

# EL PROFESOR DE HEVESY CUENTA LA HISTORIA DE LOS RADIOISOTOPOS

El Profesor George de Hevesy, uno de los precursores en la esfera de los indicadores radiactivos, preparó el siguiente trabajo para el Simposio sobre métodos radioquímicos de análisis que, patrocinado por el OIEA, tuvo lugar en Salzburgo en octubre de 1964. El Profesor de Hevesy nació en Budapest en 1885. Estudió en dicha ciudad, así como en Berlín y Friburgo, y pasó algunos años en Zurich cuando Einstein había fijado allí su residencia. En 1911 fue a Manchester para trabajar con Rutherford, y allí «presenció algunos de los descubrimientos más importantes de la historia de la Física». A fines de 1912 visitó el Instituto vienés de investigaciones sobre el radio, en el que trabajó con Paneth, y en 1913 empleó por vez primera plomo marcado. Después de la primera Guerra Mundial trabajó en el Instituto de Física Teórica de Copenhague, y a partir de 1943 ha residido y trabajado principalmente en Suecia.

En 1923 Hevesy y Coster descubrieron el elemento Hafnio. Hevesy ha hecho muchos y muy notables descubrimientos acerca de la movilidad de los iones y sobre la separación de isótopos, y su labor sobre los indicadores radioisotópicos, que tan importantes aplicaciones tienen en biología, le valió el Premio Nobel de Química correspondiente a 1943.

\*\*\*\*\*

El «niño mimado» de Rutherford era la partícula alfa. En sus investigaciones llegó muy pronto a la conclusión de que, los rayos alfa estaban formados por átomos de helio con dos cargas positivas. Rutherford descubrió y verificó muchas de las propiedades de esos rayos, e ideó con Geiger un método para su recuento. Este fue el primer paso por el camino que más tarde seguirían Geiger y Müller para construir su contador de rayos beta. Luego Rutherford se consagró al estudio de la dispersión de las partículas alfa, estudio que condujo al descubrimiento del núcleo del átomo. Rutherford elegía siempre los problemas realmente importantes, abordándolos y analizando los resultados de sus investigaciones de la manera más directa. En todos los años que trabajé bajo su dirección no le ví apartarse ni una sola vez de ese sistema de trabajo. Hacia 1913 ó 1914 comenzó a interesarse principalmente por las propiedades del núcleo atómico, sin dejar de dedicarse por ello a otras investigaciones, entre ellas las relacionadas con las propiedades de los rayos beta. Como los rayos beta emitidos por el radio-D eran muy blandos, se necesitaba un preparado muy activo de esta sustancia. Rutherford tenía en su Instituto bastante radio-D, pero estaba contenido en grandes cantidades de cloruro de plomo y, por lo tanto, podía decirse que no valía para nada. El cloruro de plomo radiactivo era donación del Gobierno austríaco, que lo había obtenido al extraer radio de la peclblenda de Joachimsthal.

Un día que Rutherford y yo estábamos en el sótano del Instituto, donde había almacenados varios quintales de cloruro de plomo radiactivo, me dijo

que yo no me merecía el pan que comía si no era capaz de separar el radio-D de todo aquel plomo que no hacía más que estorbar. Con el optimismo propio de mi juventud acepté el reto, completamente convencido de que ganaría. Pero fracasé, pese a todos mis esfuerzos. Meditando sobre mi fracaso fue como llegué a la conclusión de que si no se podía separar el radio-D del plomo, en cambio se podía añadir radio-D puro y de actividad conocida a algún compuesto de plomo que reaccionase químicamente con el plomo «marcado» y seguir las huellas de los iones de plomo con ayuda de detectores de la radiactividad. Radio-D puro se podía obtener tratando con ácido diluido un tubo de vidrio en el que se desintegrasen emanaciones del radio. Esos tubos se empleaban mucho entonces para el tratamiento del cáncer.

En 1912 el centro en que más se trabajaba con la emanación del radio - bautizada más tarde con el nombre de radón - era el Instituto vienés de investigaciones sobre el radio. Esto me indujo a visitar el Instituto en noviembre de 1912; allí conocí a Fritz Paneth, profesor adjunto que, según me enteré, también había tratado sin éxito de aislar el radio-D contenido en plomo radiactivo. Mientras pasaba las Navidades de 1912 en Budapest escribí a Paneth y le propuse el siguiente experimento: marcar nitrato de plomo con radio-D, convertirlo en sulfuro y determinar el grado de solubilidad del compuesto midiendo la fracción de radio-D presente en el líquido filtrado. Paneth me contestó que quería estudiar la electroquímica del polonio y verificar la fórmula de su condiscípulo, Karl Herzfeld, pero en su segunda carta me dijo que estaba dispuesto a iniciar la investigación por mí sugerida.

Comenzamos nuestra labor a primeros de enero estudiando, con sulfuro de plomo y cromato de plomo marcados, la solubilidad de estos compuestos. Entonces no existía el contador Geiger y para nuestros experimentos empleábamos un electroscopio de laminillas de oro. En el siguiente experimento determinamos la tensión de depósito del radio-D y del radio-E antes y después de añadir una cantidad variable de plomo y bismuto. Cuando realizábamos estas investigaciones y otras de la misma época, no solamente teníamos que esforzarnos por encontrar la solución de nuestros problemas, sino también por acopiar argumentos que oponer a quienes se negaban a reconocer la estrecha semejanza que había entre el radio-D y el plomo. Conseguimos modificar a voluntad la tensión de depósito del radio-D añadiendo plomo exclusivamente, y pudimos alterar la velocidad de disolución de una capa de torio-B añadiendo también plomo, pero no cuando añadimos bismuto o talio, con lo que se demostraba que el radio-D, el torio-B y el plomo eran elementos prácticamente idénticos desde el punto de vista químico. La palabra «isótopo» no la inventó Soddy hasta diciembre de 1913.

Estudiando el intercambio del sulfato de plomo sólido con los iones de plomo marcado de una solución saturada de sulfato de plomo, Paneth demostró que sólo la capa superior del sulfato de plomo intervenía en los procesos de intercambio. Una superficie de plomo metálico actúa de manera muy distinta, como tuve ocasión de demostrar. En efecto, el intercambio se produce entre centenares de capas atómicas de la superficie de la lámina de plomo y los

iones de plomo marcado de la solución circundante, y viceversa. Es de suponer que esto se debe a procesos locales de los electrodos, que tienden a eliminar diferencias en la electropositividad de las distintas partes de la lámina metálica.

## DESCUBRIMIENTO DE LOS PRIMEROS RADICALES LIBRES

En el invierno de 1917 me encontraba destacado en los Cárpatos cuando, Stefan Meyer, a la sazón Director del Instituto del Radio, me escribió diciendo que Paneth había realizado un importante descubrimiento: había demostrado la existencia de un hidruro de polonio volátil. Esto no fue un gran descubrimiento, ya que el azufre, el selenio y el telurio, homólogos inferiores del polonio, también forman hidruros volátiles, pero en manos de Paneth dio origen a grandes progresos. Paneth añadió ácido clorhídrico diluido a una aleación de magnesio y polonio, dirigió sobre la mezcla una corriente de nitrógeno y luego hizo pasar la corriente gaseosa a un electroscopio para determinar emanaciones. Por la descarga del aparato Paneth dedujo la presencia de un hidruro de polonio volátil. Como era muy concienzudo, repitió el experimento con bismuto marcado con torio-C. Por aquel entonces se creía que el bismuto no formaba ningún hidruro volátil, por lo que Paneth daba por seguro que el electroscopio no se descargaría. Pero, contrariamente a lo que esperaba, el electroscopio se descargó. Estos experimentos condujeron al descubrimiento de un hidruro de bismuto volátil y, más tarde, de un hidruro de plomo volátil. Este último descubrimiento tuvo repercusiones muy amplias. En sus investigaciones sobre el hidruro de bismuto, Paneth había colocado un tubo de vidrio entre la muestra de torio-C y el electroscopio; al calentar el tubo de vidrio, el hidruro marcado con torio-C se descompuso y, por consiguiente, al electroscopio no llegó radiactividad alguna. Repitió el experimento con el hidruro de plomo volátil que había descubierto, y seguidamente estudió el comportamiento de otros compuestos volátiles del plomo, tales como el plomo tetrametilo. Calentando una parte del tubo de cuarzo por el que pasaba una corriente de hidrógeno que llevaba plomo tetrametilo, obtuvo en la parte calentada del tubo un espejo de plomo debido a la separación del grupo metilo. Haciendo pasar el hidrógeno portador del metilo por otro tubo en el que había otro espejo de plomo, éste desapareció. De esta y de otras observaciones análogas dedujo la existencia de un radical metilo libre de vida muy corta. En efecto, en una corriente de hidrógeno de 2mm de presión, la mitad del metilo desaparecía en un intervalo de 0,006 segundos. Ochenta años antes de que Paneth realizase sus experimentos, Kolbe (entre otros) había afirmado ya que existían radicales libres. Ahora bien, Kolbe tomó por radical metilo lo que, en realidad, era etano. Fue únicamente el ingenioso dispositivo experimental de Paneth lo que hizo posible el descubrimiento del primer radical libre: el metilo libre. A partir de entonces los radicales libres han desempeñado un importante papel en química orgánica, radiobiología y otras ramas científicas. Paneth contribuyó al progreso de la química con numerosas investigaciones de gran importancia, pero su aportación principal fue precisamente el descubrimiento de los radicales libres.

## ANALISIS CON INDICADORES RADIATIVOS

Los indicadores radiactivos son de gran utilidad para determinar si la precipitación de un compuesto es completa o no. Por ejemplo, al fósforo se le determina con frecuencia en forma de fosfomolibdato de amonio. Al principio se creía que con este procedimiento precipitaba todo el fósforo contenido en la solución; no obstante, cuando se provocó la precipitación empleando fósforo marcado se comprobó que el líquido filtrado tenía un 1,5 por ciento de actividad del indicador y, por lo tanto, el mismo porcentaje de fósforo. Modificando las condiciones de la precipitación (por ejemplo, disminuyendo al 1 por ciento el ácido nítrico de la solución) pudo conseguirse una precipitación más completa del fósforo.

Antes incluso de disponer de radioisótopos artificiales se empleaban radioisótopos naturales en análisis con indicadores. Por ejemplo, para la determinación cuantitativa del cromato de plomo se añade a una solución del mismo otra solución que contenga una cantidad conocida de plomo marcado con torio-B. Se separa el precipitado obtenido y se mide la actividad del líquido filtrado. De la proporción entre la actividad de éste y la de la solución de plomo añadida puede calcularse la cantidad de plomo precipitado y, por consiguiente, la de cromato de plomo.

## DILUCION ISOTOPICA

La primera aplicación de la radiactividad en química analítica es tan antigua como el descubrimiento de la propia radiactividad. Fue Becquerel quien descubrió que la intensidad de las radiaciones del uranio es proporcional a la cantidad de uranio presente.

Si añadimos a una mezcla de elementos un radioisótopo de uno de los componentes de la mezcla y recuperamos seguidamente una parte de este elemento, su actividad específica nos dará la medida de la cantidad de ese elemento que contiene la mezcla. El método de dilución isotópica se basa precisamente en ese principio. Añadamos a una solución de mineral, por ejemplo, 10 miligramos de plomo en forma de nitrato y una cantidad insignificante de radio-D o de torio-D con una actividad de 100 000 cuentas por minuto. Si recuperamos 1 miligramo de plomo con una actividad de 10 000 cuentas por minuto, podemos decir que el mineral no contenía plomo; pero si recuperamos 1 miligramo de plomo y su actividad es de sólo 1 000 cuentas por minuto, deduciremos que el mineral contenía 9 miligramos de plomo inactivo.

La primera aplicación del análisis por dilución isotópica tuvo lugar en 1929 y consistió en determinar cantidades muy pequeñas de plomo; Hobbie y yo fuimos los autores y obramos de la siguiente manera: a una solución de muestras de mineral añadimos una cantidad insignificante de radio-D, de actividad conocida, y provocamos el depósito electrolítico en ánodos de platino tanto del plomo presente en las muestras como del radio-D añadido, este último en forma de peróxido. Si se depositaba el 100 por ciento del radio-D añadido tenía que depositarse también el 100 por ciento del plomo contenido en las muestras, y el peso de la sustancia depositada indicada la

cantidad de plomo contenida en la muestra. En cambio, si sólo se recuperaba el 80 por ciento del radio-D había que dividir por 0,8 el peso de la sustancia depositada para hallar la cantidad exacta de plomo contenido en las muestras de mineral que analizábamos.

## CANTIDAD DE AGUA CONTENIDA EN EL CUERPO

En abril de 1913, poco después de terminar mis primeras investigaciones con Paneth, regresé a Manchester donde un buen día tuve la oportunidad de tomar una taza de té con el difunto J.G. Moseley, descubridor de la espectrometría de rayos X. Hablando de los usos y aplicaciones de los indicadores radiactivos, esfera a la que nos dedicábamos Paneth y yo, se me ocurrió comentar lo mucho que me gustaría poder observar el camino que iba a seguir en mi organismo la taza de té que estaba bebiendo. Moseley era hombre muy despierto e imaginativo, pero estimó que semejante posibilidad era una pura utopía. Sin embargo, no habían transcurrido aún veinte años cuando Urey descubrió el agua pesada y, con ello, aquel deseo mío se hizo realidad. Urey me regaló unos cuantos litros de agua marcada que sólo contenía un 0,60 por ciento de agua pesada pero que me bastó para seguir, por ejemplo, el proceso de dilución que experimentaba un litro de agua en el cuerpo humano en el curso de unas pocas horas (tiempo suficiente para que el agua pesada se reparta homogéneamente por el agua contenida en el cuerpo). La excreción de agua marcada en el transcurso de unas pocas horas es insignificante. Con este método pudimos comprobar que el 60 por ciento aproximadamente del peso del cuerpo humano corresponde al agua. He aquí un ejemplo patente de la utilidad de la dilución isotópica. Si administramos al organismo 1 miligramo de deuterio y transcurridas algunas horas encontramos en los fluidos del cuerpo (por ejemplo, en el plasma sanguíneo) una concentración de deuterio de 1/50 000, podemos afirmar que el organismo contiene 50 litros de agua diluyente.

Una vez descubierta, el agua tritiada se utilizó con frecuencia como indicador para determinar la cantidad de agua contenida en el cuerpo. El empleo más común del método de la dilución isotópica para determinar el contenido de agua del cuerpo y el contenido de otros componentes del plasma, se debió a Moore y sus colaboradores.

El método de dilución isotópica resultó de gran valor para determinar la magnitud de los distintos componentes del organismo; por ejemplo, el volumen de hematíes o de plasma. Para determinar el volumen de hematíes se incubaba sangre a la temperatura del cuerpo por espacio de media hora, por ejemplo, en presencia de ortofosfato sódico marcado. El fósforo penetra con bastante lentitud en el glóbulo rojo, pero una vez en su interior se produce rápidamente el intercambio entre el ión y parte del fósforo orgánico soluble en ácido. La concentración de este fósforo en el hematíe es considerablemente mayor que la del ortofosfato. Como resultado de esto y del proceso anteriormente descrito, el hematíe obra como una especie de ratonera imperfecta para el fósforo-32, el cual tarda mucho más en salir del eritrocito que en entrar en él. Diez minutos bastan para conseguir una distribución homogénea entre los hematíes marcados que se inyectan y los que circulan sin

marcar; la pérdida de fósforo-32 en ese intervalo es pequeñísima, si bien llega a ser de un 6 por ciento aproximadamente en el transcurso de una hora.

Introduciendo hierro-59 en la hemoglobina de los hematíes se los puede marcar de manera estable. Como esto sólo puede realizarse *in vivo*, hay que contar con un voluntario y, por ello, la marcación con hierro-59 no se presta para usos clínicos. También se necesitaba un voluntario para el primer método de determinación ideado, en el cual se hacía una transfusión de plasma marcado a un conejo y se determinaba luego la dilución de la actividad de los fosfátidos marcados. Más tarde se implantó la marcación de hematíes con cromo-51, método que ha venido sustituyendo cada vez más frecuentemente al de marcación con fósforo. La pérdida de cromo-51 es de sólo un 5 por ciento en el curso del primer día y del 1 por ciento aproximadamente cada día sucesivo. Empleando cromato marcado puede determinarse el período de vida de los glóbulos rojos así como el volumen de corpusculos. Es más, como el cromo-51 emite rayos gamma, podemos determinar su actividad con un contador de centelleo, instrumento sumamente apropiado. Si inyectamos 1 mililitro de hematíes marcados con fósforo-32 o con cromo-51, con una actividad de 100 000 unidades, y transcurridos 15 minutos aproximadamente comprobamos que 1 miligramo de hematíes contiene 50 unidades de actividad, podemos afirmar que los hematíes marcados quedaron diluidos en 2 litros de hematíes. Tenemos así que el contenido eritrocítico de la sangre en circulación asciende a 2 litros.

Como es más conveniente determinar sólo la concentración de hemoglobina de la sangre, es este valor y no el contenido total de hemoglobina de la sangre lo que se mide. En el Laboratorio Donner de la Universidad de Berkeley se miden, en cada caso, el volumen eritrocítico y la concentración hemoglobínica, esta última por marcación con fósforo-32. De esta forma puede determinarse, en cada caso, el contenido total de hemoglobina. Para esta determinación pueden emplearse también hematíes marcados con cromo-51. Cuando se quiere averiguar el volumen plasmático, generalmente se inyecta una cantidad determinada de albúmina marcada con yodo, de actividad conocida, y se mide la dilución indicada por la actividad de la albúmina marcada. Como puede verse, también en este caso es útil el método de la dilución isotópica.

## ANALISIS POR ACTIVACION

Hemos examinado algunos ejemplos del empleo de indicadores radiactivos en química analítica, en los que se hizo uso de indicadores que se encuentran en la Naturaleza o que se obtienen por bombardeo neutrónico o incluso en un ciclotrón. Veamos ahora un ejemplo en el que el indicador se produce *in situ* en la muestra sometida a bombardeo neutrónico. Los primeros análisis por activación se hicieron con elementos de las tierras raras obtenidos por Auer von Welsbach, única persona que, antes de la segunda Guerra Mundial, poseía muestras puras de todos los elementos de las tierras raras. Auer von Welsbach se interesaba por mis estudios sobre el hafnio y me invitó varias veces a pasar unos días con él en su castillo de Carintia. Los subproductos de la fabricación de camisas Auer para mecheros y de las aleaciones

de cerio y hierro utilizadas para encender cigarrillos contenían grandes cantidades de distintos elementos de las tierras raras. Las primeras fases del proceso de purificación de las tierras raras se llevaban a cabo en la fábrica que Auer tenía en Treibach, cerca de su castillo. El propio Auer se encargaba de las fases subsiguientes del proceso de purificación y cristalizaba los sulfatos dobles de los elementos de las tierras raras. Cada vez que le hacía una visita, Auer von Welsbach me regalaba pequeñas cantidades de todos esos elementos. Un día me dijo que quería regalarme una buena cantidad de uno de los elementos, el que yo quisiese. Sin saber realmente por qué, elegí el disprosio. Cuando Frédéric Joliot e Irène Curie descubrieron la radiactividad artificial, sometí el disprosio que me había regalado Auer a un flujo neutrónico emitido por una mezcla de 600 miligramos de radio, 400 milicurios de radón y algo de berilio. El disprosio irradiado se hizo fuertemente radiactivo, pues el disprosio es el elemento que adquiere la radiactividad artificial más intensa. Esta observación me indujo a determinar la cantidad de disprosio contenido en una muestra de itrio; para ello expuse la muestra a un flujo de neutrones, y este fue el primer análisis por activación. Por aquella misma época, el Profesor Luigi Rolla, de la Universidad de Florencia, me preguntó si podía determinar si dos kilogramos de óxido de gadolinio que había preparado contenían europio. Nosotros solíamos ensayar las muestras de Rolla por espectroscopia de rayos X, pero entonces no teníamos preparado ningún espectroscopio de ese tipo y decidí someter la muestra a un análisis por activación. Envolvimos en película de cuarzo 50 miligramos de sus diversas muestras de gadolinio, y las colocamos simétricamente en un bloque de parafina en cuyo centro se hallaba la fuente neutrónica. La intensidad de la fuente sólo producía una ligera actividad en el gadolinio, y fueron los átomos de europio los que principalmente capturaron neutrones y formaron isótopos activos del europio. Para obtener resultados cuantitativos irradiamos el óxido de gadolinio de Auer, añadiéndole cantidades conocidas de europio puro igualmente procedente de Auer, al mismo tiempo que las muestras de Rolla. Todas las muestras se dispusieron a la misma distancia de la fuente neutrónica. En el Cuadro I se indican los resultados del análisis de las muestras de Rolla: la más rica contenía un 0,4 por ciento de óxido de europio, y la más pobre un 0,96 por ciento.

El flujo neutrónico que empleábamos no era suficiente para producir una cantidad importante de gadolinio marcado, ya que sólo el 22 por ciento del elemento se transforma en uno de sus radioisótopos (el  $^{159}\text{Gd}$ ); el 78 por ciento restante se convierte en isótopos más pesados del gadolinio, los cuales son estables. La capacidad de absorción de los núcleos del gadolinio-158 es sólo la quincuagésima parte de la del europio-151. Por aquella misma época, Seaborg demostró con el análisis por activación la presencia de 6 partes por millón de galio en el hierro empleando el potente haz de deuterones del ciclotrón de Berkeley.

En tanto que en el primer análisis por activación del europio, hecho en 1938, sólo se pudieron determinar con nuestra fuente neutrónica unos 0,01 miligramos, en 1954 pudimos medir  $2 \times 10^{-4}$  miligramos sometiendo las muestras a un flujo de  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>s en un reactor de uranio.

### CUADRO I\*

(La muestra «patrón» es de  $Gd_2O_3$  puro al que se ha añadido un 2 por ciento de  $Eu_2O_3$ . Las muestras 1 a 4 corresponden a las distintas etapas del proceso de purificación realizado por el Profesor Rolla)

Muestras	Cuentas/min
«Patrón»	<b>125</b>
1	<b>60</b>
2	<b>60</b>
3	<b>30</b>
4	<b>25</b>

\* G. de Hevesy y H. Levi : «Artificial Activity of Hafnium and Some Other Elements» Kgl. Danske Vid. Sels. Math-fys. Medd. 15, 11 (1938).

### CUADRO II

Elemento	Número de masa del isótopo producido	Cantidad mínima determinada	
		después de 1 día de exposición	después de alcanzarse la saturación
Na	<b>24</b>	$4 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$
P	<b>32</b>	$3 \times 10^8$	$7 \times 10^{10}$
K	<b>42</b>	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
Fe	<b>59</b>	$1 \times 10^5$	$3 \times 10^7$
As	<b>76</b>	$2 \times 10^{10}$	$9 \times 10^{11}$
Sr	81	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^8$
Ag	108	$2 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{11}$
I	128	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$
La	140	$3 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$
Eu	152	$2 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{12}$
Dy	165	$1 \times 10^{12}$	$1 \times 10^{12}$
Yb	175	$2 \times 10^{10}$	$4 \times 10^{11}$
Au	198	$4 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{11}$
Bi	210	$4 \times 10^7$	$5 \times 10^8$

En el Cuadro II se indican las cantidades mínimas de algunos elementos que pueden determinarse sometiendo la muestra a un flujo de  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>s; se da la cantidad mínima después de un día de exposición y después de alcanzarse la saturación.

La utilidad del análisis por activación ha quedado demostrada en muchos casos. Un ejemplo clásico lo tenemos cuando se trata de decidir si un caso fatal de envenenamiento con arsénico tuvo o no origen crónico. El arsénico se localiza especialmente en los cabellos; si se someten al análisis por activación las distintas partes de la hebra del pelo, se verá que todas son radiactivas cuando se trate de un envenenamiento crónico, en tanto que, de deberse el envenenamiento a una sola dosis fuerte, sólo será radiactiva una parte de la hebra: la que haya crecido entre el momento de administrarse el arsénico a la víctima y su fallecimiento.

Cuando sólo se transforma en radioisótopos una pequeña parte de los isótopos de un elemento, como ocurre por ejemplo en el caso del gadolinio, quizá convenga emplear un método de absorción en lugar del análisis por activación. Así, si deseamos conocer la cantidad de gadolinio contenida en una muestra de óxido de europio, prepararemos patrones de óxido puro de europio que contengan un 1 por ciento, un 5 por ciento, etc., de óxido de gadolinio, y compararemos la absorción de un haz neutrónico en esas muestras y en la que tengamos que analizar.

Las aplicaciones de los indicadores radiactivos en química analítica son muchas y muy diversas. Me he limitado aquí a mencionar únicamente algunas de ellas, en particular aquellas de cuya introducción he sido testigo.