

ARN PI-2/99



AR00C0007

Determinación de iodo 129 en vegetales mediante activación neutrónica

Quintana, E.E.; Thyssen, S.M. y Bruno, H.A.

autoridad regulatoria nuclear

**Please be aware that all of the Missing Pages in this document were
originally blank pages**

DETERMINACIÓN DE IODO 129 EN VEGETALES MEDIANTE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA

Quintana, E.E.; Thyssen, S.M. y Bruno, H.A.

Autoridad Regulatoria Nuclear
Argentina

RESUMEN

Se ha desarrollado y optimizado una metodología que permite determinar la concentración de ^{129}I en vegetales, utilizando activación neutrónica. El procedimiento elimina los interferentes presentes en esta matriz ambiental, principalmente el ^{82}Br que sigue una radioquímica similar a la del yodo y que se genera por activación neutrónica. Al separar el bromo antes de la irradiación, se logra disminuir la exposición que produce el ^{82}Br durante el procesamiento de la muestra.

La técnica analítica involucra la realización de cinco etapas:

- 1) *mineralización por fusión alcalina*
- 2) *purificación pre-irradiación del ^{129}I : destilación seguida de extracción por solventes, y adsorción sobre carbón activado por destilación*
- 3) *irradiación neutrónica*
- 4) *purificación post-irradiación del ^{130}I : destilación y posterior extracción por solventes*
- 5) *espectrometría gamma del ^{130}I*

Para calcular el rendimiento de la técnica se utiliza ^{131}I como trazador, obteniéndose valores de recuperación del 95% en las destilaciones. El rendimiento global oscila entre el 70% y 85%. El límite de detección alcanzado es de 2 mBq/kg de muestra, dependiendo del tipo de vegetal, contenido de yodo estable, tiempo de irradiación y flujo neutrónico.

La metodología de trabajo desarrollada es aplicable a la vigilancia ambiental con fines de salvaguardias, en la detección de actividades no declaradas de reprocesamiento de combustibles nucleares.

ABSTRACT

The developed methodology allows the determination of ^{129}I in vegetables, using neutron activation analysis. The chemical treatment removes the interferences present in these matrixes, as well as the ^{82}Br originated in the activation process.

The experimental method for the determination of ^{129}I by neutron activation analysis involves five steps:

- 1) *digestion by alkaline fusion*
- 2) *pre-irradiation purification of ^{129}I by distillation followed by solvent extraction, and adsorption on activated charcoal by distillation*
- 3) *neutron irradiation*
- 4) *post-irradiation purification of ^{130}I by distillation followed by solvent extraction*
- 5) *gamma spectrometry*

A chemical recovery of 95% is obtained in the distillations, measured using ^{131}I as tracer. The whole process recovery is within 70% and 85%. The detection limit is 2 mBq/kg of sample, but several factors affect this value, such as type of vegetable, natural iodine concentration, irradiation time and neutron flux.

The methodology developed is applied at environmental surveillance with safeguards proposes, in the detection of undeclared reprocessing of irradiated fuel.

INTRODUCCIÓN

El ^{129}I existente en la biosfera proviene de fuentes naturales, de ensayos nucleares atmosféricos y de la operación normal de instalaciones nucleares relevantes.

El ^{129}I es producido principalmente a partir de la reacción del xenón con la radiación cósmica en las altas capas de la atmósfera. Al ingresar el ^{129}I a la biosfera, presenta un comportamiento similar al de su isótopo estable, debido a la combinación de su larga vida media y su movilidad química. Los ensayos nucleares atmosféricos y la operación normal de las instalaciones nucleares, (especialmente, las plantas de reprocesamiento de elementos combustibles irradiados) liberan al ambiente pequeñas cantidades de ^{129}I , proveniente de la fisión del uranio.

La medición directa de ^{129}I en matrices ambientales es poco viable, ya que no es posible alcanzar un adecuado grado de sensibilidad en la detección. Esto se debe fundamentalmente a la combinación de dos factores:

- *larga vida media* ($1,57 \cdot 10^7$ años) que resulta en una actividad específica muy baja ($6 \text{ Bq} / \mu\text{g}$), y
- *baja energía de emisión de fotones* ($E=39,58 \text{ keV}$) que deriva en problemas de autoabsorción (ver Figura 1 y Tabla 1).

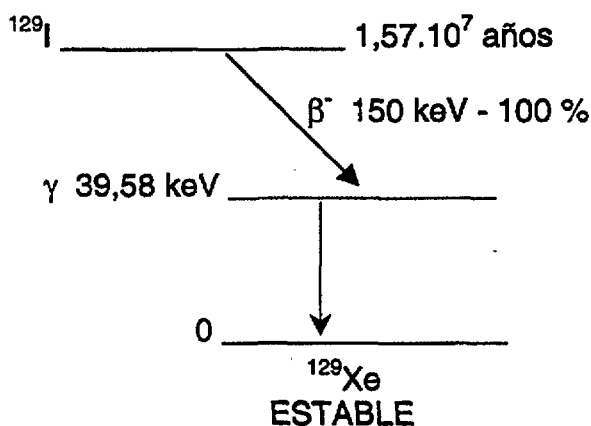


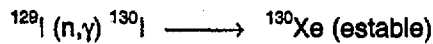
Figura 1: Esquema de decaimiento radiactivo del ^{129}I

Radiación	Energía (keV)	Eficiencia de emisión (%)
γ	39,58	7,52
RX (L)	4,33	8,2
RX ($K\alpha_1$)	29,78	37,0
RX ($K\alpha_2$)	29,46	20,0
RX ($K\beta_1$)	33,6	10,8
RX ($K\beta_2$)	34,4	2,37
β^-	150	100

Tabla 1: Energías emitidas por el ^{129}I

Teniendo en cuenta estos factores, la medición de ^{129}I en muestras ambientales se lleva a cabo por activación neutrónica o por espectrometría de masas. El análisis por activación neutrónica, es el más utilizado, ya que permite mejorar sustancialmente la sensibilidad (10^6 veces ó más), debido a la alta sección eficaz para neutrones térmicos del ^{129}I (aproximadamente 28 barn).

El ^{129}I se convierte por una reacción (n, γ) en ^{130}I . La reacción producida es la siguiente:



El ^{130}I , por desintegración β^- , decae en ^{130}Xe emitiendo radiación gamma. Se determina por espectrometría gamma el ^{130}I , producto de activación de corta vida media ($t_{1/2} = 12,6$ horas) y con energía de 536 keV (ver Figura 2).

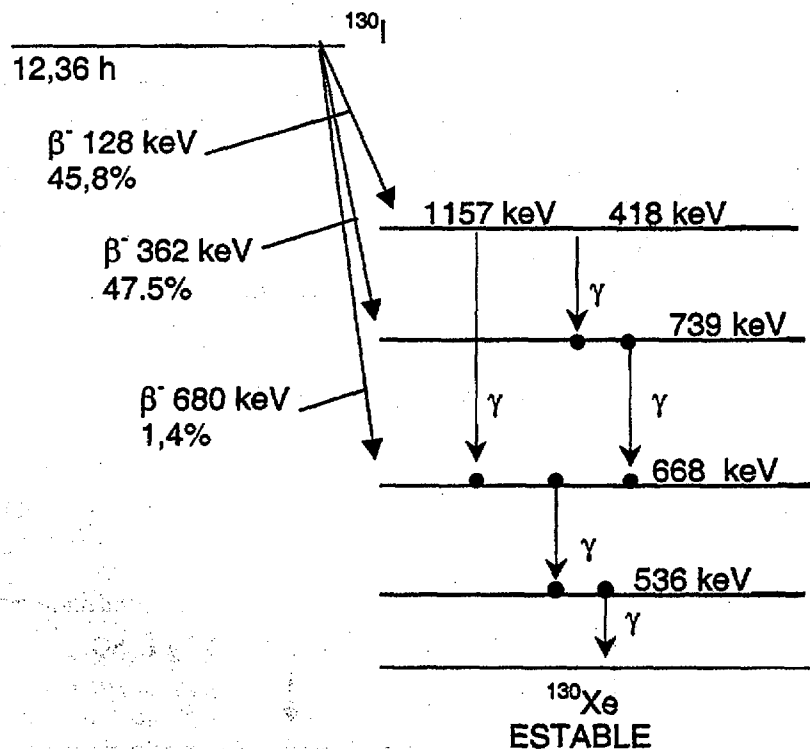


Figura 2: Esquema de decaimiento radiactivo del ^{130}I

La metodología desarrollada permite determinar la concentración de ^{129}I en hojas de diferentes vegetales como agujas de coníferas, pastos, algas, etc. Algunas de estas matrices ambientales poseen características concentradoras.

El procedimiento requiere la utilización de un laboratorio que posea aire limpio y sobrepresión para evitar la contaminación externa de la muestra, ya que la masa buscada es del orden de 10^{10} átomos/10 g de muestra. Las condiciones de trabajo de la técnica exigen además, utilizar reactivos químicos de alta pureza, agua bidestilada sobre cuarzo y purificada aplicando ósmosis inversa, y realizar la limpieza de los materiales con ultrasonido. Para el tratamiento de la muestra irradiada es necesario disponer de un laboratorio que posea campanas acondicionadas y blindajes adecuados para evitar la exposición de los operadores.

MÉTODO EXPERIMENTAL

La técnica de análisis puede ser dividida en cinco etapas. En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo correspondiente.

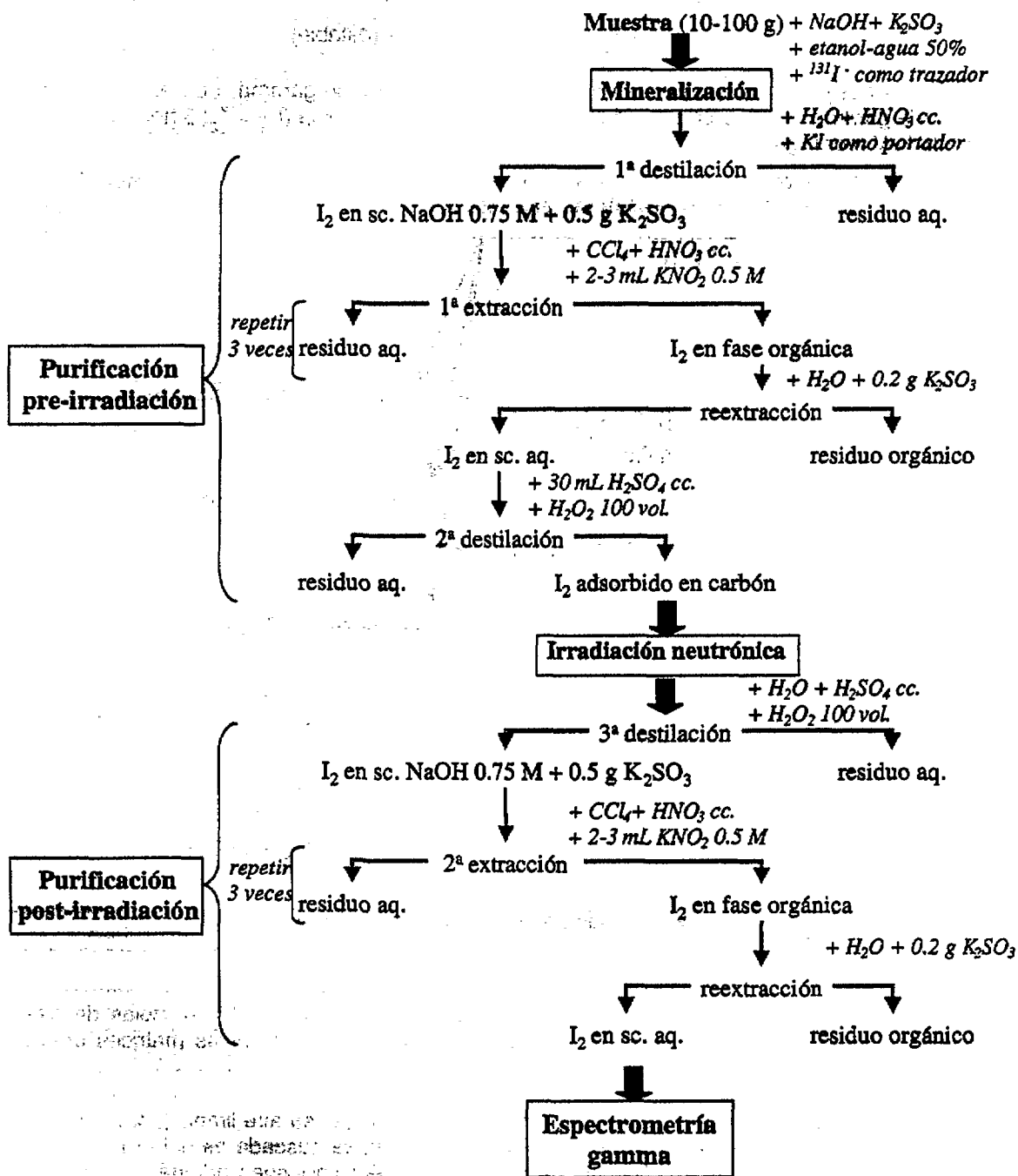


Figura 3: Diagrama de flujo del procedimiento para la determinación de ^{129}I en vegetales

1) Mineralización por fusión alcalina de la muestra

En un crisol de níquel se colocan entre 10 y 100 g del vegetal a analizar, 1 a 2 veces el peso de la muestra en KOH y cantidad suficiente como para cubrir la muestra, de una mezcla etanol absoluto-agua desionizada (1:1). Para la determinación del rendimiento químico del proceso, se agrega ^{131}I como trazador. Se lleva a sequedad en una plancha calefactora, elevando gradualmente la temperatura hasta 400°C . Con nuevos agregados de agua desionizada y utilizando una varilla, se disgrega la muestra y se lleva nuevamente a sequedad. Cuando la muestra se encuentra completamente seca, se coloca en una mufla programable siguiendo el esquema de calentamiento de la Figura 4.

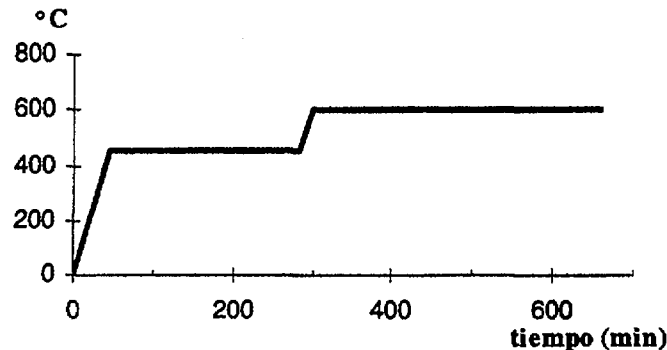


Figura 4: Esquema de calentamiento

Como resultado de este muflado se obtiene una matriz libre de materia orgánica y de partículas carbonosas, pero en caso de ser necesario, se debe repetir el esquema de calentamiento.

En este medio alcalino las formas químicas en que se encuentra el I_2 son fundamentalmente ioduro y pequeñas cantidades de iodato. Para reducir las formas oxidadas del yodo al estado de ioduro puede utilizarse K_2SO_3 durante la mineralización.

2) Purificación pre-irradiación del ^{129}I

El objetivo de esta etapa es separar el I_2 del Br_2 . Para ello, se utiliza un equipo destilador especialmente diseñado (ver Figura 5), que permite recoger el I_2 en los tubos colectores, dejando al Br_2 en el destilador. Posteriormente, se realiza una extracción de I_2 por solventes y, por último, una segunda destilación para transferir el I_2 a una matriz apropiada para su irradiación.

a) Primera destilación

El producto de la mineralización se trasvasa al equipo destilador utilizando agua desionizada.

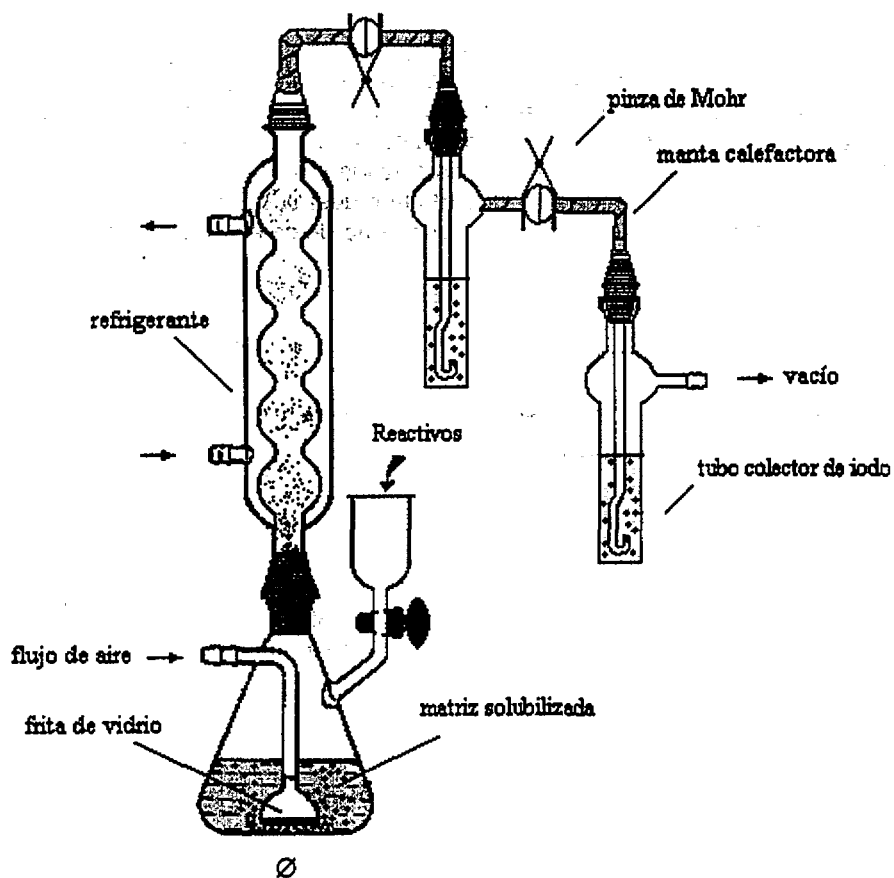


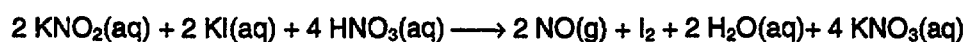
Figura 5: Equipo utilizado en la 1^{ra} destilación pre-irradiación

Se neutraliza lentamente la solución alcalina agregando HNO₃ concentrado y se adiciona un exceso de 10-15 ml para garantizar una fuerte acidez. Se agregan 2 mg de KI, que actúa como portador. La destilación se realiza durante un período de 2 horas, agregando 2-3 ml de solución de KNO₂ 0,5 M cada 30 minutos aproximadamente.

Las condiciones de trabajo del equipo son las siguientes:

- temperatura de refrigeración: entre 15°C y 25°C
- temperatura de la cinta calefactora: aproximadamente 120°C
- temperatura de la plancha calefactora: 300°C
- flujo de aire: entre 6 y 10 dm³/hora
- velocidad de agitación: 300 rpm

La reacción química que se produce en esta etapa es la siguiente:



Las oxosales del I_2 que se forman en este medio oxidante, deben ser reducidas a I^- con K_2SO_3 .

La eficiencia de la destilación depende fuertemente de la temperatura y del flujo de arrastre. El rendimiento de esta etapa se verifica midiendo el ^{131}I en los tubos colectores, los cuales se preparan de la siguiente manera:

- tubo 1: 80 cm³ de KOH 0,75M y 0,5 g de K_2SO_3 .
- tubo 2: 60 cm³ de KOH 0,75M y 0,5 g de K_2SO_3 .

La retención en el tubo 1 alcanza valores superiores al 95 % y sólo pequeñas cantidades se detectan en el tubo 2.

b) Primera extracción

La solución de cada uno de los tubos colectores se introduce en una ampolla de decantación conteniendo CCl_4 . Se acidifica con HNO_3 concentrado y se agregan 2-3 ml de solución de KNO_2 0,5 M para eliminar el K_2SO_3 y oxidar el I^- a I_2 . El I_2 se extrae a la fase orgánica con fuerte agitación, separándolo del Br_2 que aún pudiera estar presente en la fase acuosa. El procedimiento de extracción se repite de 1 a 3 veces con cantidades decrecientes de solvente orgánico. El I_2 se reextrae de la fase orgánica a la fase acuosa con 0,2 g de K_2SO_3 . Se verifica el rendimiento de la extracción del I_2 midiendo ^{131}I en la fase acuosa.

c) Segunda destilación

La fase acuosa anterior se introduce en un equipo destilador diseñado especialmente, el cual contiene 1 g de molibdato (VI) de amonio, que actúa como catalizador. El aparato utilizado se muestra en la Figura 6. Las condiciones de trabajo del equipo son las mismas que la anterior.

En la celda de adsorción de yodo, se colocan 0,5 g carbón activado tubular de alta eficiencia de retención, con las siguientes características:

- densidad: 400 kg/m³
- superficie interna: 900-1000 m² / gramo
- diámetro del carbón: 1,3-1,5 mm
- impregnación con KI: 1,6 %

El I_2 se adsorbe sobre el carbón formando monocapas a través de uniones de van der Waals (uniones de tipo electrostático de baja energía).

A la fase acuosa se le agregan 30 ml de H_2SO_4 concentrado para obtener una fuerte acidez. La destilación se realiza durante un período de 2 horas, con agregados continuos de pequeñas cantidades de H_2O_2 100 volúmenes.

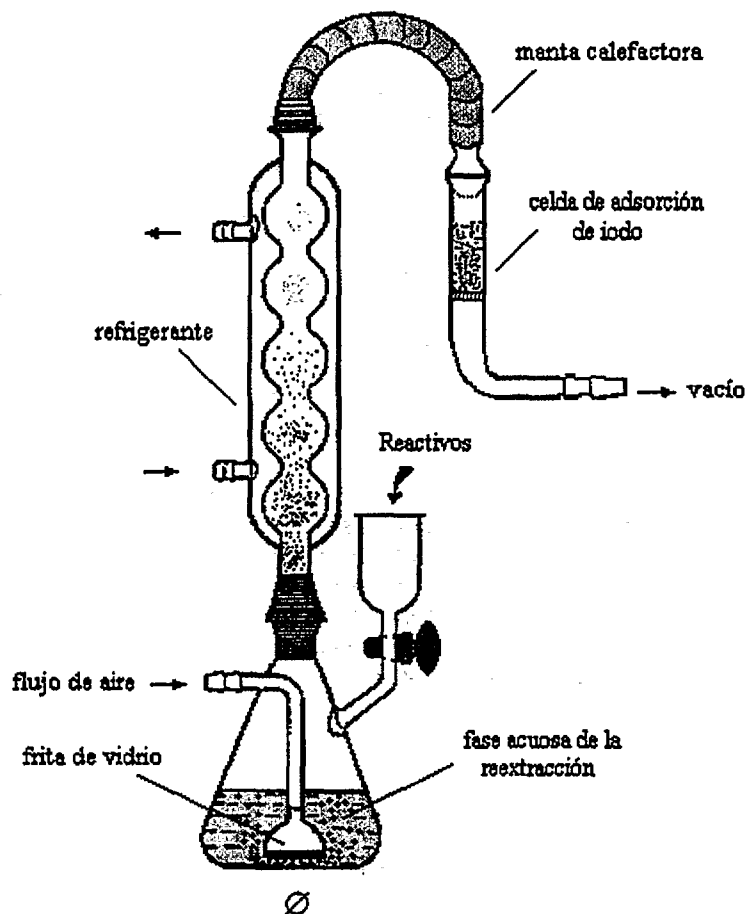
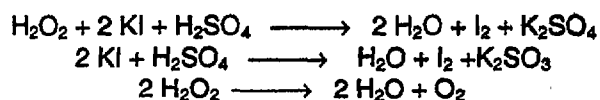


Figura 6: Equipo utilizado en 2^{da} destilación pre-irradiación

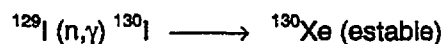
Las reacciones químicas que se producen en esta etapa son:



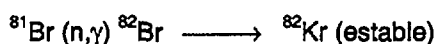
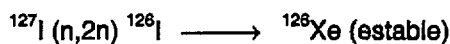
La primera reacción es catalizada por el molibdato de amonio. La última reacción (descomposición del H_2O_2), genera O_2 que ayuda al arrastre del I_2 obtenido. En caso de ser necesario puede utilizarse clorhidrato de hidroxilamina para asegurar la reducción de las oxosales presentes a I_2 . El rendimiento de esta etapa se verifica midiendo el ^{131}I adsorbido en el carbón activado. Los otros halógenos presentes son adsorbidos también en este carbón.

3) Irradiación neutrónica

El carbón activado con el I_2 adsorbido, se coloca en un tubo portamuestra de polietileno con bajo contenido de sodio. Se coloca en una cápsula de aluminio, se sella y se irradia en un reactor. Las condiciones de irradiación requieren una tasa de flujo de neutrones térmicos de $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, durante un período que varía de 2 a 6 horas. La reacción de captura neutrónica de interés es la siguiente:



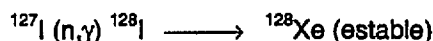
Las reacciones que generan interferentes en las etapas posteriores del proceso, son:



Por desintegración β el ^{126}I ($t_{1/2} = 13,02$ días) y el ^{82}Br ($t_{1/2} = 1,47$ días) decaen respectivamente en ^{126}Xe y ^{82}Kr ; emitiendo ambos radiación gamma.

El ^{126}I generado por neutrones rápidos presentes en el reactor, emite rayos gamma de 666,3 keV que interfieren sobre el pico de 668,5 keV correspondiente al ^{130}I . Este elemento proviene principalmente de la impregnación del carbón activado con KI, del portador (solución de KI) y en menor medida de la muestra ambiental. El bromo proveniente de diversas fuentes (muestra, carbón activado, reactivos, agua, etc.) da origen al ^{82}Br que eleva el fondo de radiación.

Las siguientes reacciones de generación:



no interfieren en los procesos posteriores debido a que la ocurrencia de la primera de ellas es despreciable para el flujo neutrónico utilizado y el ^{128}I ($t_{1/2} = 25$ minutos) desaparece durante el período de decaimiento en el reactor.

Cada muestra es irradiada conjuntamente con un patrón que contiene una cantidad conocida de ^{129}I , para evaluar correctamente el flujo neutrónico.

4) Purificación post-irradiación del ^{130}I

El objetivo de esta etapa es liberar el ^{130}I del carbón por ebullición y separarlo de los interferentes. Para ello se realiza una tercera destilación y una segunda extracción.

Después de un período de decaimiento de 48 horas, se abre el tubo portamuestra en un laboratorio equipado con campanas y blindajes para asegurar condiciones de trabajo controladas. Los niveles de exposición que presenta el carbón después de haber sido irradiado, se deben fundamentalmente a la generación de ^{24}Na ($t_{1/2} = 15$ horas, $E_{\gamma} = 2$ MeV) y en menor medida de ^{42}K ($t_{1/2} = 12,3$ horas, $E_{\gamma} = 1,5$ MeV).

a) Tercera destilación

El carbón irradiado se introduce en el equipo destilador que se muestra en la Figura 4, al cual se le agrega previamente 1 g de molibdato (VI) de amonio y suficiente cantidad de agua desionizada. Las condiciones de trabajo son similares a las de las otras destilaciones. Luego, se agrega lentamente 15 ml de H_2SO_4 concentrado hasta obtener una fuerte acidez. La destilación se realiza durante un período que varía de 1 a 2 horas, con agregados continuos de pequeñas cantidades de H_2O_2 100 volúmenes. Las sustancias volátiles presentes también se destilan, siendo los principales interferentes de la posterior medición por espectrometría gamma. El I_2 se recoge en los tubos colectores.

b) Segunda extracción

La solución de cada uno de los tubos colectores se introduce en una ampolla de decantación conteniendo CCl_4 . Se acidifica con HNO_3 concentrado y se agregan 2-3 ml de solución de KNO_2 0,5 M. El ^{130}I se extrae a la fase orgánica con fuerte agitación, separándolo del ^{82}Br que pudiera estar presente. El procedimiento de extracción se repite de 1 a 3 veces con cantidades decrecientes de solvente orgánico. El I_2 se reextrae de la fase orgánica a la fase acuosa con 0,2 g de K_2SO_3 . El proce-

so de extracción/reextracción se repite al menos una vez más utilizando una fase acuosa final de 20 cm³. Se verifica la tasa de extracción de I₂ midiendo el ¹³¹I en la fase acuosa.

5) Espectrometría gamma:

La fase acuosa purificada se coloca en un vial de 20 cm³ y se mide la emisión de radiación gamma, utilizando un detector de germanio hiperpuro coaxial de 60% de eficiencia relativa.

En la Tabla 2 se muestran las energías y eficiencias de emisión del ¹³¹I utilizado como trazador y de los diferentes nucleidos generados por activación que pueden aparecer en el espectro gamma. Los valores fueron obtenidos del "Nuclide Navigator", Interactive Gamma Ray Reference and Library Program for Microsoft Windows, Version 1.01 / 1995 de EG&G / USA y de ISSN 0341-6747 del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB - RA- 16/4), Braunschweig / 1993.

Tabla 2: Energías gamma y eficiencias de emisión del trazador y de los principales productos de activación que se generan durante la irradiación de la muestra en el reactor

Iodo-130 <i>t_{1/2} = 0,5150 días</i>		Iodo-126 <i>t_{1/2} = 13,02 días</i>		Bromo-82 <i>t_{1/2} = 1,4725 días</i>		Iodo-131 <i>t_{1/2} = 8,02 días</i>	
Energía (keV)	Eficiencia de emisión (%)	Energía (keV)	Eficiencia de emisión (%)	Energía (keV)	Eficiencia de emisión (%)	Energía (keV)	Eficiencia de emisión (%)
418,01	34,200	388,64	34,100	92,19	0,750	29,46	1,351
457,72	0,237	491,24	2,850	137,40	0,150	29,78	2,591
510,35	0,850	511,00	6,700	221,48	2,270	33,60	0,726
536,09	99,000	666,37	33,100	273,48	0,840	34,40	0,156
539,10	1,400	753,86	4,160	554,35	70,900	80,18	2,621
553,90	0,662	879,86	0,755	606,37	1,210	177,21	0,265
586,05	1,690	1420,22	0,295	619,11	43,100	232,17	0,001
603,53	0,620	2045,14	0,005	698,37	28,700	272,49	0,056
668,54	96,000			776,52	83,600	284,29	6,058
685,99	1,070			827,83	24,000	302,41	0,005
739,48	82,300			952,02	0,368	318,08	0,080
800,23	0,101			1007,59	1,310	324,64	0,022
808,29	0,236			1044,00	27,400	325,78	0,251
877,35	0,191			1081,29	0,620	358,38	0,009
967,02	0,880			1317,48	26,900	364,48	81,240
1096,48	0,552			1426,00	0,110	404,80	0,056
1122,15	0,253			1474,00	16,600	502,99	0,361
1157,47	11,300			1650,34	0,794	636,97	7,268
1222,56	0,179			1779,66	0,117	642,70	0,220
1272,12	0,748					722,89	1,804
1403,90	0,345						

En la Figura 7 se muestra el espectro correspondiente a un blanco de reactivos adsorbido sobre carbón activado, medido luego de un período de enfriamiento de 48 horas. Los principales picos interferentes observados son del ¹²⁸I (388 y 491 keV). El tiempo de medición fue de 6 horas. El límite de detección, calculado utilizando el método RISO, alcanzó valores de 130 µBq.

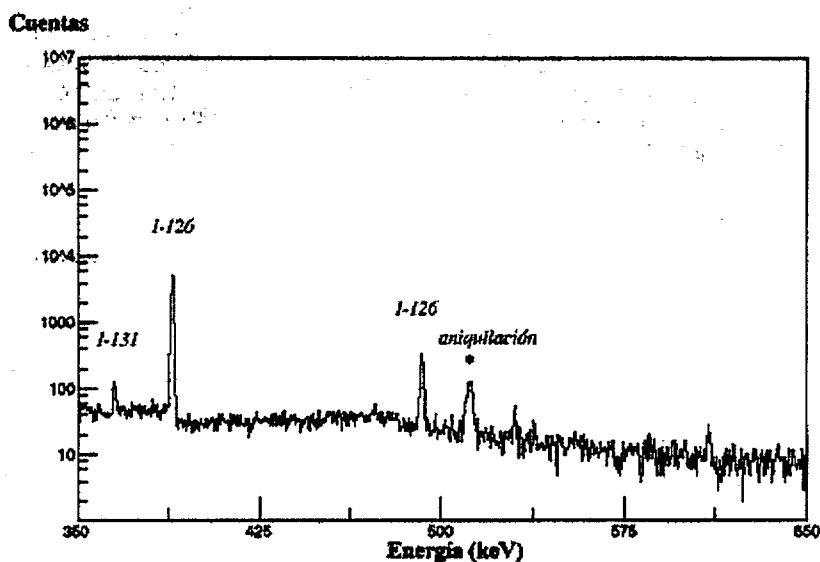


Figura 7: Espectro gamma obtenido por la medición de un blanco de reactivos sobre soporte de carbón activado

En la Figura 8 se muestra el espectro correspondiente a un patrón con 7,4 mBq de ^{129}I sin portador ni reductor, medido sin purificar luego de un período de enfriamiento de 46 horas. En el espectro se observan los picos de ^{130}I , de ^{82}Br y otros productos de activación provenientes de las trazas presentes en los reactivos. El tiempo de medición fue de 2 horas. El cálculo de la actividad del ^{130}I se realiza utilizando la energía de emisión de 536 keV, que no presenta interferencias.

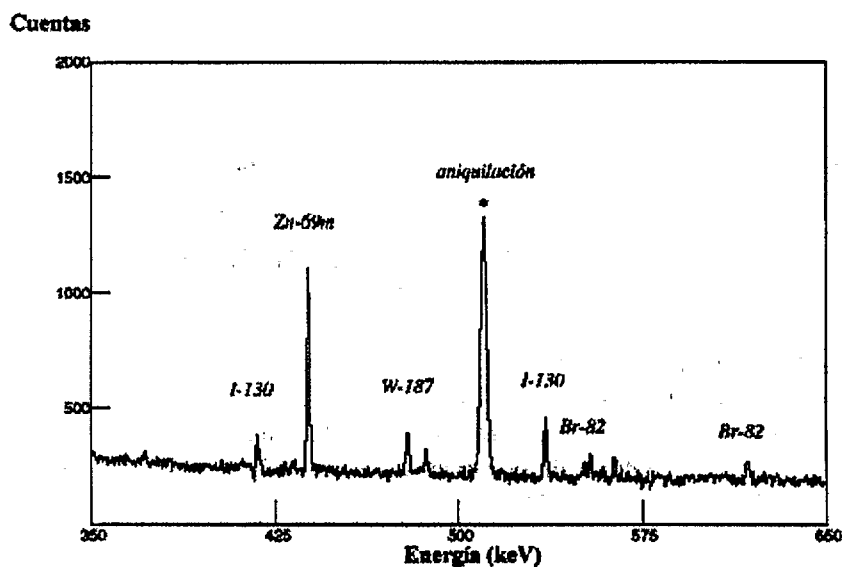


Figura 8: Espectro gamma obtenido por la medición de un patrón de iodo 129 después de la irradiación neutrónica

El tiempo de medición para las muestras ambientales puede variar entre 2 y 6 horas, dependiendo de la actividad y el fondo de radiación presentes. En la Figura 9 se muestra el espectro correspondiente a una muestra de agujas de cedro tomadas en los alrededores de la Central Nuclear de Atucha I, donde se identifica claramente el pico del ^{130}I de 536 keV. Con un tiempo de medición de 6 horas se observa que la actividad del ^{130}I y la interferencia del ^{82}Br son del mismo orden que el pico natural de 609 keV del ^{214}Bi .

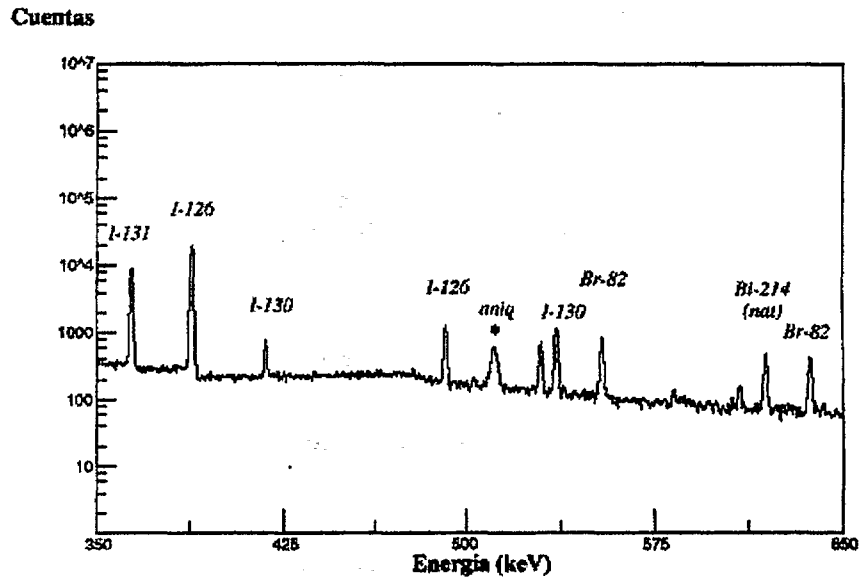


Figura 9: Espectro gamma obtenido por la medición de una muestra de agujas de cedro proveniente de los alrededores de CNA I

CÁLCULOS

1. Rendimiento total (R%)

Para calcular el rendimiento total del proceso se utiliza el pico de ^{131}I ($E_\gamma = 364,5$ keV) presente.

$$R\% = \frac{A_{I-131} \text{ final}}{A_{I-131} \text{ inicial} \cdot e^{-\lambda_{131} \cdot (t_f - t_i)}} \cdot 100$$

donde:

$A_{I-131} \text{ final}$ = actividad medida de ^{131}I (Bq).

$A_{I-131} \text{ inicial}$ = actividad agregada de ^{131}I (Bq).

λ_{131} = constante de semidesintegración del ^{131}I = $\ln 2 / 8,02$ días.

$t_f - t_i$ = tiempo transcurrido entre el momento en que se realizó la medición de la $A_{I-131} \text{ inicial}$ agregada y el comienzo de la medición (días).

2. Actividad de ^{129}I

$$A_{I-129} = \frac{A_{I-130} \cdot \lambda_{129} \cdot 1000 / \sigma \cdot \phi \cdot (1 - e^{-\lambda_{130} \cdot t_{irr}})}{P \cdot e^{-\lambda_{130} \cdot t_d}} \cdot \frac{100}{R\%}$$

donde:

A_{I-129} = actividad calculada de ^{129}I (mBq/kg).

A_{I-130} = actividad medida de ^{130}I (Bq).

λ_{129} = constante de semidesintegración del ^{129}I = $\ln 2 / 1,57 \cdot 10^7$ años.

λ_{130} = constante de semidesintegración del ^{130}I = $\ln 2 / 12,36$ horas.

σ = sección eficaz del ^{129}I ($2,9249 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$)

ϕ = flujo de neutrones térmicos ($\cong 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

t_{irr} = tiempo de irradiación (horas).

t_d = tiempo de decaimiento (horas).

P = peso de la muestra (kg).

$R\%$ = rendimiento químico total del método.

3. Flujo neutrónico

$$\phi = \frac{A_{I-130} \cdot \lambda_{129} / \sigma \cdot A_{P_{I-129}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{130} \cdot t_{irr}})}{e^{-\lambda_{130} \cdot t_d}}$$

donde:

ϕ = flujo de neutrones térmicos ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

$A_{P_{I-129}}$ = actividad agregada de solución patrón de ^{129}I (Bq).

4. Método RISO

$$LD = 4,65 \cdot \frac{\sqrt{B}}{LT} \cdot \frac{1}{\epsilon_E \cdot \gamma_d}$$

donde:

LD = límite de detección (Bq)

B = fondo (cuentas. s^{-1})

LT = tiempo vivo de medición (s)

ϵ_E = eficiencia del detector a la energía E

γ_d = gammas/desintegración para la energía E del nucleido.

Este método de cálculo presenta 99% de confianza (3σ)

CONCLUSIONES

La metodología de trabajo propuesta ha sido evaluada realizando mediciones de actividad en blancos, blancos con solución patrón de ^{129}I y muestras recolectadas en áreas convenientemente seleccionadas por su proximidad a instalaciones relevantes.

La optimización lograda por la combinación de técnicas separativas y de fraccionamiento minimiza la presencia de los interferentes que se encuentran en las matrices utilizadas, manteniendo altos rendimientos y bajos límites de detección.

Uno de los objetivos fundamentales de la técnica es separar selectivamente el Br_2 del I_2 antes de la irradiación. En experiencias previas realizadas sin extracción pre y post-irradiación, se obtuvieron valores finales de ^{82}Br de aproximadamente 20 MBq/kg de muestra, con la consecuente saturación del detector semiconductor y la potencial exposición del personal. Luego de realizarse una extracción post-irradiación, los valores de ^{82}Br disminuyeron a 20 kBq/kg de muestra. En la Figura 9 puede observarse la baja actividad del ^{82}Br presente (713 Bq/kg de muestra), lograda luego de la optimización de las etapas de separación descritas en este trabajo.

Es importante destacar que debido a las impurezas presentes en el carbón utilizado para la irradiación de la muestra, se generan ^{24}Na y ^{42}K , radionucleidos de alta energía. Por ese motivo se realiza una destilación post-irradiación antes que la extracción con el fin de separar el ^{130}I generado y disminuir los niveles de exposición evitando la manipulación de la muestra.

Los rendimientos globales oscilan entre el 70-85%, con rendimientos para las etapas de destilación de hasta el 95%. El límite de detección alcanzado es de 2 mBq/kg de muestra, dependiendo del tipo de vegetal, contenido de yodo estable, tiempo de irradiación y flujo neutrónico. Este límite se puede disminuir aún más por reducción de los niveles de actividad de las interferencias, principalmente del ^{126}I que eleva el fondo de radiación. Esto podría conseguirse utilizando como soporte un carbón de alta eficiencia de retención que no contenga ^{127}I .

La metodología de trabajo desarrollada es aplicable a la vigilancia ambiental con fines de salvaguardias, en la detección de actividades no declaradas de procesamiento de combustibles nucleares.

BIBLIOGRAFÍA

1. Magno, P.; Reavey, T.; Apidianakis, J. (1972). Iodine-129 in the Environment around a Nuclear Fuel Reprocessing Plant. U.S. Environmental Protection Agency, ORP/SID 72-5.
2. Brauer, F.P.; Tenny, H. (1975). ^{129}I Analysis Methodology, Pacific Northwest Laboratory, BNWL-SA-5287.
3. Handl, J.; Kühn, W. (1980). Activation analytical determination of ^{129}I in bovine thyroid gland. *J. Radioanal. Chem.*, Vol. 56, p. 213.
4. Annals of the ICRP (1983). ICRP Publication 38. Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions. Vol. 11-13.
5. Muramatsu, Y. et al. (1984). Neutron activation analysis of ^{129}I and ^{127}I in environmental samples. *J. Radioanal. and Nuclear Chem., Articles*, Vol. 83, N° 2.
6. Muramatsu, Y.; Ohmomo, Y. (1988). Determination of Iodine-129 and Iodine-127 in Environmental Samples Collected in Japan. *J. Radioanal. and Nuclear Chem., Articles*, Vol. 123, N° 1.
7. Handl, J. et al. (1993). Biospheric ^{129}I concentrations in the pre-nuclear and nuclear age. *Health Physics*. Vol. 65, N° 3.
8. Rosenberg, R.J. (1993). Non-conventional measurement techniques for the determination of some long-lived radionuclides produced in nuclear fuel. *J. Radioanal. and Nuclear Chem., Articles*, Vol. 171, N° 2.
9. Perkins, R.W.; Wogman, N.A. (1993.) Current and Potential Technologies for the Detection of Radionuclide Signature of Proliferation, PNL-SA-22130.
10. Muramatsu, Y.; Yoshida, S. (1995). Determination of ^{129}I and ^{127}I in environmental samples by neutron activation analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Radioanal. and Nuclear Chem., Articles*, Vol. 197, N° 1.
11. Quintana, E.E.; Thyssen, S.M.; Lewis, E.C. (1998). Análisis por activación neutrónica de Iodo-129 en muestras ambientales. 4^{to} Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear (IR-PA). La Habana, Cuba, Memorias / Tomo 4, Tema 14, p. 69.