

La importancia analítica de las reacciones umbral en análisis por activación neutrónica y los problemas de disponibilidad, trazabilidad y consistencia de los datos nucleares

Isaac Marcos Cohen

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Químicas Aplicadas, IDETQA, Medrano 951 (C1179AAQ) Buenos Aires, Argentina

mcohen@frba.utn.edu.ar

Recibido el 6 de junio de 2014, aprobado el 25 de julio de 2014

Resumen

Se discute la influencia de las reacciones umbral, inducidas por la componente rápida del espectro neutrónico, en el análisis por activación en reactores nucleares. Se describen ejemplos de su importancia analítica. Se reseña el estado actual de los datos de secciones eficaces de reacciones umbral publicados en la literatura. Se discuten la disponibilidad y la validez de estos datos, sobre la base de su trazabilidad y su consistencia.

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN – REACTORES NUCLEARES – REACCIONES UMBRAL – SECCIONES EFICACES

Abstract

The influence of the threshold reactions, induced by the fast component of the neutron spectrum, in nuclear reactor activation analysis, is discussed. Some examples of their analytical importance are described. The present status of the cross-section data of the threshold reactions published in the literature is reviewed. The availability and the validity of these data, on the basis of their traceability and consistency, are discussed.

KEYWORDS: ACTIVATION ANALYSIS - NUCLEAR REACTORS – THRESHOLD REACTIONS – CROSS-SECTIONS

Introducción

El desarrollo de la espectrometría gamma de alta resolución, a partir de la producción de detectores semiconductores de adecuado tamaño, excelentes programas de tratamiento de espectros y computadoras de amplia capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos, representó para el análisis por activación, agregar a sus múltiples cualidades, la posibilidad de efectuar determinaciones multielementales en forma simultánea y con muy buena selectividad. El empleo creciente de los reactores nucleares como instalaciones de irradiación implicó además la factibilidad de activar numerosas muestras en un mismo ciclo, aumentando por consiguiente la potencialidad de la técnica para brindar respuestas a las demandas analíticas.

Tal progreso conllevó también la necesidad de buscar alternativas a la utilización del clásico patrón de comparación, compuesto por todos los elementos involucrados en el proceso de análisis, pues su preparación pasó a resultar no solo engorrosa, sino fuertemente sujeta a posibles errores. Los métodos tradicionales fueron así reemplazados por los llamados métodos paramétricos, donde un conjunto reducido de comparadores alcanza para establecer las condiciones del flujo neutrónico, y las actividades medidas se relacionan con la masa de sus precursores (los elementos a ser determinados) mediante las correspondientes constantes nucleares.

La premisa implícita en este caso es que los productos de activación se forman a partir de reacciones de captura (reacciones donde el núcleo blanco absorbe un neutrón y se desexcita emitiendo un fotón). Tal suposición se asienta en el hecho de que el flujo de neutrones térmicos, que dan origen a este tipo de reacciones, es muy alto, como también lo son las correspondientes secciones eficaces, que expresan la probabilidad de que la reacción ocurra. Tanto para las secciones eficaces térmicas como para las integrales de resonancia, que representan la probabilidad de reacción de los neutrones epitérmicos (neutrones que han perdido su energía por choques con el moderador pero que no han llegado al equilibrio térmico el medio) las bibliotecas de datos son razonablemente completas y confiables.

Las posiciones de mayor flujo en un reactor

nuclear tienen también una componente de neutrones rápidos que pueden inducir otras reacciones, conocidas como reacciones umbral (porque se originan a partir de neutrones de una determinada energía, superior a un umbral energético) aun cuando sus secciones eficaces son generalmente más bajas.

La influencia de las reacciones umbral es pocas veces considerada, y posiblemente ignorada en la mayor parte de los trabajos de análisis por activación, donde se incluyen los valores de los flujos térmico y epitérmico de los reactores empleados, pero se omite la información acerca de la componente rápida. En estos casos es válido preguntarse si la ausencia de tales menciones es consecuencia de la verificación de efectos no significativos, o bien denuncia la inexistencia de evaluación exhaustiva.

La idea de considerar solamente a las reacciones de captura en el proceso de análisis puede conducir a errores serios. Las reacciones umbral constituyen potenciales interferencias analíticas cuando el producto de reacción es el mismo que el de una reacción de captura generado en otro elemento.

Un factor adicional, en este caso positivo, que refuerza la necesidad de explorar la producción de reacciones umbral en un reactor nuclear, es su aplicación como alternativa de determinación de varios elementos, en forma complementaria al empleo de reacciones de captura, o cuando éstas no son aplicables.

Por último, es necesario considerar la influencia de las reacciones umbral como factores de distorsión de las constantes empleadas en el análisis por activación paramétrico, que será discutida más adelante.

En el presente trabajo se describirán algunos ejemplos que ilustran la importancia de las reacciones umbral desde la óptica de los tres aspectos antes mencionados y se discutirán los problemas derivados de la necesidad de disponer de datos confiables de secciones eficaces para estas reacciones, para su aplicación con fines analíticos.

Las interferencias originadas por reacciones umbral

Las reacciones umbral que actúan como interfe-

rencias de las de captura son, básicamente, las reacciones (n,p) y (n,α) (absorción de un neutrón y eyección de un protón o de una partícula alfa, respectivamente). El caso más directo es el de un elemento mayor en una muestra que actúa como interferencia de otro presente en concentraciones menores o en niveles de traza; también puede darse entre elementos que no son componentes mayores de la matriz, y cuyos contenidos difieren en órdenes de magnitud. Una modalidad del análisis por activación, que consiste en el empleo de filtros de boro o cadmio para absorber los neutrones térmicos (análisis por activación con neutrones epitérmicos) es un factor multiplicador del grado de interferencia de las reacciones umbral, dado que la influencia de los neutrones rápidos aumenta en función de la notable disminución de la actividad inducida por reacciones de captura.

Algunas de las reacciones que potencialmente o en forma reconocida generan efectos significativos de interferencia, se muestran en la

Tabla 1. La lista no es exhaustiva y tiene solo fines ilustrativos.

Las reacciones umbral como alternativas de determinación analítica

A pesar de que la determinación de la mayoría de los elementos naturales puede llevarse a cabo por reacciones de captura, algunos son difícilmente determinables, debido a desfavorables características de los precursores (abundancias isotópicas o secciones eficaces muy bajas) o bien de los productos (periodos de semidesintegración muy cortos o muy largos¹, emisión de radiaciones de difícil detección).

En la Tabla 2 se ejemplifican varias reacciones umbral que pueden ser empleadas con fines de determinación. Algunas de ellas han encontrado amplia aplicación analítica; tal es el caso de la reacción $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$, que es la opción recomendada inclusive en comparación con una reacción de captura factible, $^{64}\text{Ni}(n,\gamma)^{65}\text{Ni}$, la medición de cuyo producto resulta frecuen-

Reacción Principal	Interferencia	Observaciones
$^{19}\text{F}(n,\gamma)^{20}\text{F}$	$^{23}\text{Na}(n,\alpha)^{20}\text{F}$	Significativa en la mayoría de las matrices, donde abunda el sodio
$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$; $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	Ambas introducen usualmente pequeños factores de corrección, sobre todo en materiales geológicos
$^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$; $^{30}\text{Si}(n,\alpha)^{27}\text{Mg}$	Muy importantes en materiales geológicos
$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$; $^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	La interferencia del fósforo es de importancia en materiales biológicos
$^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$	$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$; $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$	La interferencia del azufre es significativa en muestras biológicas
$^{36}\text{S}(n,\gamma)^{37}\text{S}$	$^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$	Posiblemente, muy importante en materiales biológicos
$^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}(\beta^-)^{47}\text{Sc}$	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	Impide la determinación de calcio por neutrones epitérmicos; interferencia importante en toda condición
$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	Significativa en el análisis con neutrones epitérmicos
$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	Significativa en materiales biológicos
$^{64}\text{Ni}(n,\gamma)^{65}\text{Ni}$	$^{65}\text{Cu}(n,p)^{65}\text{Ni}$	
$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	$^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$	Puede conducir a errores significativos, tanto en materiales biológicos como en geológicos

Tabla 1. Algunos ejemplos de interferencias por reacciones umbral

¹ Periodo de semidesintegración, o simplemente período, es el tiempo en el cual la actividad de una población de átomos radiactivos decae a la mitad de su valor inicial.

Elemento	Reacción	Observaciones
flúor	$^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$	La interferencia de $^{18}\text{O}(n,\gamma)^{19}\text{O}$ no es significativa cuando se irradia bajo cadmio
silicio	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$	Interferida por $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ y $^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$
	$^{29}\text{Si}(n,p)^{29}\text{Al}$	Libre de interferencias
fósforo	$^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	Aplicable al análisis de materiales biológicos
azufre	$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$	Método posible para la determinación de azufre; interfieren $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$ y $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$; requiere separación radioquímica del ^{32}P
titanio	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	Interferida por $^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$, aun por irradiación bajo cadmio
	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	La interferencia por $^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}(\beta^-)^{47}\text{Sc}$ es mínima irradiando bajo cadmio; el método es recomendable incluso con relación a $^{50}\text{Ti}(n,\gamma)^{51}\text{Ti}$
	$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	Libre de interferencias
hierro	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	Complementaria a la reacción de captura
níquel	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	Método recomendado para la determinación de níquel
itrio	$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	Aplicación restringida, por su baja sección eficaz
niobio	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92}\text{Nb}$; $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$	Aplicables en casos especiales, pues la concentración de niobio es usualmente muy baja.
talio	$^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$	Requiere separación radioquímica del producto, para mejorar la sensibilidad
plomo	$^{204}\text{Pb}(n,2n)^{203}\text{Pb}$; $^{204}\text{Pb}(n,n')^{204m}\text{Pb}$	Requiere en ambos casos separación radioquímica de los productos, para mejorar la sensibilidad

Tabla 2. Reacciones umbral como alternativa de determinación analítica

temente enmascarada por la presencia de actividades más altas originadas por otros elementos de constantes nucleares más favorables, como el manganeso. Otra reacción, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, se utiliza para la determinación de hierro en forma complementaria a la reacción de captura, $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)$, con fines de comprobación de resultados.

Distorsión de las constantes del análisis por activación paramétrico a causa de las reacciones umbral

Las reacciones (n,2n) y, especialmente, las (n,n') (absorción de un neutrón y eyección de dos neutrones o de otro neutrón, respectivamente) configuran un caso especial dentro de la influencia de las reacciones umbral. En muchos

casos, dichas reacciones representan una contribución a la actividad generada por reacciones de captura, algunos ejemplos de las cuales pueden verse en la Tabla 3. Tales aportes a la actividad total mejoran las posibilidades de detección del elemento y, por lo tanto, mejoran la sensibilidad analítica. En consecuencia, deberían ser tratados por el analista como un efecto deseable. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que a diferencia del análisis comparativo convencional, el empleo de métodos paramétricos debe incluir específicamente a estas contribuciones para efectuar el cálculo completo de la relación entre la masa del elemento y la actividad del radionucleido medido. Esta situación llega a hacer más complejo el proceso de su realización práctica; De Corte y colaboradores (1987) consideran su tratamiento como el de

interferencias primarias con respecto a las reacciones (n,γ) . El concepto es discutible, aplicado a la situación del elemento.

La Tabla 3 muestra algunos ejemplos de reacciones umbral que distorsionan la relación entre la actividad del radionucleido y la masa del precursor, cuando solo la reacción de captura es considerada.

Aplicaciones experimentales

En este apartado se describirán someramente algunas aplicaciones de las reacciones umbral, sobre la base de trabajos en los que el autor ha tenido intervención directa.

Las reacciones umbral han sido empleadas en el desarrollo de métodos de determinación de flúor (Cohen, 1991; Aisenberg y colaboradores, 1971); fósforo (Furnari y Cohen, 1994); titanio (Espinosa García y Cohen, 1984) y talio (Cohen y colaboradores, 1982).

La determinación de flúor a partir de la reacción $^{19}\text{F}(n,\gamma)^{20}\text{F}$ presenta el inconveniente de su corto periodo de semidesintegración (11,0 s) pero el principal problema asociado a su determinación es la interferencia generada por el sodio a través de la reacción $^{23}\text{Na}(n,\alpha)^{20}\text{F}$. El sodio es relativamente abundante en la mayor parte de las matrices donde se requiere la determinación de flúor, como los materiales biológicos, de forma tal que su interferencia debe ser siempre contemplada. La reacción (n,p) sobre ^{19}F da origen al ^{19}O , que tiene un periodo algo más largo (27,1 s) y puede ser medido sin inconvenientes; la principal ventaja de esta reacción

es que la eventual interferencia de la reacción $^{18}\text{O}(n,\gamma)^{19}\text{O}$, cuyo precursor tiene abundancia isotópica baja (0,205 %) puede minimizarse mediante irradiación bajo cobertura de cadmio. El límite de detección que se obtuvo en muestras de dientes fue de 50 $\mu\text{g/g}$.

La reacción de captura sobre ^{31}P , único isótopo estable del fósforo, conduce al ^{32}P , emisor beta puro que para su medición requiere ser aislado por separación radioquímica de todas las demás especies radiactivas presentes en una muestra irradiada. La reacción $^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$ puede ser aplicada en forma alternativa; el ^{28}Al emite radiación gamma de energía conveniente y su periodo es adecuado para la medición (2,24 min.) pero es necesario considerar que la reacción $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ sobre aluminio también se producirá durante la irradiación. Mediante irradiaciones de muestras desnudas y bajo cadmio se planteó un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas que permitió la determinación simultánea de fósforo y aluminio en material biológico. Es interesante hacer notar que la ausencia de datos confiables sobre la sección eficaz de la reacción (n,α) sobre el fósforo obligó a la determinación de un nuevo valor (Cohen y colaboradores, 1993).

La determinación de titanio es corrientemente requerida en el análisis de materiales geológicos. La única reacción de captura posible conduce a ^{51}Ti , emisor gamma de energía relativamente baja, cuya medición suele ser enmascarada por varias interferencias, principalmente aluminio, magnesio y manganeso. Los estudios efectuados sobre las reacciones $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$, $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ y $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ mostraron que la segunda de ellas es no solo aplicable, sino que

Reacción de captura	Reacción umbral
$^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}$	$^{48}\text{Ca}(n,2n)^{47}\text{Ca}$
$^{76}\text{Se}(n,\gamma)^{77\text{m}}\text{Se}$	$^{77}\text{Se}(n,n')^{77\text{m}}\text{Se}$; $^{78}\text{Se}(n,2n)^{77\text{m}}\text{Se}$
$^{86}\text{Sr}(n,\gamma)^{87\text{m}}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}(n,n')^{87\text{m}}\text{Sr}$; $^{88}\text{Sr}(n,2n)^{87\text{m}}\text{Sr}$
$^{110}\text{Cd}(n,\gamma)^{111\text{m}}\text{Cd}$	$^{111}\text{Cd}(n,n')^{111\text{m}}\text{Cd}$; $^{112}\text{Cd}(n,2n)^{111\text{m}}\text{Cd}$
$^{116}\text{Sn}(n,\gamma)^{117\text{m}}\text{Sn}$	$^{117}\text{Sn}(n,n')^{117\text{m}}\text{Sn}$; $^{118}\text{Sn}(n,2n)^{117\text{m}}\text{Sn}$
$^{194}\text{Pt}(n,\gamma)^{195\text{m}}\text{Pt}$	$^{195}\text{Pt}(n,n')^{195\text{m}}\text{Pt}$; $^{195}\text{Pt}(n,2n)^{195\text{m}}\text{Pt}$

Tabla 3. Reacciones umbral que incrementan la actividad inducida por reacciones de captura

constituye una mejor opción, con respecto a la reacción de captura. La interferencia de la reacción $^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}(\beta^-)^{47}\text{Sc}$ es mínima irradiando bajo cadmio.

El talio es un elemento tóxico cuyas sales son empleadas para la eliminación de roedores. Muchos casos de intoxicaciones se registran frecuentemente; por tal razón, su determinación en material biológico, especialmente en orina, es especialmente requerida. Los productos de las reacciones de captura sobre talio no emiten radiación gamma, por cuya razón su medición es muy compleja. El empleo de la reacción $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ constituye una alternativa válida para su determinación. Combinando métodos de preconcentración y separación radioquímica es posible alcanzar límites de detección de 0,5 $\mu\text{g/l}$ en muestras de orina.

Varios estudios sobre interferencias mutuas entre reacciones de captura y reacciones umbral han sido desarrollados (Cohen, 1991). Los pares estudiados fueron: $^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}(\beta^-)^{47}\text{Sc}$ y $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ (interferencias entre calcio y titanio); $^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$, $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ y $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ (interferencias entre titanio y escandio); $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ y $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ (interferencias entre manganeso y hierro); finalmente, $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ y $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ (interferencias entre cobre y zinc). Los resultados muestran la necesidad de evaluación de estas interferencias en cualquier proceso de determinación por análisis por activación en reactores nucleares. La conclusión más significativa de este estudio es que el análisis por activación con neutrones epitérmicos para la determinación de calcio en materiales geológicos a partir de la reacción $^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca}(\beta^-)^{47}\text{Sc}$, método recomendado en la literatura (Brunfelt y Steinnes, 1971; Allian y Sansoni, 1980) es inaplicable, debido a las serias interferencias de titanio, que en materiales geológicos es el elemento que más contribuye a la actividad de ^{47}Sc (y no el calcio, como hasta allí se creía).

Al momento de concluir la presente publicación se encuentra muy avanzado el desarrollo de un trabajo destinado a la determinación de manganeso en hierro y sus concentrados, donde la interferencia de la reacción $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ sobre $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ se evalúa a partir de las constantes nucleares de otra reacción umbral inducida en hierro, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ (Cohen y colaboradores, 2014)

Los datos de literatura para las secciones eficaces de reacciones umbral, su disponibilidad y su validez

Lo discutido en las secciones anteriores brinda elementos suficientes como para considerar demostrado que toda aplicación del análisis por activación en reactores nucleares debe incluir una adecuada evaluación de la influencia de las reacciones umbral involucradas. Si, adicionalmente, se trata de análisis multielementales con métodos paramétricos, es necesario contar con valores confiables de las secciones eficaces para las reacciones umbral, de forma tal que puedan ser contempladas en los correspondientes cálculos. A ese respecto, se combinan dos aspectos que deben ser revisados: la disponibilidad de datos, en primera instancia, y su validez, en segundo término.

Las secciones eficaces integradas para reacciones umbral se expresan promediadas con respecto a un espectro de fisión, que sirve de referencia para uniformar los distintos valores experimentales. La presencia del moderador en los reactores es siempre un factor de distorsión del espectro neutrónico, que en ocasiones presenta diferencias con el de fisión, sobre todo en la zona de energías más bajas de la componente rápida. Por tal razón, es tarea de los experimentadores que generan los datos verificar, si emplean la componente rápida de un reactor nuclear, que su distribución en energías es análoga a la de la referencia, el espectro de fisión. La práctica usual para este fin es la determinación del flujo rápido con monitores de diferentes umbrales. En el caso de encontrar razonable acuerdo entre los valores para los distintos monitores, puede considerarse que existe similitud entre el espectro rápido del reactor y uno de fisión. El analista, que actúa como usuario de los datos, tampoco puede emplear directamente los valores de literatura para las secciones eficaces de reacciones umbral, pues debe previamente hacer sus propias verificaciones con respecto a las características del espectro de neutrones rápidos de su reactor.

Planteadas las consideraciones sobre la validez de los valores de las secciones eficaces, surge el problema de la disponibilidad. Para algunas reacciones de interés analítico, los valores de secciones eficaces de reacciones umbral están razonablemente bien determinados; no obstante, para la mayor parte de las reacciones se

registran situaciones de desconocimiento de los valores, o determinación pobre. Los datos se encuentran en buena parte diseminados en sus fuentes originales, pues no existen tablas de valores actualizados. Calamand (1974) efectuó la última recopilación de valores publicados para las secciones eficaces de reacciones umbral promediadas sobre un espectro de fisión. También llevó a cabo la renormalización de esos datos, sobre la base de valores más recientes para un conjunto de secciones eficaces que adoptó como reacciones estándar. Es discutible la decisión de renormalizar los valores de secciones eficaces solamente en función de una única variable de ajuste, los valores equivalentes para las reacciones estándar, como lo son también algunos criterios para la resolución de situaciones conflictivas (Cohen y Furnari, 1999). A pesar de esas falencias, el valor de la compilación radica en que todos los datos para reacciones umbral publicados hasta ese momento se encuentran citados. Desde entonces, ninguna obra integral equivalente fue realizada.

Trazabilidad y consistencia de los datos de secciones eficaces para las reacciones umbral

El concepto de trazabilidad de los datos nucleares fue introducido por Furnari y Cohen (1998). Sobre la base de las analogías existentes entre los datos nucleares y los sistemas de estándares metrológicos, los autores proponen una clasificación basada en la asignación de órdenes jerárquicos para los primeros. De esta forma, son datos de primer orden las constantes fundamentales; de segundo orden, los datos determinados mediante métodos absolutos o que emplean datos de primer orden; finalmente, los datos de tercer orden son aquellos en cuya determinación se emplean datos de primero o segundo orden, u otros datos de tercer orden.

Dos implicaciones fundamentales surgen de

este sistema: a) el concepto de trazabilidad puede ser aplicado al tratamiento de los datos nucleares; b) los datos de tercer orden son susceptibles de renormalización, pues su determinación depende de un conjunto de datos aceptados como referencia. Si algunos de los valores del conjunto de referencia cambia, el dato original debe ser renormalizado (es decir, recalculado según el nuevo valor de referencia). Se restaura así la consistencia global: un dato trazable es un dato renormalizable.

En un trabajo reciente (Cohen y colaboradores, 2013) se plantean las constantes que se utilizan en el cálculo del valor de una sección eficaz bajo estudio: Ellas son la sección eficaz de la reacción utilizada como estándar, las abundancias isotópicas de los precursores (de la reacción investigada y del monitor) y las probabilidades de emisión de las especies radiactivas (del producto de la reacción en estudio y del producto de la reacción estándar). En total son cinco constantes. Sobre cada una de ellas puede aplicarse el criterio de renormalización; su ausencia en la publicación original representa una pérdida de la trazabilidad del valor publicado.

Los criterios enunciados en el trabajo de Cohen y colaboradores (2013) fueron aplicados a la evaluación de los valores de secciones eficaces, promediadas sobre un espectro de fisión, para las reacciones $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$; $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$; $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ y $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$, contenidos en la base de datos EXFOR, del Organismo Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency, 2012). Los resultados del proceso de renormalización se resumen en la Tabla 4.

Es posible formular varias observaciones de interés a partir de los resultados indicados en la Tabla 4:

Reacción	No. de valores originales	No. de valores aceptados	No. de valores no renormalizables	No. de valores parcialmente renormalizados	No. de valores totalmente renormalizados
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	18	15	3	11	1
$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	15	14	3	10	1
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	13	13	2	10	1
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	18	16	3	12	1

Tabla 4. Resumen de los resultados del proceso de renormalización

a) En primer lugar, el número de valores aceptados para la renormalización es menor que el número total de valores revisados. Esto se debe al hecho de que algunos valores estaban indicados sin incertidumbre. Por tal razón, se decidió que valores que se supone serán empleados en cálculos o evaluaciones no pueden ser siquiera considerados.

b) Los valores no renormalizables corresponden a datos obtenidos por métodos diferentes a la comparación con una reacción estándar.

c) El número de valores que pueden ser totalmente renormalizados (a partir de nuevos valores de todas las constantes vinculadas al cálculo de las secciones eficaces) es extremadamente bajo. Este hecho implica que los autores no incluyeron en los trabajos todos los datos de entrada involucrados.

d) La pérdida de trazabilidad que implica la situación comentada en c) conduce también a la realización de un procedimiento necesariamente incompleto, puesto que todo el proceso se sostiene en datos donde la renormalización es necesariamente parcial.

La consistencia de los conjuntos de datos se resiente cuando se analiza el estado de las reacciones de referencia, pues no hay consenso acerca de una reacción que con carácter preferencial pueda ser considerada estándar para la determinación de secciones eficaces promediadas sobre un espectro de fisión. Frecuentemente tales mediciones se refieren a una o varias reacciones cuya sección eficaz se consi-

dera bien conocida. En la literatura se encuentran abundantes ejemplos de utilización de algunas de estas reacciones como estándar para la determinación de la sección eficaz de otra reacción también usada como estándar. Estas determinaciones cruzadas hacen difícil la elección de un conjunto de valores consistente y mutuamente independiente.

Conclusiones

La realización de análisis a partir de métodos de activación en reactores nucleares debe incluir la consideración de la influencia de las reacciones inducidas por la componente rápida del espectro neutrónico. Tal requerimiento implica la necesidad de verificaciones adicionales, entre las que se encuentra la determinación de la forma del espectro de neutrones rápidos y su comparación con un espectro de fisión, para luego efectuarse las estimaciones sobre el grado en que los resultados se afectan a partir de las reacciones umbral que pueden producirse. Cuando se aplican métodos paramétricos, es preciso, además, contar con los datos pertinentes para la evaluación. El estado actual de los valores de literatura sobre secciones eficaces muestra información faltante con referencia a los datos de entrada, necesidad de actualización de valores históricos y de nuevas determinaciones. Por último, la necesidad de elaborar tablas de datos para su utilización con fines analíticos resulta perentoria. El trabajo a desarrollar es muy complejo, pues son muchos los aspectos que deben estudiarse para obtener conjuntos consistentes.

Referencias

- AISENBERG, E. Y.; COHEN, I. M.; KOROB, R. O.; RUDELLI, M. D. (1971) II Congreso Argentino de Biología y Medicina Nuclear. San Martín de los Andes, 5 al 9 de octubre.
- ALLIAN, A.; Sansoni, B. (1980) *J. Radioanal. Chem.* 59, 511.
- BRUNFELT, A. O.; Steinnes, E. (1971) *Talanta* 18, 1197.
- CALAMAND, A. (1974). En *Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections*, p. 273. IAEA Technical Report Series No. 156.
- COHEN, I. M.; RESNIZKY, S. M.; BARÓ, G. B. (1982). *J. Radioanal. Chem.* 72, 451.
- COHEN, I. M. (1991) *J. Radioanal. Chem.* 148, 155.
- COHEN, I. M.; ARRIBÉRE, M. A.; KESTELMAN, A. J.; FURNARI, J. C. (1993) Vigésimoprimer Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear. Mar del Plata, 9 al 12 de noviembre.
- COHEN, I. M.; FURNARI, J. C. (1999) *Appl. Rad. Isot.* 50, 743.
- COHEN, I. M.; FORNACIARI ILJADICA, M. C.; FURNARI, J. C.; ALÍ SANTORO, M. C. (2013) *Applied Rad. Isot.* 77, 115.
- COHEN, I. M.; SIRI, S.; SEGOVIA, M. S. (2014) Trabajo a ser publicado.
- DE CORTE, F.; SIMONITS, A.; DE WISPELAERE, A.; HOSTE, J. (1987). *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 113, 145.
- ESPINOSA GARCÍA, R.; COHEN, I. M. (1984). *J. Radioanal. Chem.* 82, 353.
- FURNARI, J. C.; COHEN, I. M. (1994). *Biol. Trace Elem. Res.* 43, 503.
- FURNARI, J. C.; COHEN, I. M. (1998). *Appl. Radiat. Isot.* 49, 1523.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2012). *Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)*. Disponible en el sitio www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm. La última versión corresponde a julio de 2014.