

ORIGINAL BREVE

IMPACTO EN EL ÁMBITO COMUNITARIO DE UNA INSTALACIÓN DE TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES- TOMOGRAFÍA COMPUTADA (PET/CT)

Francisco Cutanda Henríquez (1) y Silvia Vargas Castrillón (2).

(1) Servicio de Medicina Nuclear. Hospital General Universitario Gregorio Marañón.

(2) Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes. CIEMAT. MADRID.

No existen conflictos de interés para ninguno de los autores.

RESUMEN

Fundamento: La técnica de PET/CT (Positron Emission Tomography/Computed Tomography) está actualmente en crecimiento, apareciendo nuevas unidades e indicaciones cada año. Al ser una técnica eminentemente ambulatoria, los pacientes que han terminado la prueba, y que retienen radiofármaco en su cuerpo en un nivel considerado seguro, abandonan la unidad. La instalación de una unidad de PET/CT podría, por tanto, suponer un incremento de riesgo a la población. El objetivo de este trabajo es estudiar este riesgo.

Métodos: Se han realizado medidas exhaustivas en la unidad de PET/CT del Hospital General Universitario Gregorio Marañón, con las que se han elaborado las estimaciones. La población se ha dividido en cinco categorías según su implicación en los estudios y la intensidad de su exposición a la radiación y se ha realizado una estimación cuantitativa de dosis.

Resultados: La dosis de los trabajadores resulta ser inferior a 2 μSv por paciente, la de un acompañante $\sim 20 \mu\text{Sv}$, y la de un familiar $\sim 40 \mu\text{Sv}$. Las dosis de ciudadanos que coinciden con pacientes en la calle o en transporte público resultan inferiores al fondo natural en Madrid.

Conclusiones: Los valores obtenidos están muy por debajo de los límites anuales de dosis. Además, avalan el régimen ambulatorio de estos estudios, por el pequeño riesgo a familiares y acompañantes. El impacto de una unidad de PET/CT no supone incremento de riesgo para la población en general.

Palabras clave: Radiofármacos. Tomografía de Emisión de Positrones. Tomografía por rayos X. Dosificación de radiación. Fluorodesoxiglucosa F18.

ABSTRACT

Impact of a PET/CT Facility in its Community Environment

Background: The PET/CT (Positron Emission Tomography/Computed Tomography) technique is currently expanding, with new facilities and indications appearing every year. Being mostly an outpatient technique, patients leave the facility when the study has been performed, although they still retain a certain amount of radiopharmaceutical. Therefore, setting up a PET/CT facility might involve a risk increase for the population. This study aims at estimating this risk.

Methods: Comprehensive measurements to estimate dose levels have been carried out in the PET/CT facility at Hospital General Universitario Gregorio Marañón. The population has been distributed into five categories according to their involvement in the studies and their radiation exposure. A quantitative dose estimation has been carried out.

Results: The risk associated with a PET/CT facility has been assessed and no risk increase has been detected. Staff dose is shown to be less than 2 μSv per patient, $\sim 20 \mu\text{Sv}$ for an accompanying person and $\sim 40 \mu\text{Sv}$ for a relative. Citizens walking along with patients or sharing public transportation with them receive a dose that is below Madrid's background radiation.

Conclusions: Values obtained are well below annual dose limits. Moreover, these results support the outpatient care of this kind of studies, because accompanying persons' and relatives' risk is negligible. The impact of a PET/CT facility does not involve an increase in risk for the general population.

Keywords: Radiopharmaceuticals. Positron-Emission Tomography. Tomography X-Ray Computed. Radiation dosage. Fluorodeoxyglucose F18.

Francisco Cutanda Henríquez
Servicio de Medicina Nuclear
Hospital General Universitario Gregorio Marañón
Calle Doctor Esquerdo, 46
28007 Madrid
francisco.cutanda@salud.madrid.org

INTRODUCCIÓN

La tomografía por emisión de positrones (PET) es una técnica diagnóstica que permite la obtención de imágenes de la distribución tridimensional de radiofármacos (imágenes de cortes del paciente y reconstrucciones tridimensionales). A diferencia de otras técnicas de medicina nuclear, los radiofármacos utilizados son emisores beta positivos, es decir, de positrones que, aparte de ventajas puramente técnicas, presentan la característica de ser especies atómicas de bajo número atómico, permitiendo el marcaje de moléculas orgánicas básicas para el metabolismo humano, como la glucosa¹. La desventaja consiste en que este tipo de radioisótopos tienen ritmos de desintegración extremadamente rápidos, teniendo que usarse seguidamente a su producción en una unidad de ciclotrón.

La aparición de equipos combinados con tomografía axial de rayos X (CT en inglés) permite crear imágenes fusionadas de valor clínico superior al permitir, por un lado, la corrección por atenuación de las imágenes PET y, por el otro, conjugar información morfológica y funcional en la misma imagen.

La instalación de una unidad de PET/CT se ha convertido en una empresa más simple que en los inicios de la técnica PET, puesto que hoy en día es posible el suministro desde centros de producción de radioisótopos. Los equipos de imagen ya no se instalan junto o cerca de la unidad de producción. De hecho, una unidad de diagnóstico PET/CT puede configurarse como un centro dedicado relativamente pequeño, con atención eminentemente ambulatoria². Desde esta perspectiva, la presencia de la instalación de este equipamiento puede enfocarse sin la consideración de una ubicación hospitalaria, sino como una unidad independiente en cuanto a sus efectos externos, puesto que puede funcionar de una manera eminentemente externa.

A diferencia de otras actividades sanitarias, la medicina nuclear, particularmente la tomografía por emisión de positrones, es creadora de una serie de posibles riesgos externos bien conocidos asociados al uso de isótopos radiactivos^{3,4}. Consideraremos que otro tipo de efectos, como los derivados de residuos sanitarios o posible contaminación biológica, son pequeños y están controlados dentro de la unidad. Es el paciente el origen de los posibles riesgos, al convertirse en un emisor de radiación al serle inyectado el radiofármaco.

Con estos antecedentes, el objetivo de este trabajo consiste en realizar un estudio del riesgo asociado a la presencia de una unidad de diagnóstico por PET/CT.

MATERIAL Y MÉTODOS

El método utilizado consiste en una combinación de determinación experimental de dosis dentro de la unidad de PET/CT más una estimación, sobre parámetros reales basada en los resultados anteriores, de las dosis recibida por los miembros de la población aneja a la unidad, según su implicación en los estudios.

Todas las estimaciones de la tasa de dosis absorbida necesarias para este estudio se han realizado en el servicio de Medicina Nuclear del Hospital General Universitario Gregorio Marañón de Madrid. Se midieron las dosis en puntos de la misma sala o estancias contiguas a aquellas donde se encontraban los pacientes que eran sometidos a los procedimientos. Éstos se realizaron con fludesoxiglucosa marcada con el isótopo 18 del flúor, emisor de positrones, con período de semidesintegración de 110 minutos. La secuencia del estudio es la siguiente: el paciente es informado y preguntado sobre antecedentes y si padece diabetes, tras lo cual se le inserta una vía. Después se le acomoda en una de las dos habitaciones de reposo contiguas a la sala de exploración, donde se le inyecta el radiofármaco, y se le indica que debe des-

cansar acostado durante una hora a media luz. Después se le pide que pase al cuarto de baño y vacíe la vejiga, e inmediatamente pasa a la sala de tratamiento donde se acomoda en la mesa del equipo y se le hace el estudio. El equipo de imagen es un Siemens Biograph 6.

Las dosis de radiofármaco se preparan en un cuarto especial, dentro de un recinto de manipulación protegido, mediante un inyector automático provisto de un activímetro, que extrae del vial proporcionado por la empresa suministradora la cantidad prescrita. La manipulación directa, con jeringa protegida con plomo, ocurre durante la inyección del radiofármaco en la vía.

Las medidas en las proximidades del paciente se repitieron para 50 estudios, durante un período que se prolongó durante seis meses. Se trató de un estudio puramente ambiental, en el que ninguna información clínica es requerida ni se somete al paciente a ningún protocolo de ensayo clínico.

El monitor de radiación y contaminación estándar para estas medidas fue un equipo Lamse M-6020 con una sonda de contaminación CT15 para ser conectada cuando se precise medir contaminación superficial. Se utilizó además un monitor de radiación Thermo SmartION calibrado.

Los sujetos que se han supuesto expuestos a riesgo son:

- Los trabajadores implicados en la práctica. Principalmente son técnicos y enfermeras, y realizan tareas de recepción y preparación del radiofármaco, atención al paciente y operación del equipo PET/CT. Son personal calificado como profesionalmente expuesto a radiaciones.

- Los trabajadores ocasionalmente implicados. En nuestro caso son personal implicado en algunas técnicas como la simulación de tratamientos de radioterapia, en que tie-

nen que cooperar en la colocación del paciente, o técnicos de radiodiagnóstico que ayudan en la colocación de pacientes pediátricos. De hecho, el uso de PET/CT en simulación de radioterapia es cada vez más importante⁵, y también lo es la dosis de profesionales implicados⁶. Son también personal profesionalmente expuesto, pero procede de otros servicios donde los riesgos proceden de radiación externa.

- Los acompañantes: Los pacientes entran sin acompañantes a la unidad de PET/CT, así que en esta categoría se incluye a personas que acompañan al paciente de vuelta desde que sale de la unidad (no hay riesgo a la ida, antes de la administración del radiofármaco). El conductor de una ambulancia podría estar incluido, no así el de un taxi, que no asiste a la persona hasta la puerta del vehículo, e incluso ignora que ha sido sometida a un estudio diagnóstico.

- Convivientes: debido al corto periodo de semidesintegración del ¹⁸F, sólo pueden ser considerados sujetos en riesgo las personas que conviven con el paciente.

- Los viandantes: deberíamos considerar tan sólo aquellos viandantes o usuarios de transporte público que se acercan al paciente durante un tiempo: peatones esperando unos minutos en un semáforo o viajeros durante un trayecto en un vagón de metro o en un autobús.

Siguiendo el criterio de Protección Radiológica, los riesgos del paciente han sido considerados de manera personalizada al prescribirle el estudio, según los criterios de justificación y optimización de la dosis⁷.

Con el fin de hacer la estimación de la dosis equivalente que los diferentes roles pueden acarrear, se procedió a realizar diversas medidas en el servicio de Medicina Nuclear del Hospital General Universitario Gregorio Marañón.

1. Preparación de dosis.
2. Inyección a pacientes.
3. Reposo de pacientes. El punto de medida se encuentra a 50 cm de él.
4. Colocación del paciente. Las medidas se tomaron con el paciente sobre la camilla pero todavía fuera del anillo detector. Se hicieron mediciones en contacto con él y en varios puntos situados a un metro de la superficie de su cuerpo.
5. Paciente al abandonar el centro a un metro de distancia.

Para el personal de la unidad PET/CT se supuso que no realiza rotaciones y que trabajan dos personas por turno (siete pacientes por turno). Las enfermeras están sometidas al riesgo durante el manejo de los pacientes y en la administración del radiofármaco, y los técnicos en la preparación de las dosis y la colocación del paciente en el equipo, no intercambiándose nunca las tareas entre ellos.

Mientras que la dosis de los trabajadores implicados en la práctica ha de estimarse dependiendo del rol que cumplen, se puede concluir que los profesionales ocasionalmente implicados siguen un patrón en el que se encuentran a una distancia de entre cero y un metro del paciente durante cinco minutos, sin ninguna otra participación que involucre riesgo. Su dosis se estima con la tasa de dosis en contacto con el paciente, en el punto en que sea máxima, para hallar el valor correspondiente al peor de los casos.

En el caso de las personas acompañantes, convivientes y viandantes que no están actuando sobre el paciente, se puede postular una distancia mínima de un metro. De hecho, salvo por la desintegración radioactiva, la tasa de dosis en estos colectivos se relaciona con la que el paciente produce a un metro de distancia (en el punto de mayor

tasa) en el momento de disponerse a abandonar la unidad de PET/CT. En efecto, el paciente vació la vejiga antes de entrar a la sala, y por tanto, durante el siguiente período de semidesintegración lo más probable es que el radioisótopo desaparezca según el ritmo dictado por la desintegración radioactiva. Si no fuese así y el paciente orinase con frecuencia (como se le recomienda), el decrecimiento de su actividad será mayor. Por tanto, la dosis que se ha estimado mediante la suposición de decrecimiento físico y no fisiológico de la actividad es una estimación al alza. Si el radioisótopo tuviera una vida más larga y no hubiera habido una primera descarga de actividad por vía urinaria, esta suposición sería demasiado alejada de la realidad.

Por tanto, se puede obtener la dosis para un período de tiempo comprendido entre el momento a y b , integrando la ley de desintegración radiactiva:

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}}$$

(donde e es el número de Euler, base de los logaritmos naturales, T es el periodo de semidesintegración, H la tasa de dosis en el momento t y H_0 la tasa de dosis en el momento inicial de colocación del paciente).

La integral se representaría:

$$H_{ab} = \int_a^b \dot{H}_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}} \cdot dt = \frac{T}{\ln 2} \cdot \dot{H}_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot a}{T}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\ln 2 \cdot (b-a)}{T}} \right]$$

En el caso de los convivientes podemos suponer que el término final de su contacto con el paciente es mucho mayor que el período de semidesintegración. A efectos prácticos, se puede considerar que b es infinito.

$$H_{\infty a} = \frac{T}{\ln 2} \cdot \dot{H}_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot a}{T}}$$

Los intervalos de tiempo utilizados para los diferentes grupos se muestran en la tabla 1. Su comienzo se adelantó lo más posible para dar el caso más desfavorable: el acompañante comienza a estar en contacto con el paciente en el momento en que éste abandona la unidad (tiempo cero) y por mucho que pueda ser exagerado, suponemos que no hay intervalo de tiempo entre la salida de la unidad y el encuentro con los posibles viandantes. Consideramos un espacio mínimo de quince minutos antes de reunirse en su domicilio con sus familiares. En cuanto a los tiempos finales, para el viandante se separó el caso de un encuentro en la acera del que se da en el transporte público. Aunque el segundo implicaría más dosis, no son excluyentes entre sí. Los encuentros con viandantes en la calle duran diez minutos, en transporte público cuarenta y cinco. Los acompañantes posiblemente emplean bastante tiempo junto al paciente, no en vano han acudido para ayudarles, y esto puede ser porque su movilidad sea baja. De modo que suponemos que pasan noventa minutos con ellos, período estimado al alza.

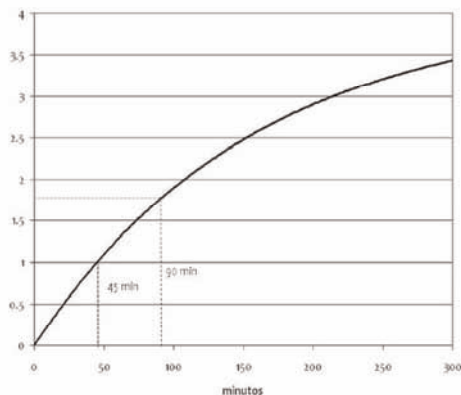
El tiempo asignado a una persona extraña en la calle puede basarse en supuestos razonables, como coincidir durante la espera de un semáforo o incluso dos, lo cual fácilmente suma varios minutos. Sin embargo, los trayectos en transporte público pueden presentar una gama muy variada y no es difícil imaginar que un viajero coincida con el paciente en un transbordo a una línea de autobús o tren de cercanías. Eso sumaría fácilmente hora y media o dos horas de viaje

Tabla 1
Intervalos de tiempo utilizados para el cálculo de la dosis y factores correspondientes

Grupo	<i>a</i> (minutos)	<i>b</i> (minutos)	<i>H₀</i>
Acompañantes	0	90	68,7 <i>H₀</i>
Familiares	15	infinito	144,4 <i>H₀</i>
Viandante (acera)	0	10	9,7 <i>H₀</i>
Viandante (transporte público)	0	45	39,2 <i>H₀</i>

y doblaría el factor en la tabla 1, pero no es razonable considerar un viaje de más de hora y media como representativo del contacto que los miembros de la población tendrán con los pacientes de la instalación. El valor elegido representa un compromiso razonable entre verosimilitud y estimación y, en

Figura 1
Dosis que recibe un usuario de transporte público



El valor está expresado en relación al trayecto de cuarenta y cinco minutos considerado estándar en el texto

cualquier caso, la figura 1 da toda la información sobre cómo se incrementaría la dosis en caso de prolongarse el trayecto.

RESULTADOS

Con los datos expuestos anteriormente y las medidas realizadas se obtienen unas dosis anuales de 3,1 mSv para enfermeras y 3,5 mSv para técnicos. Tomamos la mayor de las dos cifras, puesto que de todos modos están ambas dentro del margen de incertidumbre experimental. Esto significa que los trabajadores implicados en la práctica reciben una dosis de 3,5 mSv al año, o 14 μ Sv en una jornada, en promedio.

Los trabajadores implicados ocasionalmente, que resultarían expuestos durante cinco minutos, teniendo en cuenta la tasa de dosis medida, se expondrían a 2 Sv por

Tabla 2
Estimaciones de dosis recibida por los individuos de cada uno de los grupos en contacto con un paciente sometido a PET/CT

Grupo	Dosis por estudio	Límite anual
Trabajadores de la unidad	14 μ Sv	20.000 μ Sv
Trabajadores ocasionales	2 μ Sv	20.000 μ Sv
Acompañantes	19,6 μ Sv	1.000 μ Sv
Familiares	41,3 μ Sv	1.000 μ Sv
Acompañantes-familiares	45,4 μ Sv	1.000 μ Sv
Viandante (acera)	2,8 μ Sv	1.000 μ Sv
Viandante (transporte público)	11,2 μ Sv	1.000 μ Sv

intervención. Su dosis anual dependería de cómo de ocasional fuera su participación. Alguien que acudiera a estudios de simulación, a razón de cuatro estudios por semana durante todo el año, acumularía 0,4 mSv al año por este motivo, que se añadiría a la dosis recibida en su trabajo ordinario.

Un acompañante, teniendo en cuenta la tasa medida para los pacientes en el momento de disponerse a marchar (0,286 μ Sv/min), recibiría 19,6 μ Sv, un familiar que conviva con el paciente 41,3 μ Sv, un viandante que coincidiera con el paciente por la calle, 2,8 μ Sv y si coincidiera en un trayecto de transporte público 11,2 μ Sv. Si coincide que el acompañante permanece posteriormente en el domicilio del paciente, es decir, si cumple el doble papel de familiar y acompañante, recibiría una dosis de 45,4 Sv. Estos resultados se resumen en la tabla 2.

Es necesario señalar que las medidas de tasa de dosis tienen una incertidumbre asociada, teniendo en cuenta componentes aleatorias de distintos orígenes (diferencias entre pacientes, fluctuación de la señal, etc) y componentes no evaluables por métodos estadísticos (incertidumbre asociados a calibración, etc), de alrededor de un 20%, que se propaga a los demás resultados que se han presentado.

DISCUSIÓN

Los resultados presentados en el apartado anterior para trabajadores están de acuerdo con los límites de dosis legalmente establecidos⁷, lo cual es consistente con el hecho de que la instalación ha sido sometida a los procedimientos normativos de autorización y de inspección y su actividad está protocolizada de modo que los límites no se sobrepasen durante su funcionamiento normal. Las personas estudiadas reciben dosis muy bajas. Las más comprometidas con la práctica, es decir, las personas allegadas al paciente, acompañantes y familiares cercanos, reciben dosis inferiores a los 50 μ Sv, menor que su límite legal y que, por tanto, se considera segura. Esto apoya la prestación ambulatoria de este servicio.

Por otro lado, cabe interesarse por el efecto que puede tener en los ciudadanos que no están interesados en modo alguno en el procedimiento diagnóstico. Resulta muy improbable que una misma persona sea afectada por la proximidad de pacientes sometidos a una exploración con PET/CT varias veces en un mismo año, así que a lo sumo la dosis que podemos asignar a un ciudadano por su vecindad con la unidad de PET/CT sería de unos 33 μ Sv en un año. Siempre que viaje en tres ocasiones en transporte público con un paciente que acaba de hacerse un estudio. Esta dosis es mucho más pequeña que el límite anual de dosis del público, y es infe-

rior a los niveles típicos de radiación natural. La red de estaciones automáticas del Consejo de Seguridad Nuclear dio para el año 2008 el valor medio 0,20 $\mu\text{Sv/h}$ para la radiación gamma ambiental en Madrid⁸. Es por ello por lo que se puede afirmar que la presencia de una unidad de PET/CT no parece crear para la población un riesgo superior al que ya existía en virtud de la radiación natural.

Podemos concluir que el impacto de la unidad de PET/CT es muy pequeño y que, en condiciones normales de funcionamiento, las dosis que se reciben como consecuencia de los estudios no suponen un incremento de riesgo. Además, en comparación con el derivado del fondo de radiación natural, no hay una dosis apreciable para un ciudadano que no esté involucrado en un estudio como paciente, acompañante o familiar.

Debido al constante incremento del uso de técnicas de imagen, la dosis recibida por los pacientes que debe ser tenida en cuenta como elemento de juicio en la justificación de los estudios, ha sido objeto de extensiva consideración en la literatura, particularmente en forma de recomendaciones internacionales^{3,4}. Los trabajadores profesionalmente expuestos están en el mismo caso^{3,4,6}, pero aún no había sido abordado un enfoque desde el punto de vista del impacto comunitario.

AGRADECIMIENTOS

Francisco Cutanda Henríquez desea agradecer a Neil Hartman sus interesantes sugerencias y conversaciones. Silvia Vargas Castañón agradece a José Luis Carreras Delgado y a Alejandro Prensa Martínez haber propiciado las primeras experiencias en PET.

BIBLIOGRAFÍA

1. Muehlelehner G y Karp JS. Positron emission tomography. *Phys Med Biol.* 2006; 51:R117
2. International Atomic Energy Agency. Planning a clinical PET centre. Human Health Series No. 11. Viena:

IAEA; 2010.

3. Leide-Svegborn S. Radiation exposure of patients and personnel from a PET/CT procedure with ¹⁸F-FDG. *Radiat Prot Dosimetry.* 2010; 139:208-13.

4. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection in Newer Imaging Techniques: PET/CT. Safety Reports Series No. 58. Vienna: IAEA; 2008.

5. Lucignani G, Jereczek-Fossa B y Orecchia R. The role of molecular imaging in precision radiation therapy for target definition, treatment planning optimization and quality control. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2004; 31:1059-63.

6. Carson KJ, Young VA, Cosgrove VP, Jarrit PH y Hounsell AR. Personnel radiation dose considerations in the use of an integrated PET-CT scanner for radiotherapy treatment planning. *Br J Radiol.* 2009;89 (983):946-9.

7. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. *Ann ICRP.* 2008; 37:2-4.

8. Consejo de Seguridad Nuclear. Programas de Vigilancia Ambiental. Resultados 2008. Colección Informes Técnicos 23.2009. Madrid: CSN; 2010.