



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

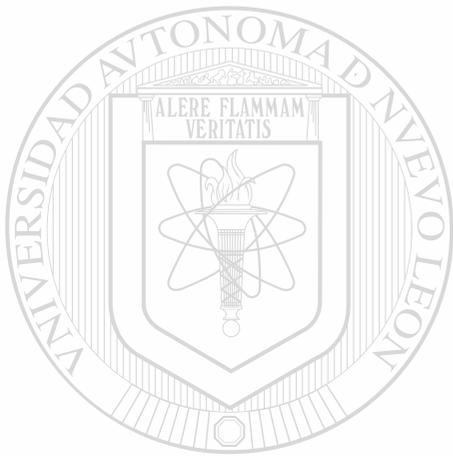
IN

2665

FCFZ

1983

15



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

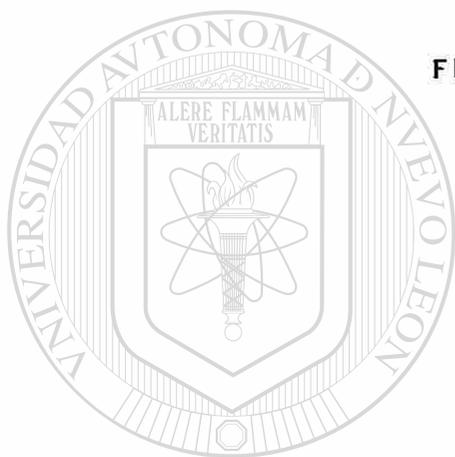


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

DETERMINACION DE TRAZAS DE ELEMENTOS EN MINERAL
DE TUNGSTENO POR EL METODO DE ANALISIS
POR ACTIVACION DE NEUTRONES

PRESENTADO POR

FERNANDO MIRELES GARCIA

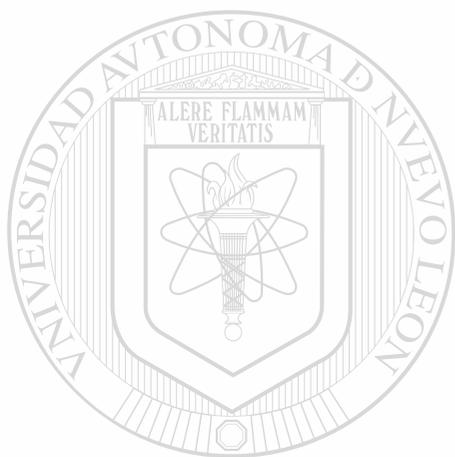


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

DETERMINACION DE TRAZAS DE ELEMENTOS EN MINERAL
DE TUNGSTENO POR EL METODO DE ANALISIS
POR ACTIVACION DE NEUTRONES



APROBADO POR:

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**DETERMINACION DE TRAZAS DE ELEMENTOS EN MINERAL
DE TUNGSTENO POR EL METODO DE ANALISIS
POR ACTIVACION DE NEUTRONES**

PRESENTADO POR

FERNANDO MIRELES GARCIA

TESIS

**Presentada en la División de Estudios Superiores de la
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de
la Universidad Autónoma de Nuevo
León, en Cumplimiento Parcial
de los Requisitos para
Obtener el Grado de**

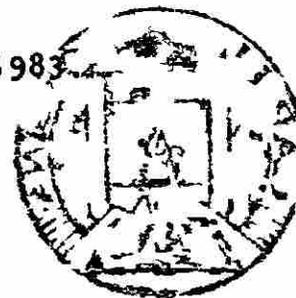
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA NUCLEAR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

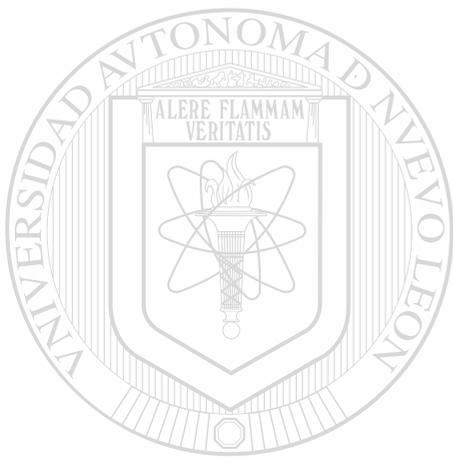
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

San Nicolás de los Garza, N.L.. VERANO-1983

III



TM
Z6651
FCFM
1983
M5

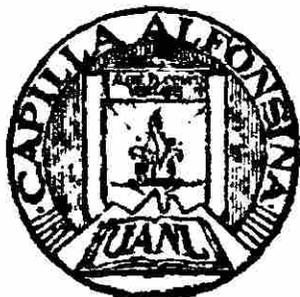


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



137698

A G R A D E C I M I E N T O S

Deseo expresar mi gratitud a los profesores de la División de Estudios Superiores de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la U. A. N. L., que son: Dr. Federico A. Rodríguez; M. en C. Carlos R. Flores Jáuregui y al Lic. en Física Edgar Treviño de los Santos; por su valiosa ayuda brindada en la realización de mis estudios de maestría y también para realizar el trabajo de tesis. Así mismo, mis más sinceras gracias a mis profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica del Programa de Ingeniería Nuclear de la Universidad de Texas en Austin, Texas, E. U. A., que son: Dr. Thomas Bauer, Dr. Andrei Pradzynski y Dr. Nolan E. Hertel; por su gran apoyo brindado para realizar los trabajos de laboratorio que se requieren para esta tesis.

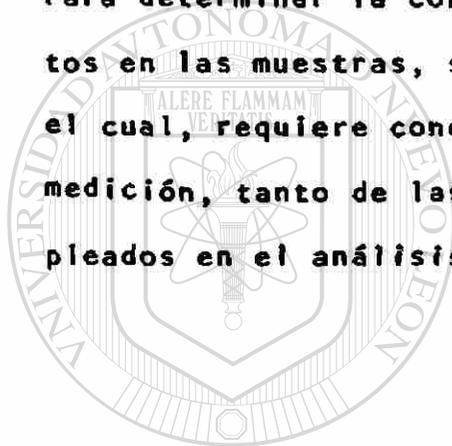
No podría faltar expresar mi agradecimiento a mi esposa Silvia y a mi hijo Alberto, que con su estímulo y ayuda hicieron posible mis estudios de maestría; también para mis padres, hermanos y compañeros mil gracias, ya que ellos me han apoyado siempre en mi vida de estudiante.

Verano-1983

F.M.G.

R E S U M E N

Utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones, se analizaron tres muestras (matrices) de mineral de tungsteno (Scheelita), con el fin de determinar trazas de elementos, tales como: W, Cu, Zn, Mo y Ag. Para determinar la concentración de las trazas de elementos en las muestras, se utilizó el procedimiento directo, el cual, requiere condiciones constantes de irradiación y medición, tanto de las muestras como de los estándares empleados en el análisis.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

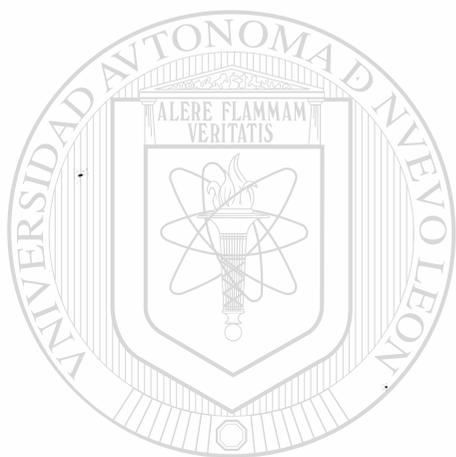
INDICE GENERAL

Capítulo	Página
I. INTRODUCCION	1
II. TEORIA DEL ANALISIS POR ACTIVACION DE NEUTRONES.	3
A. Reacciones Nucleares.	3
B. Decaimiento Radiactivo.	5
C. Producción de Radioisótopos	9
D. Identificación de los Isótopos Radiactivos	12
III. EQUIPO EXPERIMENTAL	16
A. Reactor Nuclear	16
B. Sistema de Espectroscopía de Rayos Gamma	20
IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	26
A. Preparación de los Estándares	26
B. Preparación de las Muestras	27
C. Irradiación y Medición de los Estándares y Muestras.	28
V. ANALISIS EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.	33
VI. CONCLUSIONES.	39

APENDICES:

- A. Cálculo del Flujo Térmico y Epitér-

Cápitulo	Página
mico del Reactor.	41
B. Núclidos formados por Captura Neutrónica con sus Energías Ordenadas en forma Ascendente.	48
REFERENCIAS.	57



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

L I S T A D E T A B L A S

Tabla	Página
I. Flujo de Neutrones en el Reactor TRIGA Mark I	17
II. Datos Utilizados en la Curva de Calibración	24
III. Irradiación Larga de los Estándares en el Soporte Giratorio para Muestras, Están ordenados con su Vida-Media en Forma Ascendente.	29
IV. Irradiación Corta de los Estándares en el Sistema Neumático de Traslado, Están Ordenados con su Vida-Media en Forma Ascendente	30
V. Irradiación Larga de las Muestras en el Soporte Giratorio para Muestras.	31
VI. Irradiación Corta de las Muestras en el Sistema Neumático de Traslado.	32
VII. Radioisótopos y su Energía que se Emplearon en los Cálculos, Están Ordenados con su Vida-Media en Forma Ascendente.	34
VIII. Se Hallaron las Sigüientes Concentraciones Utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones.	35

Tabla

Página

IX. Se Hallaron las Sigüientes Concentraciones Utilizando el Método de Análisis por Absorción Atómica	36
X. Límite Mínimo de Detección Utilizando - el Método de Análisis por Activación de Neutrones, para Aquellos Elementos que - no se Encontraron en las Muestras	38
XI. Energía de Corte Efectiva del Cadmio para Absorsores I/v (en eV) de un Rayo de Neutrones Colimado.	43



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

L I S T A D E F I G U R A S

Figura	Página
1. Representación de la Desintegración - Radiactiva Exponencial, en función del número de períodos.	8
2. Crecimiento-Decaimiento de la Radiac- tividad.	12
3. El Reactor Nuclear TRIGA Mark I.	19
4. Sistema Multicanal Simple de Espectros copia.	21
5. Espectro de Rayos-Gamma del Cobalto -60.	23
<hr/>	
6. Curva de Calibración	25
7. Algunas Formas Típicas de Secciones - Eficaces como Función de la Energía - Neutrónica	42

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

El método de Análisis por Activación de Neutrones es una herramienta poderosa, que ofrece muchas ventajas en el análisis cualitativo y cuantitativo de una gran cantidad de materiales, que pueden estar en estado sólido o líquido. Las ventajas más importantes son: que es un trabajo económico y rápido; se puede determinar concentraciones de elementos en un material dado (matriz) de partes por millón (ppm) o aún menores que ésta. Lo cual dependerá de la sensibilidad que tenga cierto elemento para ser determinado por dicho método.^{1,2}

La constante que juega un papel de gran importancia en el Método de Análisis por Activación de Neutrones es la sección eficaz de captura; ya que la reacción nuclear -- que nos interesa para la producción de isótopos radiactivos es la reacción neutrón-gamma (n, γ),¹⁻³

En la irradiación de las muestras y los estándares, se utilizó un flujo de neutrones térmicos en el soporte giratorio para muestras de aproximadamente 1.8×10^{12} neutrones $\text{cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$; que proviene de un Reactor Nuclear --

TRIGA Mark I; que se localiza en la Universidad de Texas en Austin, Texas, E. U. A..⁷ En la espectroscopía de rayos-gamma, se utilizó un detector de Ge(Li) de alta resolución; - además de un analizador Multicanal, un teletipo para salida de datos y una terminal para entrada y salida de datos.^{8,9, 10,22}

El trabajo desarrollado en esta tesis consistió - en determinar la concentración de trazas de elementos, tales como: W, Zn, Ag, Cu y Mo, contenidas en mineral Scheelita (CaWO_4) de una mina de tungsteno; localizada en el - Estado de Sonora, México, para lo cual, se prepararon seis muestras de ese mineral. Tres de ellas fueron utilizadas - en la irradiación larga y las otras tres para una irradiación corta. Así mismo, se llevó a efecto la preparación de los siguientes estandares: W, Zn, Ag, Cu y Mo; los tres - primeros se utilizaron en la irradiación larga y los restantes para una irradiación corta.^{7,12-14}

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
Los resultados obtenidos utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones se muestran en la Tabla VIII; que si los comparamos con los reportados en la - Tabla IX (esta se tiene como referencia), se observa que - son resultados buenos; estos últimos obtenidos utilizando el Método de Análisis por Absorción Atómica.^{2,7,15-23}

C A P I T U L O I I

TEORIA DEL ANALISIS POR ACTIVACION DE NEUTRONES

Cuando un material es bombardeado o irradiado por partículas nucleares producidas en un reactor nuclear, acelerador de partículas u otras fuentes disponibles; algunos de los átomos presentes en la muestra interactuarán con las partículas bombardeantes. Estos átomos pueden ser convertidos en isótopos diferentes del mismo elemento, o en isótopos de diferentes elementos; dependiendo de las partículas bombardeantes. En muchos casos, los isótopos producidos son radiactivos y son llamados radioisótopos; si la radiactividad puede ser distinguida o separada de todas las demás radiactividades presentes al mismo tiempo (o presentes originalmente); entonces la cantidad de esa radiactividad inducida es una medida del isótopo padre, y por lo tanto del elemento padre presente en el material original.²

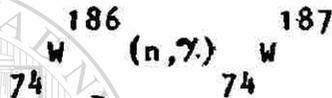
A. REACCIONES NUCLEARES

Isótopos estables pueden sufrir un gran número de transformaciones nucleares. La transformación más ampliamente aplicada para el Análisis por Activación de Neutrones es

la reacción nuclear neutrón-gamma (n,γ), que se ilustra en el siguiente ejemplo:



Esta reacción es usualmente expresada en una forma más simple,



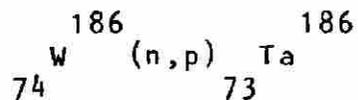
La reacción (n,γ) ocurre con gran probabilidad - con neutrones térmicos ($E_n \sim 0.025$ eV) que con neutrones de varios MeV de energía; aunque resonancias fuertes de absorción pueden ocurrir en la región epitérmica de energía.

El neutrón es capturado por un átomo blanco, y -

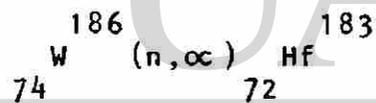
o uno o más rayos-gamma son emitidos inmediatamente; éstos - son llamados rayos-gamma pronto. Mientras no ocurran cambios en el número atómico (no cambie el número de protones), el radioelemento conserva su identidad química del material blanco. Esta reacción es de importancia primaria en el Análisis por Activación de Neutrones con neutrones térmicos.

Un número de otras reacciones nucleares usadas - ampliamente en este campo incluyen reacciones (n,p), la - cual requiere neutrones con energías más altas que las - energías térmicas. En esta reacción un neutrón penetra al

núcleo blanco con la energía suficiente y como resultado es expulsado un protón. El número atómico es reducido en la unidad, de este modo se convierte el átomo blanco en un elemento diferente; por ejemplo,



La reacción (n,α) usualmente también requiere neutrones con energías más altas que la energía térmica. La reacción nuclear (n,α) , un neutrón entra al núcleo blanco y provoca que una partícula α sea instantáneamente emitida. El número atómico del átomo blanco es reducido en dos unidades. Por ejemplo,



Otras reacciones las cuales encuentran alguna aplicación son: $(n,2n)$, (p,n) , (n,n') , (p,γ) , (d,p) , (d,n) , (d,α) , (α,n) , (α,p) y (n,f) .

B. DECAIMIENTO RADIOACTIVO

Mientras la radiactividad inducida es medida en términos de la razón de decrecimiento o decaimiento de los átomos radiactivos, más que en términos directos del número de átomos radiactivos presentes, esto es válido mientras se mencionen las leyes del decaimiento radiactivo.

El decaimiento radiactivo es un proceso puramente aleatorio, es decir al azar, y la probabilidad de que se desintegre un núcleo radiactivo dado es fija e independiente de la presencia o ausencia de otros núclidos radiactivos. Así, la razón por la cual se desintegran estos núclidos radiactivos es simplemente dependiente del número presente a cualquier tiempo y se expresa por la relación.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

donde N es el número de átomos radiactivos a cualquier tiempo t .

λ es la constante de desintegración radiactiva

La constante de decaimiento λ es una característica del núcleo radiactivo bajo consideración. La integración de la

Ec. 1 nos da,

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

donde N_0 es el número de átomos radiactivos presentes en el tiempo $t = 0$. Si el tiempo es medido, durante el cual el número de átomos radiactivos decrece a la mitad del número presente originalmente; entonces tenemos que,

$$\therefore N_0 = N_0 \exp(-\lambda t_{1/2}) \quad (3)$$

entonces $\ln 2 = \lambda t_{1/2}$ (4)

Por lo tanto $t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$ (5)

Así $t_{1/2}$ es una función de λ y por lo tanto también es una constante nuclear. Esto se conoce como Vida-Media y es una característica del núcleo bajo decaimiento. Núcleos radiactivos de diferentes pesos atómicos y/o diferentes números atómicos, tienen diferente vida media; pero ocasionalmente dos vidas medias pueden ser iguales o muy similares para cualquier distinción que sea hecha. Así por ejemplo, tenemos el caso del manganeso-56 y el níquel-65 que tienen vidas medias de 2.58 hrs. y 2.56 hrs. respectivamente.

En general la fracción del número inicial del núcleo radiactivo (o actividad) después de un período de n vidas medias es $(1/2)^n$. Después de un período de siete vidas medias, ver Fig. 1, la cantidad de material radiactivo habrá decrecido a menos del 1% de su valor inicial.

Los procesos por medio de los cuales decaen los radionúclidos de un estado de alta energía a otro de baja energía son bastante variados. Los procesos de mayor interés en el Análisis por Activación de Neutrones son: emisión beta (β^-), emisión de positrón (β^+), emisión de fotones de rayos-gamma (γ), y captura electrónica orbital. Para actividades inducidas por neutrones térmicos, solamente emisión beta ocurre con la gran mayoría de los núclidos. Las párti-

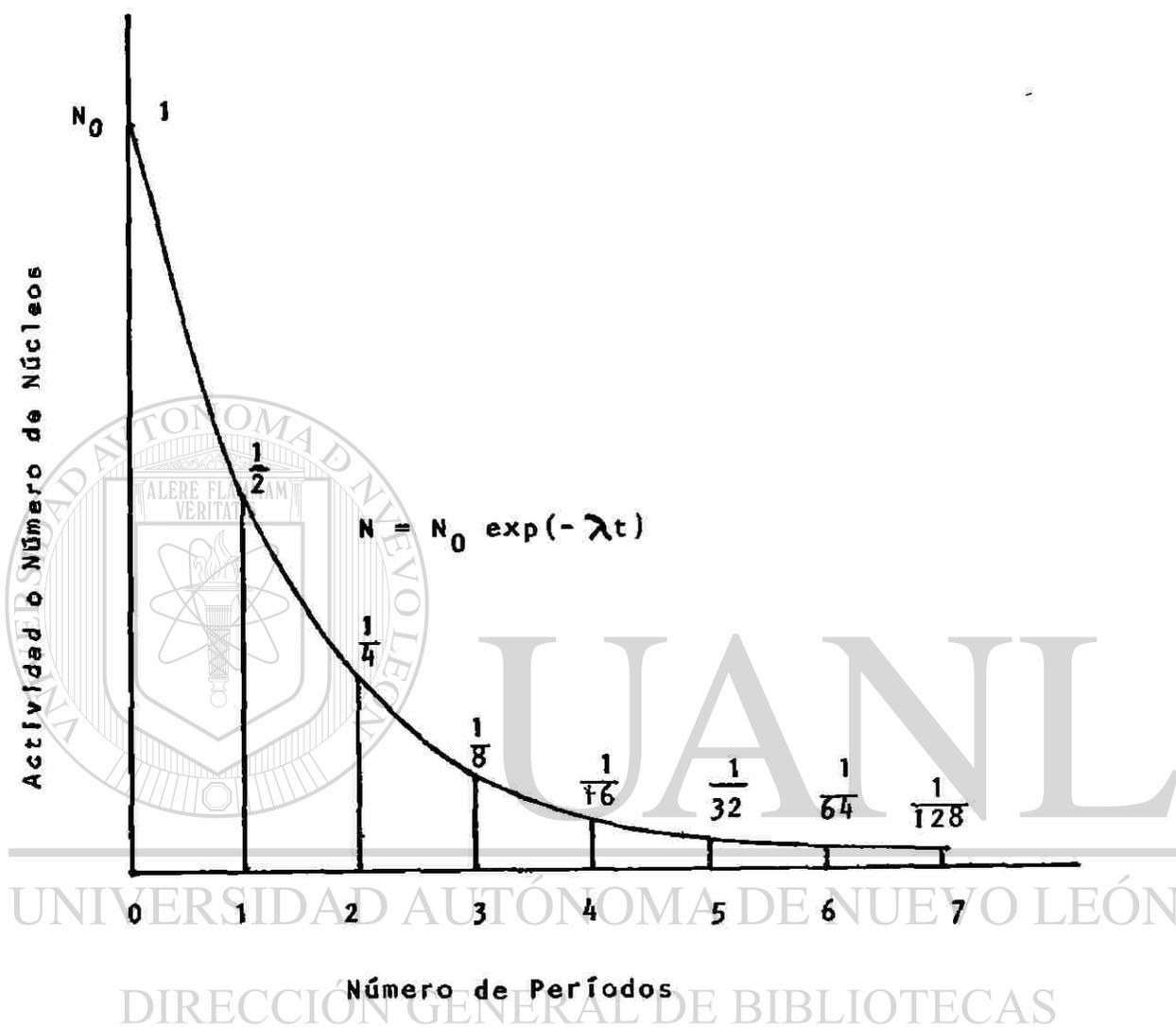


Fig. 1. Representación de la desintegración radiactiva exponencial, en función del número de períodos.

culas beta emitidas por un núcleo en particular, no son -- monoenergéticas; ellas exhiben una distribución continua de energías desde una energía cero hasta una máxima, es una ca racterística del radionúcleo. La energía máxima de la mayoría de los emisores beta (β^-) es menor que 2.5 MeV.

La emisión del fotón de un radionúcleo puede provenir de dos fuentes diferentes. La emisión de un fotón se origina directamente del núcleo de un átomo y se llama rayo-gamma (γ); este tipo de emisión es normalmente precedida por un evento de decaimiento beta del mismo núcleo. Es también posible para el núcleo que captura electrones orbitales; este evento por sí mismo no exhibe emisión de un fotón, sin embargo, los electrones orbitales de nivel alto caen dentro de las posiciones vacantes de la capa K o L, surgiendo fotones de rayos-X. Las energías de estos fotones son características del elemento al cual pertenecen los radioisótopos que los producen. En general un análisis de la energía del fotón emitido de una fuente desconocida, puede con frecuencia conducir a la identificación del radionúcleo. La captura electrónica orbital de la capa K o L no ocurre en radionúclidos producidos por la irradiación con neutrones térmicos. ¹⁻⁶

C. PRODUCCION DE RADIOISOTOPOS

Cuando un radioisótopo es producido a una razón constante tal como sucede en un reactor nuclear o acelerador

de partículas; la razón de acumulación del isótopo es dada - por la diferencia entre la razón de producción y la razón de decaimiento del isótopo. Por lo tanto tenemos,

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N \quad (6)$$

donde P es la razón de producción del núclido radiactivo - ($P = \phi \sum_{act.} V$; donde ϕ es el flujo de neutrones promedio que llegan al blanco, $\sum_{act.}$ es la sección eficaz macroscópica promedio de activación que comprende el espectro de energías del neutrón, y V es el volumen del blanco). La solución de la Ec. 6 viene dada por,

$$N = \frac{P}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t_i)] + N_0 \exp(-\lambda t_i) \quad (7)$$

donde t_i es el tiempo de irradiación.

En la mayoría de los casos, N_0 el número de átomos radiactivos presentes inicialmente es cero; por lo tanto tenemos que,

$$N = \frac{P}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad (8)$$

y la razón de desintegración de estos átomos radiactivos al instante de trasladarlos es dada por,

$$A = \lambda N = P [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad (9)$$

Si t_d es el tiempo después de efectuar el traslado; es decir, el tiempo después del tiempo de irradiación t_i ; entonces tenemos que,

$$A = P \left[1 - \exp(-\lambda t_i) \right] \exp(-\lambda t_d) \quad (10)$$

nos dá la actividad después del traslado de la muestra desde el flujo de activación.

La fig. 2 muestra una curva típica de crecimiento-decaimiento, en la cual podemos ver que el máximo o actividad de "saturación" S , es solamente aproximada a un límite teórico. En forma práctica podemos ver que de la Ec. 1 y la Ec. 9, tenemos lo siguiente,

$$A_t = P \left[1 - \exp(-0.693 t_i / T_{1/2}) \right] \quad (11)$$

Así cuando $t_i = T_{1/2}$

$$A_t = P(1 - 1/2) = P/2$$

si $t_i = 2T_{1/2}$, entonces $A_t = 3/4 P$, y así sucesivamente. - Esto es más bien interminable cuando irradiamos el material por mucho más de dos o tres vidas medias. Para obtener una actividad mayor requerimos de una razón de producción más alta; esto es, un flujo de neutrones más alto. Es también válido notar que para tiempos de irradiación más cortos que una vida media, la relación entre actividad inducida y tiempo

po de irradiación es aproximadamente lineal. ¹⁻⁴

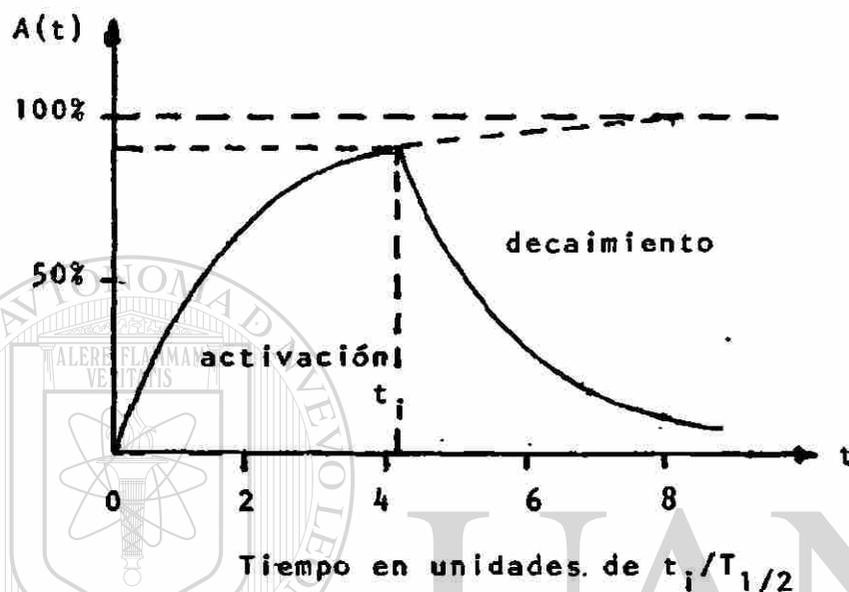


Fig. 2. Crecimiento-decaimiento de la radiactividad.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

D. IDENTIFICACION DE LOS ISOTOPOS RADIACTIVOS

Quando los materiales son irradiados, la razón de producción se mantiene normalmente constante, prescindiendo de la naturaleza de las partículas bombardeantes, y manteniendo constante el flujo de irradiación. El número de átomos siendo irradiados pueden ser considerados como constantes; mientras que una fracción está siendo removida por ac-

tivación y es una fracción pequeña del total presente. La razón de formación expresada por la Ec. 11, también puede expresarse como,

$$P = N \sigma \phi \quad (12)$$

donde N es el número presente de átomos blanco; σ es la sección eficaz de activación para la reacción (cm^2) y es una medida de la probabilidad de que un átomo blanco interactúe con las partículas bombardeantes; y ϕ es el flujo de las partículas bombardeantes, (partículas / cm^2 / seg.). La razón de desintegración, es decir, la actividad de los radioisótopos producidos es dada por,

$$A = N \sigma \phi [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad (13)$$

donde t_i es el tiempo de irradiación. Puesto que pocos elementos son monoisotópicos, solamente una fracción f de los átomos blanco tomarán parte en la reacción; donde f es la abundancia fraccional del isótopo de interés. El número de átomos puede ser expresado en términos del peso W del elemento presente, su peso atómico M y el número de Avogadro - N_a ; así la Ec. 13 se transforma en,

$$A = \frac{f N_a W}{M} \sigma \phi [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad (14)$$

$$\text{donde } N = \frac{f N_a W}{M}$$

Sin embargo, la actividad no será determinada hasta un tiempo t_d después de que el bombardeo ha terminado, así los átomos radiactivos producidos habrán decaído en un factor de $\exp(-\lambda t_d)$. Por lo tanto tenemos que,

$$A = \frac{f N_a W}{M} \sigma \phi [1 - \exp(-\lambda t_i)] \exp(-\lambda t_d) \quad (15)$$

si esta ecuación es reescrita, queda de la forma,

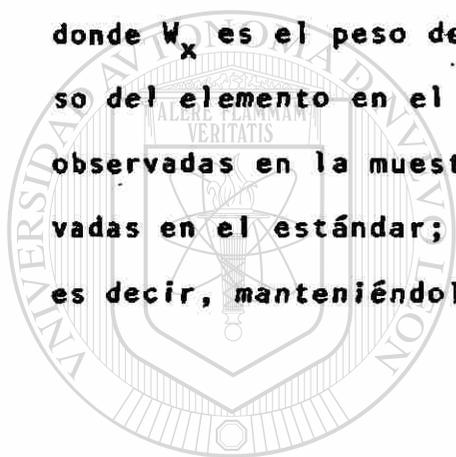
$$W = \frac{M A \exp(\lambda t_d)}{f N_a \sigma \phi [1 - \exp(-\lambda t_i)]} \quad (16)$$

En principio todos los factores del lado derecho son conocidos o pueden ser medidos. Por lo tanto, sería posible calcular el peso del elemento presente. En la práctica, sin embargo, σ no es conocida con suficiente exactitud; el ϕ no puede ser determinado exactamente; no siempre es fácil de terminar la razón de desintegración absoluta A . Consecuentemente un procedimiento que envuelva la comparación de una muestra conocida es invariablemente usado. La cantidad de actividad de una muestra desconocida es comparada con la canti

dad de actividad de un estándar del elemento que está siendo determinado. Es entonces una cuestión simple calcular el peso del elemento en la muestra de la relación,

$$W_x = W_s \frac{C_x}{C_s} \quad (17)$$

donde W_x es el peso del elemento en la muestra, W_s es el peso del elemento en el estándar, C_x es la razón de cuentas observadas en la muestra, y C_s es la razón de cuentas observadas en el estándar; medidas bajo las mismas condiciones, es decir, manteniéndolas constantes.¹⁻³



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

C A P I T U L O I I I

EQUIPO EXPERIMENTAL

A. REACTOR NUCLEAR

El Reactor Nuclear TRIGA Mark I, manufacturado - por la Gulf General Atomic (anteriormente una División de General Dynamics Corporation), localizado en la Universidad de Texas en Austin, Texas, E. U. A.; es un reactor - con seguridad inherente, que se utiliza para entrenamien- to, investigación y producción de isótopos. El reactor nor- malmente opera a una potencia en estado estable de 250 KW; pero es capaz de ser pulsado a una potencia de 250 MW por una fracción de segundo. El reactor TRIGA con su relativo flujo de neutrones térmicos alto, es una herramienta pode- rosa y versátil para el Análisis por Activación de Neutro- nes, por consiguiente para determinación de trazas de ele- mentos. La Tabla I, contiene los valores promedio de los - flujos neutrónicos térmico y rápido en varias posiciones; - ambos para estado-estable y operación de pulso.

Como la irradiación de muestras, por consiguien- te la producción de isótopos es uno de los propósitos prin-

Tabla 1. Flujo de Neutrones en el Reactor TRIGA Mark I.

	Estado-Estable		Operación de Pulso	
	Flujo Q (n/cm ² -seg-watt)	Flujo Integrado, N (n/cm ²)	Térmico (n/cm ² -seg)	Rápido (n/cm ² -seg)
Promedio en el Corazón	1 a 10 ⁷	2 x 10 ¹⁴	3 x 10 ¹⁵	2 x 10 ¹⁵
Soporte Giratorio para Muestras	6 x 10 ⁶	1 x 10 ¹⁴	1.5 x 10 ¹⁵	5 x 10 ¹⁴
Tubo Experimental Central	2,5 x 10 ⁷	5 x 10 ¹⁴	8 x 10 ¹⁵	1.1 x 10 ¹⁶

cipales del Laboratorio del Reactor Nuclear; por lo tanto, dispone de cuatro medios de irradiación para el experimentador. La localización de éstos se muestra en la Fig. 3 y, son descritos a continuación.

El acceso completo al corazón del reactor está provisto siempre de un blindaje de agua y, las muestras grandes pueden ser irradiadas en algún lugar adyacente al reactor.

Un motor mueve por medio de una cremallera al Soporte Giratorio para Muestras (Rotary Specimen Rack), y consiste de un anillo de aluminio que contiene cuarenta depósitos de aluminio espaciados. Estos depósitos sirven para colocar en ellos a los contenedores de las muestras de radioisótopos; los cuales son cilindros de polietileno (Plexiglass) de cuatro pulgadas de longitud y una pulgada de diámetro, con un volúmen de alrededor de 25 ml.

El Sistema Neumático de Traslado (Pneumatic Transfer System o Rabbit System), consiste de dos tubos que guían a la cámara de irradiación, localizada en el corazón del reactor. Las muestras son trasladadas rápidamente hacia adentro y hacia afuera de la cámara por medio de aire comprimido. Este sistema es particularmente conveniente para la producción de isótopos de vida media corta.

El Tubo Experimental Central (Central Experimental Tube) es un tubo de irradiación en el centro del corazón del reactor; que permite la irradiación de muestras en

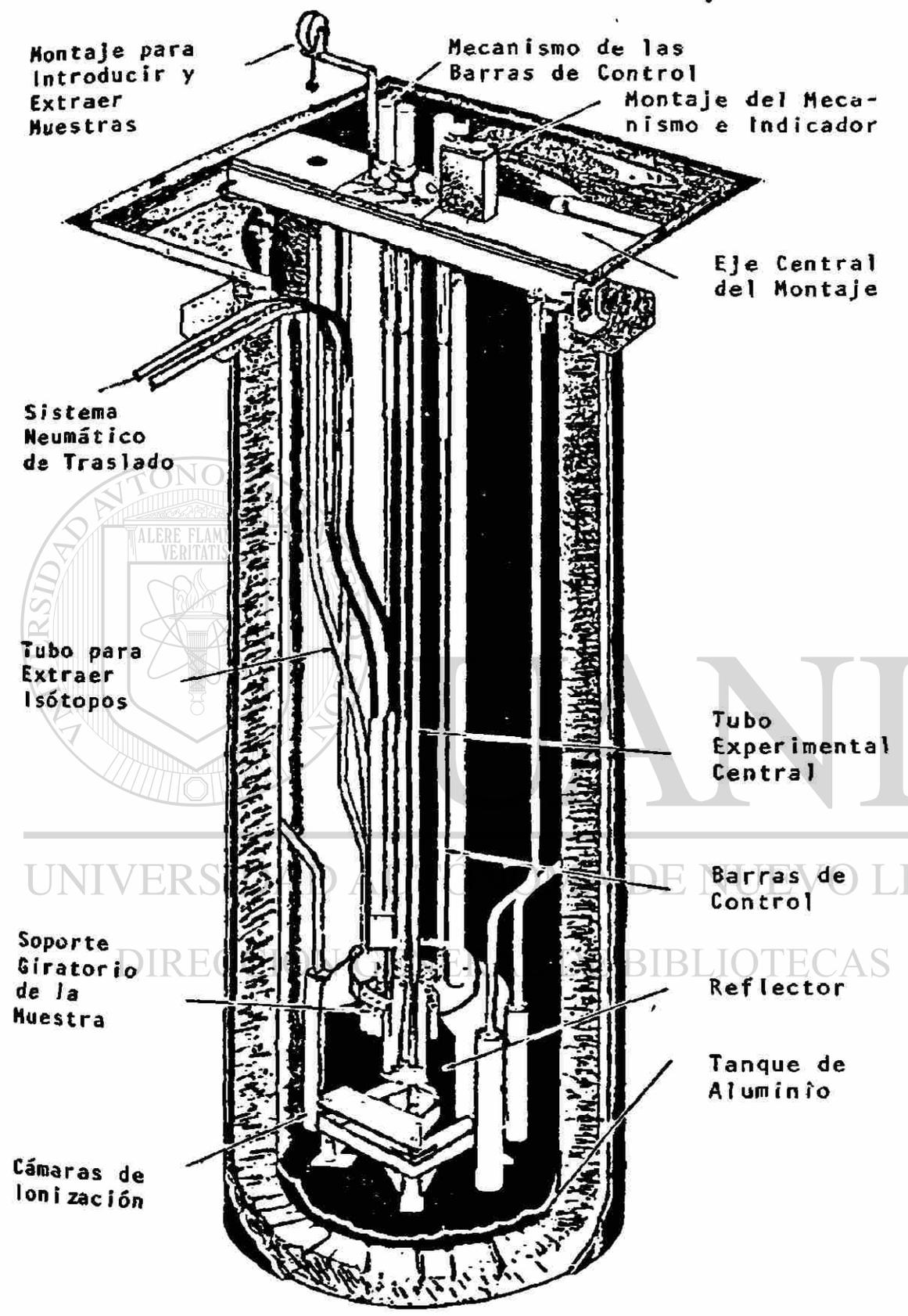


Fig. 3. El Reactor Nuclear TRIGA Mark I.

213 23
5 52

la región de densidad neutrónica máxima.⁷

B. SISTEMA DE ESPECTROSCOPIA DE RAYOS-GAMMA.

El sistema de espectroscopía de rayos-gamma del Laboratorio del Reactor Nuclear, usado para obtener el espectro de rayos-gamma consiste de un cristal de Ge(Li) con un volumen de 96.1 cc, acoplado al Analizador Multicanal - 7010 Stand-Alone DAAS (Data Acquisition and Analysis System) que puede ser conectado a una computadora DEC PDP-11 o LSI, para el control remoto total. La memoria completa del analizador es de 4096 canales. El diagrama de la Fig. 4, muestra el arreglo utilizado en la espectroscopía de rayos-gamma.

Cuando un fotón del rayo-gamma, procedente de una muestra activada interactúa con el cristal de Ge(Li), entonces un pulso de pares electron-hueco es producido, que es proporcional a la magnitud de la cantidad de energía perdida en el cristal por el fotón del rayo-gamma. Puesto que, el pulso eléctrico de salida es pequeño, producido por el contador, así pues, hay la necesidad de amplificarlo hasta un tamaño que sea compatible con el rango del Analizador Multicanal (0-10 volts). El analizador identifica el tamaño del pulso amplificado y almacena la información en el canal apropiado de la memoria (4096 canales) en el disco magnético del analizador. El programa para el

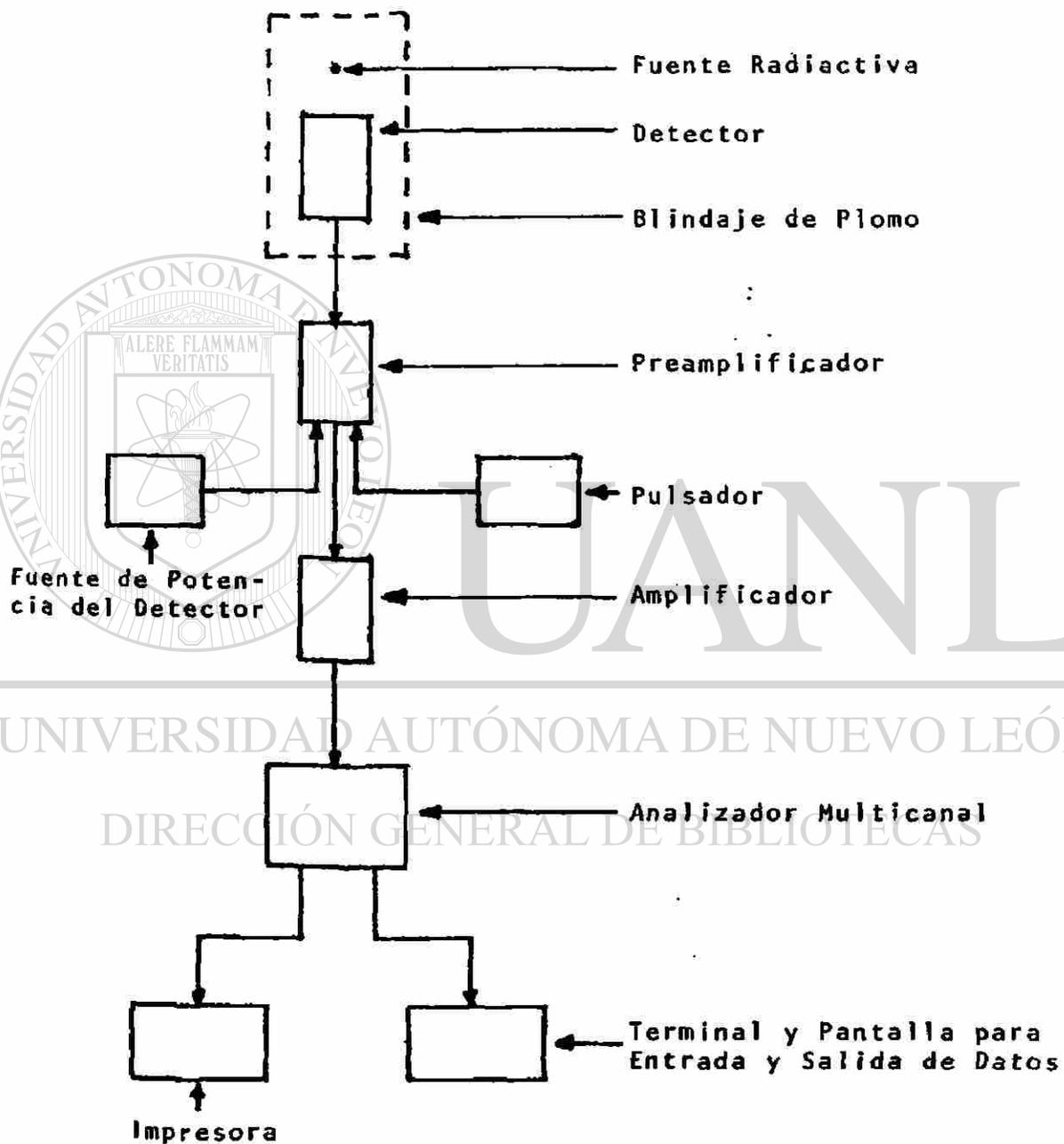


Fig. 4. Sistema multicanal simple de espectroscopía.

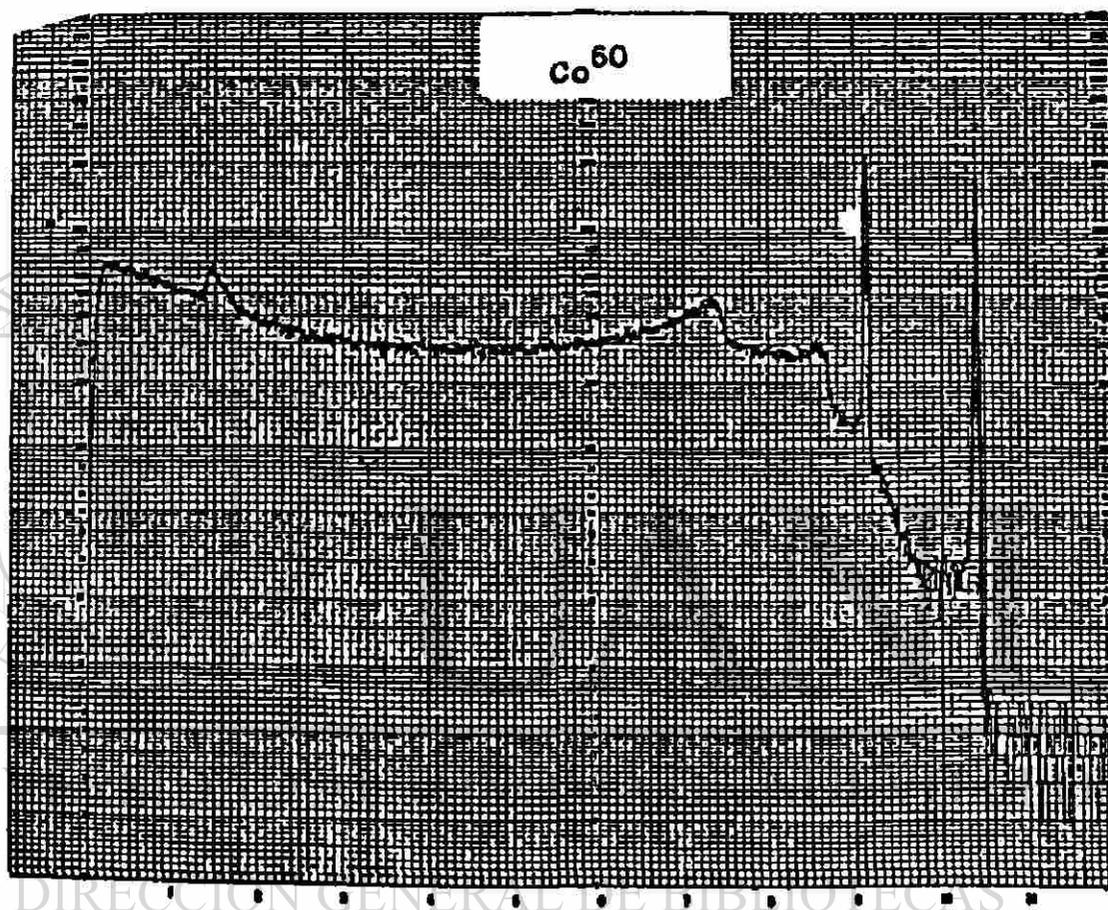
análisis de la información utilizó la subrutina: Análisis - GAMMA 2. Esta es una subrutina de investigación del pico general donde las energías centrales de los picos encontrados son comparadas con los datos del registro que se está utilizando. El espectro de altura de pulsos, puede ser relacionado con el espectro de rayos-gamma de la muestra radiactiva correspondiente. Un espectro de altura de pulsos del Co-60 se muestra en la Fig. 5.^{8,9,20,22}

La curva de calibración se muestra en la Fig. 6; correspondiendo 0.5 KeV/canal, y fué la que se utilizó en el transcurso del trabajo. Esta curva de calibración fué obtenida utilizando tres estándares de espectroscopía gamma (Modelo-CT-100, suministrados por Baird Atomic); ver Tabla II.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





Altura de Pulso H

Fig. 5. Espectro de rayos-gamma del Co^{60} .

Tabla II. Datos Utilizados en la Curva de Calibración.

Estándares	Energía del rayo-gamma (KeV)	No. de Canal
Ba ¹³³	80.99	162.0
Ba ¹³³	276.39	553.0
Ba ¹³³	302.85	606.0
Ba ¹³³	356.00	712.0
Ba ¹³³	383.85	767.8
Cs ¹³⁷	661.64	1,323.0
Co ⁶⁰	1,173.20	2,346.0
Co ⁶⁰	1,332.49	2,665.0

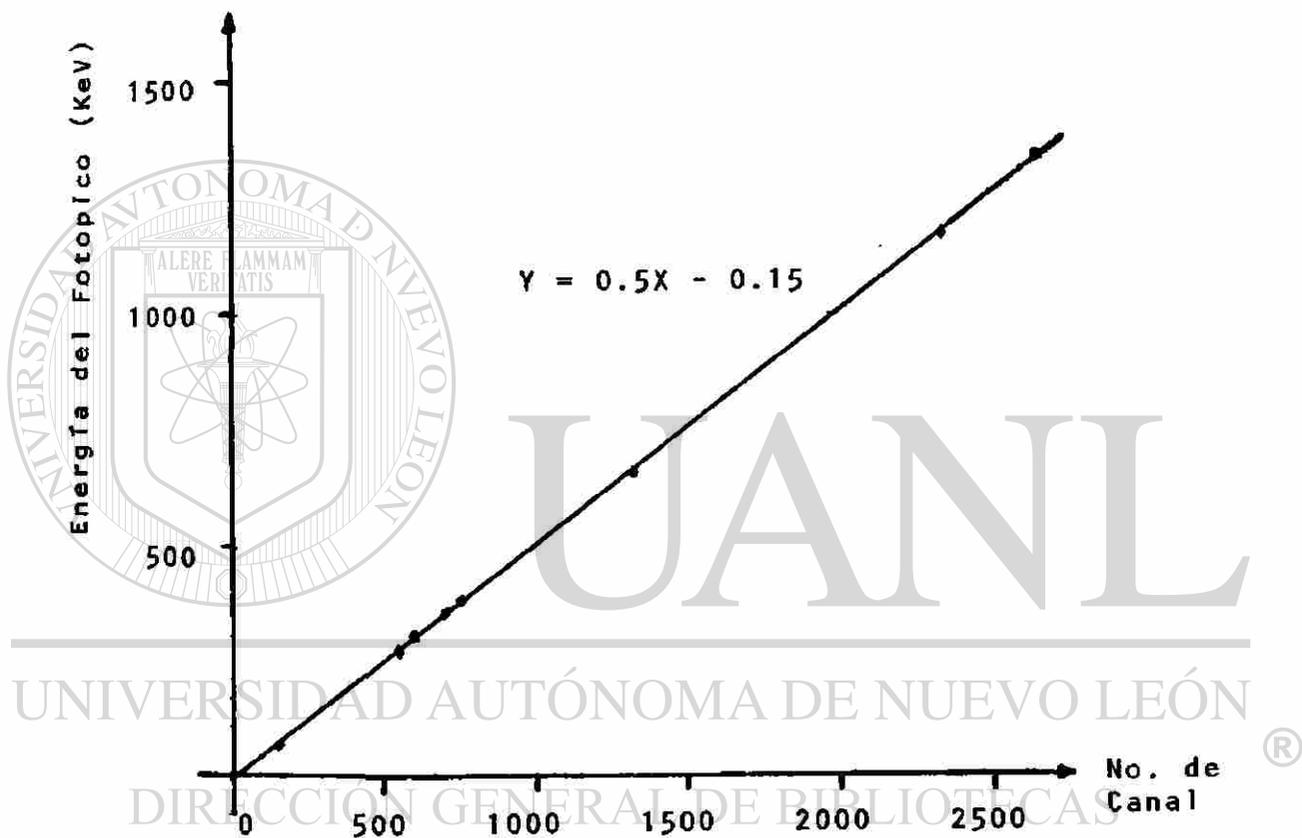


Fig. 6. Curva de calibración.

C A P Í T U L O I V

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. PREPARACION DE LOS ESTANDARES

Se prepararon en forma de solución líquida los siguientes estándares: W, Cu, Zn, Mo y Ag. Teniendo para la irradiación larga en el Soporte Giratorio para Muestras (Rotary Specimen Rack), los siguientes estándares: W, Zn, Mo y Ag; ver Tabla III. También se tienen para la irradiación corta en el Sistema Neumático de Transferencia (Pneumatic Transfer System), los siguientes estándares: Cu y Mo; ver Tabla IV.

Un cálculo aproximado del peso necesario de los estándares; tanto en la irradiación larga como en la irradiación corta, se utilizó la Ec. 16; suponiéndose una actividad de dos microcuries, tiempo de irradiación de dos horas para isótopos de vida media larga y de un minuto para isótopos de vida media corta y, una potencia de operación del reactor nuclear del 100%, es decir, 250 KW. Lo anterior se hizo con el fin de evitar que una vez irradiados los estándares, la actividad que se induzca en ellos, no sea muy

elevada o muy pequeña; ya que de llegar a suceder lo anterior, se presentarían problemas a la hora de efectuar las mediciones. El peso de los estándares se obtuvo con una precisión de décimas de miligramo.^{1,7,12-14}

B. PREPARACION DE LAS MUESTRAS

Seis muestras de mineral Scheelita (CaWO_4) de una mina de tungsteno, localizada en el Estado de Sonora, México, fueron analizadas utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones, en esta tesis. Tres de ellas utilizando en la irradiación larga y las otras tres en irradiación corta; con un peso de 200 mg y 100 mg respectivamente.

Para evitar la contaminación de las muestras durante su manejo, fueron doblemente encapsuladas en frascos de polietileno; con dimensiones exteriores de 16 mm de diámetro y 66.7 mm de longitud y 11 mm de diámetro y 24 mm de longitud, respectivamente. Deberá Sellarse el frasco más pequeño cuando se trate de una muestra en forma sólida o deberán sellarse ambos cuando la muestra sea en forma líquida; para proporcionar una mayor seguridad y, de esta forma se evita que se presenten fugas del líquido.

Los frascos de polietileno fueron lavados para eliminar la posible presencia de contaminación, haciéndose en el siguiente orden: con jabón para usos nucleares y agua

deionizada, agua deionizada con aproximadamente 20 ml de ácido nítrico rebajado al 10%, agua deionizada con aproximadamente 20 ml de ácido cítrico rebajado al 4%; a continuación se dejaron secar, para después limpiarlos con acetona. Tanto en el lavado con jabón como en cada aplicación de ácido, se enjuagaron tres veces con agua deionizada. Las muestras fueron pesadas con una precisión de décimas de miligramo.^{7,12,13}

T. IRRADIACION Y MEDICION DE LOS ESTANDARES Y MUESTRAS

Las Tablas III y IV, nos muestran los datos para los estándares de vida media larga y vida media corta respectivamente. Las Tablas V y VI, nos muestran los datos de las muestras para irradiación larga y corta, respectivamente.

Una condición de importancia fundamental es el porcentaje de pérdida del tiempo muerto durante las mediciones. En este caso se hicieron las mediciones manteniendo siempre un porcentaje de pérdida no mayor del 10%, se considera aceptable.

En el presente trabajo se emplearon las mismas condiciones en la irradiación y la medición, tanto para los estándares como para las muestras; esto conviene hacerse para facilitar el cálculo de las concentraciones de las trazas de los elementos que se buscan en las muestras.^{2,7,-}

Tabla III. Irradiación Larga de los Estándares en el Sopor-
te Giratorio para Muestras, Están Ordenados con
su Vida Media en Forma Ascendente.

Elemento	Peso (mg)	Potencia del Reactor (KW)	Tiempo de Irradiación (hrs)	Tiempo de Medición (seg)
Cu	0.3998	250.0	2.0	3,000.0
W	0.2556	250.0	2.0	3,000.0
Mo	2.6740	250.0	2.0	3,000.0
Zn	2.7670	250.0	2.0	3,000.0
Ag	0.9600	250.0	2.0	3,000.0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla IV. Irradiación Corta de los Estándares en el Sistema Neumático de Traslado, Están Ordenados con su Vida Media en Forma Ascendente.

Elemento	Peso (mg)	Potencia del Reactor (KW)	Tiempo de Irradiación (seg)	Tiempo de Medición (seg)
Cu	0.3998	250.0	60.0	200.0
Mo	2.6740	250.0	60.0	200.00

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla V. Irradiación Larga de las Muestras en el Soporte Gi
ratorio para Muestras.

No. de Muestra	Peso (mg)	Potencia del Reactor (KW)	Tiempo de Irradiación (hrs)	Tiempo de Medición (seg)
FX70010	200.0	250.0	2.0	3,000.0
FX71054	200.0	250.0	2.0	3,000.0
FX71058	200.0	250.0	2.0	3,000.0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla VI. Irradiación Corta de las Muestras en el Sistema -
Neumático de Traslado.**

No. de Muestra	Peso (mg)	Potencia del Reactor (KW)	Tiempo de Irradiación (seg)	Tiempo de Medición (seg)
FX70010	100.0	250.0	60.0	200.0
FX71054	100.0	250.0	60.0	200.0
FX71058	100.0	250.0	60.0	200.0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



C A P I T U L O V

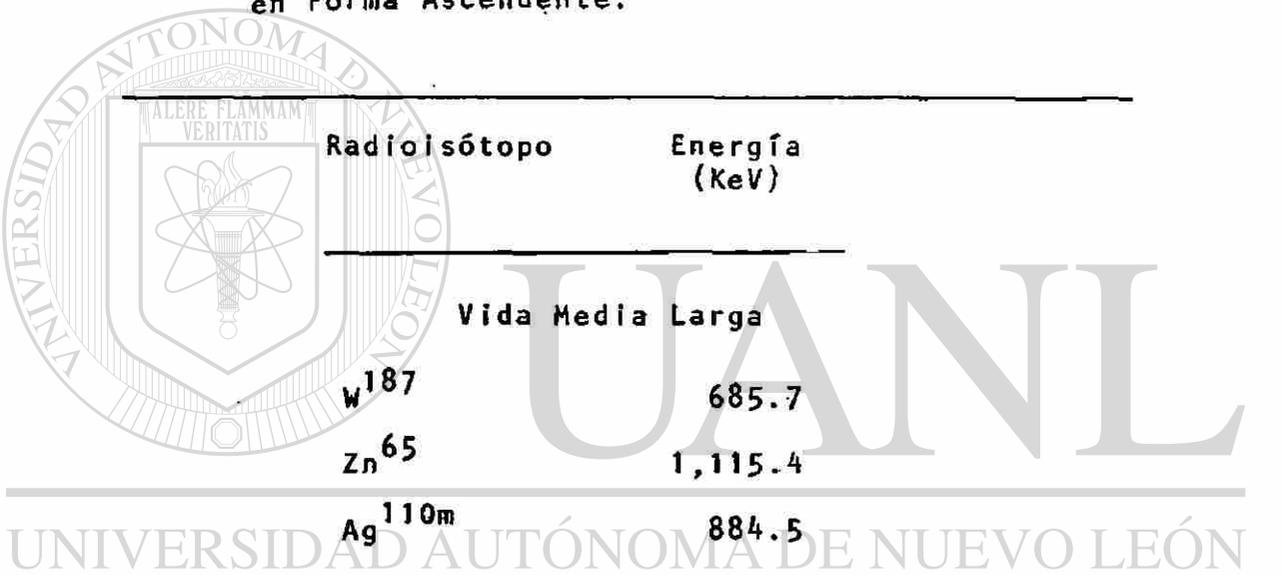
ANALISIS EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

El procedimiento utilizado para efectuar los cálculos fué el más simple, y consiste en la aplicación de la Ec. 17. De esta forma, la única corrección necesaria que se hizo a las mediciones fué la del tiempo de decaimiento; es decir, tiempo después de efectuada la irradiación hasta el momento de efectuar las mediciones. La propagación del error de las mediciones hasta llegar a los resultados, se calculó empleando las fórmulas que se encuentran en el capítulo 4, sección IV, páginas 131-139, de la referencia 8.

Teniendo en consideración el radioisótopo producido y alguna energía del rayo-gamma emitida de mayor importancia de cada uno de ellos, como se muestran en la Tabla VII, se hicieron los cálculos obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla VIII; tomando en cuenta tanto a radioisótopos de vida media larga como a radioisótopos de vida media corta, que son: W, Zn, Ag y Cu, Mo, respectivamente. 2,7,15-23

En las Tablas VIII y IX, se muestran dos análisis que se obtuvieron por dos métodos diferentes de las

Tabla VII. Radioisótopos y su Energía que se Emplearon en los cálculos, Están Ordenados con su Vida Media en Forma Ascendente.



Radioisótopo	Energía (KeV)
Vida Media Larga	
W ¹⁸⁷	685.7
Zn ⁶⁵	1,115.4
Ag ^{110m}	884.5
Vida Media Corta	
Cu ⁶⁶	1,039.0
Mo ¹⁰¹	590.8

Tabla VIII. Se Hallaron las Sigüientes Concentraciones Utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones.

No. de Muestra	W	Zn	Ag	Cu	Mo
FX70010	1.686% (±0.007%)	*	*	0.273% (±0.005%)	*
FX71054	7.387ppm (±0.706ppm)	0.822% (±0.022%)	*	*	*
FX71058	6.223ppm (±0.515ppm)	0.501% (±0.017%)	*	*	*

* Ver la Tabla IX.

Tabla IX. Se Hallaron las Sigufentes Concentraciones Utilizando el Método de Análisis por Absorción Atómica.

No. de Muestra	W	Zn	Ag	Cu	Mo	Pb
FX70010	1.600%	0.035%	19.0ppm	0.600%	52.0ppm	0.122%
FX71054	--	0.900%	15.0ppm	0.008%	--	0.322%
FX71058	--	0.500%	5.0ppm	0.004%	--	0.099%

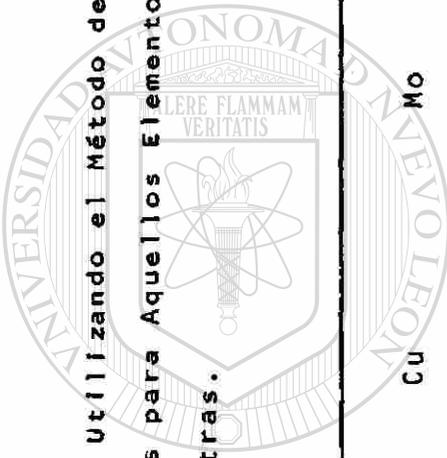
tres muestras de mineral Scheelita (CaWO_4); que se llevaron a cabo utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones y el Método de Análisis por Absorción Atómica, respectivamente. El último método considerado como una referencia.

Desde el punto de vista comparativo, los resultados obtenidos en ambos métodos de análisis son buenos. Esto implica que cada método de análisis tiene un campo de aplicación limitado; mismo que dependerá de la sensibilidad que tenga cada elemento para ser determinado, ya sea por un método u otro; así como también, de la calidad del equipo que se emplea en cada caso. Por último, se deben de aplicar las condiciones óptimas en cada método de análisis, de esta manera, los resultados que se obtengan serán con un margen de error lo más pequeño posible.

En la Tabla X, se muestra el límite mínimo de detección utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones, para aquellos elementos que no se encontraron en las muestras.

Tabla X. Límite Mínimo de Detección Utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones para Aquellos Elementos que no se Encontraron en las Muestras.

No. de Muestra	Zn	Ag	Cu	Mo
FX70010	0.070%	73.30ppm	--	652.0ppm
FX71054	--	43.00ppm	0.093%	230.0ppm
FX71058	--	42.79ppm	0.093%	292.0ppm



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

C A P I T U L O V I

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. El Método de Análisis por Activación de Neutrones es una herramienta sensible para determinar muchos elementos, que se encuentran como trazas en una gran variedad de materiales; por lo tanto, es conveniente utilizar la metodología del análisis de tal forma, que el Método de Análisis por Activación de Neutrones sea una herramienta analítica poderosa.

B. En el análisis cualitativo efectuado a las muestras utilizando el Método de Análisis por Activación de Neutrones se encontraron los siguientes elementos: W, Zn, Cu, As, Sb, Mn, Al, Fe y V. Dada la abundancia de los primeros tres se decidió obtener un análisis cuantitativo. Se hizo una comparación cuantitativa y cualitativa por el Método de Análisis por Absorción Atómica.

C. De las Tablas VIII y IX se observa que los resultados de ambas técnicas coinciden bastante bien, excepto por el Cu. En el caso del tungsteno (W) se observa claramente que la técnica del Análisis por Activación de Neutrones es bastan-

te más sensible que la de Absorción Atómica. Por lo tanto, la técnica efectuada en esta tesis es muy conveniente cuando el mineral de tungsteno sea más valioso.

En el caso del Zinc (Zn) se nota que es más sensible la técnica de Absorción Atómica. Por último, para el cobre (Cu) tenemos una situación similar a la anterior del Zn.

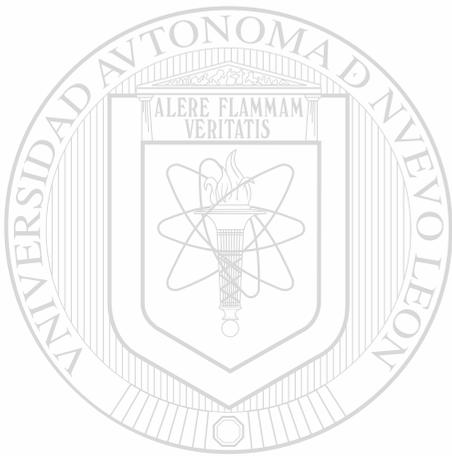
Dado que en la muestra FX70010 no coinciden los resultados del cobre, se hicieron varias determinaciones por el Método de Análisis por Activación de Neutrones obteniendo el mismo resultado, de esto, se recomienda verificar el análisis del cobre por Absorción Atómica.

D. Los estándares y las muestras con su irradiación en el reactor nuclear se convierten en materiales radiactivos, por lo tanto, en el proceso de irradiación es necesario controlar su peso, tiempo de irradiación y potencia del reactor nuclear; de tal forma que la radiactividad que se induce en los estándares y muestras, no sea problema para su manejo en el proceso de medición. En la seguridad radiológica, también se requiere tener radiactividades pequeñas (~ 2 microcuries) para evitar al máximo los riesgos.

E. En México se cuenta con un Reactor Nuclear TRIGA Mark, III, localizado en Salazar, Edo. de México, con características similares al empleado en esta tesis; que se le puede dar una utilización en: industria, investigación y enseñan-

40(a)

za. Decimos lo anterior porque muchos problemas científicos y de control de calidad se pueden auxiliar del Método de -- Análisis por Activación de Neutrones para su resolución.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

A P E N D I C E A

CALCULO DEL FLUJO TERMICO Y EPITERMICO DEL REACTOR

Como se muestra en la Fig. 7, el cadmio tiene una gran sección eficaz de absorción para neutrones con una energía abajo de 0.5 eV, debido a la reacción nuclear $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$. Si una muestra es irradiada bajo una cubierta de cadmio 0.7-1.0 mm, los neutrones térmicos son filtrados y la activación (n,γ) solamente se lleva a cabo con los neutrones "epicadmios" (epitérmicos). De la Tabla XI, también se muestra que la "energía de corte efectiva" depende del espesor del cadmio y de la geometría. La razón de cadmio (CR) es definida por:

$$CR = \frac{\text{Actividad sin la cubierta de cadmio}}{\text{Actividad con la cubierta de cadmio}}$$

$$= \frac{\phi_{th} \sigma_o + \phi_{epi} l}{\phi_{epi} l} \quad (18)$$

y por último tenemos $CR - 1 = \frac{\phi_{th} \sigma_o}{\phi_{epi} l}$ (19)

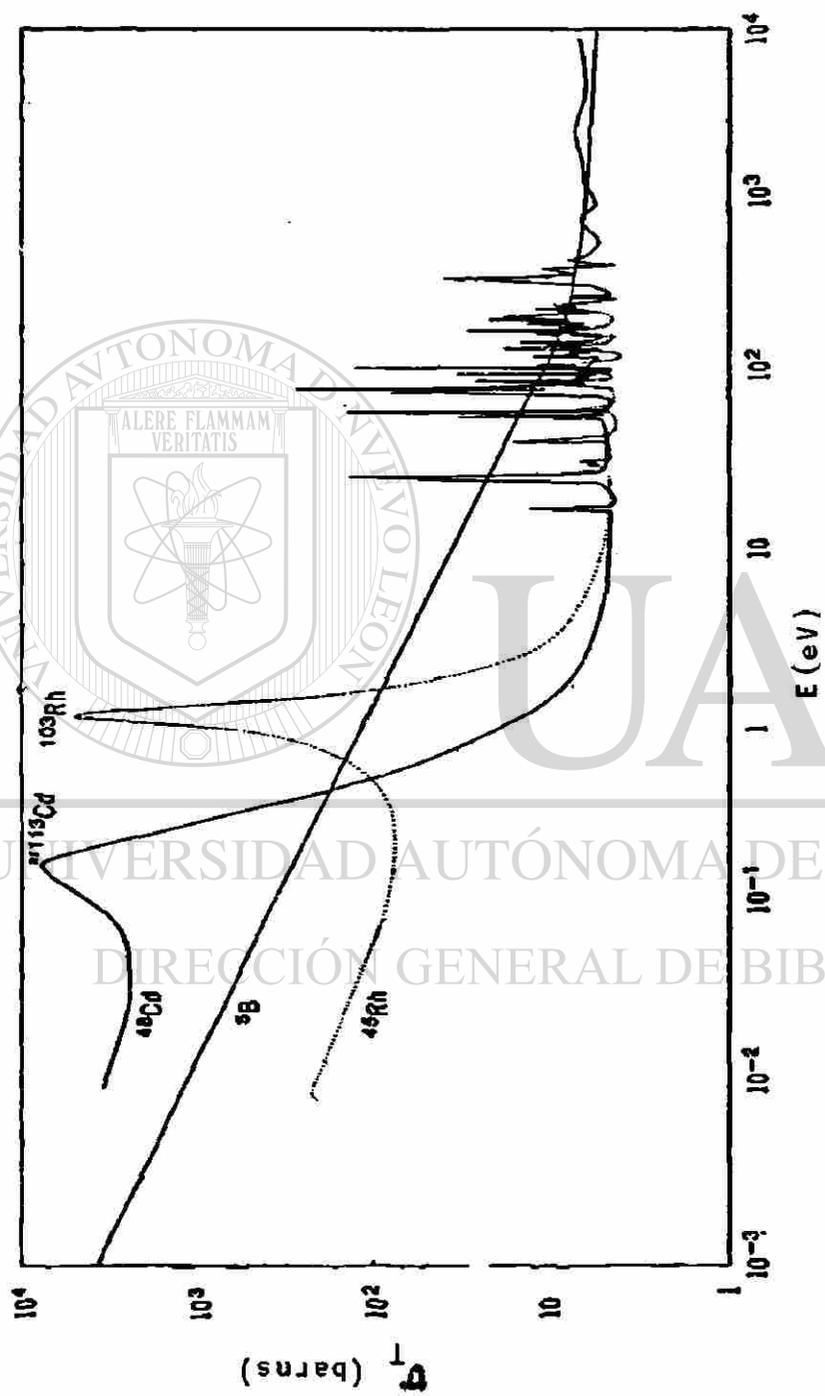


Fig. 7. Algunas formas típicas de secciones eficaces como función de la energía neutrónica.

Donde ϕ_{tn} y ϕ_{epi} representan el flujo neutrónico convencional hasta E_{Cd} y el flujo epicadmio arriba de E_{Cd} , respectivamente.

Tabla XI. Energía de Corte Efectiva del Cadmio para Absor-
sores $1/v$ (en eV) de un Rayo de Neutrones Colima-
do.

Espesor de Cd (mm)	Energía de Corte Efectiva	Lámina en Sandwich de Cadmio	Densidad del Flujo Neutrónico Isotrópico	
			Muestra Pequeña en una Envoltura Esférica	Muestra Pequeña en una Envoltura Cilíndrica
0.76	0.473	0.62	0.476	0.50
1.02	0.512	0.68	0.518	0.56
1.52	0.567	0.77	0.583	0.62

Si el cadmio no es utilizado, la razón de los flujos térmico a epitérmico o aún los valores absolutos de estos flujos pueden ser obtenidos de una irradiación de dos detectores:

$$R_1 = \phi_{th} \sigma_{01} + \phi_{epi} I_1 \quad \text{para el detector No. 1.}$$

$$R_2 = \theta_{th} \sigma_{02} + \theta_{epi} I_2 \quad \text{para el detector No. 2.}$$

resolviendo este sistema de ecuaciones simultáneas para θ_{th} y θ_{epi} tenemos,

$$\theta_{th} = \frac{R_1 I_2 - R_2 I_1}{\sigma_{01} I_2 - \sigma_{02} I_1} \quad (20)$$

$$\theta_{epi} = \frac{R_2 \sigma_{01} - R_1 \sigma_{02}}{\sigma_{01} I_2 - \sigma_{02} I_1} \quad (21)$$

El flujo térmico puede por supuesto también ser obtenido por irradiación de una muestra desnuda y otra cubierta de cadmio. La razón total es dada por,

$$R = R_{th} + R_{epi} = \theta_{th} \sigma_0 + \theta_{epi} I$$

y la razón de la muestra cubierta con cadmio es dada por,-

$$R_{epi} = \theta_{epi} I$$

Por medio de las Ecs. 20 y 21 se calculó el θ_{th} y el θ_{epi} , obteniéndose una buena aproximación. Se irradió

18.1 mg de ${}_{40}\text{Zr}$, con una potencia del 92% de la capacidad del reactor (230 KW), tiempo de irradiación de una hora, tiempo de decaimiento de 70.95 horas, tiempo de conteo de 8,000 seg, y se colocó a una distancia de 5 cm del detector. La siguiente lista de datos fué empleada en hacer el cálculo,²¹

Isótopo	Energía del R- γ (KeV)	Abundancia (%)	Eficiencia Absoluta a 5 cm	σ (barns)	l (barns)	Cuentas seg
${}_{40}\text{Zr}^{97}$	658.17	2.80	2.00×10^{-3}	0.020	5.0	3.86
${}_{40}\text{Zr}^{95}$	724.18	17.40	1.68×10^{-3}	0.055	0.3	0.60

La fórmula que se utiliza para el cálculo de R_1 y R_2 es la siguientes,

$$R(E) \frac{\text{interacciones}}{\text{núcleo-seg}} =$$

$$= \frac{\text{No. de cuentas/seg (E)}}{\epsilon_{ab}(E) f N [1 - \exp(-\lambda t_i)] \exp(-\lambda t_d)} \quad (22)$$

donde ϵ_{ab} es la eficiencia absoluta del detector en cuestión, en función de la energía.

f es la abundancia isotópica.

N es el número de partículas por cm^3 .

λ es la constante de decaimiento.

t_i es el tiempo de irradiación.

t_d es el tiempo de decaimiento.

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ec. 22, tenemos que los valores de R_1 y R_2 son:

$$R_1 = 2.61 \times 10^{-13} \frac{\text{Interacciones}}{\text{Núcleo-seg}}$$

$$\text{y } R_2 = 4.05 \times 10^{-14} \frac{\text{Interacciones}}{\text{Núcleo-seg}}$$

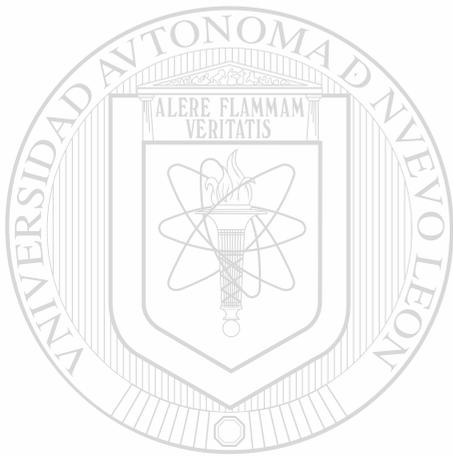
Ahora con estos valores y los valores de σ_{01} , σ_{02} , I_1 y I_2 sustituyéndolos en la Ec. 20 y la Ec. 21, tenemos que,

$$\phi_{th} = 5.02 \times 10^{11} \frac{\text{Neutrones}}{\text{cm}^2\text{-seg}}$$

$$\text{y } \phi_{epi} = 5.36 \times 10^{10} \frac{\text{Neutrones}}{\text{cm}^2\text{-seg}}$$

$$\phi_{\text{total}} = \phi_{\text{th}} + \phi_{\text{epi}} = 5.56 \times 10^{11} \frac{\text{Neutrones}}{\text{cm}^2\text{-seg}}$$

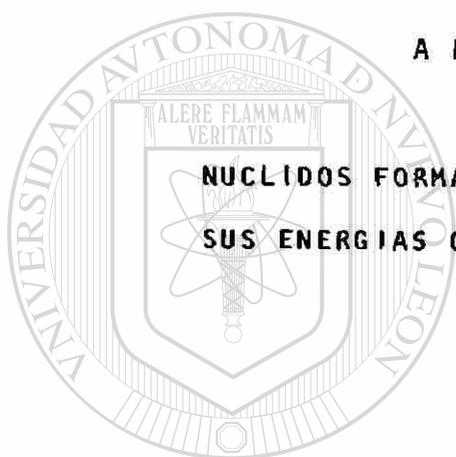
y la razón es $\frac{\phi_{\text{epi}}}{\phi_{\text{th}}} = 0.11$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



A P E N D I C E B

NUCLIDOS FORMADOS POR CAPTURA NEUTRONICA CON
SUS ENERGIAS ORDENADAS EN FORMA ASCENDENTE.²³

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Energía KeV	Isótopo	Inten- si- dad	Vida- Media	Energía KeV	Isótopo	Inten- si- dad	Vida- Media
46.5	²⁰⁸ Pb	100	22 yr	91.4	¹⁴⁷ Nd	100	11.1 d
49.1	¹⁸⁷ Th	100	7.2 d	92.4	^{186m} Re	—	18.7 min
51.4	¹⁸⁶ Rh	100	4.4 min	93.1	^{180m} Ta	—	8.15 hr
56.8	¹⁸⁷ Ir	—	1.4 min	93.2	⁶⁷ Cu	70	61.6 hr
57.4	¹³⁷ Ce	25	33.0 hr	93.2	^{107m} Ag	100	43 sec
57.5	^{187m} Hf	50	5.5 hr	93.4	^{180m} Hf	18	5.5 hr
57.5	¹⁸⁷ Co	100	10.5 min	93.6	¹⁸⁰ Yb	6	30.6 d
57.7	¹⁸⁷ Th	11	7.2 d	94.6	¹⁶⁴ Dy	100	2.36 hr
57.8	^{187m} Ir	100	1.5 min	95.9	⁷⁶ Se	100	3.91 min
58.2	¹⁵² Dy	100	344.4 d	96.7	⁷⁶ Se	6	121 d
58.4	¹⁵² Gd	2	18.0 hr	97.2	^{186m} Rh	5	4.4 min
59.8	²³⁵ U	90	6.75 d	97.5	¹⁵² Gd	100	236 d
60.5	¹⁵³ Eu	5	1.7 yr	99.0	^{186m} Pt	—	4.1 d
61.2	¹⁵³ Sm	100	340 d	99.4	¹⁸⁷ Tm	20	85 d
61.6	¹⁵³ Sb	100	3.5 min	100.3	¹⁸⁷ Ta	40	115.1 d
63.5	¹⁸⁷ Yb	100	30.6 d	102.2	¹⁸⁷ Gd	17	3.73 min
65.5	¹⁸⁷ Pm	30	27.5 hr	103.0	¹⁸⁷ Se	100	56.8 min
65.7	¹⁸⁷ Ta	8	115.1 d	103.2	¹⁸⁷ Gd	75	236 d
66.7	¹⁸⁷ Ge	3	79 min	103.2	¹⁸⁷ Sm	100	47.1 hr
67.7	¹⁸⁷ Ta	85	115.1 d	103.4	¹⁸⁷ Ta	—	8.15 hr
69.6	¹⁵² Gd	8	236 d	104.2	¹⁸⁷ Sm	100	21.9 min
69.6	¹⁵² Sm	20	47.1 hr	105.3	¹⁵² Eu	63	1.7 yr
72.3	¹⁸⁷ W	43	24.0 hr	105.4	^{177m} Lu	21	155 d
74.7	²³⁵ U	100	23.54 min	105.8	^{186m} Re	—	18.7 min
74.9	¹⁸⁷ Tb	70	7.2 d	106.1	²²⁹ Np	100	2.35 d
76.3	^{187m} Sb	100	3.5 min	108.2	^{131m} Ba	100	14.6 min
77.6	^{187m} Rh	5	4.4 min	108.2	^{187m} Dy	—	1.25 min
77.6	¹⁸⁷ Hg	100	65 hr	109.3	^{125m} Te	100	58.0 d
77.7	¹⁸⁷ Pt	100	20.0 hr	110.0	¹⁸⁷ Yb	40	30.6 d
80.2	¹⁸⁷ I	3	8.08 d	111.2	¹⁸⁷ Re	33	38 d
80.2	¹⁸⁷ Ce	10	285 d	111.6	¹⁷⁷ Er	37	7.8 hr
80.6	¹⁸⁷ Ho	100	26.9 hr	113.0	¹⁷⁷ Lu	60	6.75 d
80.6	^{187m} Ho	14	30 yr	113.0	^{177m} Lu	35	155 d
80.8	¹⁸⁷ Ba	52	7.5 yr	113.5	¹⁸⁷ Yb	30	101 hr
84.4	¹⁸⁷ Tm	100	129 d	113.8	¹⁸⁷ Ta	8	115.1 d
86.6	¹⁸⁷ Eu	100	1.7 yr	114.6	¹⁸⁷ Nd	88	1.8 hr
86.6	¹⁸⁷ Th	—	22.4 min	116.4	¹⁸⁷ Nd	100	12.0 min
87.0	¹⁸⁷ Tb	37	73 d	116.7	¹⁸⁷ Er	2	7.8 hr
87.7	¹⁸⁷ As	5	38.7 hr	118.6	¹⁸⁷ Yb	5	30.6 d
88.0	¹⁸⁷ Pd	100	13.5 hr	121.1	⁷⁶ Se	28	121 d
88.0	¹⁸⁷ Ag	100	40 sec	121.5	^{177m} Lu	10	155 d
88.0	¹⁸⁷ Cd	100	470 d	121.6	¹⁸⁷ Yb	15	1.9 hr
88.1	¹⁸⁷ Tb	1.5	7.2 d	121.8	¹⁸⁷ Eu	70	9.35 hr
88.3	¹⁸⁷ Lu	100	3.71 hr	121.8	¹⁸⁷ Eu	60	12.2 yr
89.6	¹⁸⁷ Hf	4	78.0 d	121.8	⁷⁶ Zn	—	2.2 min

Energía. KeV	Isótopo.	Inten- sidad	Vida- Media	Energía. KeV	Isó- topo	Inten- sidad	Vida- Media
121.9	⁵⁷ Co	100	270 d	158.3	¹⁹⁹ Hg	—	2.0 min
122.6	²⁰⁶ Re	6	3.8 d	158.3	¹⁹⁰ Au	100	3.15 d
123.1	²⁴¹ Eu	100	16 yr	158.4	^{117m} Sn	100	14 d
124.0	¹⁷¹ Er	8	7.8 hr	158.4	^{117m} In	—	1.1; (1.9hr)
124.2	¹³¹ Ba	100	11.5 d	158.8	^{122m} Te	100	104 d
125.5	¹⁸⁵ W	100	70.0 d	159.8	^{77m} Ge	100	54 sec
127.3	¹⁰³ Tc	2	14.0 min	160.0	⁴³ Sc	100	3.43 d
127.4	^{134m} Cs	100	3.15 h	160.2	¹²³ Sn	100	39.4 min
127.4	⁴⁷ Ni	16	36.0 h	160.6	^{179m} Hf	10	19.0 sec
128.6	^{177m} Lu	25	155 d	161.9	^{77m} Se	100	17.5 sec
129.4	¹⁹¹ Os	100	14.6 d	162.1	⁷⁷ As	10	7 hr
130.0	^{103m} Rh	100	45 sec	162.3	²³² Th	—	22.4 min
130.0	¹⁰⁰ Ru	100	4.5 hr	162.6	¹⁸⁴ Os	1	93.6 d
130.7	¹⁸⁰ Yb	25	30.6 d	164.6	²³⁷ U	10	6.75 d
133.1	¹⁸¹ Hf	50	44.6 d	164.9	¹⁶¹ Gd	7	3.73 min
133.4	¹⁴⁴ Ce	100	285 d	165.8	¹³⁸ Ce	100	140.0 d
133.7	¹³¹ Ba	43	11.5 d	165.8	¹³⁰ Ba	70	83 min
133.9	^{197m} Hg	—	24.0 hr	168.1	¹¹¹ Pm	60	27.5 hr
134.3	¹⁸⁷ W	35	24.0 hr	169.3	²³² Th	—	22.4 min
136.0	²³ Sc	96	121 d	170.0	²⁷ Mg	0.6	9.45 min
136.0	¹⁸¹ W	55	145 d	171.4	¹¹¹ In	100	2.81 d
136.3	⁴⁷ Co	15	270 d	171.7	^{182m} Ta	100	16.2 min
137.0	¹⁰⁰ Ru	100	3.8 d	172.1	^{111m} Pd	90	5.5 hr
137.4	¹⁷³ Yb	2	101 hr	172.4	¹⁹¹ Pt	25	3.0 d
138.3	¹⁷⁷ Yb	10	1.9 hr	172.9	¹⁴⁷ Sm	0.3	47.1 hr
138.4	^{116m} In	5	54 min	174.4	^{177m} Lu	19	155 d
139.0	¹⁴¹ Nd	16	12.0 min	175.3	⁷⁶ Ga	100	21.1 min
139.0	¹⁹² Os	80	31.5 hr	176.2	¹²⁴ Sb	23	2.0 yr
139.8	^{72m} Ge	100	49 sec	177.0	¹⁸⁰ Yb	50	30.6 d
140.6	⁹⁹ Mo	100	66 hr	177.0	¹⁵¹ Pm	25	27.5 hr
140.6	^{99m} Tc	100	6.04 hr	178.9	¹⁹¹ Pt	25	3.0 d
141.2	¹⁴⁸ Sm	2	21.9 min	179.5	¹⁸² Ta	16	115.1 d
142.5	^{46m} Sc	100	20.0 sec	180.9	⁹⁹ Mo	6	66 hr
144.7	¹⁷⁴ Yb	6	101 hr	184.2	⁶³ Cu	100	61.6 hr
145.4	¹⁴¹ Ce	100	32.5 d	184.3	^{164m} Ho	100	30 yr
146.7	^{162m} Ta	94	16.2 min	184.3	¹⁸⁷ Tm	46	85 d
149.7	¹²¹ Te	100	24.8 min	184.9	^{182m} Ta	55	16.2 min
150.3	¹⁷⁷ Yb	100	1.9 hr	185.9	¹⁹¹ Pt	—	30.0 min
150.8	^{111m} Cd	30	48 min	186.2	²²⁶ Ra series	—	²²⁶ Ra series
151.1	^{85m} Sr	—	70.0 min	186.7	^{190m} Os	80	10.0 min
151.7	¹⁸¹ W	100	145 d	188.9	^{160m} Pd	100	4.75 min
152.4	¹⁸² Ta	35	115.1 d	190.2	^{114m} In	100	50 d
153.1	^{177m} Lu	26	155 d	191.4	¹⁹⁷ Hg	2	65 hr
153.7	^{164m} Dy	—	1.25 min	191.4	¹⁹⁷ Pt	10	20.0 hr
155.1	¹⁸⁸ Re	100	16.7 hr	192.0	¹⁰¹ Mo	100	14.6 min
156.0	¹⁴⁹ Nd	25	1.8 hr	192.5	⁵⁸ Fe	4	45.1 d
156.3	¹⁸² Ta	12	115.1 d	194.5	⁷⁷ Ge	—	11.3 hr

Energía. KeV	Isó- topo.	In- ten- si- dad	Vida- Media	Energía. KeV	Isó- topo	In- ten- si- dad	Vida- Media
197.2	¹⁹⁰ Tb	17	73 d	250.1	¹⁷⁷ Lu	2	6.75 d
197.4	¹⁹⁰ Yb	100	29 sec	253.9	⁹² Zr	30	17.0 hr
197.8	¹⁹⁰ Yb	85	30.6 d	255.2	¹³⁸ Sr	100	115 d
198.3	¹⁸² Tm	100	85 d	255.6	¹⁵¹ Nd	28	12 min
198.4	¹⁸² Ta	8	115.1 d	261.2	¹⁶² Yb	4	30.6 d
198.6	⁷² Ge	12	79 min	263.2	¹⁰¹ Ru	5	4.5 hr
202.4	⁸⁸ Y	100	3.14 hr	264.1	¹⁸² Ta	22	115.1 d
203.8	²⁰³ Hg	100	5.6 min	264.5	⁷² Ge	100	11.3 hr
204.3	¹⁷⁷ Lu	22	155 d	264.6	⁷⁶ Se	100	121 d
208.0	²³⁵ U	100	6.75 d	264.6	⁷⁶ Ge	100	79 min
208.2	¹⁹⁸ Au	25	3.15 d	267.6	²³² U	2	6.75 d
208.4	¹⁷⁷ Lu	100	155 d	267.6	¹³² La	100	28.7 hr
211.4	⁷² Ge	100	6.75 d	269.3	¹⁹¹ Pt	12	3.0 d
211.4	¹⁴² Nd	100	11.3 hr	269.6	¹⁴² Nd	57	1.8 hr
211.4	¹⁴² Nd	100	1.8 hr	271.0	¹⁵² Eu	0.6	9.35 hr
212.3	¹²⁵ Te	100	154 d	273.3	¹¹⁷ Cd	—	3.0 hr
214.3	¹⁷⁰ Hf	100	19.0 sec	275.1	¹⁴⁷ Nd	7	11.1 d
215.3	¹⁸⁰ Hf	86	5.5 hr	275.4	¹⁴⁷ Nd	30	27.5 hr
215.5	⁷² Ge	100	54 sec	275.8	¹⁴⁷ Nd	100	18 min
215.5	⁷² Ge	100	11.3 hr	275.9	⁸⁸ Se	100	38.9 hr
215.8	⁸⁸ Y	100	2.88 d	276.4	¹³² Ba	100	38.9 hr
215.8	¹⁶¹ Tb	14	73 d	277.5	¹³² Ba	10	7.5 yr
215.8	¹⁶¹ Tb	5	30 yr	278.5	²³⁹ Np	65	2.35 d
216.1	¹⁸¹ Pt	100	11.5 d	279.1	¹⁵⁹ Te	—	72 min
219.9	¹⁸¹ Pt	—	3.0 d	279.1	²⁰³ Hg	100	46.9 d
222.3	¹⁸¹ Pt	35	115.1 d	279.6	²⁰³ Pb	100	52.1 hr
224.9	⁸⁵ Se	50	25 min	279.6	⁷⁵ Se	40	121 d
225.8	¹⁵⁹ Gd	2	18.0 hr	279.5	¹⁶⁴ Dy	17	2.36 hr
228.2	²³⁹ Np	60	2.35 d	280.3	¹⁹² Os	35	31.5 hr
228.5	¹⁷⁷ Lu	57	155 d	280.4	¹⁶⁶ Ho	33	30 yr
229.4	¹⁸² Ta	20	115.1 d	281.8	¹⁷⁷ Lu	21	155 d
229.5	¹⁷³ Hf	1	70.0 d	281.8	⁷⁵ As	—	38.7 hr
231.5	⁸⁸ Y	—	70 min	282.6	¹⁷³ Hf	60	101 hr
231.5	¹⁴² Ce	7	33.0 hr	283.3	¹⁶¹ Gd	12	3.73 min
235.7	⁹³ Nb	100	90 hr	284.3	¹⁹¹ Pt	7	8.08 d
238.6	²³² Pb	—	²³² Th series	286.1	¹⁴⁹ Fm	100	53.1 hr
238.8	⁷⁷ As	100	38.7 hr	290.0	⁸¹ Se	60	18 min
240.0	¹⁵² Nd	15	1.8 hr	293.1	¹⁴² Ce	100	33.0 hr
240.2	¹⁶¹ Pm	15	27.5 hr	293.6	¹⁹⁴ Ir	20	19.7 hr
242.0	²¹⁴ Pb	—	²³⁸ U series	295.4	²¹⁴ Pb	—	²²⁶ Ra series
244.6	¹⁵² Eu	28	12.2 yr	295.8	¹⁷¹ Er	42	7.8 hr
245.4	¹¹¹ Ag	10	7.4 d	295.8	¹⁹² Ir	35	74.4 d
245.4	¹¹¹ Cd	100	48 min	298.6	¹⁶⁰ Tb	97	73 d
245.4	¹¹¹ In	100	2.81 d	299.9	²³³ Pa	15	27.0 d
245.6	¹⁵¹ Sm	6	21.9 min	302.8	¹³⁸ Ba	20	7.5 yr
246.5	¹⁹⁹ Pt	—	30.0 min	305.3	¹⁵⁹ Gd	1	18.0 hr
249.7	⁷⁷ As	15	38.7 hr	306.2	¹⁰⁵ Rh	27	35.3 hr
				306.8	¹⁰¹ Tc	100	14.0 min

Energía. KeV	Isótopo	Inten- sidad	Vida- Media	Energía. KeV	Isótopo	Inten- sidad	Vida- Media
307.5	¹⁸³ Yb	24	30.6 d	361.0	¹²⁷ Tc	15	105 d
308.1	¹⁷¹ Er	100	7.8 hr	361.2	¹⁷⁸ Os	100	10.0 min
308.4	¹⁹² Ir	35	74.4 d	361.7	¹⁶³ Dy	30	2.36 hr
311.5	¹⁰⁷ Pd	10	13.5 hr	363.5	¹⁴⁸ Gd	100	18.0 hr
311.8	²³¹ Pa	100	27.0 d	364.5	¹²⁴ I	100	8.08 d
312.9	¹⁵ K	1	12.52 hr	366.3	⁸⁹ Mn	2	66 hr
314.6	¹⁶¹ Gd	37	3.73 min	366.5	⁴¹ Na	20	2.56 hr
315.2	^{117m} In	—	1.9 hr	367.3	⁷² Ge	15	11.3 hr
315.7	²³⁰ Np	7	2.35 d	373.1	¹²¹ Ba	16	11.3 d
316.5	¹⁹² Ir	100	74.4 d	373.6	¹⁸⁰ Hg	—	42.0 min
316.9	¹⁹⁰ Pt	—	30.0 min	375.2	²³³ Pa	—	27.0 d
317.1	¹⁰³ Ru	10	4.5 hr	376.5	¹¹¹ Pd	75	22.0 min
318.3	^{162m} Ta	12	16.2 min	378.8	^{177m} Lu	44	155 d
319.1	¹⁰³ Rh	100	35.3 hr	383.8	¹²³ Ba	11	7.5 yr
319.2	^{177m} Lu	16	155 d	387.5	¹⁶⁰ Os	35	31.5 hr
319.4	¹⁴⁷ Nd	12	11.06 d	388.2	¹²⁴ I	100	13.1 d
320.0	⁵¹ Cr	100	27.8 d	388.5	⁸⁷ Sr	100	2.84 hr
320.0	⁴¹ Ti	100	5.79 min	391.4	^{112m} In	100	104 min
321.5	¹⁶⁴ Os	35	31.5 hr	396.1	¹⁷³ Yb	100	101 hr
325.1	⁸⁷ Ru	9	2.88 d	398.2	²³³ Pa	—	27.0 d
326.3	¹⁴⁹ Nd	16	1.8 hr	400.7	⁷⁴ Se	20	121 d
327.7	^{177m} Lu	27	155 d	401.4	²⁰³ Pb	4	52.1 hr
328.0	¹⁶⁴ Ir	100	19.7 hr	409.1	¹⁹¹ Pt	50	3.0 d
328.6	¹⁴⁰ La	38	40.27 hr	410.8	^{160m} Ho	14	30 yr
332.0	^{152m} Sm	100	9.5 min	411.0	¹³² Eu	7	12.2 yr
332.2	^{100m} Hf	100	5.5 hr	411.8	¹⁹⁸ Au	100	2.70 d
332.4	²³⁵ U	2	6.75 d	414.1	^{177m} Lu	26	155 d
333.0	¹⁹⁶ Au	26	6.2 d	415.6	²³³ Pa	—	27.0 d
334.1	²³⁰ Np	10	2.35 d	416.4	⁷² Ge	25	11.3 hr
336.6	^{115m} In	100	4.5 hr	417.0	^{116m} In	35	54 min
340.3	¹⁶¹ Pm	100	27.5 hr	417.4	^{127m} Tc	100	105 d
340.3	²³³ Pa	4	27.0 d	418.8	^{172m} Lu	32	155 d
341.9	¹¹¹ Ag	100	7.4 d	423.5	¹⁴⁹ Nd	28	1.8 hr
343.6	²²⁴ Hf	100	70.0 d	425.9	¹⁹⁶ Au	15	6.2 d
344.2	¹³² Fu	100	12.2 yr	427.8	¹⁵⁴ Sb	100	2.0 yr
344.2	^{152m} Eu	20	9.35 hr	432.8	¹⁷⁴ Hf	2	70.0 d
345.7	¹⁸¹ Hf	16	44.6 d	433.8	¹⁰⁸ Ag	30	2.4 min
346.3	^{167m} Pt	100	88.0 min	438.7	¹⁰⁹ Zn	100	13.8 hr
347.5	¹⁶⁰ Gd	3	18.0 hr	440.1	¹⁶⁷ Nd	7	11.1 d
350.7	¹⁹¹ Pt	60	3.0 d	440.2	²⁰² Tl	100	12.0 d
352.0	²¹⁴ Pb	—	²²⁶ Ra series	442.7	¹²⁹ I	100	25.4 min
355.6	⁹⁷ Zr	50	17.0 hr	443.1	¹⁰⁰ Hf	83	5.5 hr
355.7	¹⁹⁶ Au	100	6.2 d	443.9	¹⁴² Eu	18	12.2 yr
356.0	¹³³ Ba	100	7.5 yr	446.0	¹⁵¹ Pm	15	27.5 hr
356.6	⁸² Se	100	25 min	447.1	¹⁶⁸ Tm	60	85 d
359.7	¹⁹¹ Pt	60	3.0 d	452.4	¹²¹ Te	24	24.8 min
360.4	¹⁶¹ Gd	100	3.73 min	456.0	¹⁹¹ Pt	12	3.0 d

Energía. KeV	Isó- topo.	In- ten- si- dad	Vida- Media	Ener- gía. KeV	Isó- topo	In- ten- si- dad	Vida- Media
459.2	²³² Th	—	22.4 min	515.5	¹⁶² Dy	—	1.25 min
459.5	¹²⁷ Te	—	33.5 d	520.8	⁷⁷ As	30	38.7 hr
459.5	¹²⁷ Te	3	72 min	520.7	⁸² Br	—	2.33 hr
460.4	¹⁹² Os	100	31.5 hr	521.5	²⁰² Tl	4	12.0 d
463.1	¹²⁵ Sb	31	2.0 yr	526.3	¹²⁵ I	9	25.4 min
464.6	¹³⁷ Cs	2	6.2 d	527.7	¹¹³ Cd	100	2.3 d
467.9	¹²⁵ I	65	74.4 d	529.5	¹⁶⁰ Gd	3	3.73 min
465.6	¹⁰¹ Ru	17	4.5 hr	529.6	¹⁶⁶ Ho	14	30 yr
475.1	¹⁰³ Rh	100	210 d	529.5	¹¹⁸ Br	—	2.33 hr
	(¹⁰³ Rh)		(2.5 yr)	531.0	¹¹⁵ Nd	45	11.06 d
478.0	¹⁰⁶ Rc	7	16.7 hr	539.0	¹⁹¹ Pt	100	3.0 d
479.3	¹⁸² W	85	24.0 hr	540.4	¹¹⁹ Nd	26	1.8 hr
479.3	⁹⁰ Y	100	3.14 hr	542.8	¹²⁰ Pt	—	30.0 min
480.1	¹⁶¹ Gd	3	3.73 min	544.9	¹⁰¹ Tc	8	14.0 min
482.2	¹⁸¹ Hf	100	44.6 d	545.7	¹¹⁶ Dy	5	2.36 hr
484.9	¹¹⁴ Cd	18	44 d	551.4	¹⁸⁷ W	18	24.0 hr
486.8	¹³⁸ La	48	40.27 hr	552.9	¹¹⁷ In	—	1.1 hr
489.5	⁴² Ca	8	4.7 d	554.3	⁸² Br	80	35.87 hr
	⁴⁷ Sc		3.43 d	555.8	¹³⁶ Rb	100	1.02 min
490.5	¹⁴² Ce	7	33.0 hr	555.8	¹⁰³ Rh	100	44 sec
491.1	²³² Th	—	22.4 min	555.8	¹⁰⁴ Rh	—	4.4 min
491.2	¹²⁴ I	15	13.1 d	557.7	¹⁹³ Os	50	31.5 hr
492.5	¹¹³ Cd	60	53 hr	558.1	⁷² Ge	18	11.3 hr
492.7	¹²¹ Te	7	24.8 min	558.2	¹¹⁴ In	4	50 d
493.5	¹⁹⁰ Pt	—	30.0 min	559.2	⁷⁶ As	100	26.3 hr
496.3	¹³¹ Ba	28	11.5 d	563.2	¹³⁴ Cs	8	2.07 yr
497.0	¹⁰³ Ru	100	38.9 d	564.0	¹²² Sb	100	2.75 d
499.4	²³² Th	—	22.4 min	565.8	⁴¹ Sc	45	18 min
506.0	¹⁰¹ Mo	60	14.6 min	565.9	¹⁶³ Dy	4	2.36 hr
507.5	¹²¹ Te	24	17.0 d	569.3	¹³¹ Cs	35	2.07 yr
507.9	⁹¹ Zr	100	17.0 hr	570.5	¹⁶⁶ Ho	8	30 yr
509.8	²³² Th	3	12.0 d	572.9	¹²³ Te	100	17.0 d
510.0	⁴⁵ Sc	60	25 min	580.0	¹¹¹ Pd	100	22.0 min
511.0	⁶¹ Co	—	12.8 hr	583.1	²⁰⁸ Tl	—	²³² Th series
	⁸⁰ Hf		17.6 min	585.0	¹³¹ Ba	2	11.5 d
	⁹⁹ Co		71.3 d	588.3	¹⁰² Ir	8	74.4 d
	⁷⁴ As		17.5 d	588.6	⁸⁹ Zr	100	4.4 min
	⁸⁸ Zr		78 hr	590.8	¹⁰¹ Mo	80	14.6 min
	²³ Na		2.58 yr	590.9	¹⁴⁰ Pm	4	53.1 hr
	⁶⁵ Zn		245 d	591.5	¹⁵⁴ Eu	12	16 yr
	⁶² Ni		36.0 hr	595.8	⁷⁴ As	100	17.5 d
	¹⁰³ Rh		210 d	600.4	¹²³ Sb	53	2 yr
			(2.5 yr)	601.1	⁷² Ga	8	14.3 hr
511.6	⁷¹ Zn	—	2.2 min	602.1	¹²¹ Te	6	24.8 min
511.9	¹⁰⁶ Ru	100	1.02 yr	602.6	¹²⁴ Sb	100	60.9 d
	(¹⁰⁶ Rh)		(30 sec)	604.2	¹⁰² Ir	15	74.4 d
514.0	⁸⁷ Sr	100	64 d	604.7	¹³³ Cs	100	2.07 yr

Energía, KeV	Isótopo.	Intensidad	Vida-Media	Energía, KeV	Isótopo	Intensidad	Vida-Media
606.6	¹²⁵ Sb	18	2.0 yr	685.7	¹⁸³ W	100	24.0 hr
608.4	⁸⁴ Ti	1	5.79 min	692.5	¹²⁵ Sb	5	2.75 d
608.5	²⁴ As	1	17.5 d	695.5	¹⁰¹ Mo	45	14.6 min
609.3	²¹⁴ Bi	—	²¹⁴ Ra series	695.8	¹²⁰ Te	100	33.5 d
610.2	¹⁰² Ru	8	38.9 d	696.4	¹¹³ Pr	100	17.3 min
612.3	¹⁰² Ir	10	74.4 d	697.5	¹⁰² Rh	12	210 d
616.4	¹⁹⁰ Os	100	10.0 min				(2.5 yr)
617.0	⁸⁰ Br	100	17.6 min	698.3	⁸² Br	33	35.87 hr
618.1	¹⁸⁷ W	23	24.0 hr	702.5	⁸⁴ Ni	100	2.03 · 10 ⁴ yr
619.0	⁸² Br	50	35.87 hr	704.3	¹¹¹ I	3	17.6 min
620.0	¹³¹ Ba	2	11.5 d	706.4	¹¹⁰ Ce	20	253 d
620.5	¹⁶³ Dy	3	2.36 hr	711.6	¹⁶⁶ Ho	65	30 yr
622.3	¹⁰⁴ Ru	30	1.02 yr	714.3	¹⁰⁰ Pt	—	30.0 min
	(¹⁰⁰ Rh)		(30 sec)	715.2	¹⁶³ Dy	18	2.36 hr
626.6	¹⁰¹ Tc	1	14.0 min	717.1	¹⁸² Os	6	93.6 d
630.1	⁷² Ga	24	14.3 hr	717.8	⁸² Se	30	25 min
631.5	¹⁸⁷ Tm	26	85 d	718.1	¹⁵¹ Pm	20	27.5 hr
632.9	¹⁰⁰ Ag	100	2.42 min	721.6	¹⁴² Ce	17	33 hr
633.0	¹⁰⁰ Rc	9	16.7 hr	722.1	¹²¹ I	4	8.08 d
633.1	¹⁶³ Dy	18	2.36 hr	722.8	¹²⁴ Sb	10	60.9 d
634.6	⁷⁴ As	24	17.5 d	723.1	¹⁵⁴ Eu	65	16 yr
635.8	¹²⁷ Sb	36	2.0 yr	724.0	⁸⁵ Zr	100	65 d
636.4	¹²¹ I	12	8.08 d	724.3	¹⁰⁴ Ru	40	4.5 hr
640.4	⁸⁰ Br	5	17.6 min	725.1	¹¹⁴ In	4	50 d
641.5	¹⁰⁰ Re	0.5	3.8 d	727.3	²¹² Bi	—	²¹² Th series
644.6	¹⁰⁴ Ir	25	19.7 hr	739.9	⁹⁹ Mo	15	66 hr
645.7	¹²⁴ Sb	8	60.9 d	741.0	¹⁸⁷ Tm	22	85 d
645.8	¹⁸² Os	100	93.6 d	743.3	⁹⁷ Nb	100	60 sec
649.3	⁸³ Se	15	18 min	743.5	¹²⁹ I	1	25.4 min
654.4	¹³¹ Te	2	24.8 min	752.1	¹⁶⁶ Ho	16	30 yr
654.8	¹⁴⁹ Nd	28	1.8 hr	753.3	¹²⁵ I	10	13.1 d
657.0	⁷⁶ As	14	26.3 hr	754.0	¹³⁸ Ce	100	55 sec
657.8	¹²⁰ Ag	100	253 d	756.6	⁹³ Zr	80	65 d
658.1	⁹⁷ Nb	100	72.1 min	763.9	¹¹⁰ Ag	24	253 d
661.6	¹³⁷ Ba	100	2.6 min	765.8	⁹⁴ Nb	100	35 d
661.6	¹³⁷ Cs	100	26.6 yr	766.8	¹⁰² Rh	9	210 d
	(¹³⁷ Ba)		(2.6 min)				(2.5 yr)
664.4	¹⁶² Ce	15	33 hr	767.5	⁷⁶ As	0.2	26.3 hr
665.7	⁸⁰ Br	15	17.6 min	768.1	²¹⁴ Bi	—	²¹⁴ Ra series
666.3	¹²⁵ I	100	13.1 d	772.9	¹⁸⁷ W	14	24.0 hr
667.7	¹²⁴ Cs	100	6.2 d	776.6	⁸² Br	100	35.87 hr
670.0	²³² Th	—	22.4 min	778.5	⁹⁹ Mo	12	66 hr
670.5	¹⁶⁶ Ho	7	30 yr	778.6	¹⁵² Eu	45	12.2 yr
672.5	¹⁰⁴ Rc	1	16.7 hr	786.5	⁷² Ga	4	14.3 hr
675.9	¹⁹⁹ Au	1	2.70 d	792.0	¹⁴¹ Re	90	38 d
676.0	¹⁰⁰ Ru	10	4.5 hr	795.8	¹³⁴ Cs	90	2.07 yr
677.9	¹¹⁰ Ag	10	253 d	796.0	¹⁷¹ Er	1	7.8 hr

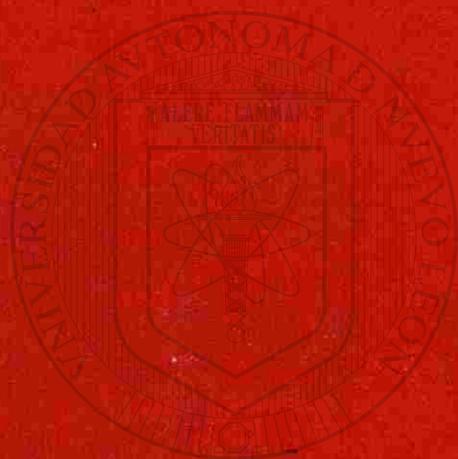
Energía. KeV	Isó- topo	In- ten- si- dad	Vida- Media	Energía. KeV	Isó- topo	In- ten- si- dad	Vida- Media
798.7	⁴⁵ Sc	20	25 min	983.5	⁴⁶ Sc	100	44 hr
802.0	¹³⁴ Cs	9	2.07 yr	995.3	¹⁶³ Dy	2	2.36 hr
810.3	⁶⁰ Co	100	71.3 d	997.2	¹³¹ Te	5	24.8 min
810.3	^{166m} Ho	66	30 yr	1005.5	¹⁴⁴ Eu	50	16.0 yr
810.5	⁷⁵ Ga	4	14.3 hr	1012.4	¹⁰¹ Mo	100	14.6 min
815.5	¹⁴⁰ La	44	40.27 hr	1014.1	²⁷ Mg	40	9.45 min
815.7	¹⁴⁰ Tm	76	85 d	1037.4	⁴⁸ Sc	98	44 hr
818.0	^{110m} Ag	8	253 d	1039.0	⁶⁴ Cu	100	5.1 min
818.8	^{114m} In	23	54 min	1039.4	⁷⁶ Ga	100	21.1 min
827.8	⁸² Br	30	35.87 hr	1043.9	⁸² Br	37	35.87 hr
828.0	⁸¹ Se	45	18 min	1047.0	^{100m} Rh	12	210 d (2.5 yr)
829.5	¹⁰⁶ Rc	3	16.7 hr				
831.0	^{166m} Ho	12	30 yr	1050.5	⁷⁶ Ga	100	21.1 min
834.1	⁷⁵ Ga	100	14.3 hr	1050.5	¹⁰⁶ Ru	5	1.02 yr
834.8	⁵⁴ Mn	100	291 d		(¹⁰⁶ Rh)		(30 sec)
841.6	^{152m} Eu	100	9.35 hr	1050.6	⁷² Ga	7	14.3 hr
844.0	²⁷ Mg	100	9.45 min	1076.6	⁸⁴ Rb	100	18.66 d
846.9	⁵⁴ Mn	100	2.58 hr	1079.8	¹⁷⁷ Yb	30	1.9 hr
860.5	²³² Th	—	²³² Th series	1085.8	⁷⁷ Ge	6	11.3 hr
863.5	⁶⁰ Co	12	71.3 d	1086.0	¹⁴² Eu	45	12.2 yr
867.5	⁷⁵ As	82	26.3 hr	1097.1	^{114m} In	70	54 min
871.1	^{94m} Nb	100	6.6 min	1098.6	⁵⁹ Fe	100	45.1 d
871.1	⁹⁴ Nb	100	2.03·10 ⁴ yr	1115.4	⁶⁵ Zn	100	245 d
874.8	¹⁴² Os	9	93.6 d	1115.4	⁶⁸ Ni	60	2.56 hr
876.0	¹⁰² Ru	3	4.5 hr	1120.0	²¹⁴ Bi	—	²¹⁴ Ra series
879.4	¹⁰⁰ Tb	100	73.0 d	1120.3	⁴⁶ Sc	100	83.9 d
880.0	¹⁴² Os	10	93.6 d	1121.2	¹⁸² Ta	100	115.1 d
884.5	^{110m} Ag	74	253 d	1136.0	¹³² Cs	0.5	6.2 d
889.4	⁴⁶ Sc	100	83.9 d	1140.5	¹²² Sb	1	2.75 d
894.3	¹⁸⁴ Rc	33	38 d	1147.8	¹²¹ Te	10	24.8 min
898.0	⁸⁶ Rb	63	17.8 min	1147.9	⁸⁷ Zr	60	17.0 hr
898.0	⁸⁶ Y	100	104 d	1157.3	¹⁴² Ta	7	115.1 d
902.8	¹⁸¹ Re	100	38 d	1173.1	⁶⁰ Co	100	5.24 yr
909.2	⁹⁰ Zr	100	78 hr	1177.6	¹⁶⁰ Tb	48	73 d
910.1	¹¹² Zn	—	2.2 min	1180.7	¹⁴¹ Nd	22	12.0 min
911.0	²³² Ac	—	²³² Th series	1188.8	¹⁸² Ta	45	115.1 d
928.5	⁴¹ Ti	5	5.79 min	1199.7	¹⁶⁰ Tb	9	73 d
931.3	¹⁰⁶ Rc	4	16.7 hr	1203.5	⁷⁴ As	0.5	17.5 d
934.1	^{113m} Cd	100	44 d	1215.8	⁷⁵ As	10	26.3 hr
934.6	^{92m} Nb	100	10.1 d	1221.6	¹⁸² Ta	95	115.1 d
937.2	^{110m} Ag	33	253 d	1228.8	⁷⁵ As	2.5	26.3 hr
938.4	¹⁸⁴ Rc	10	19.7 hr	1231.0	¹⁸² Ta	50	115.1 d
963.5	^{162m} Eu	90	9.35 hr	1240.9	¹⁷⁷ Yb	30	1.9 hr
964.1	¹⁸² Eu	55	12.2 yr	1256.6	¹²² Sb	1	2.75 d
965.8	¹⁶⁰ Tb	70	73.0 d	1256.7	⁸⁰ Br	1	17.6 min
968.8	²²⁸ Ac	—	²²⁸ Th series	1257.5	¹⁸² Ta	9	115.1 d
969.9	¹⁰⁴ Ru	2	4.5 hr	1260.4	⁷² Ga	2	14.3 hr

Energía. KeV	Isó- topo	In- ten- si- dad	Vida- Media	Energía. KeV.	Isó- topo.	In- ten- si- dad	Vida- Media
1266.0	²⁸ Si	100	2.62 hr	1481.7	⁴⁴ Ni	100	2.56 hr
1271.6	¹⁰⁰ Tb	23	73 d	1488.4	¹⁴⁴ Pr	20	17.2 min
1274.3	¹³⁴ Eu	100	16.0 yr	1488.9	¹¹⁰ Pd	60	22.0 min
1273.3	²⁶ Al	100	6.56 min	1507.7	^{110m} In	8	54 min
1274.5	²³ Na	100	2.58 yr	1508.6	^{90m} Zr	7	4.4 min
1276.5	⁷² Ga	2	14.3 hr	1524.7	⁴² K	100	12.52 hr
1276.8	¹⁰⁰ Tm	10	85 d	1532.7	¹⁰¹ Mo	45	14.6 min
1289.9	^{113m} Cd	45	44 d	1575.5	¹⁴² Pr	100	19.2 hr
1291.5	⁵⁶ Fe	80	45.1 d	1576.1	^{117m} Cd	—	3.0 hr
1293.4	^{116m} In	100	54 min	1580.5	¹¹⁶ Ho	5	26.9 hr
1293.6	⁴¹ Ar	100	110 min	1588.3	²²⁸ Ac	—	²³² Th series
1296.9	⁴⁴ Ca	90	4.7 d	1595.3	¹⁴⁴ Eu.	10	16 yr
	⁴⁵ Sc		3.43 d	1595.4	¹⁴⁰ La	100	40.27 hr
1300.0	¹¹¹ In	100	72 sec	1596.2	⁷² Ga	6	14.3 hr
1311.9	¹⁶⁰ Tb	7	73 d	1642.0	³⁶ Cl	100	37.29 min
1311.6	⁶⁰ Sc	100	44 hr	1690.7	¹²¹ Sb	50	60.9 d
1315.0	^{132m} Eu	9	9.35 hr	1778.9	²⁷ Al	100	2.31 min
1317.2	⁷⁸ Br	38	35.87 hr	1810.7	⁵⁴ Mn	25	2.58 hr
1325.5	¹²¹ Sb	2	60.9 d	1836.1	⁸⁶ Rb	100	17.8 min
1332.4	^{60m} Co	1	10.5 min	1836.1	⁸⁹ Y	100	104 d
1332.4	⁶⁰ Co	100	5.24 yr	1860.4	⁷² Ga	7	14.3 hr
1345.5	⁶³ Cu	100	12.8 hr	1997.4	^{117m} Cd	—	3.0 hr
1362.3	⁹⁷ Zr	—	17.0 hr	2090.6	¹²¹ Sh	7	60.9 d
1364.8	¹³¹ Cs	4	2.07 yr	2112.0	^{110m} In	20	54 min
1367.5	⁷² Ge	3	11.3 hr	2112.8	⁵⁴ Mn	15	2.58 hr
1368.4	²³ Na	90	15 hr	2118.6	⁸⁶ Rb	4.5	17.8 min
1378.1	¹⁶⁴ Ho	18	26.9 hr	2166.8	³⁶ Cl	70	37.29 min
1378.4	⁴⁷ Ni	100	36.0 hr	2185.8	¹⁴⁴ Pr	50	17.2 min
1384.0	^{110m} Ag	22	253 d	2201.4	⁷² Ga	14	14.3 hr
1388.1	¹¹¹ Pd	60	22.0 min	2425.8	²⁶ Al	7	6.56 min
1388.9	¹³² PEu	8	9.35 hr	2507.4	⁷² Ga	19	14.3 hr
1407.5	¹³² Eu	50	12.2 yr	2614.3	²⁰⁸ Tl	—	²³² Th series
1434.4	⁴² V	100	3.76 min	2677.6	⁸⁶ Rb	11	17.8 min
1436.8	¹²¹ Sb	2	60.9 d	2753.6	²³ Na	100	15 hr
1458.9	¹¹⁰ Pd	60	22.0 min	3083	⁴⁰ Ca	100	8.8 min
1460.7	⁴⁰ K	100	1.25-10 ⁹ yr	3102.4	³² S	100	5.05 min
1474.7	⁸⁰ Br	28	35.87 hr	4071	⁴⁰ Ca	10	8.8 min

REFERENCIAS

1. Kruger, Paul. Principles of Activation Analysis, Wiley Interscience.
2. Bowen, H. J. M., and Gibbons, D., Radioactivation - Analysis, Oxford at the Clarendon Press.
3. Taylor, Denis, Neutron Irradiation and Activation - Analysis, D. Van Nostrand Company, Inc.
4. Koch, R. C., Activation Analysis Handbook, Academic Press.
5. Glasstone, S. y Sesonske, A., Ingeniería de Reactores Nucleares, Editorial Reverte, S. A..
6. Kaplan, I., Nuclear Physics, 2nd ed., Addison-Wesley, 1963.
7. Buchanan, J. D., Activation Analysis with a TRIGA - Reactor, General Atomic Division of General Dynamics, GA-2662, December 15, 1961.
8. Knoll, F. Glenn, Radiation Detection and Measurement, John-Wiley & Sons.
9. Price, J. William, Nuclear Radiation Detection, Second Edition. McGraw-Hill, Series in Nuclear Engineering. ®
10. Zimmer, W. H., Systems Application Studies, What Affects a Gamma Spectrum, EG&G, ORTEC Physical Sciences Division, June 19, 1978.
11. Carpenter, B. Stephen, D'Agostino, Michael D., Yule, Herbert P., Computers in Activation Analysis and Gamma-Ray Spectroscopy, Published by: Technical Information Center/ U. S. Department of Energy.
12. Lenderer, C. Michael, Hollander, Jack M., Perlman, - Isadore, Table of Isotopes, Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc.

13. Handbook of Chemistry and Physics, 61st Edition 1980-1981, CRC Press.
 14. Activation Analysis Using TRIGA Reactor, High-Resolution Gamma Spectrometer and Computer, Radiochemistry Research Laboratory, the Dow Chemical Co., Midland, Mich..
 15. Radiological Health Handbook, U. S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service.
 16. De Bruuin, M., Korthoven, P. J. M., Fease M. J. J. A. Van Peer, I. R. I. Report 133-73-17.
 17. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, - Analytica Chimica Acta, 74(1975) 269-274.
 18. Lustenhouwer, J. W. A., Van der Sloot, H. A. Das. H.-A., the Determinacion of Tungesten in Silicate Rocks, Reactor Centrum Nederland, Petten (N.- H.), the Netherlands, Radiochem. Radioanal. Letters 26(1) - 57-66 (1976).
 19. Non-Destructive Determinacion of Tungesten in Molybdenum by Neutron Activation Analysis, from Multiple Gamma and X-Ray Peak Ratios, Analytica Chimica Acta, 74 (1975) 269-274.
-
20. Rowe, J. J., Steinnes, E., Instrumental Activation Analysis of Coal and Fly Ash with Thermal and Epithermal Neutrons, Journal of Radioanalytical Chemistry, - Vol. 37 (1977) 849-456.
 21. Devoe, James R., Editor: Lafleur, Philip D, Assistant Editor; Modern Trends in Activation Analysis. National Bureau of Standards Special Publication 312, Volume I and II.
 22. Instruments for Research and Applied Sciences, EG&G, - ORTEC, Product and Application Information.
 23. F. Adams. R. Dams: Compilation of Gamma-Transition - Energies; J. Radioanal. Chem. 3 (1969).



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS