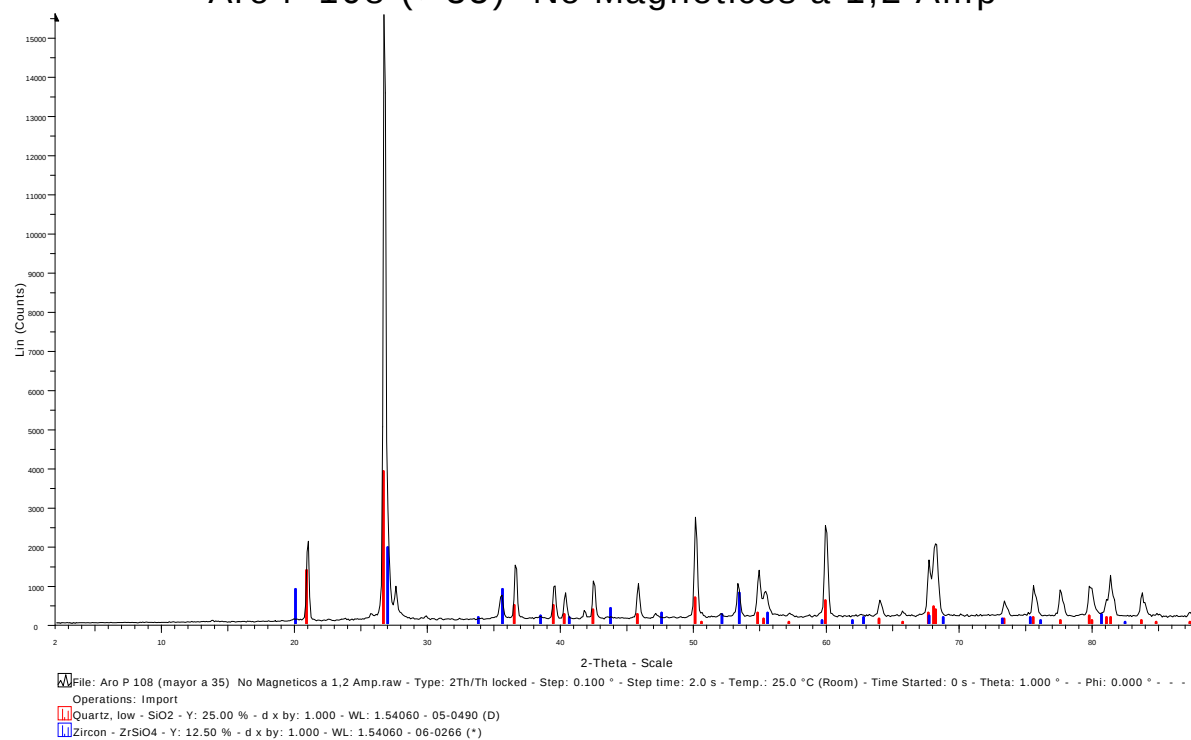
ARO P 108 (>500 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 108 (>35) Magneticos a 1,2 Amp



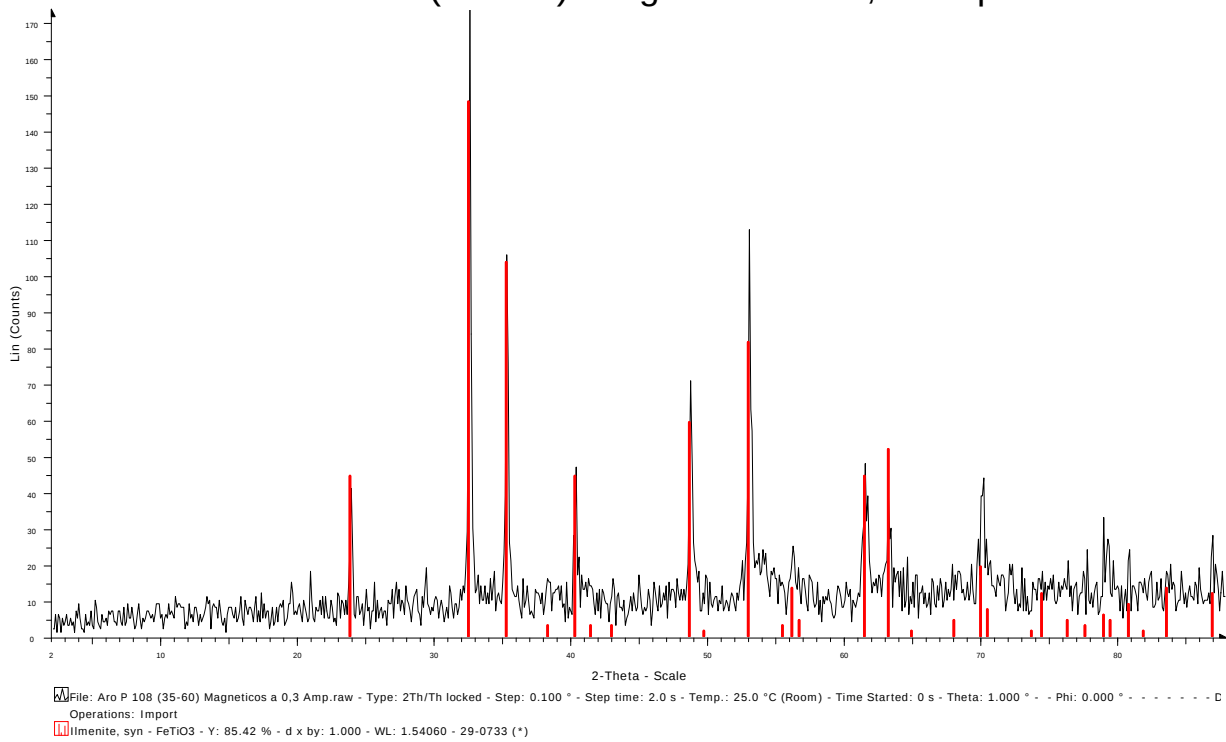
ARO P 108 (>500 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 108 (>35) No Magnéticos a 1,2 Amp



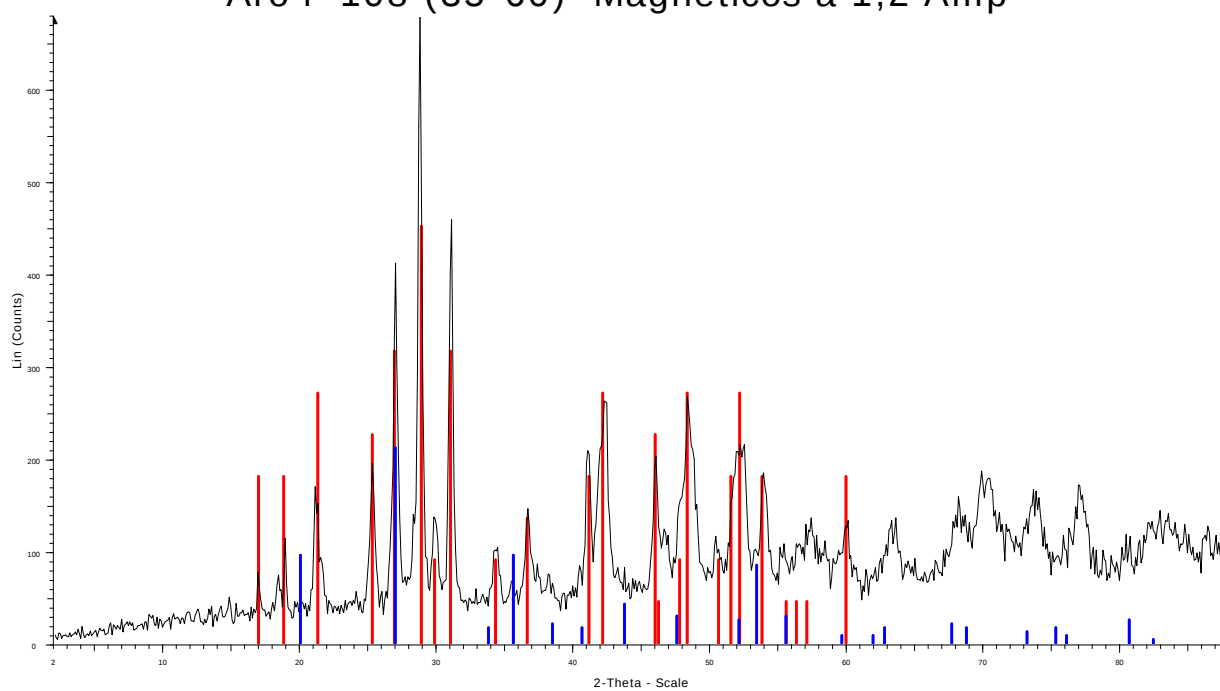
ARO P 108 (500-250 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 108 (35-60) Magneticos a 0,3 Amp



ARO P 108 (500-250 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

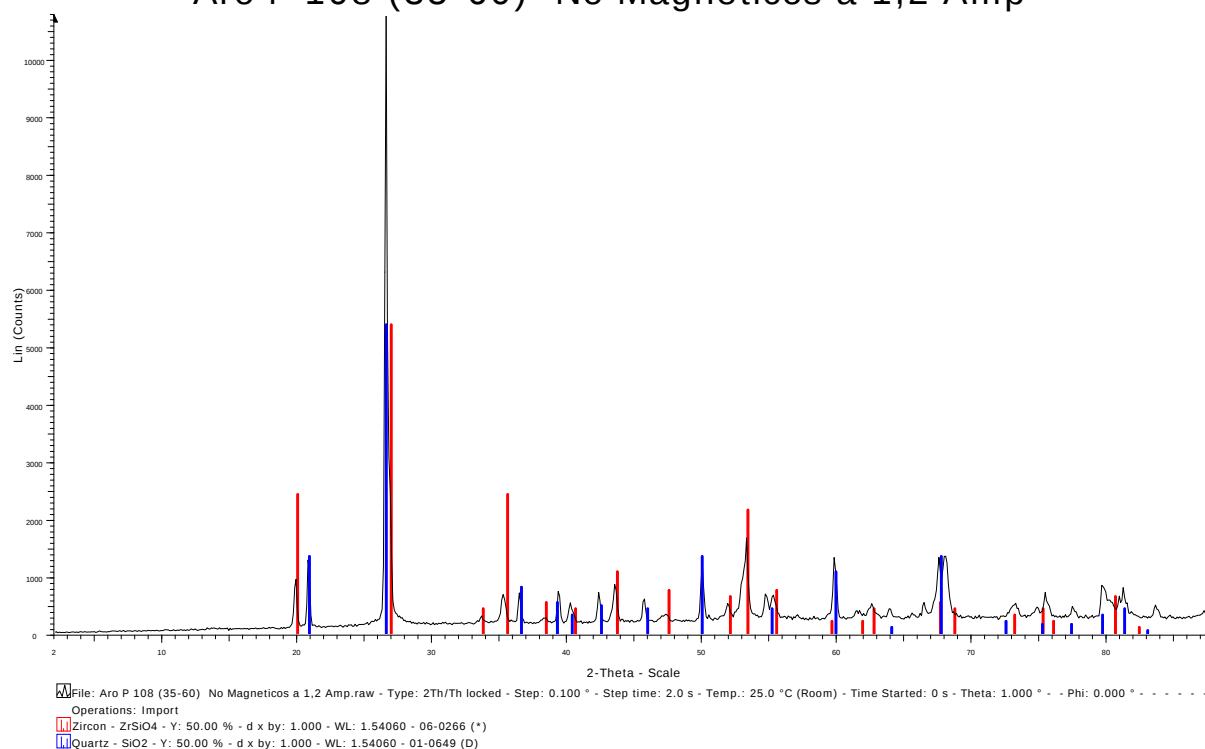
Aro P 108 (35-60) Magneticos a 1,2 Amp



File: Aro P 108 (35-60) Magneticos a 1,2 Amp.raw - Type: 2Th/Th locked - Step: 0.100 ° - Step time: 2.0 s - Temp.: 25.0 °C (Room) - Time Started: 0 s - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.000 ° - - - - -
Operations: Import
Monazite - (Ce,Lu,Y,Th)PO₄ - Y: 66.67 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 04-0612 (D)
Zircon - ZrSiO₄ - Y: 31.25 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 06-0266 (*)

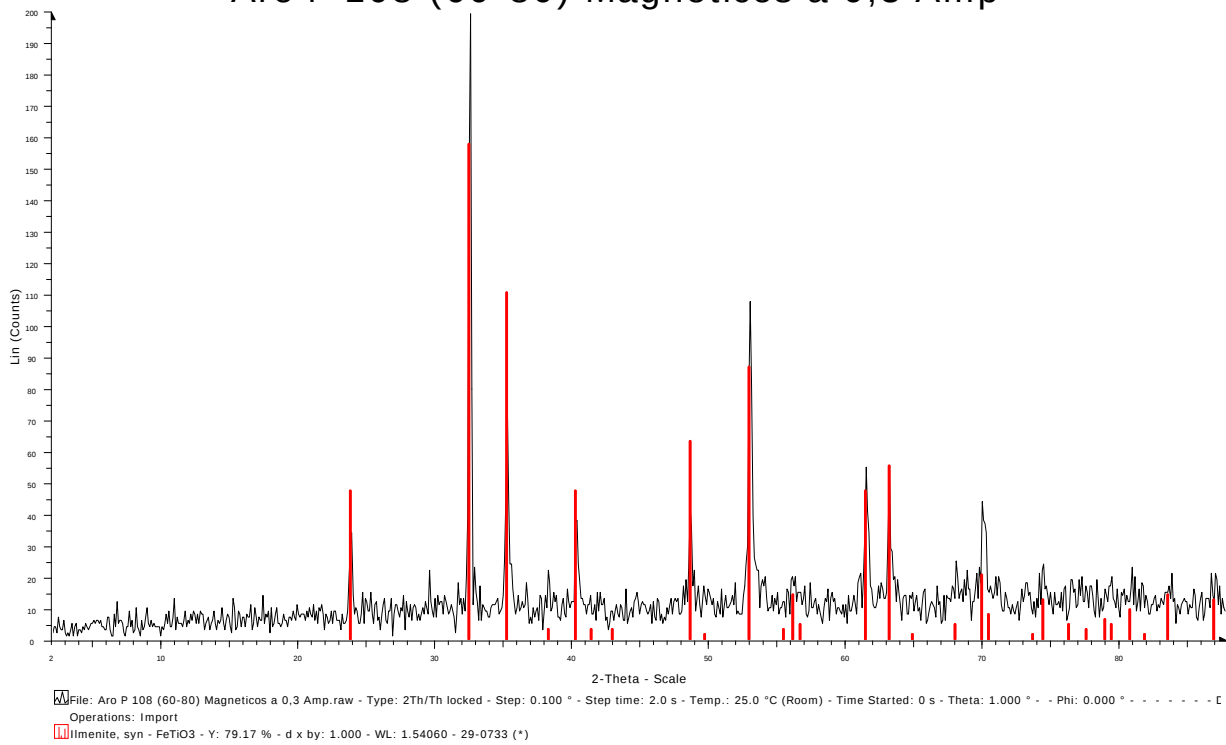
ARO P 108 (500-250 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 108 (35-60) No Magnéticos a 1,2 Amp



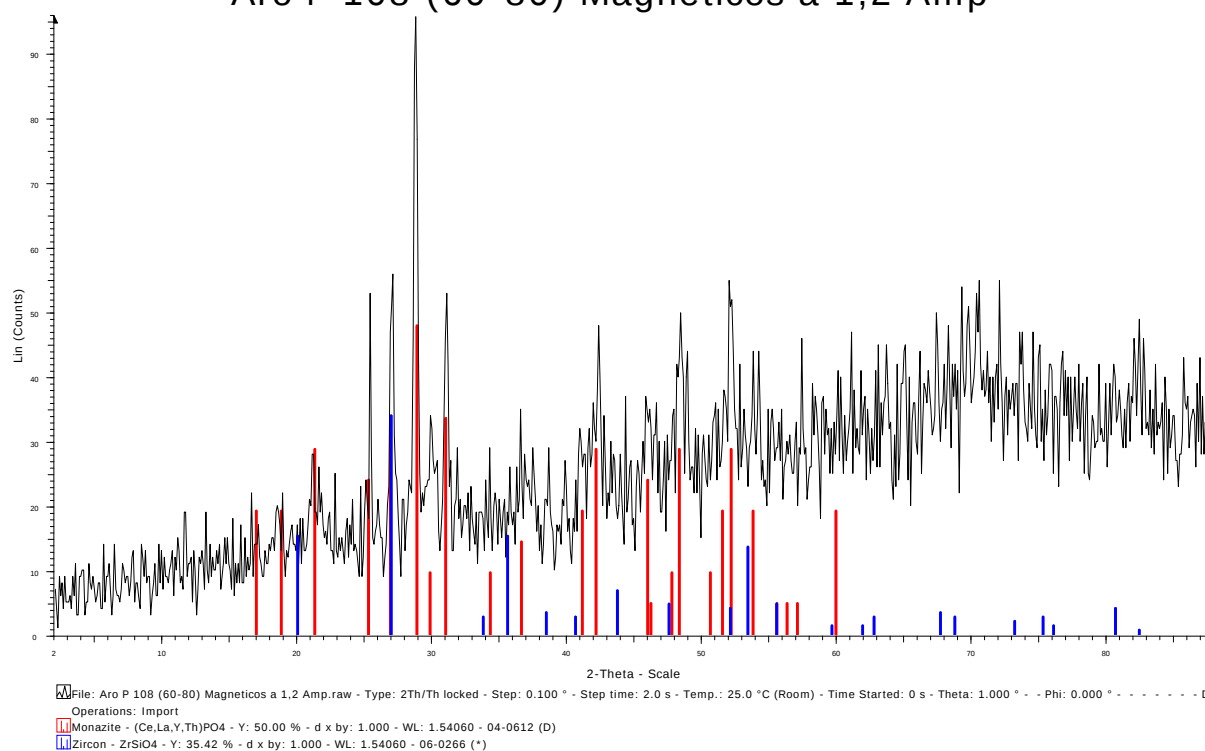
ARO P 108 (250-177 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 108 (60-80) Magneticos a 0,3 Amp



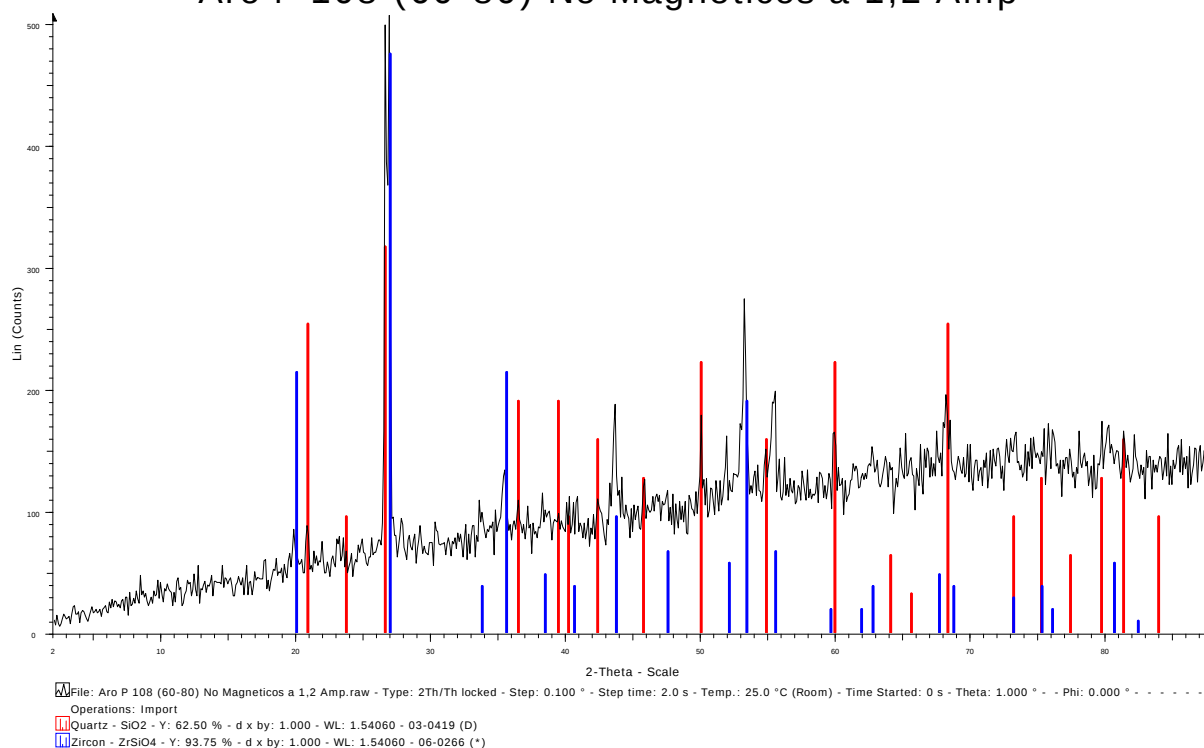
ARO P 108 (250-177 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 108 (60-80) Magneticos a 1,2 Amp



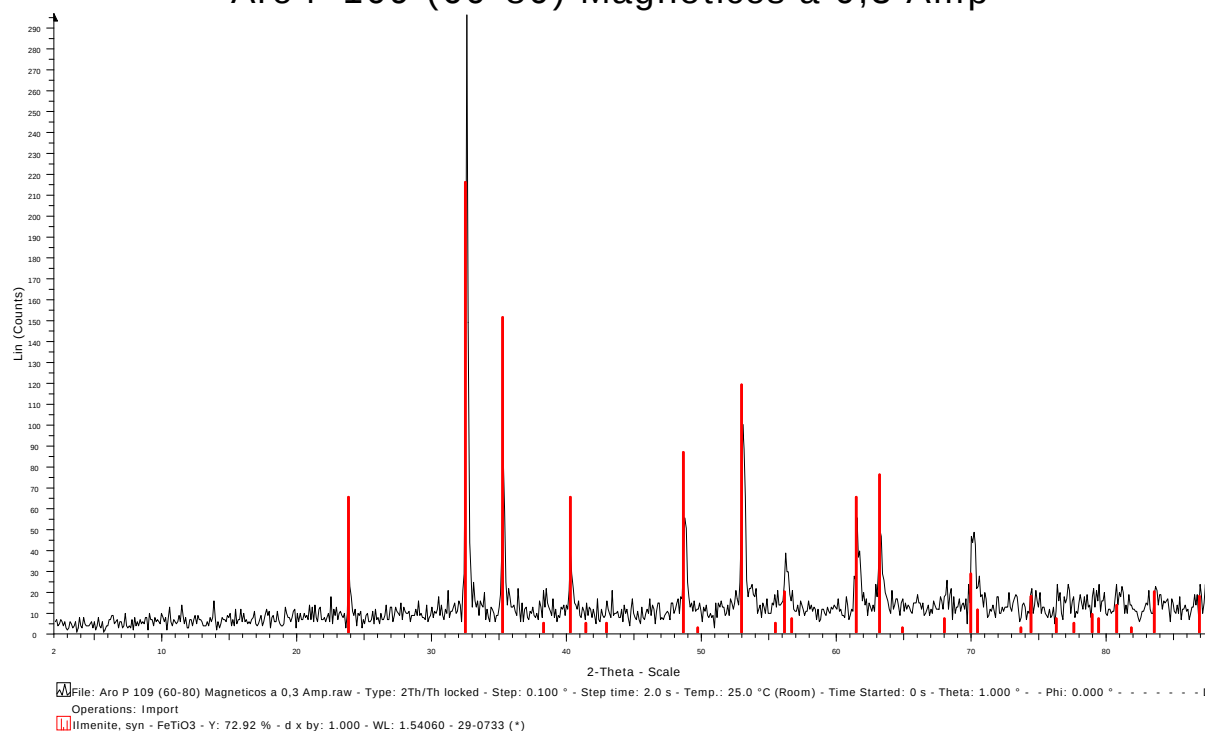
ARO P 108 (250-177 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 108 (60-80) No Magnéticos a 1,2 Amp



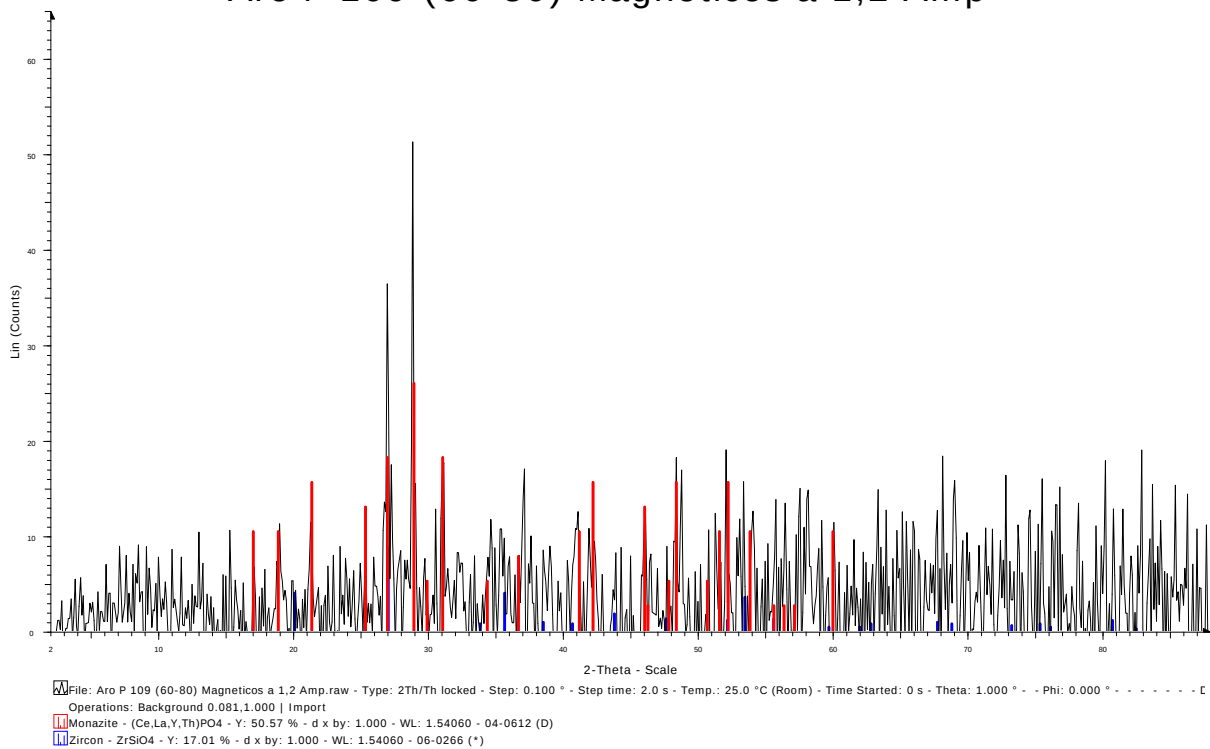
ARO P 109 (250-177 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 109 (60-80) Magneticos a 0,3 Amp



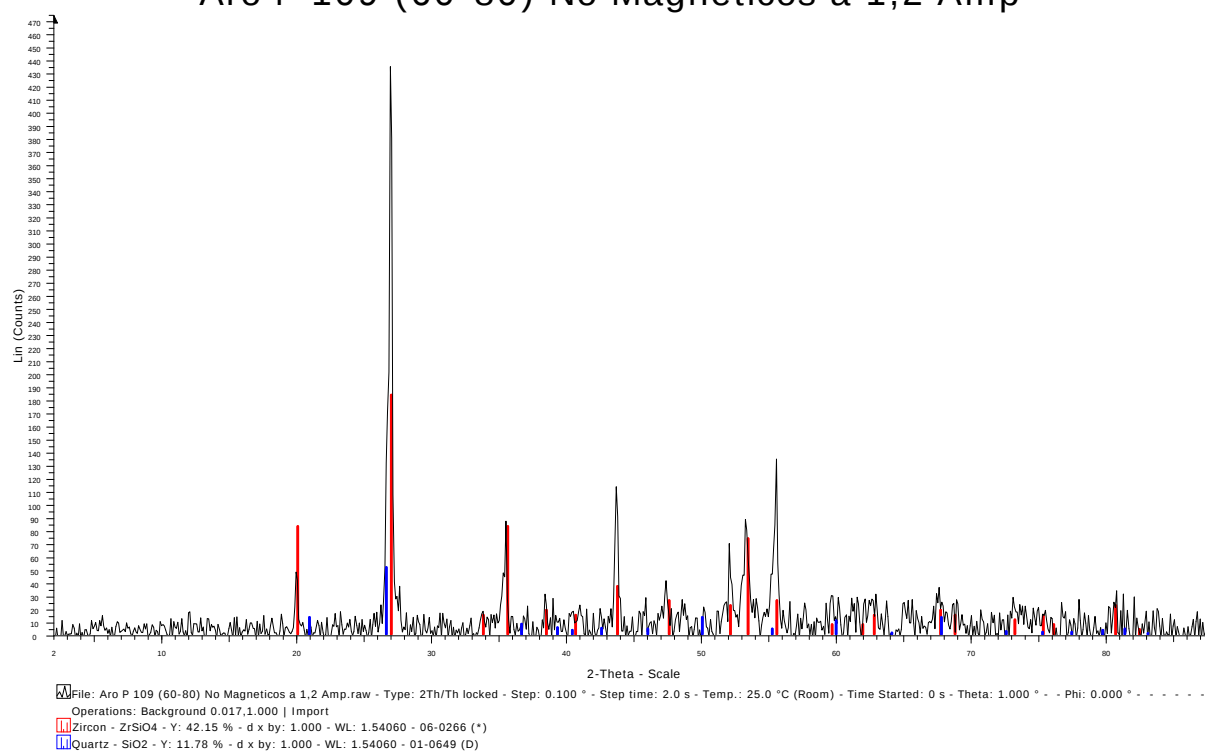
ARO P 109 (250-177 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 109 (60-80) Magneticos a 1,2 Amp



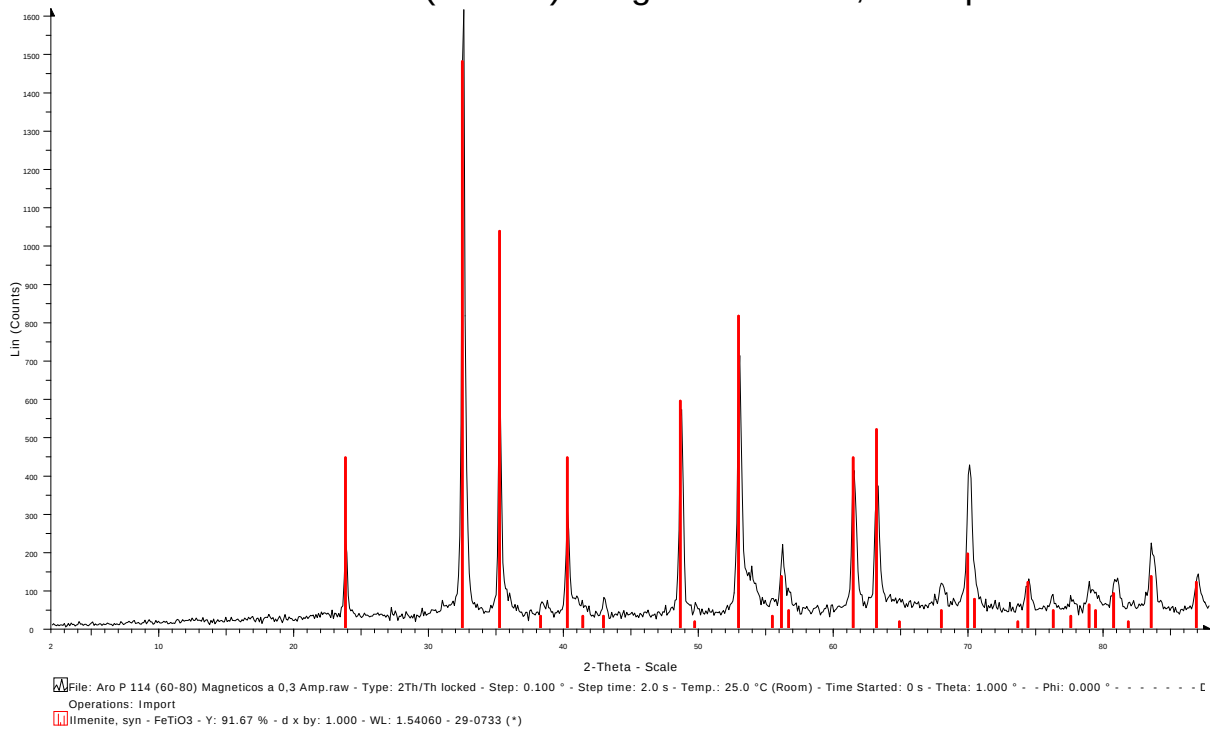
ARO P 109 (250-177 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 109 (60-80) No Magnéticos a 1,2 Amp



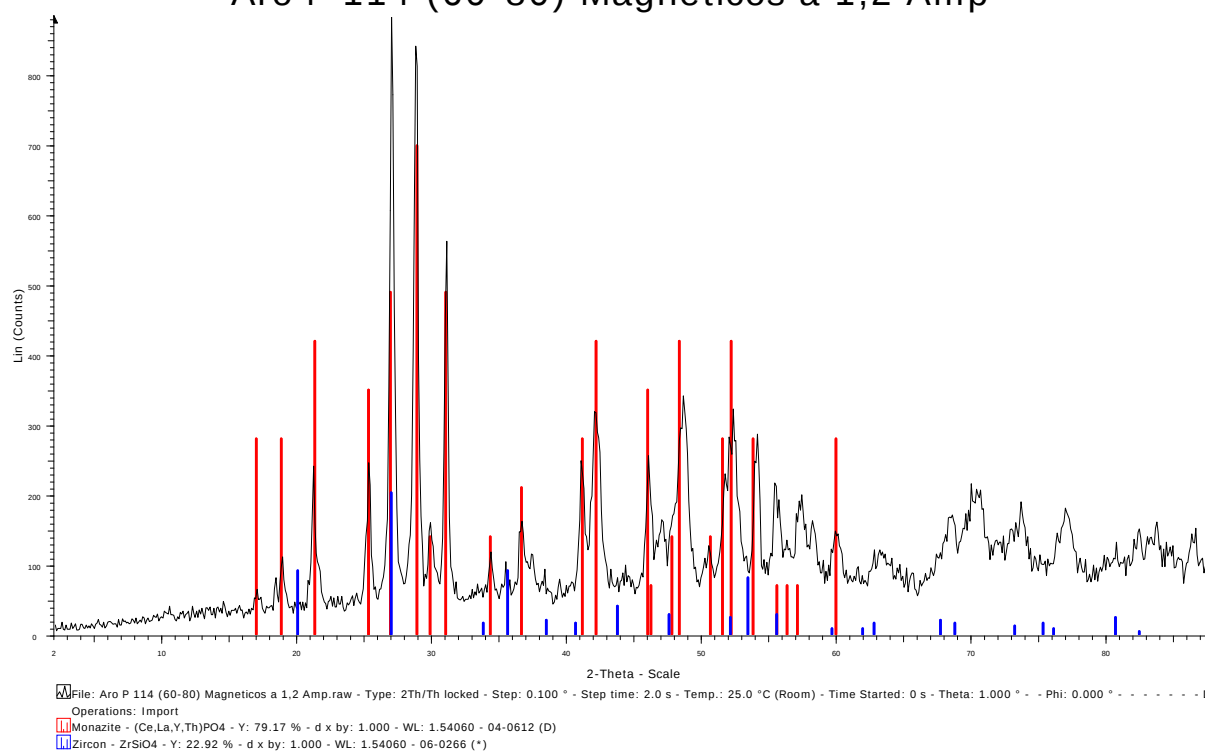
ARO P 114 (250-177 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 114 (60-80) Magneticos a 0,3 Amp



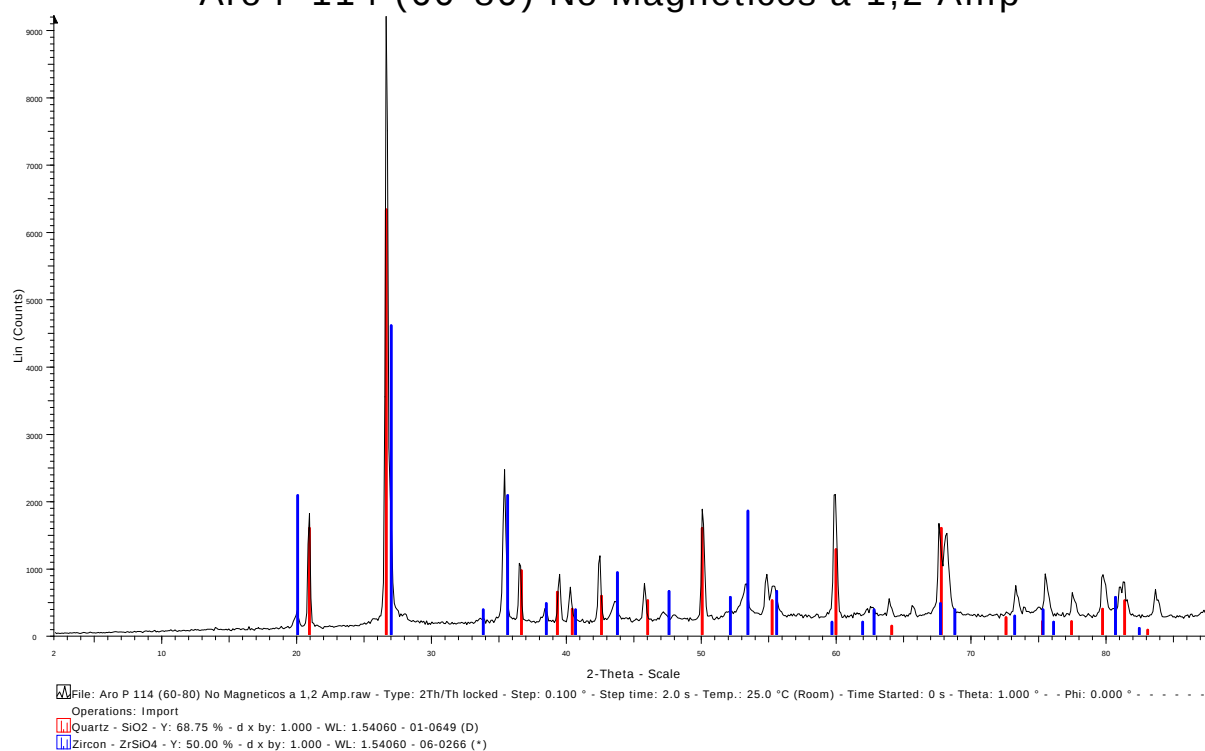
ARO P 114 (250-177 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 114 (60-80) Magneticos a 1,2 Amp



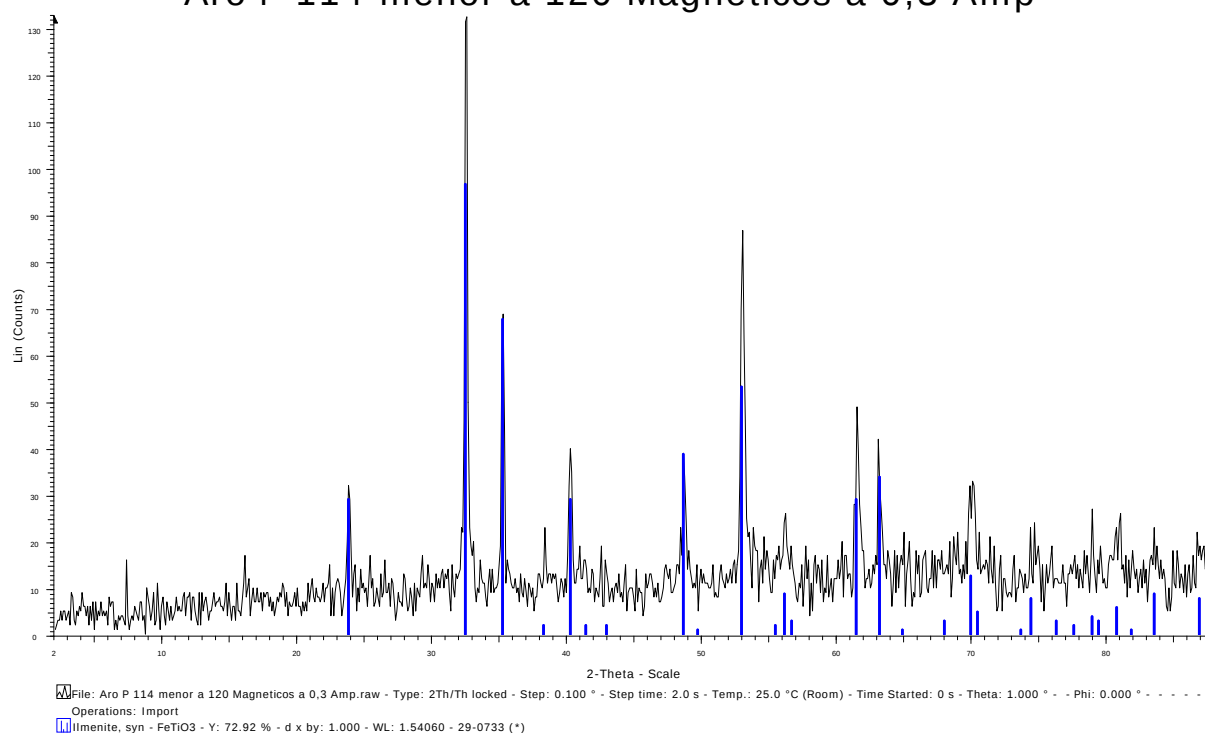
ARO P 114 (250-177 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 114 (60-80) No Magnéticos a 1,2 Amp



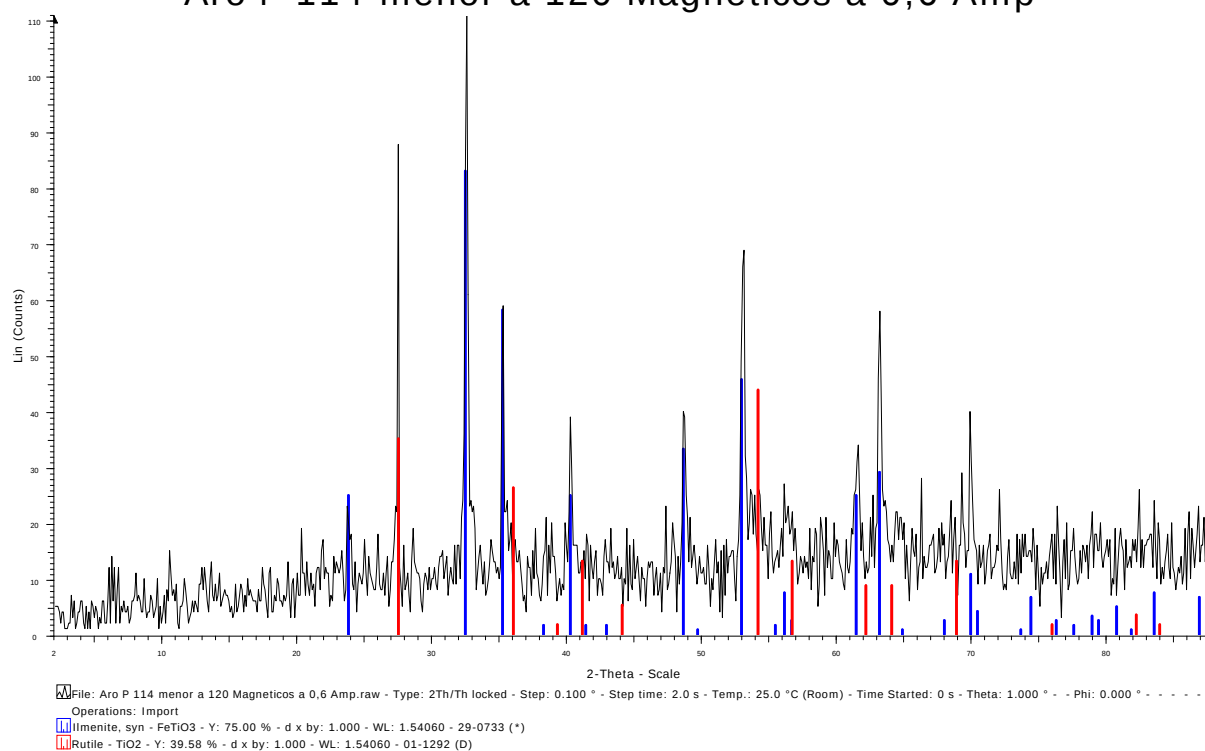
ARO P 114 (<125 μm) Magnéticos a 0,3 Amp.

Aro P 114 menor a 120 Magnéticos a 0,3 Amp



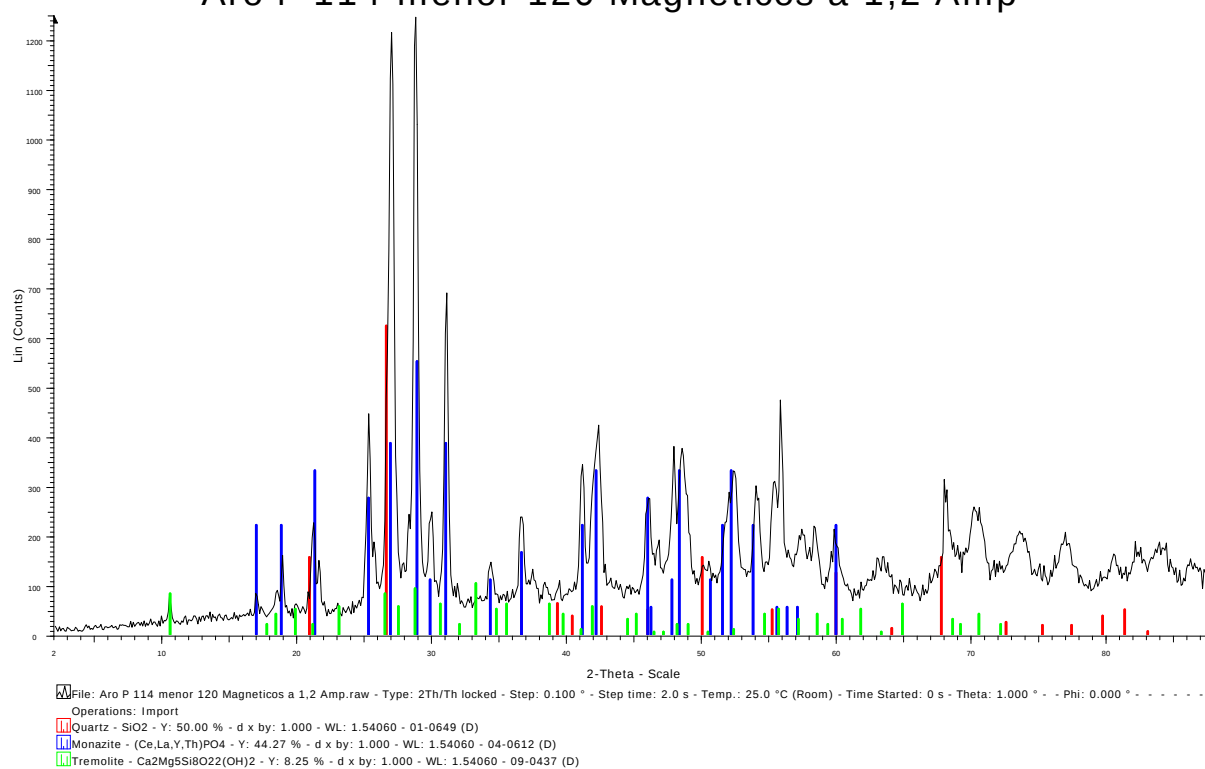
ARO P 114 (<125 μm) Magnéticos a 0,6 Amp.

Aro P 114 menor a 120 Magnéticos a 0,6 Amp



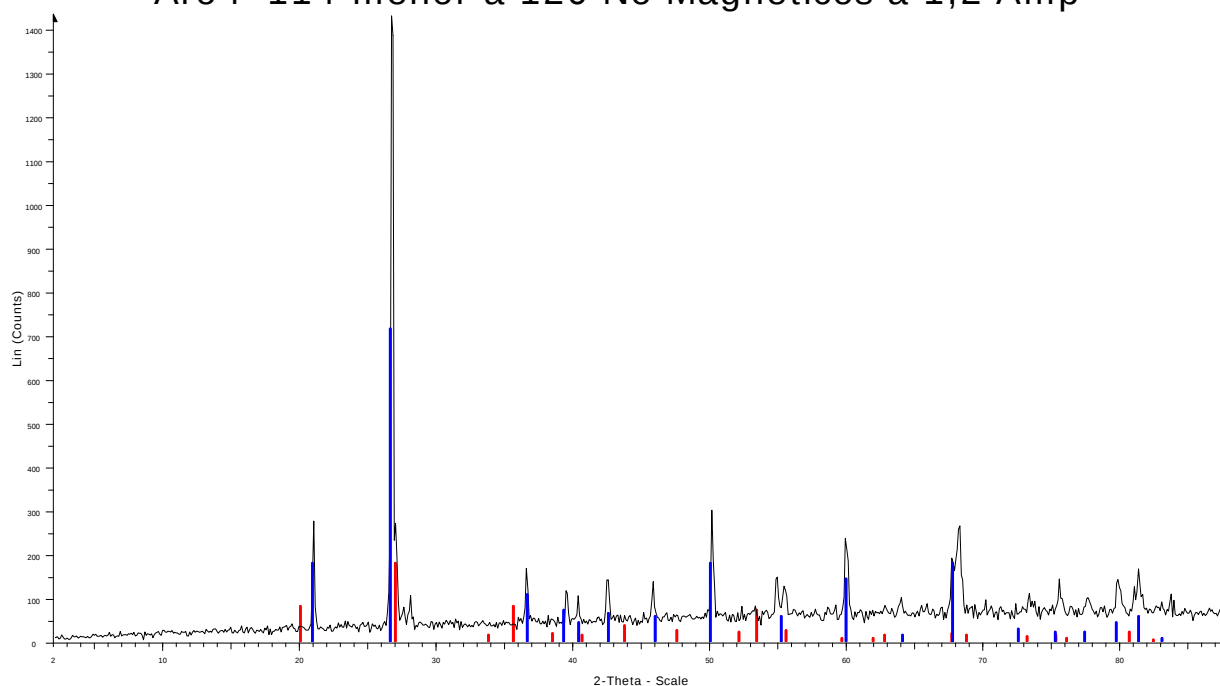
ARO P 114 (<125 μm) Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 114 menor 120 Magnéticos a 1,2 Amp



ARO P 114 (<125 μm) No Magnéticos a 1,2 Amp.

Aro P 114 menor a 120 No Magneticos a 1,2 Amp



File: Aro P 114 menor a 120 No Magneticos a 1,2 Amp.raw - Type: 2Th/Th locked - Step: 0.100 ° - Step time: 2.0 s - Temp.: 25.0 °C (Room) - Time Started: 0 s - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.000 ° - - -
Operations: Import
Zircon - ZrSiO4 - Y: 12.50 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 06-0266 (*)
Quartz - SiO2 - Y: 50.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54060 - 01-0649 (D)