

Las instalaciones de irradiación de los reactores nucleares y su importancia en las aplicaciones del análisis por activación

Isaac Marcos Cohen

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires,
Departamento Ingeniería Química, Grupo IDETQA, Medrano 951 (C1179AAQ)
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

mcohen@frba.utn.edu.ar

Recibido el 30 de julio de 2015, aprobado el 10 de agosto de 2015

Resumen

En esta presentación se evalúa críticamente la relación entre las instalaciones disponibles para irradiación en reactores nucleares y los requerimientos del análisis por activación como técnica analítica. Se discuten los aspectos referidos a diferentes alternativas de determinación, sensibilidad analítica e interferencias. Se presentan algunos ejemplos experimentales de la aplicación del análisis por activación, bajo esta concepción.

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN – REACTORES NUCLEARES – INSTALACIONES DE IRRADIACIÓN

Abstract

The relationship between the facilities available for irradiation in nuclear reactors and the requirements of activation analysis as analytical technique are critically evaluated. The aspects referred to different alternatives for determination, analytical sensitivity and interferences are discussed. Some experimental examples of application of activation analysis, under this conception, are presented.

KEYWORDS: ACTIVATION ANALYSIS - NUCLEAR REACTORS – IRRADIATION FACILITIES

Introducción

Aproximadamente el 80 % de los trabajos publicados con respecto al desarrollo o la aplicación de métodos de análisis por activación están referidos a los reactores nucleares como fuente de irradiación. Esta cifra marca una tendencia cuya explicación puede encontrarse en dos aspectos básicos: disponibilidad de altos flujos de partículas, neutrones térmicos en este caso, y muy favorables secciones eficaces, con tales partículas, para la mayor parte de los elementos (La sección eficaz es un término que expresa la probabilidad de producción de una determinada reacción nuclear). A estas condiciones, sin duda importantes para el análisis por activación, se suma una componente adicional, tal vez decisiva, como lo es la posibilidad de irradiación simultánea de múltiples muestras, factor que permite el empleo del reactor para varios fines, principalmente la producción de radioisótopos.

Difícilmente pueda concebirse, sobre todo en los países en desarrollo, la construcción de un reactor nuclear destinado en forma excluyente, o siquiera preferencial, al análisis por activación. Sin embargo, es esta técnica la que podría requerir la utilización de todas las posiciones de irradiación del reactor, incluyendo varias de sus instalaciones auxiliares, en los diferentes problemas que involucra el análisis de matrices de diverso origen para la determinación de elementos con características nucleares muy disímiles en muchos casos.

Sobre la base de la experiencia adquirida por el autor en la utilización de varios reactores del país y de otros países latinoamericanos, el presente trabajo tiene como objetivo efectuar una evaluación crítica acerca de la necesidad de empleo de las diferentes instalaciones de irradiación de un reactor nuclear, en relación con la aplicación integral del análisis por activación.

Irradiación, sensibilidad analítica e interferencias

El cálculo primario de la sensibilidad analítica en análisis por activación toma como base la conocida fórmula que vincula, para una reacción directa, la actividad de un radionucleido expresado como (2) con el número de átomos de su precursor expresado como (1):

$$A_2(t) = N_1 \sigma_{12} \Phi (1 - e^{-\lambda_2 t_{irr}})$$

donde N es el número de átomos, σ es la sección eficaz para la reacción, Φ el flujo de partículas, λ la constante de desintegración del radioisótopo y t_{irr} el tiempo de irradiación.

De acuerdo con esta fórmula, resultaría conveniente efectuar la irradiación en alguna de las posiciones de mayor flujo posible, puesto que así se detectarían masas cada vez menores de los precursores. La aplicación de este concepto en forma lineal supone ignorar otro factor crítico, relacionado con las interferencias que se producen en forma simultánea con la activación del elemento de interés. Ejemplos de mecanismos a partir de los cuales pueden producirse interferencias de segundo orden son:

a) reacción principal: $3(n,\gamma)4$; interferencia: $1(n,\gamma)2$; (decaimiento); $3(n,\gamma)4$

b) reacción principal: $d(n,\gamma)e$; interferencia: $a(n,\gamma)b(n,\gamma)c$ (decaimiento)e

Los números y las letras simbolizan a los diferentes nucleidos involucrados, de los cuales los subrayados corresponderían a isótopos estables. Al solo efecto de diferenciar a los dos casos posibles, se reservará la denominación de interferencia de segundo orden a la secuencia descrita en a), mientras que la descripción de b) se caracterizará como interferencia por doble captura neutrónica.

Simbolizando con el subíndice p a todas las variables involucradas en la reacción principal y con i a las dependientes de la primera reacción de interferencia, se expresará el grado de interferencia del elemento i en términos de concentración aparente de p, elemento principal. Para la interferencia de segundo orden (Cohen, 1982) la ecuación aplicable es:

$$[p]_{ap}(t) = [i] \lambda_i \frac{\theta_i P A_p}{\theta_p P A_i} \sigma_i \Phi \left[\frac{1}{(\sigma_p \Phi - \lambda_i)(\sigma_p - \sigma_i)} + \frac{(\lambda_p - \sigma_p \Phi)}{(\lambda_p - \sigma_i \Phi)(\lambda_i - \sigma_i \Phi)(\sigma_p - \sigma_i) \Phi} \left(\frac{e^{-\sigma_i \Phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}}}{e^{-\sigma_p \Phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}}} \right) - \frac{(\lambda_p - \sigma_p \Phi)}{(\lambda_p - \lambda_i)(\sigma_p \Phi - \lambda_i)(\lambda_i - \sigma_i \Phi)} \left(\frac{e^{-\lambda_i t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}}}{e^{-\sigma_p \Phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}}} \right) \right]$$

donde $[p]_{ap}$ representa la concentración aparente del elemento p que induce la interferencia del elemento i, de concentración $[i]$; θ y PA representan a las abundancias isotópicas y los pesos atómicos, respectivamente.

La expresión equivalente para la interferencia por doble captura neutrónica (Cohen, 1982) es:

$$[p]_{ap} = [i] \frac{\lambda_{ii}(\lambda_p - \sigma_p\phi)}{\lambda_i + (\sigma_{ii} - \sigma_i)\phi} \frac{\theta_i PA_p \sigma_i \sigma_{ii} \phi}{\theta_p PA_i \sigma_p}$$

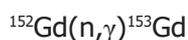
$$\left\{ \frac{1}{(\lambda_p - \lambda_{ii})} \left[\frac{1}{\lambda_{ii} - (\lambda_i - \sigma_{ii}\phi)} \frac{e^{-(\lambda_i + \sigma_i\phi)t_{irr}} - e^{-\lambda_{ii}t_{irr}}}{e^{-\sigma_p\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}}} \right] - \frac{1}{(\lambda_{ii} - \sigma_i\phi)} \frac{(e^{-\sigma_i\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_{ii}t_{irr}})}{(e^{-\sigma_p\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})} \right\} [1 - e^{-(\lambda_{ii} - \lambda_p)t_{irr}}] + \frac{1}{(\lambda_{ii} + \sigma_i\phi)(\lambda_p - \sigma_i\phi_{ii})} \frac{(e^{-\sigma_i\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})}{(e^{-\sigma_p\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})} - \frac{1}{[\lambda_p - (\lambda_i + \sigma_{ii}\phi)][\lambda_{ii} - (\lambda_i + \sigma_{ii}\phi)]} \frac{(e^{-(\lambda_i + \sigma_i\phi)t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})}{(e^{-\sigma_p\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})} + \frac{1}{(\lambda_p + \lambda_{ii})[\lambda_{ii} - (\lambda_i + \sigma_{ii}\phi)][\lambda_{ii} - \sigma_i\phi]} \frac{(e^{-\lambda_{ii}\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})}{(e^{-\sigma_p\phi t_{irr}} - e^{-\lambda_p t_{irr}})} \right\}$$

El subíndice i se refiere a la primera reacción que conduce a la interferencia, mientras que ii está referido a la segunda reacción.

En ambos ejemplos la concentración aparente de p inducida en la muestra, obviamente errónea, es más significativa cuanto mayor sea el flujo neutrónico.

Un ejemplo de interferencia de segundo orden es la que genera el europio en la determinación de gadolinio, estudiada por Kramar (1980):

Reacción principal:



Interferencias:

- 1) $^{151}\text{Eu}(n,\gamma)^{152}\text{Eu}(\beta^-)^{152}\text{Gd}(n,\gamma)^{153}\text{Gd}$
- 2) $^{151}\text{Eu}(n,\gamma)^{152m}\text{Eu}(\beta^-)^{152}\text{Gd}(n,\gamma)^{153}\text{Gd}$

Cohen y colaboradores (1976) estudiaron varios casos de interferencia por doble captura neutrónica. Entre ellos, uno de los más relevantes se da entre el oro y el platino:

Reacción principal:

- 1) $^{198}\text{Pt}(n,\gamma)^{199}\text{Pt}(\beta^-)^{199}\text{Au}$
- 2) $^{198}\text{Pt}(n,\gamma)^{199m}\text{Pt}(TI)^{199}\text{Pt}(\beta^-)^{199}\text{Au}$

Interferencia:



El tratamiento matemático en los ejemplos anteriores conduce a fórmulas más complejas que las formuladas anteriormente. El aspecto distintivo es que el grado de interferencia depende, también aquí, del flujo neutrónico. Para la interferencia de segundo orden, la actividad de ^{153}Gd inducida por europio, para 24 h de irradiación a un flujo térmico igual a 8×10^{13} n.cm⁻².s⁻¹, alcanza el 40 % de la actividad producida por gadolinio, para masas equivalentes. En cuanto a la interferencia por doble captura neutrónica, la concentración aparente de platino en oro, por medición de ^{199}Au , luego de 4 días de irradiación a un flujo de 10^{13} n.cm⁻².s⁻¹ y 5 días de decaimiento, es de 62 %.

Los casos mencionados, son quizás los de mayor importancia práctica, aunque no excluyen otros ejemplos también significativos.

Las posiciones de mayor flujo neutrónico son las más cercanas al núcleo del reactor, donde en general las relaciones entre las componentes rápida y térmica del espectro neutrónico son altas. Cuando se irradia en estas posiciones, la posibilidad de interferencias por reacciones neutrón-protón y neutrón-alfa, inducidas solamente por neutrones de mayor energía, dado que es necesario vencer un umbral energético para su generación, debe ser específicamente explorada. En forma simplificada, la concentración aparente que induce una interferencia i en un elemento principal p en estos casos es:

$$[p]_{ap} = [i] \frac{\theta_i PA_p}{\theta_p PA_i \phi_t} \frac{\bar{\sigma}_i \phi_r}{\sigma_p \phi_t + I_p \phi_{epi}}$$

Los términos conservan el mismo significado que en las ecuaciones anteriores; Φ_t , Φ_{epi} y ϕ_r refieren respectivamente a las componentes de neutrones térmicos (en equilibrio con el medio), epitérmicos (neutrones que perdieron parte de su energía por choques con las moléculas del moderador) y rápidos (neutrones que conservan la energía original debida a la fisión); I_r , integral de resonancia, expresa la probabilidad

de reacción en la zona epitérmica.

Varios ejemplos experimentales pueden ser consultados en un trabajo del autor (Cohen, 1991). Una revisión más extensa puede ser consultada en un artículo posterior (Cohen, 2014). Un trabajo más reciente (Cohen y colaboradores, 2015) describe una metodología para la determinación de manganeso a partir de la reacción $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ en concentrados de hierro, donde la interferencia de la reacción $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ es particularmente alta.

En razón de lo discutido en los párrafos precedentes, resulta evidente la necesidad de evaluar adecuadamente las interferencias que pueden presentarse según la posición de irradiación elegida en cada caso. En muchas ocasiones, a menos que puedan ser efectuadas las correcciones pertinentes, resulta aconsejable irradiar con flujos más bajos, inclusive en la columna térmica del reactor (Sekimoto y colaboradores,

2007) aun a pesar de la consiguiente pérdida de sensibilidad en la determinación.

Alternativas de determinación

En la práctica del análisis por activación, la necesidad de optimizar la relación entre la actividad del elemento de interés con respecto a la inducida sobre otros elementos presentes en la muestra, debe anteponerse a la idea de obtención de altas actividades. Este criterio encuentra justificación plena en el análisis por activación con neutrones epitérmicos, donde se emplean filtros de cadmio para absorber los neutrones térmicos. En esas condiciones, algunos elementos encuentran favorecida su determinación, aun cuando la actividad inducida es significativamente menor.

Sobre la base de un factor de ventaja, definido por Brune y Jirlow (1964) como el cociente entre las relaciones de cadmio de la interferencia

Nucleido	Sección eficaz (b)	Integral de resonancia (b)	Relación de cadmio	Factor de ventaja (^{24}Na)	Factor de ventaja (^{47}Ca)	Factor de ventaja (^{56}Mn)
^{24}Na	0,53	0,35	38,6	---	---	---
^{47}Ca	0,25	0,32	20,4	---	---	---
^{56}Mn	13,3	13,9	24,7	---	---	---
^{140}La	9,0	11,5	20,4	1,9	1,0	1,2
^{141}Ce	0,57	0,43	33,9	1,1	0,6	0,7
^{143}Ce	0,97	0,95	23,4	1,7	0,9	1,1
^{147}Nd	1,3	2,6	13,2	2,9	1,5	1,9
^{153}Sm	206	3141	2,6	14,7	7,7	9,4
$^{152\text{m}}\text{Eu}$	3300	3036	28,0	1,7	0,7	0,9
^{152}Eu	5900	3700	40,6	0,9	0,5	0,6
^{153}Gd	1100	3000	10,1	3,8	2,0	2,5
^{159}Gd	2,5	83,3	1,7	22,2	11,7	14,2
^{160}Tb	25,5	410	2,5	15,2	8,0	9,7
^{165}Dy	2700	810	83,7	0,5	0,24	0,3
^{166}Ho	63,0	636	3,5	11,1	5,9	7,2
^{171}Er	5,7	23,9	6,9	6,6	2,9	3,6
^{170}Tm	103	1410	2,8	13,7	7,3	8,8
^{169}Y	3470	25000	4,4	8,7	4,6	5,6
^{175}Y	65	38	43,4	0,9	0,5	0,6
$^{177\text{m}}\text{Lu}$	16,4	547	1,7	22,2	11,7	14,2
^{177}Lu	2100	1090	48,8	0,8	0,4	0,5

Tabla 1. Factores de ventaja de nucleidos producidos por los elementos de las tierras raras, con relación a sodio, calcio y manganeso

y del elemento de interés, es posible establecer la eventual conveniencia de emplear la activación exclusivamente con neutrones epitérmicos. Tal alternativa resultará más ventajosa cuanto mayor sea el factor de ventaja calculado. Los primeros trabajos se efectuaron sobre material geológico silicatado. El autor extendió su aplicación a otras matrices (Cohen, 1973; Gomez y Cohen, 1981).

La Tabla 1 muestra los factores de ventaja para radionucleidos producidos por activación de los elementos de las tierras raras, con respecto a ^{24}Na , ^{47}Ca y ^{56}Mn como interferencias principales, para una relación $\Phi_{\text{epi}}/\Phi_{\text{th}}$ igual a 0,035. Puede observarse que estos factores son favorables para una buena parte de los elementos investigados. Sobre esa base, se desarrolló un método para la determinación de tierras raras en fluoritas mediante análisis por activación con neutrones epitérmicos (Cohen, 1978).

No siempre es posible emplear las reacciones de captura neutrónica, (n,γ) , para el análisis por activación, pues las características de los productos podrían ser desfavorables. Las reacciones umbral, mencionadas anteriormente como interferencias, pueden servir como alternativas analíticas. Algunos ejemplos de interés pueden consultarse en los trabajos, ya citados,

del autor (1991 y 2014).

El empleo de flujos predominantemente térmicos, o irradiación con neutrones epitérmicos y rápidos, depende del requerimiento analítico, pero también, obviamente, de las posibilidades de irradiación. Las relaciones $\Phi_{\text{epi}}/\Phi_{\text{t}}$, $\Phi_{\text{r}}/\Phi_{\text{t}}$ y $\Phi_{\text{epi}}/\Phi_{\text{t}}$ son parámetros de importancia y, puesto que cada problema puede encontrar una solución distinta, la disponibilidad de posiciones de irradiación con características diferentes es una herramienta invaluable.

Como necesidad asociada a la utilización de neutrones epitérmicos y rápidos debe mencionarse la instalación de sistemas de transferencia de cápsulas irradiadas y celdas de apertura, en razón de que los filtros de cadmio empleados para absorber neutrones térmicos generan altas actividades y podrían implicar riesgos para el operador.

Las instalaciones del reactor y el análisis por activación con radionucleidos de período corto

El empleo de nucleidos de periodo de semidesintegración¹ corto implica en el análisis, como ventaja inmediata, la reducción del tiempo de operación. Más allá de este factor favorable,

Elemento	Radionucleido	Periodo
N	^{16}N	7,13 s
O	^{19}O	27,1 s
	^{16}N	7,13 s
F	^{20}F	11,0 s
	^{19}O	27,1 s
Mg	^{27}Mg	9,46 min
Al	^{28}Al	2,25 min
S	$^{37}\text{S}^*$	5,0 min
Cl	^{38}Cl	37,18 min
V	^{52}V	3,75 min
Rh	^{104}Rh	42 s
In	$^{116\text{m}2}\text{In}^{**}$	54 min
I	^{128}I	25,0 min

Tabla 2. Elementos que conducen a radionucleidos de periodo corto como única alternativa analítica

* Único emisor gamma

** Vía prácticamente excluyente

¹Periodo de semidesintegración o periodo, es el tiempo en el cual una población de átomos radiactivos disminuye su número a la mitad.

Elemento	Radionucleido	Periodo (s)
Li	^8Li	0,84
O,N	^{16}N	7,13
Cl	$^{38\text{m}}\text{Cl}$	0,7
In	$^{116\text{m}2}\text{In}$	2,2
Er	^{167}Er	2,3
Hf	$^{177\text{m}}\text{Hf}$	1,1
Hf	^{178}Hf	4,0
W	$^{183\text{m}}\text{W}$	5,3
Au	$^{187\text{m}}\text{Au}$	7,8

Tabla 3. Nucleidos de interés analítico y periodo menor que 10 segundos

para varios elementos, que se indican en la Tabla 2, es la única vía aplicable.

El autor ha intervenido en numerosos trabajos destinados a la medición de radioisótopos de periodo corto, con fines analíticos o de caracterización de reacciones nucleares y productos. La nómina de nucleidos y sus periodos comprende: ^{19}O , 27,1 s (Aisenberg y colaboradores, 1971); ^{20}F , 11,0 s (Aisenberg y colaboradores, 1972); $^{116\text{m}2}\text{In}$, 54 min (Cohen, 1973); $^{34\text{m}}\text{Cl}$, 32,0 min (Cohen y colaboradores, 1987); ^{28}Al , 2,25 min (Furnari y Cohen, 1994; Arribére y colaboradores, 2000); ^{70}Ga , 21,15 min, y ^{74}Ga , 8,1 min (Cohen y colaboradores, 1996); ^{25}Na , 59,1 s, ^{27}Mg , 9,458 min, ^{29}Al , 6,56 min (Arribére y colaboradores, 2000); $^{77\text{m}}\text{Ge}$, 53 s (Kestelman y colaboradores, 2000); ^{66}Cu , 5,12 min, $^{68\text{m}}\text{Cu}$, 3,75 min, ^{63}Zn , 38,47 min, y ^{71}Zn , 2,45 min (Cohen y colaboradores, 2005); $^{75\text{m}}\text{Ge}$, 48 s (Dorval y colaboradores, 2006); ^{68}Cu , 31,1 s (Kestelman y colaboradores, 2007).

La experiencia operativa permite concluir que es factible la medición de radionucleidos con periodos del orden de 10 min o mayores aun cuando no se disponga de sistemas neumáticos de transferencia de muestras hacia y desde la posición de irradiación, pero que ellos resultan imprescindibles para periodos más cortos. Cabe señalar, en tal sentido, que los dos sistemas neumáticos de transferencia del reactor de investigación más importante de la Argentina (Reactor RA-3; Centro Atómico Ezeiza, Comisión Nacional de Energía Atómica) se encuentran no operables desde 1972. Tal situación representa una fuerte restricción a las posibilidades de aplicación del análisis

por activación (por ejemplo, con respecto a la determinación de aluminio y magnesio, componentes habituales de muestras geológicas).

El análisis por activación con periodos muy cortos (por ejemplo, del orden de unos pocos segundos) implica la necesidad de contar con sistemas de transferencia muy precisos y veloces, para asegurar el posicionamiento de las cápsulas de irradiación en el sitio seleccionado y su rápida recuperación. Adicionalmente, el sistema de medición debe encontrarse en el lugar de recepción de las muestras irradiadas. En ocasiones, se requiere la realización de irradiaciones y mediciones cíclicas, con el objeto de mejorar los límites de detección. En la Tabla 3 se indican algunos nucleidos de periodo corto de interés analítico, que pueden emplearse en la determinación elemental.

En resumen, para todo análisis que involucre la medición de radionucleidos de periodo corto, la extensión del tubo neumático y su destino final (cuarto de medición de bajo fondo radiactivo) son factores muchas veces determinantes en la definición de la viabilidad de un método. Puede ser necesario, además, contar con estaciones de recepción y procesado rápido de muestras, cuando estos métodos se combinan con activación por neutrones epitérmicos.

La utilización de haces de irradiación externos

Una de las modalidades más promisorias del análisis por activación es la determinación multielemental directa en muestras grandes,

en los casos en que no es posible tomar una fracción representativa para el trabajo analítico. Esta situación se da cuando la composición es no homogénea, o bien cuando la integridad del objeto debe ser preservada, como en las muestras de interés arqueológico. El tamaño de tales muestras impide su irradiación en el núcleo mismo del reactor, que implicaría además la generación de actividades inaceptablemente altas. Por tal razón, se utilizan haces de neutrones para su activación fuera del recinto mismo.

Ejemplos de aplicación de estos métodos pueden consultarse en los artículos de Bedregal y colaboradores (2009 y 2012). El autor formó parte del grupo de profesionales que llevó a cabo esos desarrollos, efectuados mediante el Contrato de Investigación 15224, celebrado con el Organismo Internacional de Energía Atómica. El contrato estaba destinado al desarrollo de métodos de análisis por activación de objetos arqueológicos enteros. Las irradiaciones se efectuaron a la salida de uno de los

tubos radiales del reactor nuclear de 10 MW del Centro Nuclear RACSO (Instituto Peruano de Energía Nuclear) empleando un dispositivo rotatorio diseñado para asegurar que muestra y estándar recibieran el mismo flujo integrado.

Conclusiones

La reseña presentada permite demostrar la estrecha relación existente entre la factibilidad de realización del análisis por activación, en sus diferentes formas, y las instalaciones de los reactores nucleares, incluyendo a las posiciones de irradiación, los sistemas de transferencia y los servicios auxiliares.

El examen pormenorizado conduce a una conclusión final: la necesidad de una compenetración cabal de los requerimientos del usuario, por parte de diseñadores y operadores de reactores nucleares y, con respecto al analista, del conocimiento adecuado de las posibilidades que su propio reactor ofrece.

Referencias

- AISENBERG, E. Y.; COHEN, I. M.; KOROB, R. O. y RUDELLI, M. D., (1971) II Congreso Argentino de Biología y Medicina Nuclear; San Martín de los Andes, 5 al 9 de octubre.
- AISENBERG, E. Y.; COHEN, I. M.; KOROB, R. O. y RUDELLI, M. D., (1972) Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences 1972, Proceedings of a Symposium, p. 551; International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- ARRIBÉRE, M. A.; COHEN, I. M.; KESTELMAN, A. J. y RIBEIRO GUEVARA, S., (2000) J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles 244, 417.
- BEDREGAL, P.; MUNIVE, M.; MENDOZA, P.; REVILLA, A.; GAGO, J.; COHEN, I. M. y MONTOYA, E., (2009) Proyecciones 7, 1, 65.
- BEDREGAL, P.; MENDOZA, P.; COHEN, I. M.; BALTUANO, O. y MONTOYA, E., (2012) J. Radioanal. Nucl. Chem. 291, 37.
- BRUNE, O. y JIRLOW, K., (1964) Nukleonik 6, 242.
- COHEN, I. M., (1973) Radiochem. Radioanal. Letters 15, 379.
- COHEN, I. M.; KOROB, R. O.; MILÁ, M. I. y ROCCA, H. C., (1976) Informe CNEA No. 416.
- COHEN, I. M., (1978) XIV Sesiones Químicas Argentinas. Santa Fe, 16 al 20 de julio.
- COHEN, I. M., (1982) Informe CNEA NT 15/82.
- COHEN, I. M.; MAGNAVACCA, C. y BARÓ, G. B., (1987) J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles 112, 387.
- COHEN, I. M., (1991) J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles 148, 155.
- COHEN, I. M.; KESTELMAN, A. J.; FURNARI, J. C. y ARRIBÉRE, M. A., (1996) J. Radioanal. Nucl. Chem, Letters 212, 353.
- COHEN, I. M.; RIBEIRO GUEVARA, S.; ARRIBÉRE, M. A.; FORNACIARI ILJADICA, M. C.; KESTELMAN, A. J.; OHACO, R. A.; SEGOVIA, M. S. y YUNES, A. N., (2005) Radiochimica Acta 93, 543-546
- COHEN, I. M., (2014) Proyecciones 12, 2, 45.
- COHEN, I. M.; SEGOVIA, M. S. y SIRI, S., (2015) 14th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis. Delft, Netherlands, 23-29 September. Enviado para su publicación en J. Radioanal. Nucl. Chem.
- DORVAL, E.; ARRIBÉRE, M. A.; RIBEIRO GUEVARA, S.; KESTELMAN, A. J.; COHEN, I. M. OHACO, R. A.; SEGOVIA, M. S.; YUNES, A. N. y ARRONDO, M., (2006) J. Radional. Chem. Articles 270, 603.

FURNARI, J. C. y COHEN, I. M., (1994) *Biological Trace Element Research* 43-5, 503.
GOMEZ, C. D. y COHEN, I. M., (1981) *Actas de la X Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear*, p. 303.
KESTELMAN, A. J.; ARRIBÉRE, M. A.; COHEN, I. M. y FURNARI, J. C., (2000) *Phys. Rev. C* 61, 067304.
KESTELMAN, A. J.; RIBEIRO GUEVARA, S.; ARRIBÉRE, M. A. y COHEN, I. M., (2007) *App. Rad. Isotopes* 65, 872.
KRAMAR, U. (1980) *Geochim.Cosmochim. Acta* 44, 379.
SEKIMOTO, S.; KOBAYASHI, T.; TAKAMIYA, K. y; SHIBATA, S., (2007) *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* 8, No. 2, 113.