

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DESARROLLO PARA LA PRODUCCION A ESCALA
ROUTINARIA DE YODO-131

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

p r e s e n t a

FERNANDO LUIS ELIZALDE VALDES

México, D. F.

1973



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tesis
1973
Hit-90



QUIMICA

PRESIDENTE	MANUEL NAVARRETE TEJERO
VOCAL	JUAN LERTIGUE GORDILLO
SECRETARIO	MARCOS ROSENBAUM PITLUK
1er. SUPLENTE	SOFIA G. BURILLO AMEZCUA
2o. SUPLENTE	LUIS CABRERA MOSQUEDA

CENTRO NUCLEAR DE MEXICO

SALAZAR , EDO. DE MEXICO

SUSTENTANTE	FERNANDO LUIS ELIZALDE VALDES
ASESOR DEL TEMA	MARCOS ROSENBAUM PITLUK
SUPERVISOR TECNICO	ENRIQUE PARRA KATEOS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Nacional de Energía Nuclear la beca que me brindó para realizar este trabajo en el Departamento de Producción de Radioisótopos del Centro Nuclear de México.

También quiero agradecer la orientación y colaboración que me dispensaron las siguientes personas:

M.C. Enrique Parra Mateos

M.C. Ana María Martínez Leal

Dr. Marcos Rosenbaum Pitluk

Ing. Rafael Alvarado Saldaña

Ing. Luis Pablos Hach

así como a todos los empleados y personal del Centro Nuclear de México que directa o indirectamente cooperaron en la elaboración de este trabajo.

Gracias.

CONTENIDO

	INTRODUCCION	
CAPITULO I	METODOS DE PRODUCCION DEL I	131
CAPITULO II	METODOS DE SEPARACION DE I	131
	DEL TELURIO IRRADIADO	
CAPITULO III	EVALUACION DE LOS METODOS DE SEPARACION DEL I	131
	DEL TE IRRADIADO	
CAPITULO IV	CONCLUSIONES	
	REFERENCIAS	
	APENDICE	

INTRODUCCION

En vista del gran desarrollo que ha alcanzado el uso de los radioisótopos tanto en la Medicina como en la Industria e Investigación, es deseable desarrollar en México métodos adecuados para producirlos a escala rutinaria de acuerdo con las Normas de Control de Calidad que requieren los consumidores.

Los principales radioisótopos que se consumen en el país se dan en la tabla I.

Tabla I

Radioisótopo	Curios Consumidos 1972
¹³¹ I	62.387
⁹⁹ Mo	40.350
¹⁹⁸ Au	31.545

Como se puede apreciar en esta tabla, el ¹³¹I es el radioisótopo que mayor consumo ha tenido, por lo que se debe de tratar de producir en el país, a menor costo que el producto de importación.

La cantidad que se desea producir de ¹³¹I es de 6 Ci/mes, o sea, 1.5 Ci/semana, con lo cual se abastecerá la demanda existente. La producción futura depende del incremento en el consumo de este producto.

La producción anual de ¹³¹I en el país desde 1962 hasta 1972 está indicada en la tabla II.

Tabla II

Año	Consumo de ¹³¹ I (Ci)	Año	Consumo de ¹³¹ I (Ci)
1962	0.670	1968	37.509
1963	3.985	1969	22.800
1964	13.158	1970	44.000
1965	24.850	1971	53.924
1966	26.566	1972	62.387
1967	27.434		

aproximadamente el 95% del yodo que se importa se emplea en la Medicina y el resto tiene aplicaciones en la Investigación.

Usos del I^{131} en la Medicina:

a.- Aplicaciones del I^{131} como isótopo primario:

a1.- Tratamiento de hipertiroidismo

a2.- Cáncer en la tiroides

b.- Aplicación de moléculas marcadas con I^{131} , por ejemplo:

b1.- Albúmina (volumen sanguíneo, pruebas de circulación, placentografía)

b2.- Macroagregados de albúmina (gama gramas de pulmón)

b3.- Rosa de bengala (pruebas funcionales hepáticas, gama gramas del hígado)

b4.- Acido oléico (digestión de grasas)

b5.- Tricoleína (digestión de grasas)

b6.- Yodotalamato de sodio (pruebas renales)

b7.- Hipurán (pruebas renales)

b8.- Yodo antipirina (localización de varices)

b9.- Bromo sulfaleína (gama gramas del hígado, pruebas funcionales hepáticas)

b10.- Dicloro-difenil-dicloroetano (gama grama de cápsulas suprarrenales)

Aplicaciones a la Tecnología:

a.- Hidrología

b.- Investigación en celulosa y papel

Actualmente, el Departamento de Dilución del Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN) está importando alrededor de 5 Ci/mes de I^{131} , de los cuales

200 mCi/semana son enviados al Departamento de Moléculas Marcadas en donde se marcan los compuesto citados en la tabla III así como las cantidades utilizadas

de I^{131} para marcar estos compuestos.

Debido al gran uso que tiene el I^{131} , en este trabajo se describe el desarrollo experimental de tres métodos de separación de I^{131} del telurio irradiado.

Una vez desarrollados estos métodos y teniendo los resultados experimentales, se compararon con el fin de ver cual de ellos presentaba mejor rendimiento en

Tabla III*

Compuesto Marcado	Cantidad de I ¹³¹ Utilizada (mCi)
Albúmina	287.20
Hipurán	282.55
Yodotalamato de sodio	152.50
Macroagregados de albúmina	110.55
Rosa de bengala	53.20
Tricleína	6.60

* Estos datos comprenden del día 2 de abril al 22 de mayo de 1973.

la separación, mayor facilidad del proceso, menor tiempo de operación, menor cantidad de reactivos y menor tamaño del equipo.

Estos criterios sirvieron para establecer el método seco como el que servirá para producir el I¹³¹.

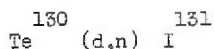
Finalmente, para este método se propone un equipo experimental, actualmente en fabricación y cuyas condiciones óptimas de operación deberán determinarse mediante análisis estadístico para posteriormente producir el I¹³¹ pudiendo así abastecer su consumo actual y futuro.

CAPITULO I

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE I^{131}

Entre los principales métodos de producción de I^{131} se encuentran los siguientes:

1.- Bombardeo de telurio (Te) con deuterones por medio de la reacción nuclear (1):

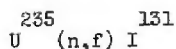


En forma desarrollada esta reacción se expresa como:



Este método resulta bajo en producción de I^{131} ya que una partícula cargada como el deuterón encontrará una gran fuerza de repulsión que le impide penetrar al núcleo.

2.- Producción de I^{131} por fisión directa del uranio 235, la reacción nuclear es (1):



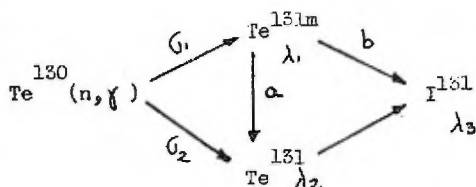
y cuyo rendimiento de fisión es de 3%, o sea, se forman 3 átomos de I^{131} por cada 100 átomos de Uranio que se fisionan (2).

Este método es poco usado ya que se forman muchas impurezas en la serie de decaimiento de los productos de fisión, lo cual hace más difícil la separación del I^{131} requiriendo equipo y técnicas más elaboradas.

3.- El I^{131} se puede producir por la irradiación de Te natural bajo un flujo de neutrones térmicos (3) formándose el Te^{131m} (estado metaestable) y el Te^{131} . El Te^{131m} decae por dos caminos diferentes: uno es por emisión de partículas beta (β^-) formando el I^{131} y el otro es por transición isomérica (TI), compitiendo con una conversión interna de electrones, formándose el Te^{131} .

El Te^{131} que se formó por reacción directa del Te^{130} con neutrones y por el decaimiento del Te^{131m} decae por emisión de partículas beta a I^{131} , el cual, a su vez decae a Xe^{131} estable también por emisión de partículas beta.

La reacción nuclear es:



donde G_1 y G_2 son las secciones eficaces (usualmente expresadas en barns, 1 barn es 10^{-24} cm^2) de captura neutrónica para formar el Te^{131m} y el Te^{131} respectivamente.

λ_1 , λ_2 y λ_3 son las constantes de decaimiento del Te^{131m} , Te^{131} y I^{131} respectivamente, $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$.

$t_{1/2}$ es el tiempo de vida media del radioisótopo (tiempo necesario para que la actividad inicial se reduzca a la mitad).

a y b son las fracciones de actividad del Te^{131m} que decaen por TI y por β^- respectivamente, $a + b = 1$.

Este método de producción es el más usado y por tanto el que se siguió en este trabajo. El material blanco usado fue telurio metálico (99.99%), pero se pueden usar compuestos de Te tales como: ácido ortotelúrico (H_6TeO_6), dióxido de telurio (TeO_2) o ácido metatelúrico (H_2TeO_4).

Al ser irradiado el Te bajo un flujo neutrónico, ϕ (neutrones/ cm^2 seg), sus isótopos estables, que están dados en la tabla IV, son transformados a isótopos inestables conocidos como radioisótopos y cuya velocidad de formación está en función del número de átomos iniciales de blanco (N_0), del flujo neutrónico (ϕ) y de la sección eficaz microscópica de captura neutrónica (G). Tanto el número de átomos iniciales de material blanco como el flujo neutrónico se consideran constantes durante el tiempo de irradiación.

Tabla IV

Composición Isotópica del Telurio(*)

Isótopo Estable	Abundancia %
¹²⁰ Te	0.089
¹²² Te	2.460
¹²⁴ Te	4.610
¹²⁶ Te	18.710
¹²⁸ Te	31.790
¹³⁰ Te	34.490

Los esquemas de formación y decaimiento para los radioisótopos de la tabla V son:

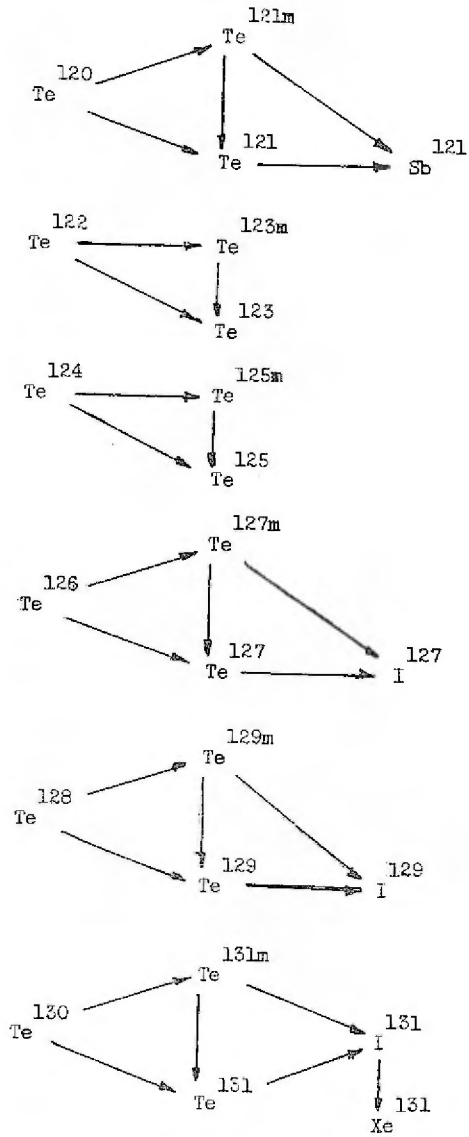


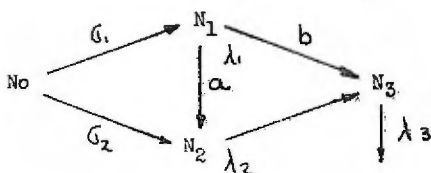
Tabla V

Formación y decaimiento de los radioisótopos del telurio (4)

Isótopo Estable Irradiado	Masa del Elemento base: 1 (g) (g)	barns	Isótopo Radiactivo Formado	$t_{1/2}$	Tipo de Decaimiento	Decae a	$t_{1/2}$
¹²⁰ Te	0.00089	2.00 0.30	^{121m} Te ¹²¹ Te	154 d 17 d	TI CE	¹²¹ Te ¹²¹ Sb	17 d estable
¹²² Te	0.0246	1.00	^{123m} Te	104 d	TI	¹²³ Te	estable
¹²⁴ Te	0.0461	5.00	^{125m} Te	58 d	TI	¹²⁵ Te	estable
¹²⁶ Te	0.1871	0.10 0.90	^{127m} Te ¹²⁷ Te	105 d 9.35 h	TI, β^- β^-	¹²⁷ Te ¹²⁷ I	9.35 h estable
¹²⁸ Te	0.3179	0.017 0.14	^{129m} Te ¹²⁹ Te	33 d 74 (m)	TI, β^- β^-	¹²⁹ Te ¹²⁹ I	74 (m) estable
¹³⁰ Te	0.3449	0.04 0.20	^{131m} Te ¹³¹ Te ¹³¹ I	30 h 24.8 (m) 8.05 d	TI, β^- β^- β^-	¹³¹ Te ¹³¹ I ¹³¹ Xe	24.8 (m) 8.05 d estable

donde d (días); h (horas); m (minutos) y CE (captura electrónica).

De estos esquemas se puede establecer el siguiente mecanismo general de formación y decaimiento:



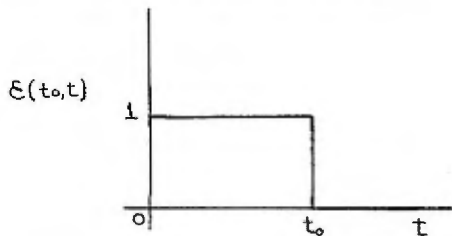
donde N_1 , N_2 y N_3 representan a las especies radiactivas formadas. Para el caso particular del esquema de formación del I^{131} , N_1 , N_2 y N_3 representan al Te^{131m} , Te^{131} y I^{131} respectivamente.

Analizando este mecanismo se pueden obtener las ecuaciones que lo rigen para N_1 , N_2 y N_3 .

La rapidez de formación de radioisótopos en un momento dado será igual al número de átomos que se están formando ($No\phi G$) menos los que se están desintegrando (λN).

Desde que se inicia la irradiación de un material blanco hasta que ésta se termina (tiempo de irradiación), el material se va a activar constantemente produciendo especies radiactivas según la velocidad de formación $No\phi G$, una vez que la irradiación se suspende (cuando el flujo neutrónico es cero) el material activado que se formó va a decaer constantemente de acuerdo a su velocidad de decaimiento λN .

Para tratar simultáneamente el caso de activación y el de decaimiento de las especies radiactivas N_1 , N_2 y N_3 se hizo uso de la función escalón⁽⁵⁾ $\mathcal{E}(t_0, t)$ cuya representación está dada en la siguiente figura:



$$\mathcal{E}(t_0, t) \begin{cases} 1, & 0 < t < t_0 \\ 0, & t \geq t_0 \end{cases}$$

En base a lo anterior, la rapidez de formación de N_1 se expresa matemáticamente como:

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0 \phi G, \mathcal{E}(t_0, t) - \lambda_1 N_1$$

substituyendo $R_1 = N_0 \phi G$, se tiene

$$\frac{dN_1}{dt} = R_1 \mathcal{E}(t_0, t) - \lambda_1 N_1 \quad (1)$$

Esta ecuación se resuelve fácilmente mediante la aplicación de la transformación de Laplace⁽⁵⁾. Haciendo uso de

$$\mathcal{L} \left[\frac{dN_1}{dt} \right] = s n_1(s) - N_1(0) , \quad (2)$$

$$\mathcal{L} [N_1] \equiv n_1(s) ,$$

donde \mathcal{L} denota el operador de transformación de Laplace $\mathcal{L} = \int_0^{\infty} e^{-st}$, y substituyendo estas transformadas en (1) queda:

$$s n_1(s) - N_1(0) = R_1 \mathcal{L} [\mathcal{E}(t_0, t)] - \lambda_1 n_1(s)$$

Notando que $N_1(0) = 0$, se obtiene:

$$s n_1(s) + \lambda_1 n_1(s) = R_1 \mathcal{L} [\mathcal{E}(t_0, t)]$$

$$n_1(s) (s + \lambda_1) = R_1 \mathcal{L} [\mathcal{E}(t_0, t)] ,$$

i.e.

$$n_1(s) = R_1 \frac{\mathcal{L} [\mathcal{E}(t_0, t)]}{s + \lambda_1} . \quad (3)$$

$$\text{Poniendo: } f_1(s) = \frac{1}{s + \lambda_1} \text{ y } f_2(s) = \mathcal{L} [\mathcal{E}(t_0, t)]$$

tenemos que:

$$n_1(s) = R_1 f_1(s) f_2(s) \quad (4)$$

Haciendo ahora la observación⁽⁵⁾ que $f_1(s)f_2(s)$ es la transformada de Laplace de una convolución, i.e.,

$$\mathcal{L} [f_1(s) f_2(s)] = \mathcal{L} [\bar{F}_1(t) * \bar{F}_2(t)] \equiv \mathcal{L} \left[\int_0^t \bar{F}_1(\tau) \bar{F}_2(t-\tau) d\tau \right] \quad (5)$$

e invirtiendo las transformadas, tenemos que

$$\mathcal{L}^{-1} [n_1(s)] = N_1(t)$$

$$F_1(t) = \mathcal{L}^{-1} [f_1(s)] = \mathcal{L}^{-1} [1/(s+\lambda_1)] = e^{-\lambda_1 t}$$

$$F_2(t) = \mathcal{L}^{-1} [f_2(s)] = \mathcal{L}^{-1} [\mathcal{L} [\mathcal{E}(t_0, t)]] = \mathcal{E}(t_0, t),$$

$$\text{y } \mathcal{L}^{-1} [f_1(s)f_2(s)] = F_1(t) * F_2(t) = \int_0^t e^{-\lambda_1 \tau} \mathcal{E}(t_0, t-\tau) d\tau$$

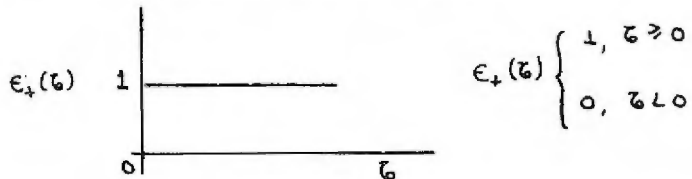
Haciendo la sustitución $x = t - \tau$ en la expresión anterior, obtenemos

$$F_1(t) * F_2(t) = \int_0^t e^{-\lambda_1(t-x)} \mathcal{E}(t_0, x) dx,$$

o

$$F_1(t) * F_2(t) = e^{-\lambda_1 t} \int_0^t e^{\lambda_1 x} \mathcal{E}(t_0, x) dx.$$

El efecto de la función escalón en la integral equivale a poner en los límites otra función escalón $\mathcal{E}_+(t-t_0)$, la cual se representa según la figura:



Consecuentemente

$$F_1(t) * F_2(t) = e^{-\lambda_1 t} \int_0^{t-(t-t_0)} e^{\lambda_1 x} \mathcal{E}_+(t-t_0) dx = \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} [e^{\lambda_1 [t-(t-t_0)]} \mathcal{E}_+(t-t_0) - 1]. \quad (6)$$

Utilizando estos resultados en la inversión de la ecuación (4) obtenemos

$$N_1(t) = R_1 \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} [e^{\lambda_1 [t-(t-t_0)]} \mathcal{E}_+(t-t_0) - 1] \quad (7)$$

Similarmente podemos proceder para determinar en forma matemática la rapidez de formación de N_2 , tenemos que

$$\frac{dN_2}{dt} = N_0 \beta G_2 \mathcal{E}(t_0, t) + a \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

substituyendo $R_2 = N_0 \delta(t_0)$ se tiene:

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 \epsilon(t_0, t) + a \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (8)$$

aplicando nuevamente transformadas de Laplace:

$$\mathcal{L} \left[\frac{dN_2}{dt} \right] = s n_2(s) - N_2(0)$$

$$\mathcal{L} [N_1] = n_1(s)$$

$$\mathcal{L} [N_2] = n_2(s),$$

y substituyendo estas transformadas en (8) queda:

$$s n_2(s) - N_2(0) = R_2 \mathcal{L} [\epsilon(t_0, t)] + a \lambda_1 n_1(s) - \lambda_2 n_2(s)$$

Notando que $N_2(0) = 0$, se obtiene:

$$s n_2(s) + \lambda_2 n_2(s) = R_2 \mathcal{L} [\epsilon(t_0, t)] + a \lambda_1 n_1(s),$$

o

$$n_2(s) = R_2 \frac{\mathcal{L} [\epsilon(t_0, t)]}{s + \lambda_2} + a \lambda_1 \frac{n_1(s)}{s + \lambda_2}$$

Haciendo las substituciones

$$f_1(s) = \frac{1}{s + \lambda_2}, \quad f_2(s) = \mathcal{L} [\epsilon(t_0, t)] \quad (9)$$

así como

$$g_1(s) = n_1(s) \quad \text{y} \quad g_2(s) = \frac{1}{s + \lambda_2} \quad (10)$$

podemos escribir

$$n_2(s) = R_2 f_1(s) f_2(s) + a \lambda_1 g_1(s) g_2(s) \quad (11)$$

Invirtiendo las transformadas e introduciendo las convoluciones respectivas, se tiene

$$\mathcal{L}^{-1} [n_2(s)] = N_2(t)$$

$$\mathcal{L}^{-1} [f_1(s) f_2(s)] = [F_1(t) * F_2(t)] = \int_0^t F_1(\tau) F_2(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

$$\mathcal{L}^{-1} [g_1(s) g_2(s)] = [G_1(t) * G_2(t)] = \int_0^t G_1(\tau) G_2(t - \tau) d\tau \quad (13)$$

Utilizando las ecuaciones (9) y (10) encontramos que

$$F_1(t) = \mathcal{L}^{-1} [f_1(s)] = \mathcal{L}^{-1} [1/(s+\lambda_2)] = e^{-\lambda_2 t}$$

$$F_2(t) = \mathcal{L}^{-1} [f_2(s)] = \mathcal{L}^{-1} [\mathcal{L}[\varepsilon(t_0, t)]] = \varepsilon(t_0, t),$$

$$G_1(t) = \mathcal{L}^{-1} [g_1(s)] = \mathcal{L}^{-1} [n_1(s)] = N_1(t),$$

$$G_2(t) = \mathcal{L}^{-1} [g_2(s)] = \mathcal{L}^{-1} [1/(s+\lambda_2)] = e^{-\lambda_2 t}.$$

Por lo tanto la convolución en la ecuación (12) tiene la forma

$$F_1(t) * F_2(t) = \int_0^t e^{-\lambda_2 \tau} \varepsilon(t_0, t-\tau) d\tau \quad (14)$$

Esta convolución es igual a la desarrollada para el caso anterior de N_1 , lo único que cambia es la λ_1 por λ_2 en la ecuación (6). Podemos, por consiguiente, escribir de inmediato

$$F_1(t) * F_2(t) = \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 [t-(t-t_0)]} \varepsilon_+(t-t_0) - 1 \right]$$

Para $G_1(t) * G_2(t)$ se tiene:

$$G_1(t) * G_2(t) = \int_0^t e^{-\lambda_2 (t-\tau)} N_1(\tau) d\tau$$

Substituyendo el valor de $N_1(\tau)$ encontramos que

$$\begin{aligned} G_1(t) * G_2(t) &= R_1 \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1} \int_0^t e^{\lambda_2 \tau} \left[e^{-\lambda_1 (\tau-t_0)} \varepsilon_+(\tau-t_0) - e^{-\lambda_1 \tau} \right] d\tau \\ &= R_1 \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1} \left\{ \int_0^t e^{-\lambda_1 (\tau-t_0)} \varepsilon_+(\tau-t_0) e^{\lambda_2 \tau} d\tau - \int_0^t e^{(\lambda_2 - \lambda_1) \tau} d\tau \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

Resolviendo por partes la integral

$$I = \int_0^t e^{-\lambda_1 (\tau-t_0)} \varepsilon_+(\tau-t_0) e^{\lambda_2 \tau} d\tau$$

después de hacer las substitutiones

$$u = e^{-\lambda_1 (\tau-t_0)} \varepsilon_+(\tau-t_0), \quad v = \frac{e^{\lambda_2 \tau}}{\lambda_2}$$

tenemos

$$\frac{d\mu}{d\tau} = -\lambda_1 e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} \epsilon_+(\tau-t_0) \left[\epsilon_+(\tau-t_0) + (\tau-t_0) \frac{d}{d\tau} \epsilon_+(\tau-t_0) \right]$$

$$d\nu = e^{\lambda_2 \tau} d\tau$$

$$\text{Consecuentemente } I = [\mu\nu]_0^t - \int_0^t \nu d\mu = \frac{e^{\lambda_2 \tau}}{\lambda_2} e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} \epsilon_+(\tau-t_0) \Big|_0^t +$$

$$+ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \int_0^t e^{\lambda_2 \tau} e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} \epsilon_+(\tau-t_0) \left[\epsilon_+(\tau-t_0) + (\tau-t_0) \frac{d}{d\tau} \epsilon_+(\tau-t_0) \right] d\tau =$$

$$\frac{1}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 t} e^{-\lambda_1(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \int_0^t e^{\lambda_2 \tau} e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} \epsilon_+(\tau-t_0) \epsilon_+(\tau-t_0) d\tau +$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \int_0^t e^{\lambda_2 \tau} e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} \epsilon_+(\tau-t_0) (\tau-t_0) \delta(\tau-t_0) d\tau$$

en esta última integral el símbolo δ denota a la función delta⁽⁶⁾ de Dirac que tiene como propiedades

$$\delta(\tau-t_0) = \begin{cases} 0 & \text{para } \tau \neq t_0 \\ \infty & \text{para } \tau = t_0 \end{cases}$$

$$\int_0^t \delta(\tau-t_0) d\tau = \begin{cases} 0 & \text{para } t < t_0 \\ 1 & \text{para } t \geq t_0 \end{cases}, \quad (\tau-t_0) \delta(\tau-t_0) = 0$$

De aquí que la segunda integral en la ecuación anterior será igual a cero; y siguiendo nuestro desarrollo, la otra integral se resuelve de la siguiente manera:

$$\int_0^t e^{\lambda_2 \tau} e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} \epsilon_+(\tau-t_0) \epsilon_+(\tau-t_0) d\tau = \epsilon_+(t-t_0) \int_{t_0}^t e^{\lambda_2 \tau} e^{-\lambda_1(\tau-t_0)} d\tau$$

$$= \epsilon_+(t-t_0) e^{\lambda_1 t_0} \int_{t_0}^t e^{(\lambda_2 - \lambda_1)\tau} d\tau = \epsilon_+(t-t_0) e^{\lambda_1 t_0} \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_0} \right]$$

$$\therefore I = \frac{1}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 t} e^{-\lambda_1(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{\lambda_1 t_0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_0} \right] \quad (16)$$

Resolviendo la otra integral de la ecuación (15) se tiene

$$\int_0^t e^{(\lambda_2 - \lambda_1)\tau} d\tau = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right] \quad (17)$$

Substituyendo las ecuaciones (16) y (17) en (15) obtenemos

$$G_1(t) * G_2(t) = \frac{R_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1} \left\{ \frac{1}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 t} e^{-\lambda_1(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{\lambda_1 t_0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_0} \right] - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right] \right\}$$

Ahora bien, como: $N_2(t) = R_2 F_1(t) * F_2(t) + a \lambda_1 G_1(t) * G_2(t)$, finalmente se tiene que

$$N_2(t) = R_2 \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 [t-(t-t_0)]} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + a R_1 e^{-\lambda_2 t} \left\{ \frac{1}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 t} e^{-\lambda_1(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{\lambda_1 t_0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_0} \right] - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right] \right\} \quad (18)$$

Para el cálculo de N_3 (I^{131}) procedemos análogamente a los casos considerados anteriormente.

Tenemos así que la rapidez de formación de N_3 se expresa matemáticamente como

$$\frac{dN_3}{dt} = b \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (19)$$

Nótese que en esta ecuación no aparece el término de activación ($No \phi G$) ya que el I^{131} es un descendiente radiactivo del Te^{131m} y del Te^{131} .

Aplicando transformadas de Laplace en la ecuación (19) tenemos:

$$\mathcal{L} \left[\frac{dN_3}{dt} \right] = sN_3(s) - N_3(0)$$

$$\mathcal{L} [N_1] = n_1(s)$$

$$\mathcal{L} [N_2] = n_2(s)$$

$$\mathcal{L} [N_3] = n_3(s)$$

Substituyendo estos valores y observando que $N_3(0) = 0$ se tiene:

$$sN_3(s) + \lambda_3 N_3(s) = b\lambda_1 n_1(s) + \lambda_2 n_2(s),$$

o

$$n_3(s) = b\lambda_1 \frac{n_1(s)}{s+\lambda_3} + \lambda_2 \frac{n_2(s)}{s+\lambda_3}$$

Invirtiendo las transformadas, obtenemos

$$N_3(t) = b\lambda_1 \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{n_1(s)}{s+\lambda_3} \right] + \lambda_2 \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{n_2(s)}{s+\lambda_3} \right]$$

Haciendo las substituciones

$$f_1(s) = \frac{1}{s+\lambda_3} \quad \text{y} \quad f_2(s) = n_1(s),$$

así como

$$g_1(s) = \frac{1}{s+\lambda_3} \quad \text{y} \quad g_2(s) = n_2(s),$$

tenemos que

$$N_3(t) = b\lambda_1 \mathcal{L}^{-1} [f_1(s)f_2(s)] + \lambda_2 \mathcal{L}^{-1} [g_1(s)g_2(s)] \quad (20)$$

Observando nuevamente que

$$\mathcal{L}^{-1} [f_1(s)f_2(s)] = F_1(t) * F_2(t) = \int_0^t e^{-\lambda_3(t-\sigma)} N_1(\sigma) d\sigma,$$

Y

$$\mathcal{L}^{-1} [g_1(s) g_2(s)] = G_1(t) * G_2(t) = \int_0^t e^{-\lambda_3(t-\bar{t})} N_2(\bar{t}) d\bar{t},$$

y substituyendo en la ecuación (20) resulta que

$$N_3(t) = b\lambda_1 \int_0^t e^{-\lambda_3(t-\bar{t})} N_1(\bar{t}) d\bar{t} + \lambda_2 \int_0^t e^{-\lambda_3(t-\bar{t})} N_2(\bar{t}) d\bar{t} \quad (21)$$

Las convoluciones $F_1(t) * F_2(t)$ y $G_1(t) * G_2(t)$ pueden evaluarse en forma análoga a la seguida en los casos anteriores.

En forma final obtenemos la siguiente ecuación para $N_3(t)$:

$$\begin{aligned} N_3(t) = & bR_1 e^{-\lambda_3 t} \left\{ \frac{1}{\lambda_3} \left[e^{\lambda_3 t} e^{-\lambda_1(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{\lambda_1 t_0}}{\lambda_3 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t} - e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t_0} \right] \right. \\ & \left. - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{\lambda_3 - \lambda_1} \right\} + R_2 e^{-\lambda_3 t} \left\{ \frac{1}{\lambda_3} \left[e^{\lambda_3 t} e^{-\lambda_2(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{\lambda_2 t_0}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right. \\ & \left. \left[e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t} - e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t_0} \right] - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right\} + aR_1 e^{-\lambda_3 t} \left\{ \frac{1}{\lambda_3} \left[e^{\lambda_3 t} e^{-\lambda_1(t-t_0)} \epsilon_+(t-t_0) - 1 \right] + \right. \\ & \left. \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{\lambda_1 t_0}}{\lambda_3 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t} - e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t_0} \right] - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{\lambda_3 - \lambda_1} \right\} + aR_1 \lambda_1 \epsilon_+(t-t_0) \frac{e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left\{ e^{\lambda_1 t_0} \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{\lambda_3 - \lambda_1} \right. \\ & \left. - e^{\lambda_2 t_0} \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right\} - aR_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_3 t} \left\{ \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{\lambda_3 - \lambda_1} - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

Si en la ecuación (7) consideramos el caso particular $\bar{t} = t - t_0 \geq 0$ entonces $\epsilon_+(\bar{t}) = 1$, por lo que dicha ecuación se reduce a

$$N_1(t) = R_1 \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} (e^{\lambda_1 t_0} - 1) = \frac{R_1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1(t-t_0)} [1 - e^{-\lambda_1 t_0}]$$

Si llamamos a $t - t_0 = t_e$ (tiempo de espera después de haber irradiado) y t_0 (tiempo de irradiación), podemos escribir

$$N_1(t) = \frac{R_1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) e^{-\lambda_1 t_e} \quad (23)$$

Llamando $A = \lambda_1 N_1$ a la actividad debida al radioisótopo N_1 , y recordando que

$R_1 = N_0 \phi \sigma_1$, obtenemos que

$$A_1 = N_0 \phi \sigma_1 (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) e^{-\lambda_1 t \epsilon} \quad (24)$$

Haciendo arreglos semejantes en las ecuaciones (18) y (22) e introduciendo en las exponenciales el tiempo t_0 , se obtienen las siguientes ecuaciones de actividad para las especies radiactivas N_2 y N_3

$$A_2 = N_0 \phi \left\{ \sigma_2 (1 - e^{-\lambda_2 t_0}) e^{-\lambda_2 t \epsilon} + \frac{\sigma_1 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\lambda_2 (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) e^{-\lambda_1 t \epsilon} - \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 t_0}) e^{-\lambda_2 t \epsilon} \right] \right\} \quad (25)$$

$$A_3 = N_0 \phi \left\{ \left(b + \frac{\sigma_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \left[\frac{\sigma_1 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) e^{-\lambda_1 t \epsilon} - \frac{\sigma_1 \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} (1 - e^{-\lambda_3 t_0}) e^{-\lambda_3 t \epsilon} \right] + \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \left[\frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_0}) e^{-\lambda_2 t \epsilon} - \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} (1 - e^{-\lambda_3 t_0}) e^{-\lambda_3 t \epsilon} \right] \right\} \quad (26)$$

Para obtener resultados de estas ecuaciones se elaboró un programa de cómputo en lenguaje Fortran IV (ver Apéndice), y los datos que se emplearon se encuentran en las tablas IV, V y VI.

Desarrollo matemático de las ecuaciones de dosis para los radioisótopos del Te:

El programa de cómputo también calculó los índices de exposición esperados o dosis para los radioisótopos de nuestro interés, para lo cual se hizo el siguiente desarrollo:

La emisión constante de radiación debida al decaimiento de los radioisótopos formados es un factor importante que se debe tomar en cuenta para efectos de seguridad radiológica.

Spongámos que se tiene un haz colimado de rayos γ y que esta radiación pasa a través de un material dado sufriendo una absorción debida a la interacción con los átomos del

material absorbente, principalmente por efectos Fotoeléctrico, Compton y por Producción de Pares.

El resultado de esta absorción se traduce en el decremento de la intensidad de la radiación en forma exponencial según lo expresa la Ley de Lambert ⁽⁸⁾:

$$I = I_0 e^{-\Sigma X} \quad (24)$$

donde I es la intensidad de la radiación que se tiene después de pasar a través de un material absorbente (mR/h mCi).

I_0 es la intensidad inicial (mR/h mCi).

Σ es la sección eficaz macroscópica en cm^{-1} ($\Sigma = G N_A \rho / A$).

N_A es el número de Avogadro (6.023×10^{23} moléculas/g mol).

ρ es la densidad del material absorbente (g/cm^3).

A es el número de masa.

G es la sección eficaz microscópica de captura (cm^2).

X es el espesor del material absorbente o blindaje (cm).

Para el caso en que se tiene un radioisótopo que emite más de un rayo γ con energía definida (rayo monoenergético), como es el nuestro, cada una de las energías de la γ va a tener un valor de I_0 y una de Σ , introduciendo este en la ecuación (27) tenemos:

$$I = \sum_{i=1}^n I_{0i} e^{-\Sigma_i X} \quad n = 1, 2, 3, \dots, k \quad (28)$$

Esta ecuación es satisfactoria para calcular la intensidad de la radiación que pasa por un material absorbente relativamente delgado.

Si se aumenta el espesor del material, algunos de los fotones que habían sido dispersados pueden, por repetidas dispersiones, volver al haz incidente por lo que se toma un factor de corrección conocido como factor "B" de Incremento (Build-up), el cual es una función del material absorbente, de su espesor y de la energía de los rayos γ . Para un blindaje de plomo este factor ⁽⁷⁾ es

$$B = 1 + \frac{\Sigma X}{2}$$

Haciendo la corrección por el factor de Incremento en la ecuación (28), ésta queda:

$$I = \sum_{i=1}^n I_{0i} (1 + Z_i X/2) e^{-Z_i X} \quad (29)$$

Para el caso de la emisión de partículas β^- hay que considerar que éstas en su paso por el material van a sufrir una deflexión en las inmediaciones de los núcleos de éste produciendo constantemente radiación de frenamiento electromagnética (γ) conocida con el nombre de Bremsstrahlung.

El Bremsstrahlung es radiación γ monoenergética por lo que la fórmula para calcular la dosis que produce es:

$$I_b = I_{0b} (1 + Z X/2) e^{-Z X} \quad (30)$$

donde los subíndices b significan que son debidos al Bremsstrahlung.

Ahora bien, las ecuaciones (29) y (30) se multiplican por la actividad del radioisótopo, y si se introduce en la ecuación de I_b el factor de corrección $F = 1.1 \times 10^{-3} E_{máx} Z$, el cual nos da la fracción de la energía de la β^- que se convierte en Bremsstrahlung⁽⁹⁾ y tomando la suma de las ecuaciones como la dosis total producida por radioisótopo, se tiene que

$$I_T = \text{Actividad} \left\{ \left[\sum I_{0i} (1 + Z_i X/2) e^{-Z_i X} \right] + F I_{0b} (1 + Z X/2) e^{-Z X} \right\} \quad (31)$$

donde I_T es la dosis total (mR/h)

Z es el número atómico efectivo del material en donde se absorben las β^- (3.0 para el polietileno)

$E_{máx}$ es la energía máxima de la β^- (MeV)

Hasta ahora se ha supuesto un haz colimado de fotones, si se toma en cuenta que se tiene una fuente puntual emitiendo radiaciones isotrópicamente, se necesita incluir un factor geométrico que en nuestro caso consiste en dividir la intensidad por $4\pi d^2$ donde d es la distancia de la fuente al detector en metros:

$$S = I_T / 4\pi d^2 \quad (32)$$

S es la dosis producida por una fuente que emite radiaciones isotrópicamente.

En las tablas VII y VIII se dan los datos que sirvieron para obtener resultados de las ecuaciones (31) y (32).

En el Apéndice, también se incluyen los resultados obtenidos del programa para las siguientes condiciones:

Tiempo de irradiación: 48 horas

Flujo neutrónico: 2×10^{13} neutrones/cm² seg

Tiempos de espera: 0, 24, 48, 72 y 384 horas

Espesores del blindaje: 0, 5 y 10 cm

De estos resultados se pudo observar que para una fuente puntual de ^{131}I , dentro de una cápsula de irradiación, produciendo una actividad de 2.34 Ci, la intensidad de la radiación se reduce de $\sim 59,712.6289$ mR/h (sin blindaje) a ~ 246.2549 mR/h (dentro de un blindaje de 5 cm de espesor de la pared de plomo), y si se mide la intensidad de esta fuente (dentro del blindaje) a 1 metro de distancia, será de ~ 0.0309 mR/h.

Las actividades con las que se trabajó fueron del orden de μCi , por lo que el uso de un contenedor de plomo de 5 cm de espesor dió un buen margen de seguridad.

Tabla VI

Valores de a y b para los radioisótopos del Te ⁽⁴⁾

Radioisótopo	a %	b %
121m Te	0.9	0.1
123m Te	1.0	---
125m Te	1.0	---
127m Te	0.992	0.008
130m Te	0.64	0.36
131m Te	0.18	0.82

Tabla VII

Datos empleados para calcular las dosis de los radioisótopos de Te que emiten β

Radioisótopo	$E_{\text{máx}}$ (hev)	F $\times 10^3$	Σ cm^{-1}	$I_{0\beta}$ mR/h mCi a 1 cm
127m Te	0.73	2.89	1.135	4000
127 Te	0.70	2.772		3950
129m Te	1.60	6.336	49.713	7400
129 Te	1.45	5.742	47.443	7000
151m Te	0.90	3.563	37.395	4700
131 Te	2.14	3.474	0.499	3700
131 I	0.606	2.399	1.418	3500

Los valores para el factor F se calcularon por medio de la expresión dada anteriormente.

Los valores de Σ y de $I_{0\beta}$ se obtuvieron gráficamente según la referencia (10).

Tabla VIII

Datos para calcular las dosis de los radioisótopos del Te que emiten γ

Radioisótopo	E γ (MeV)	%	Σ cm ⁻¹	I ₀ mR/h mCi a 1 cm
121m Te	0.0818 0.2140	1.00 1.00	26.105 9.534	380 1200
121 Te	0.575 0.506	0.87 0.13	1.475 1.816	2960 390
123m Te	0.0667 0.158	1.00 1.00	30.000 19.295	420 640
125m Te	0.11 0.0354	1.00 1.00	49.713 212.245	510 620
127m Te	0.089 0.0585	0.98 0.015	54.05 60.155	410 5.4
127 Te	0.418 0.37 0.17		2.44 3.098 17.025	2400 2100 780
129m Te	0.106	1.00	54.78	490
129 Te	1.12 0.21 0.72 0.475 0.027	0.104 0.017 0.02 0.171 0.98	56.75 1191.75 976.1 1.135 0.817	640 20 85 480 1010
131m Te	0.18 0.239 1.12 0.099 0.446	0.217 0.7 0.9 0.84 0.5	14.755 76.612 71.505 61.29 2.156	220 960 5540 390 1330
131 Te	0.773 0.446 0.147 0.099 0.051	0.05 0.45 0.60 0.40 0.40	1.021 2.156 23.835 61.29 56.26	230 1190 450 180 160

Tabla VIII (continuación)

Radioisótopo	E_{γ} (MeV)	%	Σ cm ⁻¹	I_0 mR/h mCi a 1 cm
¹³¹ I	0.08	0.026	29.51	10.4
	0.284	0.054	5.107	89
	0.364	0.820	3.178	1640
	0.637	0.068	1.328	227
	0.723	0.016	1.123	64

Los valores de E_{γ} y % se obtuvieron según la referencia (11)

Los valores de Σ por la referencia (10)

Los valores de I_0 por la referencia (11), excepto para el Te^{127} que se encontraron en la referencia (10).

CAPITULO II

METODOS DE SEPARACION DE I¹³¹ DEL TELURIO IRRADIADO

Los métodos que se desarrollaron en esta tesis para separar al I¹³¹ del telurio irradiado fueron:

1.- Destilación vía húmeda:

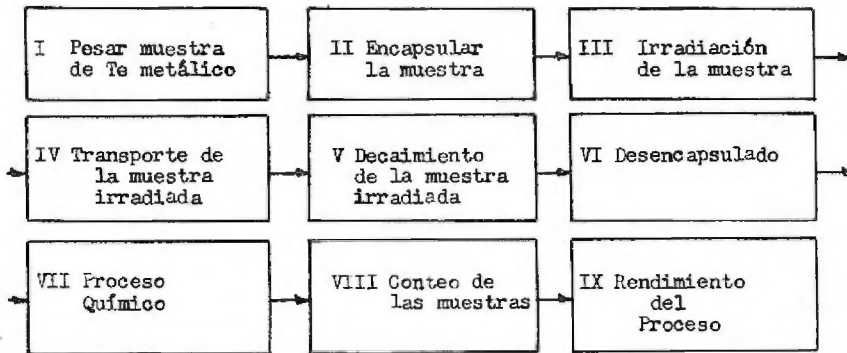
a.- Disolución de Te en medio básico y posterior destilación del I¹³¹.

b.- Disolución de Te en medio ácido y posterior destilación del I¹³¹.

2.- Destilación vía seca:

a.- Calentamiento del Te sólido y arrastre del I¹³¹.

El procedimiento general que se siguió en el desarrollo de estos métodos se muestra en el siguiente diagrama de flujo:



I) Pesar muestra de Te metálico: Se pesó 1 g de Te metálico (Prolabo)/experimento.

II) Encapsular la muestra: Este gramo de Te se introdujo a una capsula cilíndrica de polietileno (altura=5.4 cm y diámetro=1.5 cm), la cual se selló con calor y se introdujo a una segunda cápsula también de polietileno (altura=11.6 cm y diámetro=1.7 cm) pero con tapa de rosca.

III) Irradiación de la muestra: La muestra de Te así encapsulada se introdujo al SINCA (Sistema de Irradiación Neumático de Cápsulas) del Reactor Experimental Tri-ga Mark III del Centro Nuclear de México.

El tiempo de irradiación fue de media hora para cada experimento y se irradió bajo un flujo de neutrones térmicos de $\sim 7 \times 10^{12}$ neutrones/cm² seg. La actividad obtenida de I^{131} a la salida del SINCA fue de $\sim 35.776 \mu\text{Ci/g}$ de material blanco.

IV) Transporte de la muestra irradiada: Al salir la cápsula del SINCA, se colocó dentro de un contenedor cilíndrico de plomo (2.5 cm de espesor) y se llevó al Laboratorio de Producción de Radioisótopos, dejándose en el interior de un castillo de tabiques de plomo de 10 cm de espesor.

V) Decaimiento de la muestra irradiada: La muestra se dejó decaer dentro del castillo de plomo durante 48 horas para permitir que el Te^{131m} con vida media de 30 horas decayera a I^{131} , después de este tiempo la actividad de I^{131} fue de $\sim 107.059 \mu\text{Ci/g}$ de blanco.

VI) Desencapsulado: La muestra ya decaída se llevó a la campana de proceso y se abrió la cápsula de tapa de rosca, la otra cápsula se cortó con una navaja y el Te se vertió dentro del equipo de proceso.

VII) Proceso Químico: El desarrollo del proceso es diferente en cada uno de los métodos estudiados, y se verá con detenimiento más adelante.

VIII) Conteo de las muestras: Antes de que se iniciara la separación se tomó una muestra del material irradiado, y al terminar la destilación se tomaron dos muestras, una del destilado y otra de los residuos.

Estas muestras se contaron en un analizador multicanal y se obtuvieron los espectros correspondientes a la energía de la I^{131} del 0.364 Mev. Para esta energía se sacó el área que se encontraba debajo del pico según la relación:

Área del pico = Suma de todas las cuentas - Fondo
que componen al pico

y el fondo está dado por la siguiente relación:

Fondo = $\frac{\text{Valor de la primera cuenta} + \text{Valor de la última cuenta}}{2} \times$ Número de canales en los que se encuentra comprendido el pico

IX) Rendimiento del proceso: Las áreas calculadas en el punto anterior se corri-

gieron por los totales (ya que eran partes alícuotas) y se obtuvo el rendimiento de los diferentes procesos según:

Area antes del proceso = Area del destilado + Area de los residuos + Pérdidas

Area antes del proceso = 100%

$\% \text{ de } I^{131} \text{ destilado} = \frac{\text{Area del destilado}}{\text{Area antes del proceso}} \times 100$

$\% \text{ de } I^{131} \text{ en los residuos} = \frac{\text{Area de los residuos}}{\text{Area antes del proceso}} \times 100$

$\% \text{ en pérdidas} = 100\% - \% \text{ de } I^{131} \text{ destilado} - \% \text{ de } I^{131} \text{ en los residuos}$

Métodos de separación:

1a.- Disolución de Te radiactivo en medio básico y destilación del I^{131} .

Disolución de Te:

Se estudió la disolución de telurio con dos factores (variables) y cinco niveles de investigación para cada uno de ellos, éstos son:

Factores	Niveles de Investigación
NaOH	5, 10, 15, 20 y 25 %
H ₂ O ₂ al 30%	1, 3, 5, 7 y 9 ml

Se seleccionaron 13 combinaciones de estos factores, resultantes del diseño de tratamientos conocido como "Cuadrado Doble" ⁽¹²⁾, cada tratamiento se repitió 4 veces. Los rendimientos medios de los tratamientos se tomaron como variables dependientes para obtener una ecuación de regresión múltiple, en la que sólo se incluyeron los parámetros lineal, cuadrático y la interacción lineal.

La ecuación de regresión múltiple es:

$$Y_c = 0.150196 + 0.00595 X_1 + 0.098199 X_2 - 0.0003 X_1^2 - 0.007666 X_2^2 + 0.000525 X_1 X_2$$

e indicó que la máxima disolución de Te (Y_c) se obtiene con NaOH (X₁) al 16% y con 7 ml de H₂O₂ (X₂).

Las condiciones que se mantuvieron constantes en estos tratamientos fueron:

Cantidad de Te a disolver: 0.5 g/tratamiento

Volumen de NaOH: 2 ml

Tiempo de disolución: media hora con agitación magnética

Una vez que se conocieron las condiciones de disolución (éstas se realizaron con Te sin activar), se irradiaron 5 muestras de Te metálico (completamente al azar) tal como se indica en el diagrama de flujo.

Proceso Químico:

La muestra se vertió al matraz de disolución (M1) (ver Fig. 1), en donde se adicionaron 4 ml de NaOH al 16% y 14 ml de H_2O_2 al 30% (condiciones de disolución para 1 g de Te). El H_2O_2 se adicionó lentamente y con agitación magnética durante media hora, así el telurio pasó a la forma de telurato ⁽¹³⁾. Esta solución se transfirió al matraz (M2) y se adicionaron 4 ml de H_2SO_4 concentrado, este matraz tiene adaptado un condensador de reflujo (C1) en cuya parte superior se encuentra un filtro de carbón activado (F) que retiene los vapores de I^{131} que pudiera escapar, el tiempo de reflujo fue de 30 minutos, al cabo de éste, se abrió la llave (L1) y el I^{131} empezó a destilar pasando a través del condensador (C2) y finalmente se recibió en el matraz (M3), el cual contenía una solución buffer de Na_2CO_3 M/40 $NaHCO_3$ M/5 con tiosulfato de sodio (1 g) para asegurarse de que el I^{131} queda en la forma de yoduro.

Durante la destilación, la línea de vacío se conectó al matraz (M3), habiendo así un ligero flujo de aire, el cual arrastró a los vapores de I^{131} que destilaron. Los residuos que quedaron en el matraz (M2) se transfirieron al embudo (R) y de ahí se enviaron al Departamento de Desechos Radiactivos.

El tiempo total de operación para estos 5 procesos fue de 3 horas 5 minutos.

Los resultados experimentales que se obtuvieron se dan en la tabla IX.

Tabla IX

Muestra	Rendimiento		
	131 % de I destilado	131 % de I en los residuos	% pérdidas
1	92.1	1.445	6.455
2	92.5	10.20	-----
3	99.5	6.49	-----
4	82.4	5.82	11.76
5	81.6	1.18	17.22

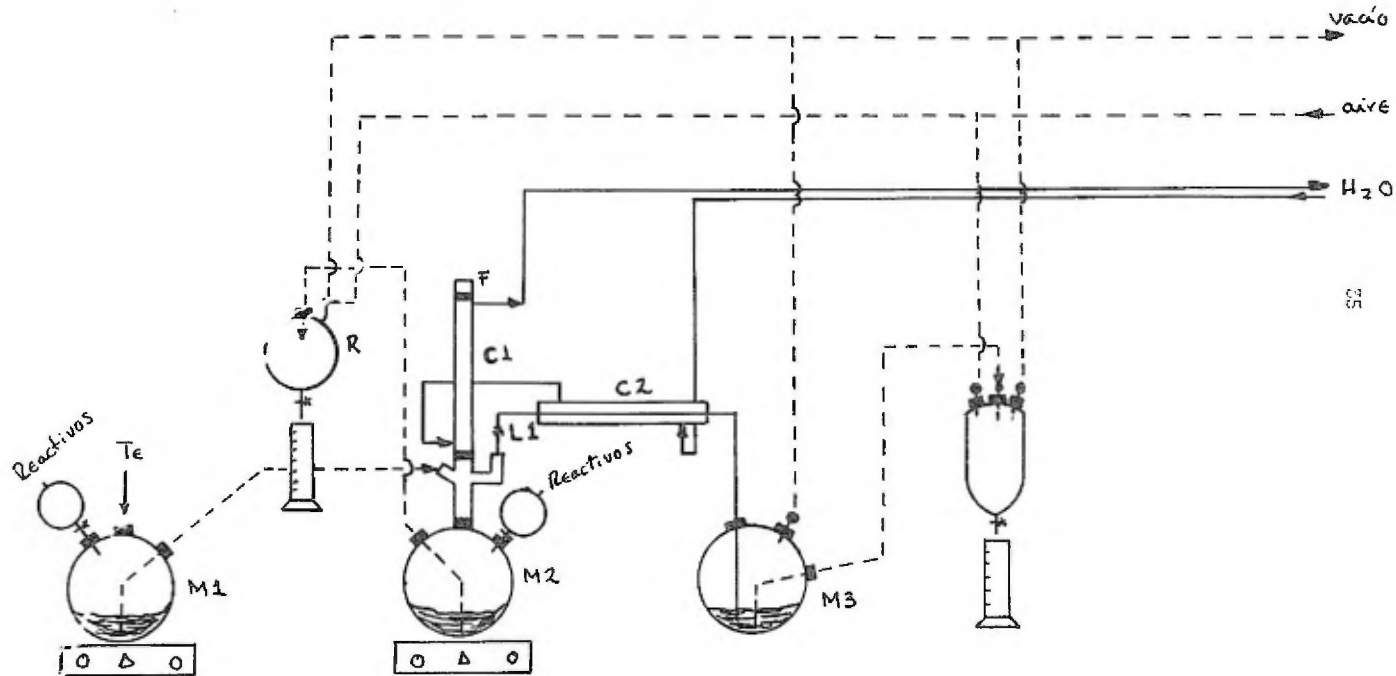


Fig. 1 Aparato Utilizado en la separación de I^{131} del Te irradiado, por el método básico.

131
 lb.- Disolución de Te radiactivo en medio ácido y destilación del I¹³¹.

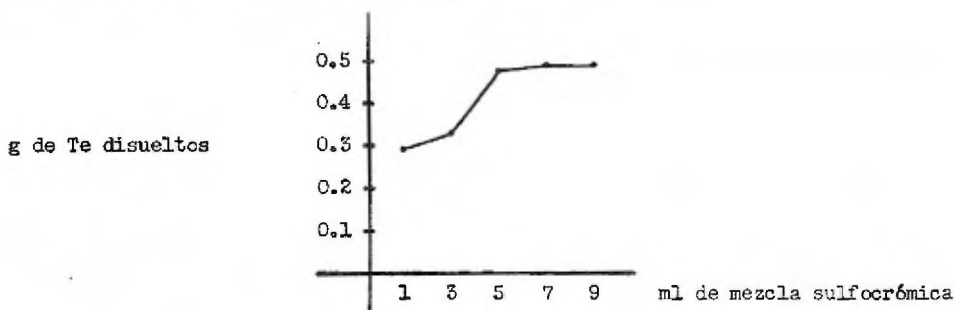
Disolución de Te:

En este caso también se buscó la cantidad óptima de reactivos para disolver el Te natural.

El Te se puede disolver en una mezcla sulfocrómica que contenga H_2SO_4 18N y una solución de CrO_3 al 50% en la proporción 2:1⁽¹⁾, teniéndose así una sola variable de experimentación.

Se tomaron cinco volúmenes diferentes de esta mezcla, a saber: 1,3,5,7 y 9 ml, se disolvió el telurio y con cada volumen se hicieron 3 observaciones.

Los resultados de los rendimientos medios para cada nivel de investigación contra los niveles, dieron la siguiente gráfica:



De esta gráfica se puede observar que más allá de los 5 ml de mezcla sulfocrómica, la disolución permanece constante, por lo que se tomó el valor de 6 ml de esta mezcla para lograr la máxima disolución del Te.

Para 1 g de Te se necesitarán 12 ml de esta mezcla .

Las condiciones que permanecieron constantes para estas pruebas de disolución fueron:

Cantidad de Te a disolver: 0.5 g/nivel de experimentación

Tiempo de disolución: media hora con agitación magnética, a baño María y con reflujo.

Igual que en el método básico se irradiaron 5 muestras de Te metálico, las cuales se procesaron de acuerdo con la siguiente técnica:

La muestra de Te se colocó en el matraz (11) (ver Fig. 2), el cual tiene un condensador de reflujo (21) en su parte superior, se adicionaron 12 ml de mezcla sulfocrómica 2:1 y esta solución se dirigió en baño María Durante 30-40 minutos. En este paso el Te se disolvió y el yodo radiactivo (I^{131}) pasó al estado de oxidación IO_3^- . Después de enfriarse la solución a la temperatura ambiente (30 minutos), ésta se transfirió al matraz (12) en donde se agregaron 5 ml de H_2SO_4 al 50% y 4 g de ácido oxálico para reducir el ión yodato a yodo elemental y así poder destilar.

Cuando la reducción se completó (color verde fuerte), se destiló el I^{131} y se recogió en el matraz (13) que contenía una solución buffer igual a la del método básico.

El tiempo de operación de estos procesos fue de 2 horas/proceso.

Los resultados experimentales se dan en la tabla X.

Tabla X

Muestra	Rendimiento		
	I^{131} % de I destilado	I^{131} % de I en los residuos	% pérdidas
1	78.6	7.69	13.71
2	87.0	3.31	9.69
3	96.5	1.845	1.65
4	70.0	5.69	24.31
5	73.1	3.94	22.96

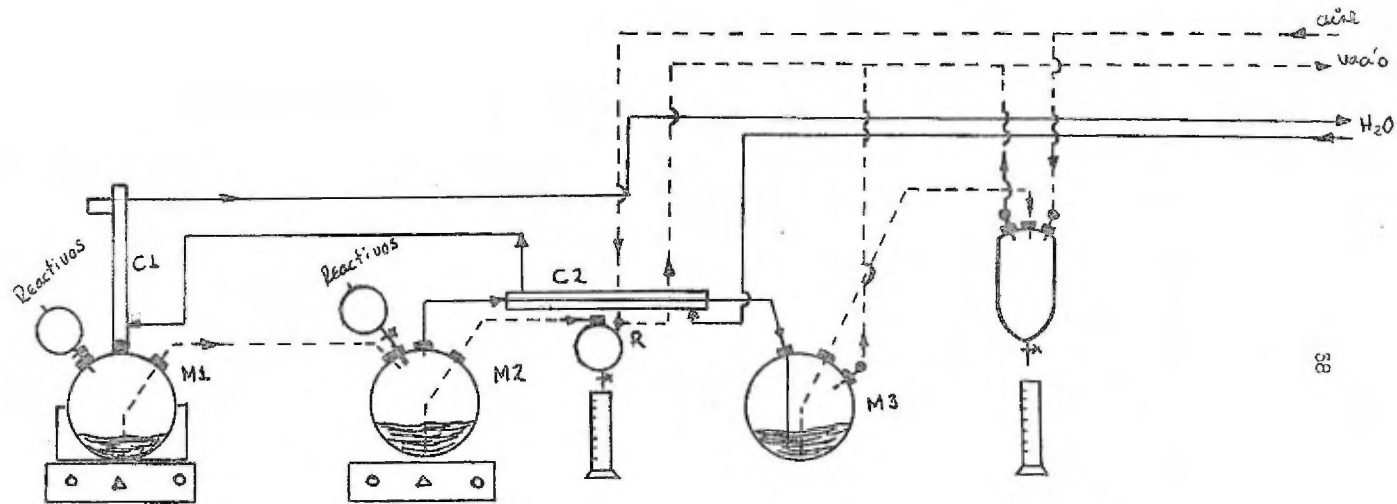


Fig. 2 Aparato utilizado en la separación de I^{131} del Te irradiado, por el método ácido.

2a.- Calentamiento del Te sólido y arrastre del I^{131} .

El Te irradiado bajo las condiciones ya citadas se introdujo a la campana de proceso y se virtió dentro del tubo (T1) (ver Fig. 3), el cual se calentó durante 3 horas (tiempo de operación) a una temperatura de 400°C permitiendo así el desprendimiento de I^{131} de la malla del Te. Los vapores de yodo que se liberaron se arrastraron con aire precalentado (para evitar tener partes frías en el equipo) y se pasaron a través del matraz (ml) en donde se tenía una solución de H_2SO_4 2N para atrapar al Te que se pasara, los vapores de I^{131} se recibieron en el frasco lavador (F1) que tenía una solución buffer igual a la usada en los métodos anteriores.

Los resultados experimentales se dan en la tabla XI.

Tabla XI

Muestra	Rendimiento		
	% de I^{131} destilado	% de I^{131} en los residuos	% pérdidas
1	86.9	7.50	5.6
2	70.5	3.05	26.45
3	98.0	2.00	—
4	80.0	8.00	12.00
5	78.3	5.00	16.70

En el aparato usado para este método el matraz (MO) contenía glicerina, la cual se calentó y sus vapores pasaron a través del serpentín (S), por el cual fluía aire, y su salida se conectó al tubo (T1), el refrigerante de arriba sirvió para condensar los vapores de glicerina.

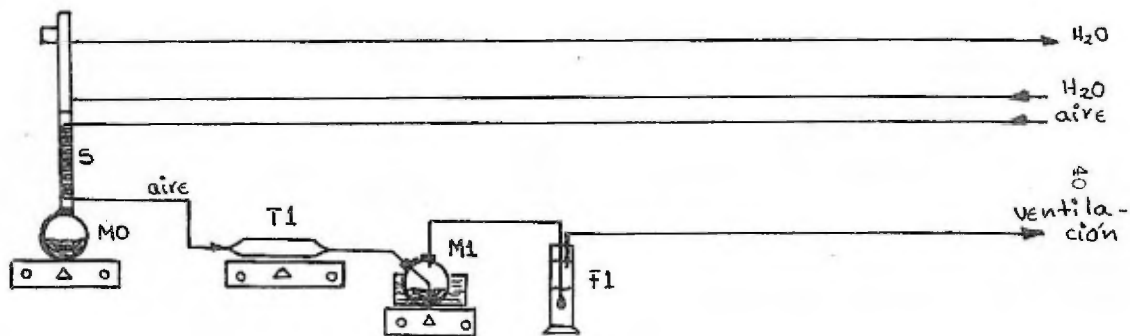


Fig. 3 Aparato utilizado en la separación de I^{131} del Te irradiado, por el método seco.

CAPITULO III

EVALUACION DE LOS METODOS DE SEPARACION DEL I¹³¹ DEL TE IRRADIADO

Los resultados experimentales, que se dan en las tablas IX, X y XI del capítulo anterior, fueron sometidos a pruebas de Análisis de Varianza para un diseño experimental con una sola variable de clasificación⁽¹⁴⁾, en estos casos el rendimiento.

El objeto de realizar estas pruebas es encontrar diferencia o igualdad estadística entre los métodos desarrollados.

En un análisis de varianza de este tipo se asume que los datos se distribuyen normalmente, y que las observaciones realizadas en cada uno de los tratamientos (métodos) se tomaron, al azar, de poblaciones que tienen aproximadamente la misma varianza (homogeneidad).

Para homogeneizar las varianzas, los resultados originales de % de I¹³¹ destilado y % de I¹³¹ en los residuos se transformaron por la raíz cuadrada $\sqrt{(\%)}$, en tanto que los resultados de % de pérdidas se transformaron por $\sqrt{100 - (\%)}$.

La prueba de hipótesis que se usó fue la de igualdad entre las medias de las poblaciones.

El estadístico usado fue F y se trabajó con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

La hipótesis de igualdad entre las medias se acepta cuando el valor de la F calculada es menor que el de la F tabulada, y se rechaza cuando F calculada es mayor que la F tabulada.

Los cálculos que se realizaron para obtener los cuadros de análisis de varianza son:

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados (SC):} \quad & \text{entre medias} = \sum \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T_{++}^2}{N} \\ & \text{en los grupos (observaciones)} = \sum \sum x_{ij}^2 - \sum \frac{T_{i+}^2}{n_i} \\ & \text{totales} = \sum \sum x_{ij}^2 - \frac{T_{++}^2}{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Grados de libertad (GL):} \quad & \text{entre medias} = k - 1 \\ & \text{en los grupos} = N - k \\ & \text{totales} = N - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cuadrado medio (CM):} \quad & \text{entre medias} = \frac{SC \text{ entre medias}}{k - 1} \\ & \text{en los grupos} = \frac{SC \text{ en los grupos}}{N - k} \end{aligned}$$

$$F \text{ (calculada)} = \frac{CM \text{ entre medias}}{CM \text{ en los grupos}}$$

la notación en estas ecuaciones es:

T_{i+} , total de las observaciones de la i ésima columna.

T_{++} , total de todas las observaciones.

n_i , número de observaciones en cada tratamiento (5).

N , observaciones totales (15)

x_{ij} , observación j tomada del tratamiento i .

k , número de tratamientos (3).

El valor de la F tabulada⁽¹⁴⁾ para un nivel de significancia de 0.05 con 2 grados de libertad en el numerador y 12 en el denominador es 3.89.

Los resultados del análisis de varianza para estos metodos se dan a continuación.

La tabla XII muestra los resultados transformados para el % de destilado en los métodos A(ácido), B(básico) y C(seco).

Tabla XII

	A	B	C
I	8.86	9.59	9.32
II	9.33	9.62	8.39
III	9.82	9.97	9.89
IV	8.36	9.07	8.94
V	8.55	9.03	8.85

Realizando con estos valores el análisis de varianza, se obtuvo el siguiente cuadro:

Cuadro de Análisis de Varianza

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F calculada
Entre medias	2	0.61668	0.30813	1.1174
En los grupos	12	3.30888	0.27574	
Total	14	3.92556		

De este cuadro se observa que el valor de F calculada (1.1174) es menor que el de la F tabulada (3.89), por lo que se deduce que estos métodos son estadísticamente iguales.

Los resultados transformados para el % de residuos se dan en la siguiente tabla:

Tabla XIII

	A	B	C
I	2.77	1.20	2.74
II	1.82	3.19	1.74
III	1.35	2.54	1.41
IV	2.38	2.41	2.83
V	1.98	1.08	2.23

Realizando el análisis de varianza para estos datos se obtuvo el cuadro:

Cuadro de Análisis de Varianza

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F calculada
Entre medias	2	0.04785	0.02392	0.0476
En los grupos	12	6.02612	0.50217	
Total	14	6.07397	0.43385	

De aquí se observó que $0.0476 \ll 3.89$, \therefore los métodos son iguales.

Los resultados transformados para el % en pérdidas se dan en la tabla XIV:

Tabla XIV

	A	B	C
I	9.29	9.67	9.71
II	9.50	10.00	8.57
III	9.91	10.00	10.00
IV	8.70	9.39	9.38
V	8.77	9.09	9.13

Los resultados del análisis de varianza para los datos de la tabla XIV son:

Cuadro de Análisis de Varianza

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F calculada
Entre medias	2	0.41029	0.20514	0.8591
En los grupos	12	2.86540	0.23878	
Total	14	3.27569		

Comparando el valor de 0.8591 con 3.89, se ve que en este caso los métodos también son iguales.

En estos análisis se consideró que los datos se distribuían en forma normal, lo cual no puede asegurarse, y como a pesar de estos resultados se cree que si hay diferencia entre los 3 métodos, los valores originales de los experimentos se sometieron a la prueba No-Paramétrica de Kruskal-Wallis⁽¹⁵⁾ probándose la igualdad entre los métodos, la cual se acepta si Q es menor que χ^2 , y se rechaza si Q es mayor que χ^2 .

$$Q = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} \left(\sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} R_i \right)^2 - 3(N+1)$$

N es el número de observaciones total (15)

n_j es el número de observaciones para cada tratamiento (5)

R_i es el valor de las observaciones enumeradas en orden ascendente del 1 al 15

χ^2 es la Chi cuadrada (se calcula en tablas de porcentajes⁽¹⁴⁾ para esta distribución).

Los valores de R_i para los datos originales de % de I¹³¹ destilado en cada uno de los métodos estudiados serán:

Tabla XV

Método	Valor Original	Valor de R_i
A	78.6	5
	67.0	10
	36.5	13
	70.0	1
	73.1	3
B	92.1	11
	92.5	12
	99.5	15
	82.4	8
	81.6	7
C	86.9	9
	70.5	2
	98.0	14
	80.0	6
	78.3	4

Substituyendo los valores de R_i en la ecuación de Q, se obtuvo el valor de $Q = 2.58$ y siendo el valor de χ^2 para un nivel de significancia de 0.05 con 2 grados de libertad 5.99, aceptamos la hipótesis de igualdad entre los métodos.

Para el caso de los residuos y de las pérdidas, los valores de se obtuvieron en forma análoga a ésta y los resultados para Q fueron:

En los residuos $Q = 0.1404$

En las pérdidas $Q = 0.7200$

Comparando estos valores de Q con 5.99, éstos son menores y por consiguiente se aceptó la igualdad estadística entre los métodos.

Como se aceptó la igualdad entre los métodos en la prueba paramétrica (análisis de varianza) y en la no-paramétrica, los criterios que sirvieron para evaluarlos son cualitativos y se discuten en el siguiente capítulo.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

En vista de que estadísticamente no se encontró diferencia entre los métodos, los criterios que sirvieron para escoger uno de ellos se basaron en las observaciones hechas al realizarlos.

Hay que recordar que la cantidad que se desea producir de I^{131} es de 1.5 Ci/semana, lo cual implica un aumento del tiempo de irradiación, del flujo neutrónico y de la cantidad de material blanco.

El aumento en la cantidad de material blanco hace que los volúmenes en la disolución, destilación y desechos radiactivos sean mayores para los métodos húmedos que para el método seco.

En el método seco la operación es más sencilla ya que basta con introducir el telurio irradiado al equipo y calentar, por otra parte, en los métodos húmedos hay que transvasar.

En base a esto el método que se escogió fue el seco y a continuación se propone el equipo experimental que servirá para experimentarlo (ver Fig. 4) hasta encontrar la temperatura óptima de destilación.

Para proponer el equipo experimental se consideraron ciertos factores referentes al sistema con el cual se trabajó.

Se puede considerar que el I^{131} queda atrapado dentro de la malla cristalina del telurio (0.019488×10^{-5} g de I^{131} /g de Te, en 2 Ci de I^{131} y 80 g de Te), y al aumentar la temperatura, los átomos de Te que se encuentran formando la red cristalina, van a adquirir energía vibracional, por lo que las ligaduras se debilitarán permitiendo que el I^{131} emane del lecho de telurio.

La emanación de I^{131} se inicia a partir de los 330°C y se dificulta a temperaturas (16) cercanas al punto de fusión del Te (450°C).

De esto se ve que el rango de temperatura para experimentar será de 330°-430°C, y una vez que se haya determinado la temperatura óptima de operación en este rango, el I^{131} podrá ser producido en forma rutinaria.

Equipo Experimental para el estudio de la Temperatura Óptima de Operación en la Separación del I^{131} del Te irradiado (método seco).

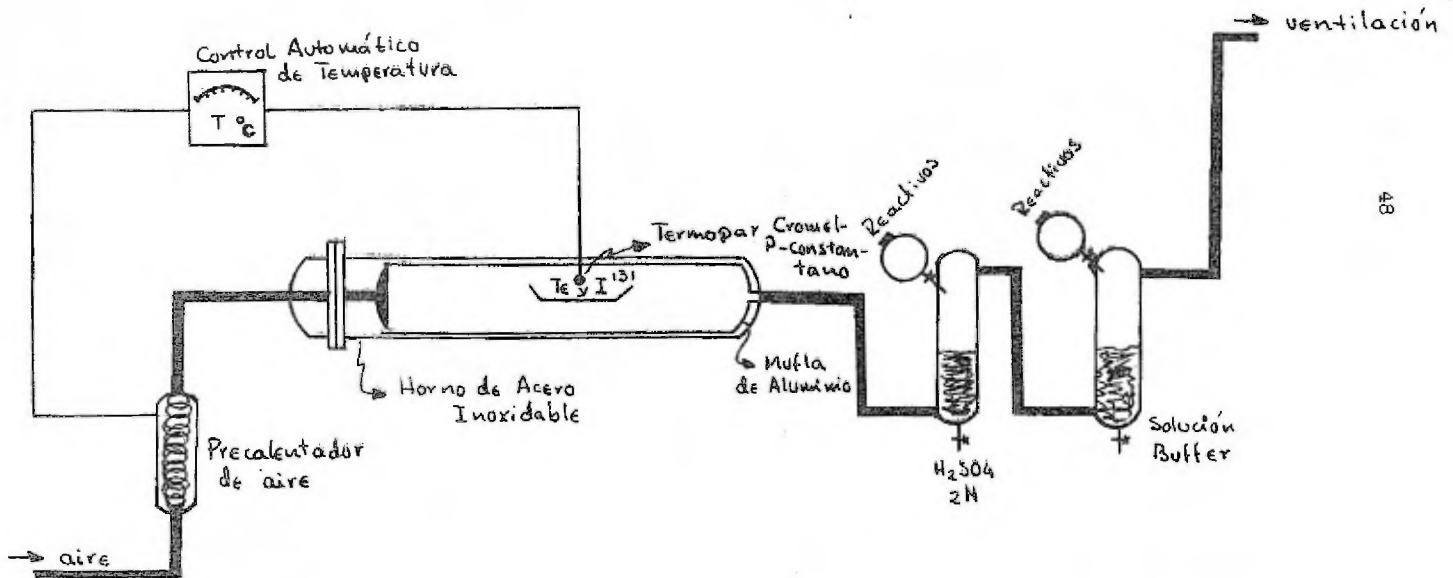


Fig. 4

REFERENCIAS

- (1) Kleimberg, J.; Cowan, G., "The Radiochemistry of Fluorine, Chlorine, Bromine and Iodine", Nuclear Science Series NAS-NS 3005, p. 5, January (1960).
- (2) Nuclear Radiation Center, "Gamma Ray Energy Tables for Neutron Activation Analysis", Report # WSUNRC - 97(2), p. 4.5, Washington State University (1970).
- (3) International Atomic Energy Agency, "Radioisotope Production and Quality Control", Technical Reports Series # 128, p. 237-286, Vienna (1971).
- (4) Lederer, C.M.; Hollander, J.M.; and Perlman, I., "Tables of Isotopes", p. 66-70, John Wiley and Sons, Sixth Edition, New York (1967).
- (5) Doetsch, Gustav, "Guide to the Applications of the Laplace and \mathfrak{L} -Transforms", p. 15,27,28; Van Nostrand Reinhold Company, London (1971).
- (6) Aseltine, John, A., "Transform Method in Linear System Analysis", p. 24, Electrical and Electronic Engineering Series, Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London (1958).
- (7) U.S. Department of Health and Welfare, "Radiological Health Handbook", p. 158, September (1967).
- (8) Chase, G., D.; Rabinowitz, J.,L., "Principles of Radioisotope Methodology", p. 224, Burgess Publishing Company, Third Edition, U.S.A. (1967).
- (9) Department of Health, Education and Welfare, "Occupational Radiation Protection", Training Pub. # 36 (3.53), p. 2.
- (10) General Dynamics, Fort Worth Division; "Health Physics Handbook", OSP-379, p. 227, 229, 230; April (1963).

- (11) Von Marth, W., : Atompraxis, 8, vo. 12; p. 392 (1966).
- (12) Escobar Girón, J., A., "Consideraciones sobre la Comparación de Diseños de Tratamientos", Tesis de Maestría, Escuela Nacional de Agricultura, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx. (1967).
- (13) Pagano, G. Da Silva, G.; Ramaniah, V.M., "Preparação de Iôdo-131 a partir do Telúrio Elementar Irrradiado", Publicação IEA # 110, Sao Paulo, Brasil (1965).
- (14) Dixon, J., W.; Masey, J., F. Jr., "Introduction to Statistical Analysis", p. 145-152, Mc Graw Hill Book Company, Inc., Second Edition, New York, Toronto, London (1957).
- (15) Hájek, Jaroslav, "Non Parametric Statistics", Holden Day, U.S.A. (1969).
- (16) Bardy, André; Beydon, Jacqueline., "Production de L'Iode 131 par voie seche a partir de Tellure Elementaire Irradie a la File", 1 ére Partie - "Etude Des Conditions Pour obtenir L'Emanation de L'IODE et le Capter", CEA-R 3153, Centre D'Etudes Nucléaires de Saclay (1967).

APENDICE

PROGRAMA PARA CALCULAR LAS ACTIVIDADES Y LAS DOSIS PRODUCIDAS POR LOS RADIONUCLEIDOS
DEL TELURIO AL SER IRRADIADO BAJO UN FLUJO DE NEUTRONES TERMICOS

Este programa calcula las actividades y las dosis que producen cada uno de los radioisótopos del telurio de acuerdo con las ecuaciones (24), (25), (26), (27) y (28) del Capítulo I.

Los datos que utiliza el programa los lee según se indica en el listado, y hace iteraciones con los datos comunes a todos los radioisótopos que son variables, siendo en este caso: $TAO(J), J$ 1,5 (tiempo de espera) y $X(M), M$ 1,3 (espesor del blindaje). Los datos constantes para cada radioisótopo son: (T) (tiempo de irradiación), (FI) (flujo neutrónico), (PAT) (peso atómico del blanco) y (Z) (número atómico del material en donde se absorben las .

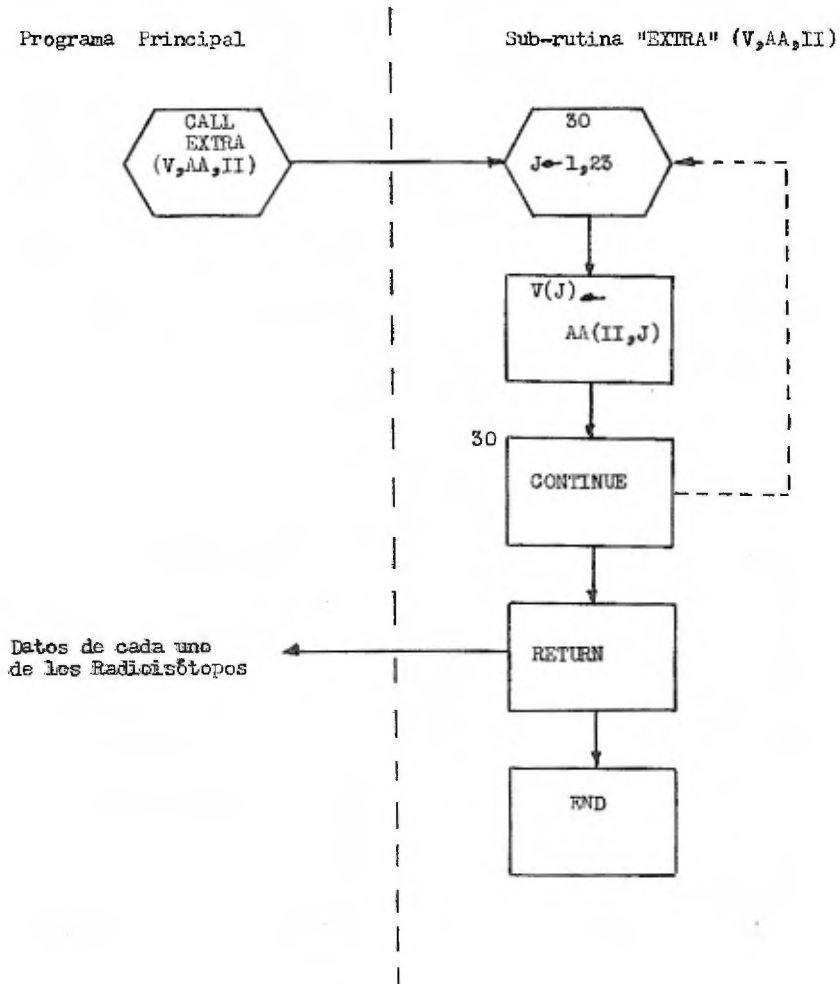
Los datos particulares son los 23 que se dan en el EQUIVALENCE y que se designan como vectores $V(J), J$ 1,23, si el número de radioisótopos es de 11, se van a tener 11 juegos de 23 datos y esto permite tener una matriz de datos de la forma $AA(I,J)$ donde I 11 y J 23. La forma matricial de los datos particulares se presenta a continuación:

Radioisótopo en clave del programa	Número de Juegos (NJ)	Arreglo Matricial de los datos $V(J)$						
1. 121	1	V(1)	V(2)	V(3)	- - - - -	V(23)		
2. 121	2	V(1)	V(2)	V(3)	- - - - -	V(23)		
1. 123	3							
1. 125	4							
1. 127	5							
2. 127	6							
1. 129	7							
2. 129	8							
1. 131	9							
2. 131	10							
3. 131	11	V(1)	V(2)	V(3)	- - - - -	V(23)		
	12						V(7)	

Hay un juego extra (12) que sirve de salida al programa y presenta solamente el dato de $(XN, V(7))$ 4 .

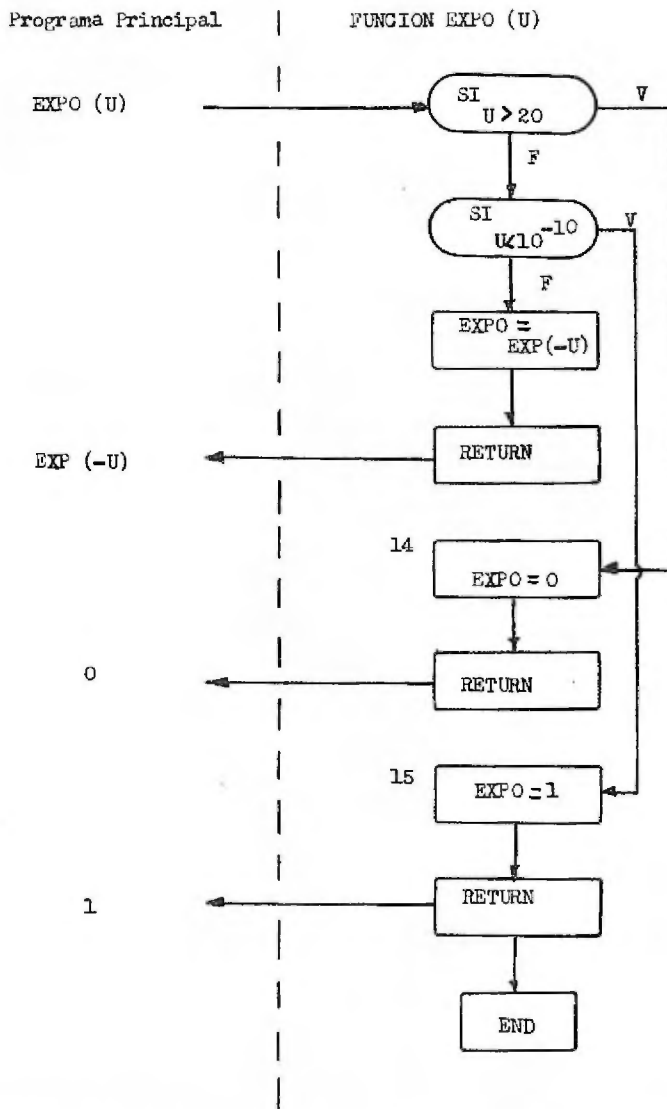
Para poder leer estos datos, el programa utilizó la Sub-rutina "EXTRA", la cual extrae los datos de cada renglón $V(J)$ en la forma en que se muestra por el siguiente diagrama de flujo:

Diagrama de flujo que muestra la entrada y salida al programa principal de la Sub-rutina "EXTRA"



Con estos datos se inician los cálculos los cálculos para el radioisótopo (s) deseado (s), posteriormente el programa llega a la FUNCION "EXPO", la cual se utiliza como se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

Diagrama de flujo de la Funcion "EXPO"



Los valores de EXPO (U) presentan los límites que se indican en este diagrama y una vez que se hayan corregido por los límites, el programa continua con los cálculos.


```

C   PROGRAMA PARA CALCULAR LAS ACTIVIDADES Y LAS DOSIS PRODUCIDAS POR
    LOS RADIOISOTOPOS DEL TELURIO AL SER IRRADIADO BAJO UN FLUJO DE
    2 NEUTRONES TERMICOS
    DIMENSION DOG(5),AA(12,23),V(23),TAO(5),CO(5),X(3)
    EQUIVALENCE (ABUND,V(1)),(SG1,V(2)),(SG2,V(3)),(D1,V(4)),(D2,V(5))
    1,(D3,V(6)),(XN,V(7)),(XNUM,V(8)),(DOG(1),V(9)),(DOG(2),V(10)),(DOG
    2(3),V(11)),(DOG(4),V(12)),(DOG(5),V(13)),(CO(1),V(14)),(CO(2),V(15
    3)),(CO(3),V(16)),(CO(4),V(17)),(CO(5),V(18)),(EBETA,V(19)),(DBR,V(
    420)),(CF,V(21)),(A,V(22)),(B,V(23))
C   ABUND ES LA ABUNDANCIA DE CADA ISOTOPO ESTABLE *
C   SG1 Y SG2 SON LAS SECCIONES EFICACES DE CAPTURA NEUTRONICA PARA
    2 LAS ESPECIES 1 Y 2. BARN: 1BARN=10E-24 CME2
C   D1,D2 Y D3 SON LAS CONSTANTES DE DECAIMIENTO PARA LAS ESPECIES 1,
    1 2 Y 3. HORASE=1 . D=0.693/TIEMPO DE VIDA MEDIA
C   XN ES EL NUMERO DE LA ESPECIE (1,2 O 3)
C   XNUM ES EL NUMERO DE MASA (121,123,125,127,129 O 131)
C   DOG DOSIS PRODUCIDA POR LA ENERGIA DE LA GAMA DEL RADIOISOTOPO
    1 MR/HR NCI A 1 CM
C   CO COEFICIENTE DE ABSORCION LINEAL DEBIDO A LA ENERGIA DE LA GAMA
    1 EN EL MATERIAL DEL BLINDAJE. CME-1.
C   EBETA ENERGIA MAXIMA DE LA BETA. MEV.
C   DBR DOSIS PRODUCIDA POR EL BREMSSTRAHLUNG. MR/HR NCI A 1 CM.
C   CA COEFICIENTE DE ABSORCION LINEAL DEBIDO AL BREMSSTRAHLUNG
    1 CME-1.
C   A FRACCION DE LA ACTIVIDAD QUE DECAE POR TRANSICION ISOMERICA. *.
C   B FRACCION DE LA ACTIVIDAD QUE DECAE POR BETAS. *.
100 FORMAT (F6.2)
105 FORMAT(5F8.0)
110 FORMAT(E8.1,3F5.0,F6.1,F4.1)
120 FORMAT(I4)
130 FORMAT(F4.4,5F10.0,/,F2.0,F10.0,5F10.3,/,5F10.3,/,F10.3,F10.0,F10.
    13,2F5.3)
200 FORMAT(1H,55X,2F5.2)
250 FORMAT(36X,' TIEMPOS',73X,' DOSIS',///10X,' FLUJO',10X,' IRRADIACION'
    10H,9X,' ESPERA',10X,' ACTIVIDAD',10X,' ESPESOR',10X,' SUPERFICIE'
    2,6X,' A 1 METRO',//9X,' M/CME2-SEG',9X,' HORAS',14X,' HORAS',11X,'
    3 NCI/GR',15X,' CME',15X,' MR/HR',10X,' MR/HR',///)
300 FORMAT (10X,F8.1,10X,F7.3)
400 FORMAT (48X,F6.0,5X,F15.6,13X,F4.0,6X,F10.6,3X,F13.6)
C   TIEMPO DE IRRADIACION. HORAS.
    1 READ(2,100) T
C   TAO TIEMPO DE ESPERA DESPUES DEL TIEMPO T . HORAS.
    2 READ(2,105) (TAO(J),J=1-5)
C   FI FLUJO DE NEUTRONES TERMICOS. NEUTRONES/CME2 SEG.
C   X ESPESOR DEL BLINDAJE. CM.
C   PAT PESO ATOMICO DEL MATERIAL BLANCO (TELURIO)
C   Z NUMERO ATOMICO EFECTIVO DEL MATERIAL EN DONDE SE ABSORBEN LAS
    1 BETAS (POLIETILENO)
    3 READ(2,110) FI,(X(M),M=1-3),PAT,Z
C   NJ NUMERO DE JUEGOS DE DATOS CONTENIDOS EN LA MATRIZ AAI(J),
    1 CADA JUEGO TIENE 23 DATOS QUE SON LOS CONTENIDOS EN EL EQUIVA
    2 LENCE, PARA EL CASO DEL TELURIO EN QUE SE TIENEN 11 ISOTOPOS
    3 ACTIVOS NJ=11 MAS 1 JUEGO QUE CORRESPONDE A LA SALIDA DEL PRO

```

```

4 GRABA CON X=1.
1 PRAD(2,120) 1J
DO 5 I=1,NJ
5 PRAD(2,130) (AA(I,1),J=1,23)
DO 70 I=1,MJ
CALL EXTRA (V,AA,IT)
IF (XN,EO,4.) GO TO 62
PRINT 200,XN,XNUM
PRINT 250
RD21=Q2-Q1
RD31=Q3-Q1
RD32=Q3-Q2
Q332=Q3/RD32
Q232=Q2/RD32
AS2R=AS*SQ1*1/RD21
AS2R=AS*SQ1*Q2/RD21
BA2R=BA+AS2R
SAS1R=SQ2=AS1R
SUR3=SQ1*Q3/RD31
SUR3=SQ1*Q1/RD31
* 2 ES EL NUMERO DE ATOMOS INICIALES DE BLANCO.
E E=1,6234E16#ABUND/(PAT)
FD1=FXPO(F1)
F1=(1.-FD1)
D2T=D2*T
FD2=FXPO(D2T)
F2=(1.-FD2)
D3T=D3*T
FD3=FXPO(D3T)
F3=(1.-FD3)
PRINT 300,F1,T
DO 52 J=1,5
E1TA=FXPO(E1T)
FD1TA=FXPO(FD1TA)
D2TA=D2+TAD(T)
FD2TA=FXPO(FD2TA)
D3TA=D3+TAD(T)
FD3TA=FXPO(FD3TA)
IF (XN=2) 10,15,20
* ACT ACTIVIDAD PRODUCCION, MCI/ GR DE BLANCO.
10 ACT=FF1*F1*SQ1*FD1TA
GO TO 17
15 ACT=FF1*(AS2R*F1*FD1TA+SAS1R*F2*FD2TA)
GO TO 17
20 ACT=FF1*(BA2R*(SUR3*F1*FD1TA+SUR1*F3*FD3TA)+SAS1R*(D332*F2*
1ED2TA+D232*F3*FD3TA))
17 DO 50 I=1,3
* 200 ES LA SUMATORIA DE LAS EOG.
SOGG=0.
DO 25 I=1,5

```

```

C      CARC(1)*Y(1)
C      BUILD FACTOR DE BUILD UP DEBIDO A CG.
32    BUILD=(1.+CX/2.)
      ECX=EXPO(CX)
      CBX=CBR*Y(M)
C      BUILD FACTOR DE BUILD UP DEBIDO A CRR.
      BUFB=(1.+CBX/2.)
      ECRX=EXPO(CBX)
C      F FRACCION DE ENERGIA PETA TOTAL QUE SE CONVIERTE EN BREMSSTRAB
1     LUMG.
      F=1.1E-3*7*EBFTA
      BRFB=F*CR*BUFB*ECX
      SDOG=SDOG+DOG(1)*BUILD*ECX
25    CONTINUE
C      DOSUP DOSIS EN LA SUPERFICIE DEL BLINDAJE. MR/HR.
      DOSUP=ACT*(SDOG+BRFB)
C      DOSINT DOSIS A 1 FT DE LA SUPERFICIE DEL BLINDAJE. MR/HR.
22    DOSINT=DOSUP*1.F=4/4T
      PRINT 400,TAC(1),ACT,X(1),DOSUP,DOSINT
52    CONTINUE
72    CONTINUE
60    CALL EXIT
      END

```

CONSTANTS

0 265716643305 1 167440267400 2 163643334272

EQUIVALENCES

B	622	A	621	CR	620	DRP	617	EBFTA	616
CO	611	DOG	604	XNM	603	XW	602	D3	601
D2	600	D1	577	SG2	576	SG1	575	V	574
ABUND	574								

SUBPROGRAMS

FORSE, JAFF FLOUT, FLINT, INTO, INTI, EXIPA EXPO EXIT

SCALARS

T	623	I	624	FI	625	M	626	PAT	627
Z	630	J	631	J	632	II	633	XN	602
XNM	603	RD2J	634	D2	600	D1	577	RD31	635
D3	601	RD3J	636	D332	637	D232	640	A2P	641
A	621	AS1P	642	SG1	575	AS2P	643	BA2P	644
B	622	SAS1P	645	SG2	576	SUR3	646	SUR1	647
ENE	650	ABUND	574	EFT	651	D1T	652	ED1T	653
RE1	654	D2T	655	ED2T	656	RE2	657	D3T	660
ED3T	651	PF3	662	D1TA	663	ED1TA	664	D2TA	665
ED2TA	666	D3TA	667	ED3TA	670	ACT	671	SDOG	672
L	673	CX	674	BUILD	675	ECX	676	CBX	677
CBR	700	BUFB	701	ECBX	702	F	703	EBFTA	616

Q	DOCSAG_F4	F40	126(14)	10-AUG-73	16474	PAGE 4
f	ARR	724	BAR	617	DOSEP	705
	ARRAYS					
	DOG	624	AA	727	V	574
	X	134				

```
FUNCTION EXP0(I)  
IF(U,GT,22.) GO TO 14  
IF(C,LT,1.E-12) GO TO 15  
EXP0=EXP(-I)  
RETURN  
14 EXP0=0.  
RETURN  
15 EXP0=1.  
RETURN  
END
```

CONSTANTS

W 137467633766

GLOBAL VARIABLES

U 44

SUBPROGRAMS

EXP

SCALARS

EXP0 46 7 44

```

SUBROUTINE EXTRA(V,AA,II)
DIMENSION V(23),AA(12,23)
DO 30 J=1,23
V(J)=AA(II,J)
30 CONTINUE
RETURN
END

```

GLOBAL DIMMIES

V	34	AA	35	II	36
SCALARS					
EXTRA	37	J	40	II	36
ARRAYS					
V	34	AA	35		

Resultados del programa de actividades-dosis para los radioisótopos del telurio

TIEMPOS

1. 121.

IRRADIACION	ESFERA	ACTIVIDAD
HORAS	HAPAS	MCI/GR
48.600	0.	0.041228
	2.	0.041228
	4.	0.041228
	24.	0.041043
	24.	0.041043
	48.	0.040858
	48.	0.040858
	72.	0.040674
	72.	0.040674
	72.	0.040674
	384.	0.038360
	384.	0.038360
	384.	0.038360

DOSIS

ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
CM	MR/HR	MR/HR
0.	65.140495	0.006514
5.	0.000000	0.000000
10.	0.000000	0.000000
5.	64.847554	0.006485
5.	0.000000	0.000000
10.	0.000000	0.000000
5.	64.555931	0.006456
5.	0.000000	0.000000
10.	0.000000	0.000000
0.	64.265620	0.006427
5.	0.000000	0.000000
10.	0.000000	0.000000
0.	52.600261	0.006061
5.	0.000000	0.000000
10.	0.000000	0.000000

2. 121.

TIEMPOS			DOSIS		
IRRADIACION	ESPEJA	ACTIVIDAD	ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
HORAS	HORAS	MCI/GR	CM	MR/HR	MR/HR
48.000	0.	0.055577	0.	186.183279	0.018616
	0.	0.055577	5.	0.496969	0.000050
	0.	0.055577	10.	0.000544	0.000000
	24.	0.055000	0.	184.251255	0.018425
	24.	0.055000	5.	0.491812	0.000049
	24.	0.055000	10.	0.000538	0.000000
	48.	0.054439	0.	182.371639	0.018237
	48.	0.054439	5.	0.486795	0.000049
	48.	0.054439	10.	0.000533	0.000000
	72.	0.053893	0.	180.542444	0.018054
	72.	0.053893	5.	0.481912	0.000048
	72.	0.053893	10.	0.000528	0.000000
	384.	0.047934	0.	160.580246	0.016058
	384.	0.047934	5.	0.428628	0.000043
	384.	0.047934	10.	0.000469	0.000000

1. 123.

TIEMPOS

DOSIS

IRRADIACION	ESPERA	ACTIVIDAD	ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
HORAS	HORAS	MCI/GR	CM	MR/HR	MR/HR
49.000	0.	0.832276	0.	1048.667370	0.104867
	0.	0.832276	5.	0.000000	0.000000
	0.	0.832276	10.	0.000000	0.000000
	24.	0.826741	0.	1041.693940	0.104169
	24.	0.826741	5.	0.000000	0.000000
	24.	0.826741	10.	0.000000	0.000000
	48.	0.821244	0.	1034.766890	0.103477
	48.	0.821244	5.	0.000000	0.000000
	48.	0.821244	10.	0.000000	0.000000
	72.	0.815782	0.	1027.885910	0.102789
	72.	0.815782	5.	0.000000	0.000000
	72.	0.815782	10.	0.000000	0.000000
	384.	0.748007	0.	942.488258	0.094249
	384.	0.748007	5.	0.000000	0.000000
	384.	0.748007	10.	0.000000	0.000000

1. 125.

TIEMPOS

DOSIS

IRRADIACION	ESPEJA	ACTIVIDAD	ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
HORAS	HORAS	MCI/GR	CM	MR/HR	MR/HR
48.000	0.	13.841229	0.	15640.509000	1.564059
	0.	13.841229	5.	0.000000	0.000000
	0.	13.841229	10.	0.000000	0.000000
	24.	13.677440	0.	15455.507200	1.545551
	24.	13.677440	5.	0.000000	0.000000
	24.	13.677440	10.	0.000000	0.000000
	48.	13.515589	0.	15272.615600	1.527262
	48.	13.515589	5.	0.000000	0.000000
	48.	13.515589	10.	0.000000	0.000000
	72.	13.355653	0.	15091.088100	1.509189
	72.	13.355653	5.	0.000000	0.000000
	72.	13.355653	10.	0.000000	0.000000
	384.	11.440821	0.	12920.127800	1.292813
	384.	11.440821	5.	0.000000	0.000000
	384.	11.440821	10.	0.000000	0.000000

1. 127.

TIEMPOS

IRRADIACION HORAS	ESPERA HORAS	ACTIVIDAD MCI/GR
	0.	0.625991
	0.	0.625991
	0.	0.625991
	24.	0.621875
	24.	0.621875
	24.	0.621875
	48.	0.617785
	48.	0.617785
	48.	0.617785
	72.	0.613723
	72.	0.613723
	72.	0.613723
	384.	0.563279
	384.	0.563279
	384.	0.563279

DOSIS

ESPEJOR CM	SUPERFICIE MR/HR	A 1 METRO MR/HR
0.	267.275166	0.026728
5.	7.238460	0.000724
10.	7.238460	0.000724
0.	265.517593	0.026552
5.	7.190861	0.000719
10.	7.190861	0.000719
0.	263.771580	0.026377
5.	7.143575	0.000714
10.	7.143575	0.000714
0.	262.037048	0.026204
5.	7.096599	0.000710
10.	7.096599	0.000710
0.	240.499281	0.024050
5.	6.513304	0.000651
10.	6.513304	0.000651

2. 127.

TIEMPOS

IRRADIACION	ESPESA	ACTIVIDAD
HORAS	MCPAS	MCI/GR
48.230	0.	417.921219
	0.	417.921219
	0.	417.921219
	24.	71.273600
	24.	71.273600
	24.	71.273600
	48.	12.577911
	48.	12.577911
	48.	12.577911
	72.	2.636550
	72.	2.636550
	72.	2.636550
	384.	0.560856
	384.	0.560856
	384.	0.560856

DOSIS

ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
CM	MR/HR	MR/HR
0.	9398.797400	0.939880
5.	7585.022250	0.758502
10.	7585.019350	0.758502
0.	1602.900500	0.160290
5.	1293.573560	0.129357
10.	1293.573070	0.129357
0.	282.869667	0.028287
5.	228.281618	0.022828
10.	228.281532	0.022828
0.	59.294435	0.005929
5.	47.851825	0.004785
10.	47.851807	0.004785
0.	12.613315	0.001261
5.	10.179204	0.001018
10.	10.179200	0.001018

1. 129.

TIEMPOS			DOSIS		
IRRADIACION	ESPERA	ACTIVIDAD	ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
HORAS	HORAS	MCI/GR	CM	MR/HP	MR/HP
48.000	0.	0.573684	0.	308.003075	0.030800
	0.	0.573684	5.	26.897972	0.002690
	0.	0.573684	10.	26.897972	0.002690
	24.	0.561627	0.	301.530079	0.030153
	24.	0.561627	5.	26.332684	0.002633
	24.	0.561627	10.	26.332684	0.002633
	48.	0.549824	0.	295.193115	0.029519
	48.	0.549824	5.	25.779275	0.002578
	48.	0.549824	10.	25.779275	0.002578
	72.	0.538269	0.	288.989330	0.028899
	72.	0.538269	5.	25.237498	0.002524
	72.	0.538269	10.	25.237498	0.002524
	384.	0.408397	0.	219.262529	0.021926
	384.	0.408397	5.	19.148242	0.001915
	384.	0.408397	10.	19.148242	0.001915

2. 129.

TIEMPOS

IRRADIACION
HORASESPERA
HORASACTIVIDAD
MCI/GR

48.000

0.	113.970862
0.	113.970862
0.	113.970862
24.	0.382667
24.	0.382667
24.	0.382667
48.	0.374470
48.	0.374470
48.	0.374470
72.	0.366600
72.	0.366600
72.	0.366600
384.	0.278148
384.	0.278148
384.	0.278148

DOSIS

ESPESOR
CMSUPERFICIE
MR/HRA 1 METRO
MR/HR

0.	259305.822000	25.930582
5.	11193.025500	1.119303
10.	4750.903630	0.475090
0.	870.640579	0.087064
5.	37.501501	0.003758
10.	15.951549	0.001595
0.	851.992165	0.085199
5.	36.776536	0.003678
10.	15.609879	0.001561
0.	834.086685	0.083409
5.	36.003640	0.003600
10.	15.281622	0.001528
0.	632.839821	0.063284
5.	27.316750	0.002732
10.	11.594653	0.001159

TIEMPOS

1. 131.

DOSIS

IRRADIACION	ESPERA	ACTIVIDAD	ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
HORAS	HORAS	MCI/GR	CM	MR/HR	MR/HR
48.000	7.	24.813194	0.	209839.000000	20.983900
	0.	24.813194	5.	420.029594	0.042003
	0.	24.813194	10.	415.640846	0.041564
	24.	13.484428	0.	114034.447000	11.403445
	24.	13.484428	5.	228.259966	0.022826
	24.	13.484428	10.	225.874954	0.022587
	48.	7.327948	0.	61970.631300	6.197063
	48.	7.327948	5.	124.045097	0.012405
	48.	7.327948	10.	122.748992	0.012275
	72.	3.982284	0.	33677.184100	3.367718
	72.	3.982284	5.	67.410796	0.006741
	72.	3.982284	10.	66.706443	0.006671
	304.	0.001436	0.	12.141822	0.001214
	304.	0.001436	5.	0.024304	0.000243
	304.	0.001436	10.	0.024050	0.000240

TIEMPOS

2. 131.

IRRADIACION HORAS	ESFERA HORAS	ACTIVIDAD MCI/GR
48.000	0.	180.498804
	0.	180.498804
	0.	180.498804
	24.	2.464472
	24.	2.464472
	24.	2.464472
	48.	1.339287
	48.	1.339287
	48.	1.339287
	72.	0.727819
	72.	0.727819
	72.	0.727819
	384.	0.000262
	384.	0.000262
	384.	0.000262

DOSTS

ESPF/SOP CM	SUPERFICIE MR/HR	A 1 METRO MR/HR
0.	412210.039000	41.221004
5.	14230.920300	1.423092
10.	13317.012600	1.331701
0.	5620.182310	0.562010
5.	194.304373	0.019430
10.	181.826174	0.018183
0.	3058.567080	0.305857
5.	105.592344	0.010559
10.	98.811218	0.009881
0.	1662.140992	0.166214
5.	57.382872	0.005738
10.	53.697752	0.005370
0.	0.599261	0.000060
5.	0.020689	0.000002
10.	0.019360	0.000002

TIEMPOS

3. 131.

DOSIS

INDICACION	ESPESES	ACTIVIDAD	ESPESOR	SUPERFICIE	A 1 METRO
HORAS	HORAS	KCI/GR	CM	MR/HR	MR/HR
48.000	0.	29.874467	0.	62911.026400	6.091103
	0.	29.874467	5.	315.785240	0.031579
	0.	29.874467	10.	251.176769	0.025118
	24.	29.286700	0.	59712.628900	5.971263
	24.	29.286700	5.	309.572300	0.030957
	24.	29.286700	10.	246.234978	0.024623
	48.	27.705307	0.	56488.326700	5.648833
	48.	27.705307	5.	292.856335	0.029206
	48.	27.705307	10.	232.939030	0.023294
	72.	25.875235	0.	52756.994100	5.275699
	72.	25.875235	5.	273.511726	0.027351
	72.	25.875235	10.	217.552258	0.021755
	384.	8.682359	0.	17702.454100	1.770245
	384.	8.682359	5.	91.776055	0.009178
	384.	8.682359	10.	72.999020	0.007300

FE DE ERRATAS

Pag. 4 y 47 dice conclusiones, debe decir conclusiones.

Pag. 27 el valor de Σ para el Te^{127} es 1.250.