

Cómo funciona el cuerpo humano

Tomografía por emisión de positrones

La tomografía por emisión de positrones es una poderosa herramienta para estudiar parámetros funcionales en el cuerpo humano, como especificar la ubicación de neuroreceptores o hacer “mapeos” de las funciones cerebrales.

Mercedes Rodríguez Villafuerte
y Miguel Ángel Ávila Rodríguez

Con el avance de la tecnología, se han desarrollado paulatinamente sistemas de imagenología (obtención de imágenes) más complejos, que utilizan rayos X como fuente de radiación, tales como la angiografía digital, que permite la visualización de arterias o venas del sistema circulatorio, o la tomografía axial computarizada, que produce imágenes de secciones pla-

INTRODUCCIÓN

La medicina nuclear molecular es una especialidad médica relativamente nueva comparada con las que utilizan rayos X para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades. La radiografía convencional fue la primera técnica no invasiva, desarrollada después del descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen en 1895 (Röntgen, 1895), para obtener imágenes bidimensionales del interior del cuerpo humano. Este desarrollo representó en su momento un gran avance en el campo de la medicina. Esta técnica proporciona información sobre la anatomía del cuerpo humano, y es útil en situaciones muy diversas, como la visualización de fracturas en huesos o la detección de tuberculosis pulmonar.

nas del cuerpo, conocidas como *imágenes tomográficas*.

La principal característica de estas técnicas de diagnóstico consiste en que pueden detectar cambios anatómicos o estructurales producidos por ciertas enfermedades. Sin embargo, las enfermedades también pueden alterar los procesos metabólicos y funcionales de los tejidos y órganos, y estos cambios pueden ocurrir antes de que se presenten modificaciones anatómicas detectables. Estas alteraciones funcionales no pueden ser detectadas con las técnicas tradicionales ya mencionadas.

El descubrimiento de la radiactividad natural a principios de 1896, por Henri Becquerel, y el trabajo posterior realizado por Pierre y Marie Curie, dieron lugar a otra aplicación importante de las radiaciones en la medicina. El uso inmediato de fuentes radiactivas se limitó al tratamiento y control de enfermedades porque los elementos radiactivos descubiertos no eran adecuados para ser utilizados en el diagnóstico. La medicina nuclear molecular, como se conoce hoy en día, es decir, la especialidad médica en que se hace uso de fuentes radiactivas para

el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, se desarrolló plenamente después de la segunda Guerra Mundial, una vez que fue posible producir artificialmente elementos radiactivos en cantidades suficientes y con las características adecuadas para poder ser utilizados ampliamente en la medicina.

Existen diferentes modalidades de la medicina nuclear molecular para el diagnóstico de enfermedades. Su denominador común es su potencial científico para estudiar los procesos metabólicos o funcionales de tejidos u órganos del cuerpo humano. La tomografía por emisión de positrones (conocida también como PET, *positron emission tomography*) es una modalidad de la medicina nuclear molecular que utiliza elementos radiactivos que emiten positrones para obtener imágenes bidimensionales y tridimensionales de la distribución de moléculas radiactivas dentro del cuerpo humano.

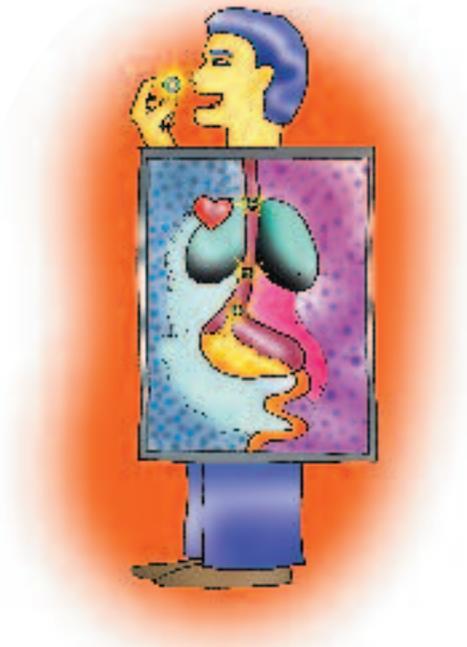
El positrón es la antipartícula del electrón: tiene la misma masa y su carga eléctrica es igual, pero con signo positivo. El potencial que ofrece la tomografía por emisión de positrones es muy grande, ya que permite estudiar procesos bioquímicos y funcionales del cuerpo humano, y hace posible detectar cambios tempranos en la fisiología producidos por alguna enfermedad, aun antes de que se presenten los primeros síntomas o de que aparezcan alteraciones anatómicas. Algunas de las virtudes de la tomografía por emisión de positrones son su facultad para medir el flujo sanguíneo, el metabolismo del oxígeno, la síntesis de proteínas, la actividad enzimática, el metabolismo de glucosa y la densidad de receptores, y para caracterizar enfermedades a nivel molecular, entre otras.

En este artículo se revisarán los conceptos físicos asociados a la tomografía por emisión de positrones, así como sus aplicaciones para el diagnóstico de enfermedades.

UN POCO DE HISTORIA

La tomografía por emisión de positrones se desarrolló gracias a una serie de acontecimientos históricos importantes ocurridos desde finales del siglo XIX. Como ya se mencionó, el descubrimiento de la radiactividad natural fue el primer gran paso para el surgimiento de la aplicación de fuentes radiactivas en la medicina. Sin embargo, el positrón no aparece en esta historia sino hasta 1928, cuando Paul Dirac predijo en un trabajo teórico la existencia de esta partícula. La primera observación experimental del positrón fue reportada por Carl David Anderson en 1932 (Anderson, 1932). Casi dos décadas después del trabajo de Anderson, Wrenn y colaboradores publicaron en 1951 el pri-

mer



estu-

La tomografía por emisión de positrones permite estudiar procesos bioquímicos y funcionales del cuerpo humano

mo en el que se utilizaron elementos radiactivos que emitían positrones, y mencionaban la posibilidad de utilizarlos en medicina (Wrenn *et al.*, 1951). Estos investigadores mostraron la capacidad que representaba el uso de emisores de positrones, pero su aplicación se limitaba a la producción de imágenes bidimensionales, sin producir aún imágenes tomográficas. Las herramientas matemáticas para producir este tipo de imágenes existían desde tiempo atrás, pues los algoritmos matemáticos para la reconstrucción de imágenes tomográficas fueron desarrollados en 1917 por Johann Radon

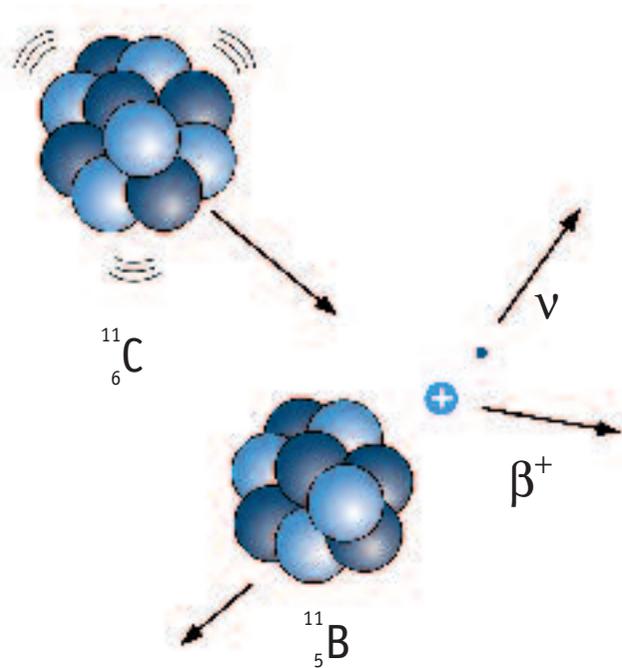


Figura 1. Proceso del decaimiento del carbono-11, el cual se transforma en boro-11 mediante la emisión de un positrón y de un neutrino.

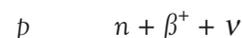
Cuando el átomo tiene exceso de energía, ésta se libera a través de procesos conocidos como decaimientos radiactivos

(Radon, 1917). El año de 1971 marcó indudablemente un gran acontecimiento en la historia de la medicina, pues fue cuando se realizó el primer estudio clínico con tomografía axial computarizada en el hospital Atkinson Morley, en Inglaterra (Webb, 1990). El anuncio oficial del primer escáner comercial de tomografía axial computarizada se hizo en el Instituto Británico de Radiología un año después (Hounsfield, 1973). El desarrollo de la tomografía por emisión de positrones se trasladó enormemente con el de la tomografía axial computarizada, y no es sorprendente que esta técnica haya aparecido, como la conocemos hoy, en 1974 y fuera reportada un año después (Phelps *et al.*, 1975). La aparición casi simultánea de estas técnicas de diagnóstico se debe en gran parte a los avances tecnológicos de la época: la posibilidad de utilizar computadoras suficientemente rápidas para el almacenamiento y procesamiento de los datos, así como para la reconstrucción de las imágenes tomográficas, fue el punto clave para su desarrollo.

¿QUÉ ES EL DECAIMIENTO β^+ ?

Toda la materia está constituida por átomos. Cada átomo consta de un núcleo muy denso de aproximadamente una billonésima de milímetro (10^{-15} metros) de radio y una “nube” de electrones que viajan en órbitas alrededor del núcleo, con radios de aproximadamente una diezmilésima de milímetro (10^{-10} metros). Los núcleos atómicos están formados a su vez de protones y neutrones. Todos los elementos del átomo están en movimiento continuo, dando lugar a que existan diferentes niveles de energía permitidos. Todos los átomos tienden a mantenerse en su estado de mínima energía.

Cuando el átomo tiene exceso de energía, ésta es liberada a través de procesos conocidos como *decaimientos radiactivos*. El decaimiento β^+ , también llamado decaimiento por emisión de positrones, es un proceso en el cual el núcleo emite un positrón y una partícula neutra conocida como *neutrino*. Este decaimiento puede entenderse fácilmente en términos de la transformación de un protón (p) del núcleo en un neutrón (n) más un positrón (β^+) y un neutrino (ν), en cuyo caso se puede escribir la siguiente reacción: \rightarrow



El decaimiento radiactivo libera energía, que se utiliza para poner en movimiento al positrón y al neutrino. Los núcleos inestables con exceso de protones decaen comúnmente por emisión de positrones. En este proceso, la carga neta del núcleo disminuye, pues pierde un protón. Uno de estos ejemplos se muestra en la Figura 1.

PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS RADIATIVOS EMISORES DE POSITRONES

Crear un elemento radiactivo significa, en general, transformar el núcleo de un elemento estable en otro núcleo inestable, a través de un proceso de “bombardeo” con partículas pesadas como neutrones o protones. El núcleo puede absorber la partícula incidente y emitir su exceso de energía como radiación electromagnética, o como neutrones, protones o partículas más pesadas. Para producir tales reacciones con partículas cargadas, es necesario acelerar las partículas incidentes a altas velocidades para superar la fuerza de repulsión eléctrica con que el núcleo las repele.

Los positrones pueden provenir de distintas fuentes. Sin embargo, en tomografía por emisión de positrones generalmente son producto del decaimiento radiactivo de un elemento radiactivo. Los elementos radiactivos que emiten positrones son comúnmente producidos en aceleradores de partículas llamados *ciclotrones*, bombardeando núcleos estables con protones. Por ejemplo, el emisor de positrones flúor-18 (compuesto por 9 protones y 9 neutrones, y representado como ^{18}F) se obtiene bombardeando el núcleo de oxígeno-18 (compuesto de 8 protones y 10 neutrones, ^{18}O) con un haz de protones. El oxígeno-18 captura un protón y emite un neutrón, convirtiéndose en flúor-18. Este proceso se puede representar de la siguiente manera:



En la Tabla 1 se presentan algunas de las propiedades de los elementos radiactivos más importantes que se utilizan en tomografía por emisión de positrones. Como

Uno de los radiofármacos más importantes en tomografía por emisión de positrones es la fluorodeoxiglucosa

puede apreciarse, el tiempo promedio requerido para que la cantidad de una muestra radiactiva disminuya a la mitad (es decir, la *vida media*) de los elementos radiactivos emisores de positrones puede ser desde minutos hasta horas, por lo que es imprescindible realizar los estudios en la cercanía de un ciclotrón.

PRODUCCIÓN DEL RADIOFÁRMACO

Una vez producido, el elemento radiactivo se une a un compuesto químico o molécula que sea afín a cierto tejido. Pueden usarse compuestos similares a la glucosa, al agua, al amoníaco y a ciertas drogas. Al proceso de unir el elemento radiactivo al compuesto se le deno-

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS RADIATIVOS EMISORES DE POSITRONES MÁS UTILIZADOS EN TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES

Radionúclido	Vida media (minutos)	Energía promedio (MeV*)	Alcance promedio en agua (mm)
^{11}C	20.4	0.39	1.1
^{13}N	9.96	0.49	1.5
^{15}O	2.05	0.74	2.5
^{18}F	109.8	0.25	0.6

*El electrón-volt, eV, es una unidad de energía y se define como aquella que adquiere un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un volt, en el vacío. Por comparación, la luz tiene asociada una energía de aproximadamente 4 eV. Un MeV es un millón de electrón-volts.

Las células cancerosas consumen más glucosa que las células normales

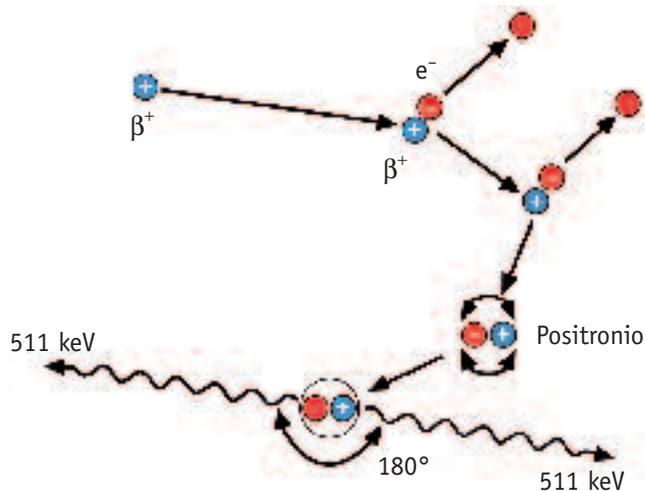


Figura 2. Cuando viaja un positrón, pierde energía en el medio hasta que se encuentra con un electrón libre, éste se aniquila y produce dos fotones.

mina “marcado”, ya que al compuesto se le añade una “etiqueta”. El compuesto químico marcado también es conocido como “radiofármaco” o “radiomolécula”. Como puede verse en la Tabla 1, se listan núcleos radiactivos del carbono, del nitrógeno y del oxígeno, así como del flúor. Cualquier molécula de interés biológico puede ser potencialmente marcada utilizando uno de estos elementos radiactivos, sin alterar sus propiedades químicas. En esto radica la capacidad de la tomografía por emisión de positrones para estudiar las propiedades metabólicas del cuerpo humano.

Uno de los radiofármacos más importantes que se utilizan en tomografía por emisión de positrones es la fluorodeoxiglucosa, es decir glucosa marcada con flúor-18. La estructura de la fluorodeoxiglucosa es similar a la de la glucosa, el azúcar que es el combustible más común de las células, lo cual permite que sea utilizada para identificar tejidos que están consumiendo más energía que otros. Una vez inyectada, la fluorodeoxiglucosa se distribuye por todas las células del organismo, pero se concentra donde el metabolismo celular esté aumentado. Este hecho permite estudiar cualquier órgano o tejido con aumento de metabolismo de glucosa, sea normal, como el cerebro, o patológico, como los tumores, ya que las células cancerosas consumen más glucosa que las células normales. La fluorodeoxiglucosa se usa para hacer estudios fisiológicos muy variados, por ejemplo, de memoria o de percepción, así como para detectar y diagnosticar varios tipos de tumores y otros tipos de enfermedades del cerebro u otras partes del cuerpo.

LA ANIQUILACIÓN DEL POSITRÓN

Como ya se mencionó previamente, el positrón es la antipartícula del electrón, tiene la misma masa y su carga eléctrica es igual, pero con signo positivo. Cuando el positrón es emitido, pierde energía en el medio, hasta que finalmente se encuentra con algún electrón libre y forma un sistema parecido al átomo de hidrógeno, denominado *positronio*. A continuación, el positronio se aniquila y se convierte en dos fotones con energías de 511 keV que viajan en sentidos opuestos, como se muestra en la Figura 2.

Si estos fotones son detectados en un intervalo de tiempo de

aproximadamente 9 nanosegundos (es decir ¡9 milmillonésimas de segundo!) se puede determinar la última posición del positrón dentro del paciente antes de su aniquilación. Dado que el intervalo de tiempo utilizado es extremadamente pequeño, se dice que la detección ocurre “en coincidencia”. Este proceso es la base de la tomografía por emisión de positrones para conocer la distribución del radiofármaco dentro del paciente. La Figura 3 muestra la geometría que se utiliza en el escáner de tomografía por emisión de positrones para la detección en coincidencia.

Una característica importante de los positrones emitidos es que su energía debe ser pequeña, para que no recorran una distancia grande dentro del medio antes de aniquilarse. El objetivo de la tomografía por emisión de positrones consiste en proporcionar información sobre la concentración y distribución espacial del radiofármaco en los tejidos. Esto significa determinar el sitio en donde ocurrieron los decaimientos, lo cual se hace indirectamente al determinar las posiciones en que ocurrieron las aniquilaciones. Si los positrones recorren una distancia grande antes de aniquilarse, puede haber una separación importante entre el sitio de decaimiento y el de aniquilación, lo cual afecta la posibilidad de obtener información relevante de la imagen reconstruida. La distancia común que recorren los positrones antes de aniquilarse se conoce como *alcance promedio*, el cual depende de su energía, y suele ser de unos cuantos milímetros (véase la Tabla 1).

EL SISTEMA DE DETECCIÓN

El sistema de detección, representado en la Figura 4, consiste en un conjunto de cristales centelladores acoplados a tubos fotomultiplicadores. Los elementos cristal-tubo fotomultiplicador se acomodan formando anillos, como se muestra en la Figura 3. Los cristales convierten la energía depositada por los fotones de 511 keV en luz, y esta luz es convertida a su vez en una señal eléctrica por los fotomultiplicadores, al mismo tiempo que es amplificada hasta un millón de veces.

Posteriormente, esta señal es procesada por un sistema electrónico muy complejo y enviada a una computadora para su procesamiento posterior. Las señales generadas por cristales opuestos son aceptadas

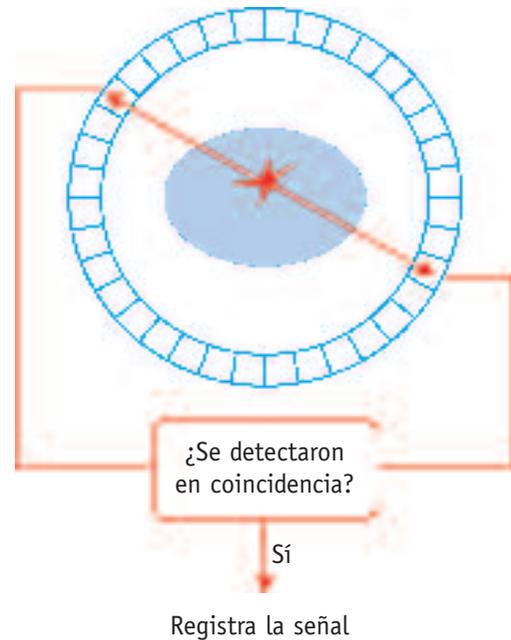
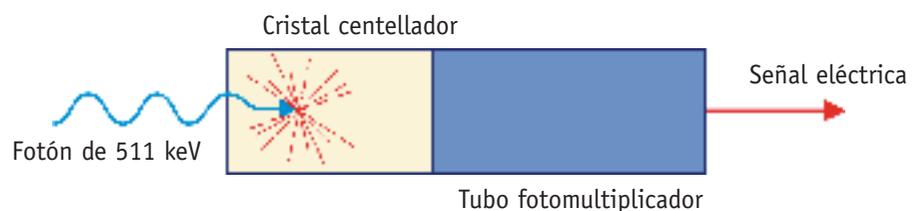


Figura 3. Detección en coincidencia de los fotones de aniquilación.

La distancia común que recorren los positrones antes de aniquilarse se conoce como *alcance promedio*

Figura 4. Elementos básicos del sistema de detección de tomografía por emisión de positrones.

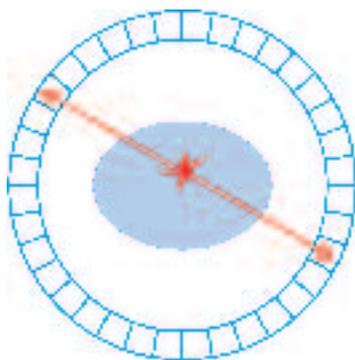


como “verdaderas” sólo si se detectan en coincidencia.

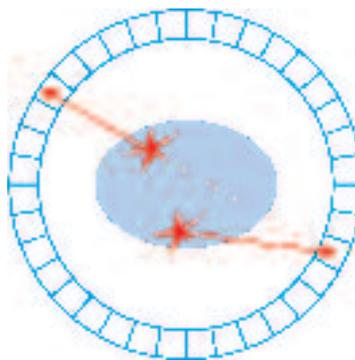
Con un escáner de tomografía por emisión de positrones se deben detectar tantos pares de fotones de 511 keV como sea posible, y al mismo tiempo discriminar las coincidencias aleatorias (fotones provenientes de dos aniquilaciones en lugares diferentes detectados en coincidencia, Figura 5b), o de dispersión (fotones dispersados en el paciente, cambiaron

su dirección y energía, y se detectaron en coincidencia, Figura 5c) (Cherry, 1994). Los diferentes tipos de coincidencias se presentan en la Figura 5. El sistema de detección también debe ser capaz de: a) localizar con muy alta precisión la posición en donde ocurrió la aniquilación, para poder distinguir objetos muy pequeños (es decir, asegurar una alta resolución), b) tener alta capacidad de conteo, para obtener imágenes de alta calidad en poco tiempo, y c) utilizar una cantidad de radiofármaco lo más pequeña posible.

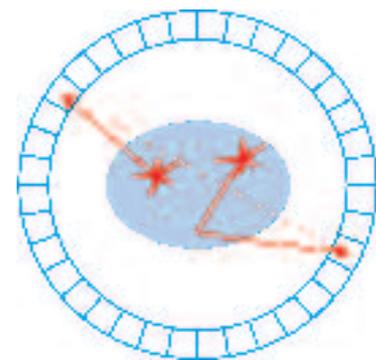
Finalmente, todo el sistema del escáner tiene que estar con-



a. Coincidencias verdaderas



b. Coincidencias aleatorias



c. Coincidencias de dispersión

Figura 5. Diferentes tipos de coincidencias que pueden producir una señal si el par de fotones llega a los detectores dentro de la ventana de coincidencia.

Un escáner para tomografía por emisión de positrones puede tener cerca de 18 mil cristales acomodados alrededor de un cilindro

trolado por una computadora, la cual también almacena los datos registrados y los procesa para reconstruir la imagen. Los algoritmos de reconstrucción para producir imágenes tomográficas pueden ser muy complejos. Los más novedosos realizan la reconstrucción en tres dimensiones, pero normalmente requieren tiempos mucho más largos que los que generan imágenes bidimensionales.

En términos más técnicos, se dice que un buen escáner de tomografía por emisión de positrones debe cumplir las siguientes características (Moses *et al.*, 1994): a) detectar fotones de 511 keV con una eficacia de más del 85%, b) distinguir objetos de por lo menos 5 mm de tamaño, c) poder registrar fotones individuales que arriben al cristal con diferencias de por lo menos 4 microsegundos, d) distinguir fotones de diferente energía para poder rechazar las señales de los que se dispersaron en el paciente, y e) ser barato.

Actualmente, un escáner para tomografía por emisión de positrones puede tener cerca de 18 mil cristales acomodados alrededor de un cilindro. Se pueden monitorear simultánea-

mente hasta 30 millones de líneas de coincidencia en un campo de vista de 80 cm de diámetro y 15 cm de altura, y también se pueden producir entre 30 y 60 imágenes tomográficas al mismo tiempo con una resolución espacial de entre 4 y 5 milímetros.

LA TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES, EN RESUMEN

Una vez que hemos descrito los fundamentos y los componentes de la tomografía por emisión de positrones, podemos resumir los pasos para obtener la imagen tomográfica, que se muestran en la Figura 6 y se enumeran a continuación:

1. Se produce un elemento radiactivo emisor de positrones en un ciclotrón o en un generador.
2. El elemento radiactivo producido se une a un compuesto químico para producir una radiomolécula.
3. Se administra una dosis apropiada de la radiomolécula al paciente, ya sea por inyección o por inhalación.
4. Una vez que la radiomolécula se ha concentrado en la región que se quiere estudiar, se recaban los datos en el escáner o en la cámara de tomografía por emisión de positrones.
5. Se aplican algoritmos matemáticos a los datos adquiridos para reconstruir las imágenes tomográficas.
6. Finalmente, se interpretan los resultados bidimensionales o tridimensionales que fueron procesados.

APLICACIONES CLÍNICAS

La tomografía por emisión de positrones se ha utilizado como una poderosa herramienta de investigación para estudiar parámetros funcionales en el cuerpo humano, por ejemplo, para cuantificar o especificar la ubicación de neurorreceptores o para hacer “mapeos” de las funciones cerebrales. Actualmente,

Áreas de la medicina más beneficiadas con la tomografía por emisión de positrones: oncología, neurología y cardiología

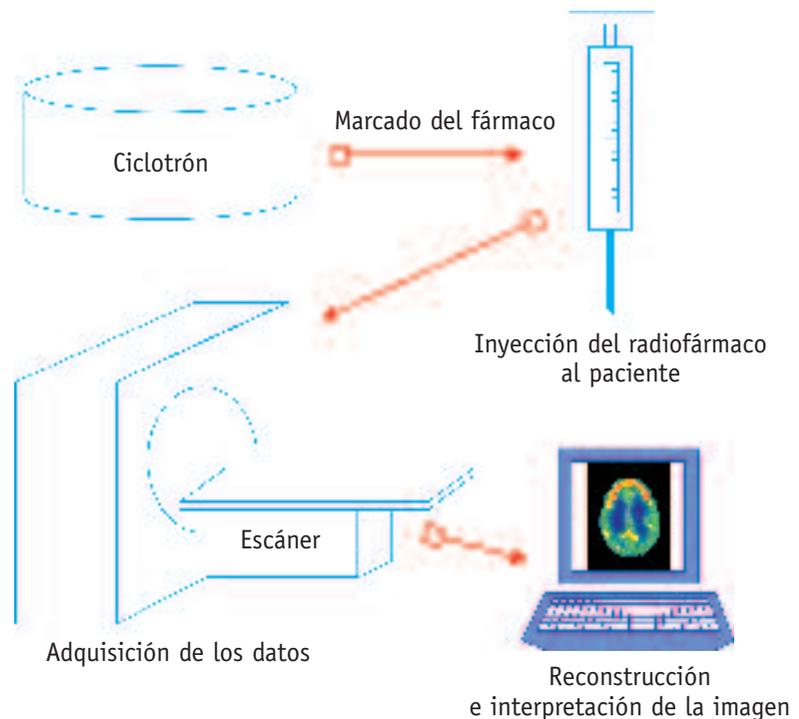


Figura 6. Pasos por seguir en la tomografía por emisión de positrones, desde la producción del elemento radiactivo hasta la obtención de la imagen.

El gran avance obtenido en los años más recientes también se debe al desarrollo de algoritmos matemáticos para la fusión de imágenes

la tomografía por emisión de positrones tiene múltiples aplicaciones clínicas y probablemente tendrá muchas más en el futuro. Son tres las áreas de la medicina que se han visto mayormente beneficiadas con la tomografía por emisión de positrones: la oncología, la neurología y la cardiología.

Es importante mencionar que el gran avance obtenido en los años más recientes también se ha debido al desarrollo de algoritmos matemáticos para la fusión de imágenes de diferentes modalidades, por ejemplo, la fusión de imágenes de tomografía axial computarizada o de resonancia magnética con las de tomografía por emisión de positrones. La información que se puede obtener por la fusión de imágenes ha mostrado ser mucho más útil que cada una de las técnicas por separado, ya que de la misma imagen se puede obtener información anató-



Figura 7. Fusión de imágenes de resonancia magnética y tomografía por emisión de positrones. (Cortesía del Centro PET Complutense de Madrid, España.)

mica y metabólica de manera simultánea.

La Figura 7 muestra cortes tomográficos del cerebro obtenidos por resonancia magnética y por tomografía por emisión de positrones, así como la fusión de estas dos últimas, de un paciente con epilepsia. En este ejemplo, la imagen de resonancia magnética es mostrada en una escala convencional de grises, y da información sobre la anatomía del cerebro del paciente. El corte tomográfico logrado con tomografía por emisión de positrones, en el mismo nivel que la imagen de resonancia, muestra el metabolismo de la glucosa en el cerebro de dicho paciente. La imagen se representa en una escala convencional de varios colores, que permite distinguir las áreas del cerebro que captan más radiofármaco (en rojo) de aquellas que captan menos (en azul). La fusión de imágenes ayuda a determinar con precisión qué estructura(s) del cerebro está(n)

funcionando de manera normal y cuál o cuáles de manera anormal. En este paciente se aprecia hipometabolismo anormal en uno de los lóbulos temporales, mientras que la anatomía es normal.

Algunas aplicaciones en el área de la oncología en las que la tomografía por emisión de positrones ha demostrado ser extremadamente útil son la determinación de si un tumor es maligno o benigno, el grado de malignidad, la detección precoz de tumores primarios o de metástasis (tumores secundarios), la valoración de la respuesta de los tratamientos a los tumores (cirugía, radioterapia o quimioterapia) e inclusive la planificación de tratamientos en radioterapia. La Figura 8 muestra imágenes de tomografía por emisión de positrones obtenidas con fluorodeoxiglucosa de un paciente con un tipo de cáncer del sistema linfático (conocido como linfoma) antes y después de un tratamiento médico. En estas imágenes, las regiones oscuras

indican alta concentración de la radiomolécula. Una aplicación muy interesante de la tomografía por emisión de positrones en neurología es el estudio del funcionamiento del cerebro. Con esta técnica ha sido posible determinar qué regiones del cerebro están encargadas de controlar determinado tipo de acción, desde movimientos de los dedos, visualización de colores y formas, percepción de música o hasta la realización de operaciones matemáticas. De esta manera, se ha ampliado nuestro conocimiento de cómo funciona el cerebro humano, la computadora más compleja y elaborada del universo.

En la Figura 9 se muestran imágenes del cerebro obtenidas de un sujeto normal, comparadas con las obtenidas de un sujeto con enfer-

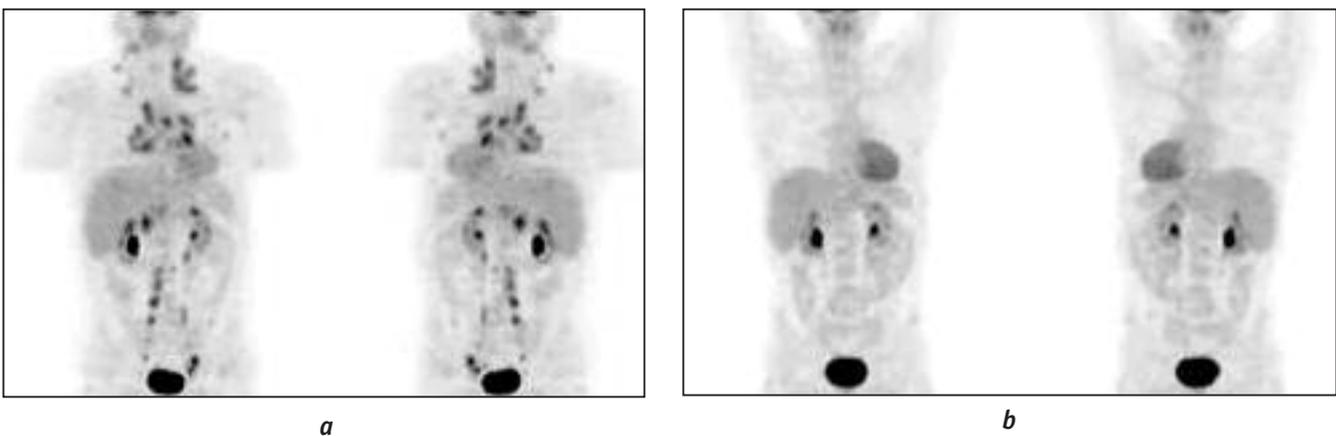


Figura 8. Imágenes de tomografía por emisión de positrones con fluorodeoxiglucosa de un paciente con linfoma, **a.** antes del tratamiento, **b.** después del tratamiento. http://www.cti-pet.com/case_studies/exact/lymphoma.html.

indican alta concentración de la radiomolécula. En la Figura 8a (antes del tratamiento) se puede observar alta concentración de la radiomolécula no sólo en la vejiga, el hígado, el bazo, el corazón y los riñones (lo cual es normal, ya que la radiomolécula se elimina por vía urinaria), sino que también se observa cierta concentración anormal en varios de los ganglios linfáticos abdominales y torácicos. En la Figura 8b puede apreciarse que la concentración anormal de la radiomolécula en los ganglios linfáticos ha desaparecido, lo cual indica que el tratamiento fue exitoso.

En neurología, la tomografía por emisión de positrones se ha utilizado extensivamente para estudiar desórdenes cerebrales vasculares, del movimiento (por ejemplo, Parkinson), demencias (por ejemplo, Alzheimer), epilepsias o inclusive el efecto que causa el abuso de alcohol, la cocaína y otras sustan-

Una aplicación muy interesante de esta técnica en neurología es el estudio del funcionamiento del cerebro

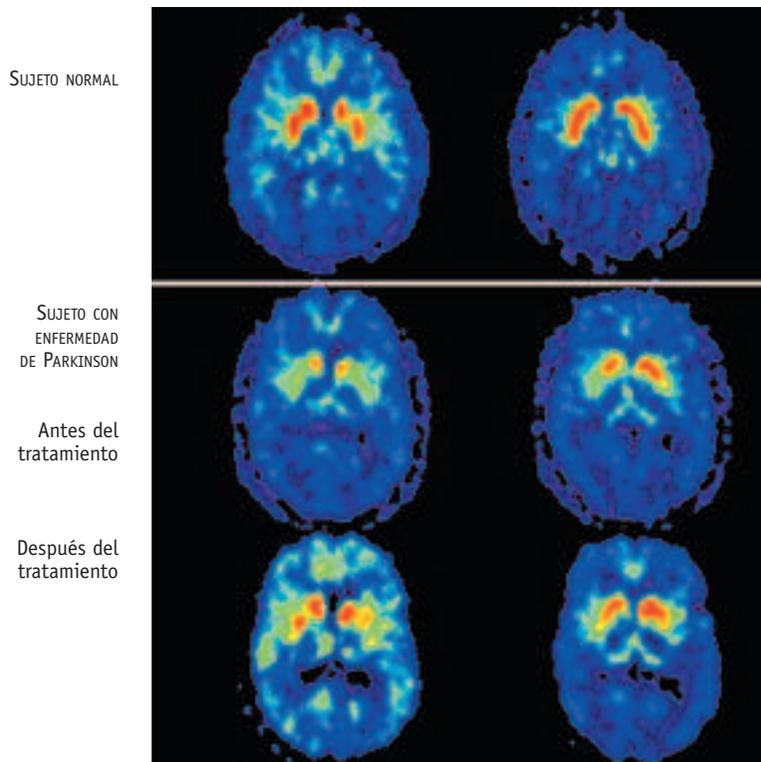


Figura 9. Imágenes de tomografía por emisión de positrones de sujetos sin la enfermedad de Parkinson y con ella. (Cortesía de la Universidad de California, Los Ángeles.)

medad de Parkinson. Allí se puede observar la absorción de fluoro-L-dopa (un precursor de dopamina) en una escala de colores: el color rojo indica mayor absorción, y el azul menor absorción. Sin dopamina, las neuronas no pueden transmitir las señales de control de los movimientos a los centros motores del cerebro. Las imágenes denotan mayor concentración de la radiomolécula en las regiones del cerebro relacionadas con el control de los movimientos motores en el sujeto normal. En las imágenes del sujeto con enfermedad de Parkinson se aprecia baja concentración de la radiomolécula antes de recibir tratamiento, pero resulta evidente que después del tratamiento hay determinado aumento en la captación de dopamina en las regiones cerebrales del mismo paciente.

En cardiología, la tomografía por emisión de positrones se ha utilizado para revelar la existencia de enfermedades coronarias y de anomalías del flujo sanguíneo, así como para cuantificar la extensión de algunas enfermedades cardíacas, determinar la presencia de tejido muer-

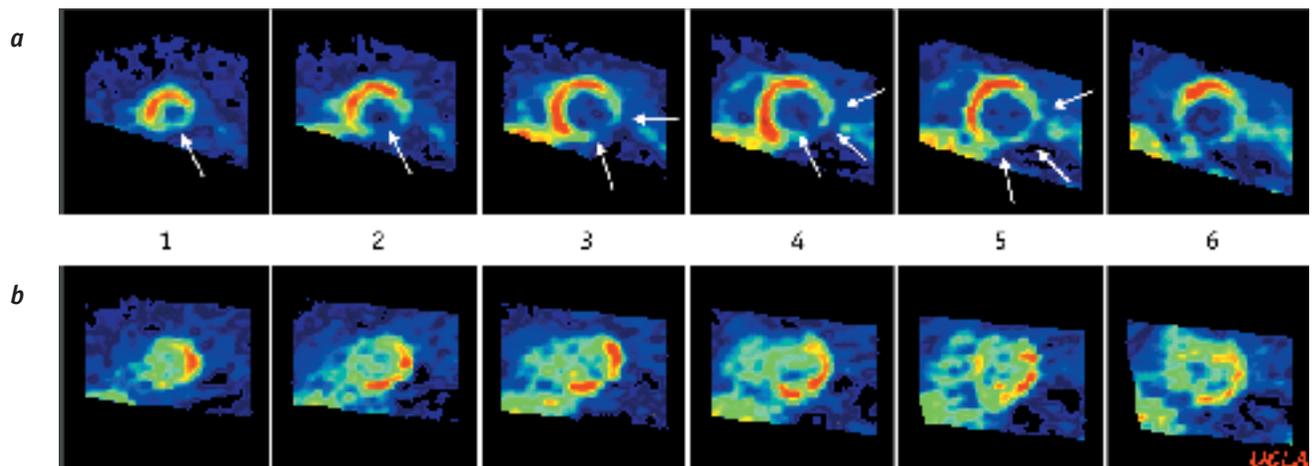


Figura 10. Imágenes tomográficas por emisión de positrones del músculo cardíaco, *a.* estudio de flujo sanguíneo, *b.* estudio metabólico. (Cortesía de la Universidad de California, Los Ángeles.)

to (necrosis) en el músculo cardíaco, e inclusive señalar cuándo es apropiado un trasplante de corazón. La Figura 10 muestra un estudio de tomografía por emisión de positrones de un mismo sujeto, estudio en el que se utilizaron diferentes radiomoléculas para analizar el

flujo sanguíneo y el metabolismo del músculo cardiaco. Esta evaluación revela que el flujo sanguíneo está marcadamente reducido en una gran extensión del corazón (véanse las flechas en las figuras 10a), pero el metabolismo se mantiene (figuras 10b). Ya que el estudio metabólico indica que el músculo cardiaco está aún vivo, para este paciente no es necesario un trasplante de corazón; sin embargo, requiere cirugía para corregir el flujo sanguíneo. Este tipo de valoración es considerada actualmente el “estándar de oro” para seleccionar a los candidatos para trasplante cardiaco.

COMENTARIOS ADICIONALES

Los elementos radiactivos que emiten positrones tienen vidas medias muy cortas, por lo que los estudios de tomografía por emisión de positrones tienen que realizarse en las cercanías de un ciclotrón. Además de esto, el escáner de tomografía por emisión de positrones es un sistema muy complicado que requiere elementos de gran calidad, técnica electrónica muy compleja y algoritmos matemáticos suficientemente precisos y rápidos para la reconstrucción de la imagen, así como un sistema de almacenaje de datos de gran capacidad y confiable eficacia para su acceso. Todo esto hace que los sistemas de tomografía por emisión de positrones (ciclotrón-escáner) sean en la actualidad muy caros, por lo que las aplicaciones en la rutina hospitalaria están claramente concentradas en los países industrializados. Por ejemplo, hay alrededor de 140 centros de tomografía por emisión de positrones en los Estados Unidos, mientras que en Latinoamérica sólo se tienen dos (uno de ellos en la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México).

Por la gran capacidad potencial que representa la tomografía por emisión de positrones, es muy importante que se desarrollen sistemas que sean lo suficientemente baratos, pero de buena calidad, para que mayor número de países y de personas se vean beneficiadas con esta prometedora modalidad de la medicina nuclear molecular.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento al doctor Carlos Martínez Duncker por la cuidadosa lectura de este

manuscrito, así como por sus invaluables sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, C. D. (1932), “The apparent existence of easily deflectable positives”, *Science*, 76, 238.
- Cherry, S. R. (1994), “Recent advances in instrumentation for positron emission tomography”, *Nucl. Instr. Meth.*, A 348, 577-582.
- Hounsfield, G. N. (1973), “Computerized transverse axial scanning (tomography), Part 1: Description of system”, *Br. J. Radiol.*, 46, 1016-1022
- Moses, W. W., S. E. Derenzo y T. F. Budinger (1994), “PET detector modules based on novel detector technologies”, *Nucl. Instr. Meth.*, A 353, 189-194.
- Phelps, M. E., E. J. Hoffman, N. A. Mullani y M. M. Ter-Pogossian (1975), “Application of annihilation coincidence detection to transaxial reconstruction tomography”, *J. Nucl. Med.*, 16, 210-224.

Mercedes Rodríguez Villafuerte obtuvo el doctorado en física por el University College London de la Universidad de Londres, en Inglaterra. Es investigadora en el Instituto de Física, UNAM, cuyos campos de interés son la dosimetría de radiaciones débilmente ionizantes (radiación electromagnética) y altamente ionizantes (partículas cargadas pesadas), aplicación de técnicas Monte Carlo para el transporte de radiación ionizante en materia y sus aplicaciones en física médica. Es una de las primeras personas especializadas en física médica en México.

Miguel Ángel Ávila Rodríguez es maestro en ciencias, por la UNAM, con especialidad en física médica. Sus áreas de interés son la dosimetría de la radiación, la radioterapia en sus diferentes modalidades y la tomografía por emisión de positrones. Actualmente labora en la Unidad PET de la Facultad de Medicina de la UNAM, en el área de producción de radionúclidos emisores de positrones de vida corta para su uso en aplicaciones médicas.

Radon, J. (1917), “Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten”, *Ber. Verh. Sächs. Akad. Wiss.*, 69, 262-277.

Röntgen, W. C. (1895), “Über eine neue Art von Strahlen”, *Sitzungs-Berichte der Physikalisch-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg*, 9, 132-141

Webb, S. (1990), *From the Watching of Shadows: The Origins of Radiological Tomography*, Bristol, Adam Hilger.

Wrenn, F. R., M. L. Good y P. Handler (1951), “The use of positron emitting radioisotopes for the localization of brain tumours”, *Science*, 113, 525-527.