

LA QUIMICA EN EL CENTRO NUCLEAR DE INVESTIGACIONES  
DEL PERU

Ricardo Espinosa G., Manuel Castro V., Percy Zúñiga P.

*Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) \**

La puesta en servicio del Centro Nuclear de Investigaciones del Perú (CNIP), con su reactor de 10 MW, constituirá un acontecimiento de primer orden en la historia de la ciencia en el Perú. Científicos e ingenieros trabajarán comunitariamente en este centro realizando investigación y desarrollo (I y D) en disciplinas tan diversas como Física Nuclear y del Sólido, Química Nuclear y Analítica, Ciencia de los Materiales, Radioprotección y Seguridad Nuclear, Radiobiología e Ingeniería de Procesos. La interacción entre estos grupos especializados permitirá encarar estudios complejos de carácter multidisciplinario en ecología, energía, evaluación de recursos naturales, etc.

Los programas en Química que se desarrollarán en el CNIP son muy variados y comprenden tanto servicios como actividades de I y D. Entre los primeros podemos citar el uso del reactor y sus facilidades asociadas para producción de radioisótopos y compuestos marcados a ser utilizados como trazadores, análisis de isótopos estables y radioactivos en muestras de carácter muy diverso, control y mantenimiento químico del reactor y otras. Entre las actividades de I y D tenemos la implementación de nuevos métodos de producción y síntesis de compuestos marcados, de análisis por activación y separaciones radioquímicas, el estudio del destino de contaminantes estables y radioactivos en el ambiente y organismos vivientes, radiólisis, dosimetría y química del átomo caliente.

---

\* IPEN, Avenida Canadá 1470, Lima 100

El contar con trazadores de más de 60 elementos químicos y con poderosas técnicas nucleares posibilitará igualmente que otras instituciones y universidades, que trabajan en los campos de la Química Orgánica, Inorgánica, Analítica, Ambiental, Bioquímica e Ingeniería Química, se beneficien ampliando sus posibilidades de investigación.

En vista de los limitados recursos, tanto económicos como humanos, de un país en vías de desarrollo como el Perú, es necesario efectuar una planificación cuidadosa de los programas a desarrollarse inicialmente, tanto en Química como en otras áreas, tomando en cuenta las necesidades prioritarias del país. Entre estos programas detallaremos tres de gran importancia en todo centro nuclear y en los cuales el IPEN ya tiene una experiencia básica adquirida: Producción de Radioisótopos, Análisis por Activación y Radioactividad Ambiental.

### PRODUCCION DE RADIOISOTOPOS

La Planta de Producción de Radioisótopos del RP-10 (PPR) no sólo producirá los pocos radioisótopos que tradicionalmente se importaban sino también muchos otros cuyo corto período de semidesintegración impedía traerlos del exterior. Mediante reacciones nucleares del tipo  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$  y  $(n, \alpha)$  se podrán producir radioisótopos correspondientes a aproximadamente 60 elementos químicos, entre los cuales pueden ser objeto de una producción regular los siguientes: Na-24, P-32, S-35, K-42, Ca-45, Sc-46, Cr-51, Fe-59, Cu-64,

Tabla 1 Elementos que pueden dar lugar a trazadores radioactivos en el RP-10 (Subrayados). Límites de detección que se obtienen en AAN para un flujo neutrónico similar al del RP-10

H																	He		
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
<u>Na</u>	<u>Mg</u>													Al	Si	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Cl</u>	Ar
9	8													9	5	2	2	10	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
9	7	11	8	11	9	12	7	10	8	11	9	11	9	11	9	11			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	<u>Ag</u>	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe		
9	10	9	8	8	9		10	12	9	10	10	13	8	11	9	11			
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	<u>Au</u>	<u>Hg</u>	Tl	Pb	<u>Bi</u>	Po	At	Rn		
10	10	11	11	10	11	12	6	11	9	12	11	8		6					
Fr	Ra	Ac	(Rf)	(Ho)															

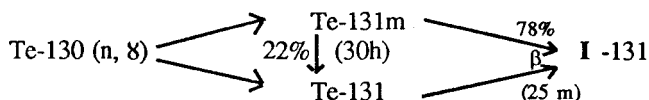
Ce	Pr	<u>Nd</u>	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
9	9	9		12	13	14	10	13	13	10	10	11	12
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	(Lw)
11		11											

Zn-65, As-76, Br-82, Rb-86, Mo-99, Ag-110m, Sb-124, I-131, La-140, Yb-169, Hg-197 y Au-198. La Tabla 1 muestra aquellos elementos químicos de los cuales se puede obtener uno o más radioisótopos por irradiación en el RP-10.

En la PPR se han montado celdas blindadas especialmente acondicionadas para la producción rutinaria de los siguientes radioisótopos de gran demanda en los campos de la medicina, agricultura e industria: P-32, S-35, Mo-99, I-131 y Au-198, así como de generadores de Tc-99m e In-113m. Igualmente, para la producción de los restantes radioisótopos se ha implementado una celda multipropósito que permitirá producirlos a partir de la irradiación de blancos tipo óxidos o carbonatos y posterior disolución en ácido, obteniéndolos en formas químicas simples (radioisótopos primarios).

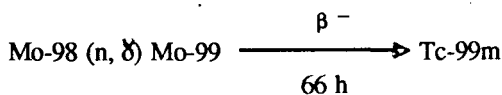
*El Oro - 198* (2.7 días) se prepara irradiando oro metálico de alta pureza mediante la reacción nuclear Au-197 (n,  $\gamma$ ) Au-198. El oro irradiado se disuelve en agua regia, se evapora a sequedad y, agregando solución de NaOH, se forma el cloroaurato de sodio. Su uso en medicina exige que se encuentre en estado coloidal por lo cual se deja gotear esta solución en una solución reductora de glucosa y gelatina obteniéndose una solución final de Au-198 coloidal.

*El Yodo-131* (8 días) se obtiene irradiando óxido de telurio mediante la reacción nuclear:



Después de disolver el TeO<sub>2</sub> con NaOH, el I es precipitado como Ag<sub>2</sub>O I-131, agregando AgNO<sub>3</sub>. Este óxido se separa por decantación eliminándose el sobrenadante que contiene una serie de teluros de diferentes períodos de semidesintegración. El yoduro radioactivo se redissuelve en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se destila y se recupera el destilado en solución buffer carbonato/bicarbonato para obtener el producto final.

El Tc-99m (6 horas) se obtiene del decaimiento del Mo-99 (66 horas) producido mediante la siguiente reacción nuclear:



Este es uno de los radioisótopos más empleados actualmente y también se le puede obtener "in situ" empleando los denominados "Generadores de Radioisótopos" que también se producirán en la PPR. El Mo-99 (padre), bajo una forma química adecuada, se absorbe en una columna cromatográfica de  $Al_2O_3$ . El Tc-99m (hijo) se separa del padre eluyendo la columna con un volumen pequeño de solución fisiológica cada vez que se reestablezca el equilibrio. Los generadores de In-113m aprovechan el equilibrio Sn-113(118 días) / In-113m (99 minutos).

## ANALISIS POR ACTIVACION NEUTRONICA

El Análisis por Activación Neutrónica (AAN) es una técnica analítica muy difundida en los países que cuentan con reactores nucleares de investigación. Sus principales ventajas son su elevada sensibilidad y su gran capacidad analítica que hace posible su aplicación donde se requiere gran número de análisis multielementales, como por ejemplo en la prospección geológica, control de calidad de metales y aleaciones, estudios de polución, etc.

La técnica se basa en producir radioisótopos de los elementos a analizar mediante reacciones nucleares inducidas por bombardeo de la muestra con neutrones en un reactor nuclear o generador de neutrones. La identificación de los radioisótopos producidos y la medición de sus actividades son la base de los análisis cualitativo y cuantitativo. Como se aprecia en la Tabla 1, la casi totalidad de los elementos analizables de la Tabla Periódica pueden determinarse con elevadísima sensibilidad.

Otra gran ventaja adicional del AAN es que se encuentra libre del peligro de cometer error por introducción de impurezas de los reactivos. Una vez irradiada la muestra se puede trabajar empleando incluso reactivos impuros sin peligro de alterar el resultado, dado que las impurezas inactivas introducidas no variarán nuestra medida de la radioactividad previamente inducida. Esto es determinante para la exactitud que puede obtenerse en el análisis de trazas y ultratrazas por lo que AAN es muy empleado para la certificación de materiales de referencia por el National Bureau of Standards de EEUU y otros organismos. Al irradiar la muestra se producen radioisótopos de muchos elementos presentes lo cual posibilita efectuar un análisis multielemental y, en muchos casos, en forma puramente instrumental si se dispone de detectores semiconductores de alto poder de resolución.

Las fuentes de irradiación neutrónica con que cuenta el IPEN actualmente, Reactor Nuclear de Entrenamiento y Generador de Neutrones, han venido

empleándose extensamente en AAN. Los elementos Ti, Mn, V, In, As, Sb, Cu y Zn se han determinado en minerales y concentrados de Zn, se ha analizado directamente oxígeno en catalizadores, reactivos y arenas empleando la reacción nuclear  $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$  que permite efectuar cada análisis en un tiempo menor que un minuto. Igualmente se ha efectuado la caracterización química en los elementos mayores Si, Al, O y Fe de carbones nacionales de diferentes yacimientos, se han determinado los elementos V, Cl y Mn en crudos petroleros y derivados, Ga en minerales y relaves, P y N en granos nativos, etc. Con el reactor RP-10 operando se podrán desarrollar la mayor parte de las aplicaciones del AAN. A fin de apoyar a la prospección geológica nacional se ha desarrollado una metodología para el análisis, en ese reactor, de 23 elementos químicos en rocas silicatadas en forma puramente instrumental.

En el marco de un proyecto internacional, auspiciado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), se vienen desarrollando métodos y efectuando análisis de elementos micronutrientes y tóxicos en alimentos típicos de la población infantil. Se tiene programado analizar los elementos Fe, Cu, Mn, Zn, Co, I, Mo, Se, Cr, Sn, Hg, Pb, Cd y As, haciendo uso de AAN y otras técnicas no nucleares de alta sensibilidad, con la finalidad de crear un programa de vigilancia alimentaria. También se aplicará la técnica al control de calidad de alcaciones y productos industriales en general, evaluación de la contaminación del ecosistema, estudio de la relación suelo-planta, investigación arqueológica y criminalística, etc.

#### RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL

En la naturaleza, conjuntamente con los isótopos estables de los elementos químicos, encontramos radioisótopos que pueden tener un origen natural como artificial. Entre los primeros tenemos principalmente las familias radioactivas del U-235, U-238 y Th-232, el K-40 y el C-14; los artificiales provienen de las explosiones nucleares y del funcionamiento de reactores nucleares que involucran ambos la fisión del U-235, con la consiguiente producción de productos de fisión radioactivos que son en mayor o menor grado introducidos al ambiente. Algunos radioisótopos, como el H-3 (tritio), tienen origen tanto natural como artificial.

La Tabla 2 muestra los principales productos de fisión, con sus rendimientos, para el caso de una explosión nuclear. Entre estos presentan una gran importancia, desde el punto de vista radiosanitario, el I-131 (8 días), el Sr-90 (28.6 años) y el Cs-137 (30.2 años). La importancia del primero se debe a su inmediata incorporación a las cadenas ecológicas hasta llegar al hombre y su fijación por la tiroides, los dos últimos se incorporan igualmente al hombre por ingestión y se fijan, el Sr en los huesos y el Cs homogeneamen-

te en el tejido blando. Debido a sus largos períodos de semidesintegración se encontrarán presentes durante varios años en el ambiente representando un riesgo radiológico.

**Tabla 2. Principales nucleidos de fisión y sus rendimientos**

<b>Nucleidos (T 1/2)</b>	<b>Rendimiento de Fisión Representativo - (%)</b>
Sr — 89 (50, 5d)	2,56
Sr — 90 (28, 6a)	3,50
Zr — 95 (64, 0d)	5,07
Ru — 103 (39, 4d)	5,20
Ru — 106 (368d)	2,44
I — 131 (8, 04 d)	2,90
Cs — 139 (13, 2d)	0,04
Cs — 137 (30, 2a)	5,57
Ba — 140 (12, 8d)	5,18
Ce — 141 (32, 5d)	4,58
Ce — 144 (284d)	4,69

La vigilancia radiológica ambiental nos permite conocer los niveles de radioactividad ambiental a los que está expuesta la población. El programa de mediciones debe ser realizado en forma permanente para garantizar detección inmediata de contaminación radiactiva proveniente del exterior o de cualquier descarga incidental interna. El IPEN ha venido realizando controles de radioactividad ambiental desde la década del 60 con estos fines. Las determinaciones han consistido en medición instrumental de radioactividad beta y gamma total en el aire y análisis cuantitativo de Cs-137 y Sr-90 en leche y otros alimentos haciendo uso de separaciones radioquímicas.

Para determinar el Cs-137 la muestra se incinera a 400°C, se disuelve en HCl y se separa el Cs, conjuntamente con los otros elementos alcalinos, empleando el intercambiador inorgánico fosfomolibdato de amonio (AMP). Luego se redisuelve y se pasa a través de una resina catiónica reteniéndose únicamente el Cs que a continuación se eluye y precipita como tetrafenilborato

de Cs, midiéndose la actividad en un contador beta de bajo fondo. El Cs-137 también se puede determinar por vía puramente instrumental empleando un espectrómetro gamma de alta resolución pero con menor sensibilidad.

Los radioisótopos *Sr-89* y *Sr-90* son sólo emisores de radiación beta por lo que requieren ser separados de otros elementos. La separación y medición del Y-90 se emplea para distinguir ambos estroncios dado que el Y-89 (hijo) es estable. El método usual de separación aprovecha la baja solubilidad del Sr y del Ba en HNO<sub>3</sub> fumante para separarlos del Ca y muchos otros metales. El Ba se separa posteriormente como BaCrO<sub>4</sub>. El Y-90 (hijo) se separa del Sr-90 (padre) coprecipitándolo sobre hidróxido férrico.

La Fig. 1 muestra los resultados de las mediciones de actividad beta total en el aire de Lima durante el período 1966-1987 observándose el incremento en los períodos en que se efectuaron explosiones nucleares atmosféricas. La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos del análisis radiométrico de leche en polvo, importada de diferentes países, y leche fresca nacional obtenidos en 1987 después del accidente de Chernobyl. Con la inauguración del CNIP entrará en funcionamiento el Centro Nacional de Protección Radiológica que equipado con modernos laboratorios hará posible incrementar substancialmente las determinaciones que se vienen efectuando y desarrollar nuevos procedimientos y técnicas de medición para otros radioisótopos.

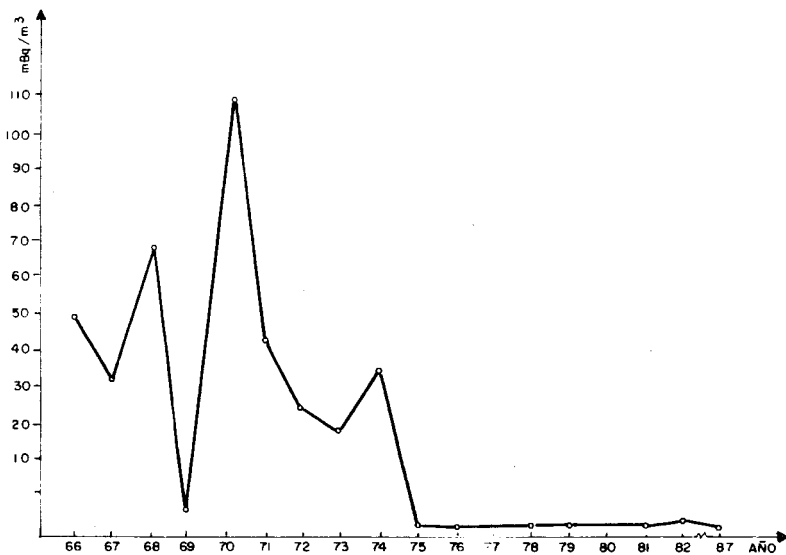


Fig. 1 Actividad beta global en el aire de Lima-Perú

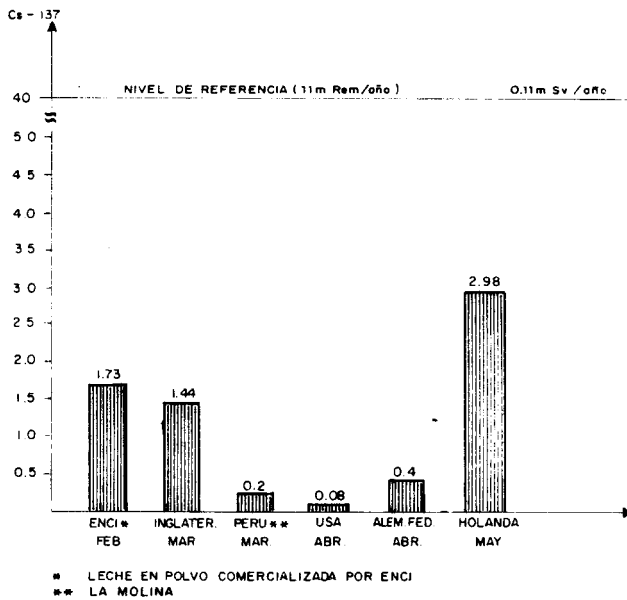


Fig. 2: Análisis radiométrico de Cs-137 en leche en polvo importada y leche fresca nacional efectuados en 1987.