

SPECT/CT: principales aplicaciones en la medicina nuclear

Alejandro Perera Pintado, Leonel A. Torres Aroche, Alex Vergara Gil, Juan F. Batista Cuéllar, Anaís Prats Capote.

Centro de Isótopos, Ave. Monumental y Carretera La Rada, km 3 ½, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.
Centro de Isótopos, Dirección de Investigaciones Clínicas. Calle 34 No. 4501 e/ 45 y 47, Kohly, Playa, La Habana, Cuba.
alejandro.perera@infomed.sld.cu / aperera2004@gmail.com

Resumen

El SPECT/CT ha significado no solo la posibilidad de adquirir las imágenes anatómicas y funcionales en un único estudio, sino una verdadera revolución en el manejo de muchas enfermedades a partir de lo mejor que es capaz de aportar cada una de estas modalidades de imagen. El objetivo del presente trabajo es brindar una panorámica de las principales aplicaciones del SPECT/CT en el campo de la oncología, la cardiología y la neurología. Nuevos avances tecnológicos en el diseño de novedosos detectores de estado sólido y equipos dedicados han mejorado mucho las prestaciones de este tipo de modalidad dual. Esta técnica híbrida ha mostrado que mejora la sensibilidad y la especificidad de los estudios gammagráficos, a la vez que acorta los tiempos de adquisición y brinda imágenes corregidas por atenuación que facilitan el mejor análisis de las mismas. Entre las principales aplicaciones en el estudio de las enfermedades oncológicas se pueden mencionar las siguientes: localización y seguimiento de diferentes tipos de tumores y sus metástasis, así como para la optimización de las dosis en los estudios de radioterapia. Esta técnica ha resultado muy útil en la valoración de la enfermedad de arterias coronarias al permitir una adecuada corrección de la atenuación, determinar el score de calcio y realizar estudios de angio-CT, en dependencia de la calidad de la CT. En el estudio de algunas enfermedades neurológicas también ha ido ganando terreno el SPECT-CT. La incorporación de nuevos avances tecnológicos, así como de novedosos radiofármacos augura un peso cada vez más relevante del SPECT/CT en la práctica clínica.

Palabras clave: medicina nuclear; tomografía de emisión computerizada de fotón único; tomografía computerizada; tratamiento de imágenes.

SPECT/CT: main applications in nuclear medicine

Abstract

SPECT/CT has represented not only the possibility of acquiring anatomical and functional images in one single study, but also a revolution for the clinical management of several diseases, taking the better of each one of these imaging modalities. The present work is aimed at presenting an overview of the most important applications of the SPECT/CT in the field of oncology, cardiology and neurology. New technological advances in the design of innovative solid state detectors and related equipment have had a positive effect on the performance of this kind of dual modality. This hybrid technique improves the sensitivity and the specificity of gammagraphic studies, as well as shortens the acquisition times and gives attenuation correction of co-registered images, which, in turn, makes their analysis easier. Some of the main applications for the study of oncological diseases are the following: localization and follow-up of different kinds of tumors, their metastasis and relapses, as well as the optimization of radiotherapy doses. This technique has been useful to evaluate the coronary artery disease allowing an adequate attenuation correction of images, the determination of calcium score, and performing angio-CT studies, according to the CT quality. SPECT/CT has also gained ground in the assessment of some neurological diseases. Conclusions: The introduction of new technological advances and radiopharmaceuticals thus predicting a more relevant place for SPECT/CT in clinical practice.

Key words: nuclear medicine; single photon emission computed tomography; computerized tomography; image processing.

Introducción

El SPECT/CT ha significado no solo la posibilidad de adquirir las imágenes anatómicas y funcionales en un único estudio, sino una verdadera revolución en la medicina nuclear diagnóstica, a partir de lo mejor que es capaz de aportar cada modalidad de imagen. Esta técnica híbrida ha mostrado que mejora la sensibilidad y la especificidad de los estudios gammagráficos, a la vez que acorta los tiempos de adquisición y brinda imágenes corregidas por atenuación que facilitan el mejor análisis de las mismas [1-5].

Este tipo de estudio ha ido ganando cada vez más aplicaciones en el campo de la oncología, en las imágenes de enfermedades óseas malignas y benignas, en el estudio de los procesos infecciosos, en las imágenes de perfusión miocárdica y en el estudio de algunas enfermedades neurológicas [2, 4-11].

El objetivo del presente trabajo es brindar una panorámica de las principales aplicaciones del SPECT/CT en el campo de la oncología, la cardiología y la neurología.

EQUIPOS SPECT/CT

Desarrollo de los sistemas SPECT/CT comerciales

Las imágenes gammagráficas planas, limitan la detectabilidad de lesiones y la eficacia de estos estudios diagnósticos debido a la superposición de órganos y estructuras que produce una reducción en su contraste y su calidad [1]. No es hasta finales de los años 60 e inicios de los 70 que aparecen en el mercado las modalidades de imágenes tridimensionales, entre las que se encuentran la tomografía axial computarizada (CT, por las siglas en inglés de *Computed Tomography*) y la tomografía por emisión de fotón único (SPECT, por las siglas en inglés de *Single-Photon Emission Computed Tomography*) a partir de la adquisición de un conjunto de vistas planas alrededor de una región del cuerpo, que luego se reconstruían para obtener las imágenes tomográficas [1-3].

El SPECT es una técnica de imagen de medicina nuclear que basa su principio en la detección de los fotones con energías comprendidas entre 59 y 364 keV, los cuales se producen como parte del proceso de desintegración radiactiva del núcleo atómico. Esta modalidad brinda una información funcional valiosa acerca de procesos que ocurren a nivel tisular o celular, a partir de la biodistribución de determinadas moléculas marcadas con radionucleidos emisores de radiación gamma. La elevada sensibilidad de esta técnica permite visualizar concentraciones de sustancias en el orden de 10^{-9} - 10^{-12} moles, lo cual resulta de gran interés en el diagnóstico médico de disímiles patologías [1-3]. Sin embargo, sus mayores limitaciones se deben a que las imágenes obtenidas son ruidosas, de baja resolución espacial (en el rango de ~12 mm para el ^{99m}Tc) y, a veces, con cierto grado de complejidad para su interpretación [1, 4]. La CT, por su parte, proporciona al médico reconstrucciones tridimensionales de la anatomía

del paciente con una elevada resolución espacial [12]. No obstante, sus principales limitaciones están dadas por la imposibilidad de ofrecer información acerca de la actividad funcional o metabólica de los tejidos, lo cual puede conllevar a falsos positivos o falsos negativos en los resultados del estudio [2]. De esta forma, surgió la idea de unir ambas modalidades de imagen con el fin de obtener lo mejor de cada una.

Desde los inicios de los años 80 se identificó el valor potencial de estudios resultantes de la fusión de imágenes anatómicas y funcionales adquiridas de forma independiente y fue el cerebro un órgano pionero en el logro de este objetivo. No obstante, el corregistro de estudios obtenidos por separado plantea serias limitaciones en las regiones no rígidas, como el tórax, abdomen, pelvis, cabeza y cuello debido a la presencia de artefactos por movimiento; además de las diferencias provocadas por la respiración y el posicionamiento del paciente, así como la dificultad para establecer contornos anatómicos apropiados en las imágenes funcionales de tórax y abdomen que permitan correlacionarlas con las referencias de los estudios anatómicos [1, 4].

Paralelamente, se evidenció la utilidad de la CT para contribuir a la corrección de la atenuación presente en los estudios SPECT, que es uno de los factores que más afectan la calidad y cuantificación de estos estudios [1, 4]. Ambas metas, o sea, la disponibilidad de imágenes de fusión con valor diagnóstico adicional y la corrección de atenuación de los estudios SPECT potenciaron el surgimiento de los sistemas híbridos [1, 4].

El primer sistema SPECT/CT fue desarrollado por Hasegawa y cols [6] a fines del siglo pasado y aparece en el mercado comercializado por la firma GE Healthcare desde 1999 bajo el nombre comercial de Infinia Haweye-4 [1, 13]. Hoy día existen, además, otros equipos híbridos de este tipo, que se clasifican de forma general de acuerdo a las posibilidades que ofrece la CT: 1) cámaras con la opción de CT de baja dosis, optimizadas solo para la corrección de la atenuación y la localización anatómica; 2) cámaras con CT de calidad diagnóstica total, que permiten el uso de contrastes, incluso, algunas, la realización de estudios angiográficos [1, 3, 4]. Se pueden señalar, por ejemplo, la cámara Symbia, producida por Siemens, de la cual hay un equipo instalado actualmente en Cuba; la cámara Precedence, de la firma Philips y la cámara AnyScan, de la firma MEDISO SA, de la cual hay dos equipos instalados en Cuba. Todos estos sistemas con sus diferentes opciones de CT multicorte.

Avances futuros

Se prevé que uno de los avances más connotados en el futuro sea la sustitución de los actuales detectores con cristales centellantes de NaI (Tl), por detectores de estado sólido o semiconductores hechos con yoduro de mercurio (HgI_2), con telurio de cadmio (CdTe) o de cadmio-zinc-telurio (CZT) que operen a temperatura ambiente. Una de las características de este tipo de detectores es que los rayos gamma o X generan directamente la imagen digital con una resolución energética adecuada.

da. Además de su sensibilidad, generan imágenes de gran resolución y contraste en lesiones de pequeñas dimensiones, por ejemplo, para la identificación del ganglio centinela y la cirugía radioguiada [13].

Nuevos equipos se están desarrollando en estos momentos en el mundo, algunos ejemplos de ellos son los siguientes:

- **Equipos SPECT órgano dedicados para estudios de perfusión miocárdica.** Recientemente se están desarrollando sistemas híbridos SPECT/CT con nuevos detectores y geometrías de colimadores que mejoran significativamente la eficiencia de detección y la resolución espacial de las imágenes de perfusión miocárdica. Por ejemplo, las cámaras dedicadas desarrolladas por Spectrum Dynamics Ltd. (Caesarea, Israel) y por Cardiac Inc. (Canton, MI), respectivamente, están diseñadas para adquirir los estudios cardíacos tomográficos en solo 2-3 min, mientras que los sistemas SPECT convencionales de doble cabezal requieren entre 10 y 15 min [1].
- **Equipos SPECT/CT con nuevas prestaciones.** Varios fabricantes han introducido en el mercado sistemas que permiten corregir los factores que afectan la calidad de las imágenes (atenuación, dispersión, recuperación de la resolución, etc.), basados en el desarrollo de nuevas opciones para la colección de los datos y el procesamiento de las imágenes. Estos equipos permiten disminuir las dosis a administrar a los pacientes y/o acortar los tiempos de colección de los datos primarios. En los últimos años han aparecido en el mercado opciones revolucionarias como la técnica del IQ-SPECT de SIEMENS o los paquetes de procesamiento de imágenes EVOLUTION, ANTONISH, FLASH-3D y Tera-TOMO de GE, Philips, SIEMENS y MEDISO, respectivamente.
- **SPECT/CT para mamografías.** Aunque las mamografías adquiridas con un equipo de rayos X convencional detectan el 85% de las lesiones en mama, no son específicos y de hecho, solamente el 30% de esos pacientes con biopsias por sospecha de cáncer resultan ser positivas. En este sentido, tanto investigadores de la Universidad de Duke como de varias universidades de Italia han estado trabajando en sistemas que permiten realizar imágenes fusionadas de SPECT y CT. De esta manera logran una especificidad y sensibilidad superiores al 90% para tumores de 1 cm³ [13]. Para el caso de tumores aún más pequeños se está desarrollando por la firma noruega-californiana Gamma Medical-Ideas (GM-I) un equipo híbrido de alta resolución empleando detectores CZT [13].
- **Sistema SPECT/CT/PET.** La empresa Mediso SA ha desarrollado un sistema único en el que convergen el PET, el SPECT (en las variantes de doble y triple cabezal) y la CT en un solo equipo, bajo el nombre comercial de AnyScan. Las ventajas de un sistema híbrido de este tipo deberán estudiarse en el futuro.
- **Sistema SPECT/MRI.** La empresa noruega-californiana Gamma Médica-Ideas (GM-I) está desarro-

llando un equipo comercial de SPECT con resonancia magnética (MR) [13]. Hoy día ya existen sistemas PET/CT y la utilidad de este tipo de equipamiento es algo a estudiar en el futuro.

- **Micro-SPECT/CT para estudios de investigación preclínica.** La realización de estudios preclínicos es una de las etapas imprescindibles en el desarrollo de nuevos medicamentos. En este sentido, los estudios gammagráficos, gracias a su elevada sensibilidad para detectar cantidades ínfimas de sustancias y la posibilidad de estudiar procesos a nivel tisular y celular, ofrece una alternativa viable [14-16]. Sistemas micro-SPECT/CT permiten el estudio del comportamiento in vivo de moléculas radiomarcadas en animales pequeños de experimentación, con un valor adicional al integrar la información anatómica con la funcional, lo cual es importante para las ciencias biomédicas y brinda la posibilidad de llegar a resultados con una disminución significativa de los animales a utilizar [13]. Un ejemplo de este tipo de equipamiento es el U-SPECT-I que tiene una resolución espacial < 1 mm y discrimina concentraciones moleculares muy bajas [17].

APLICACIONES CLÍNICAS DE LA IMAGEN FUSIONADA DEL SPECT/CT

Aplicaciones en oncología

La imagen fusionada del SPECT/CT es una herramienta de gran utilidad en la detección y seguimiento de tumores malignos, ya que permite observar con mayor definición el tejido que capta el radiofármaco, así como la localización anatómica de la masa tumoral dentro de un órgano, al excluir la presencia inespecífica del compuesto marcado en estructuras fisiológicas, como los vasos, el sistema urinario y el tracto gastrointestinal, lo cual incide en un aumento de la especificidad en el diagnóstico [8, 11].

Estudio de los tumores neuroendocrinos

Los tumores neuroendocrinos (TNE) comprenden un grupo variado de lesiones malignas, las cuales se desarrollan a partir de las células neuroendocrinas de los pulmones, timo, páncreas, tracto gastrointestinal, glándulas suprarrenales y la piel, por lo cual son extremadamente heterogéneos [18]. Una característica común de la mayoría de estas neoplasias es la sobreexpresión de receptores de la somatostatina (SSTR), sobre todo del tipo SSTR-2 y SSTR-5, aunque en menor medida también SSTR-3, lo cual ha sido empleado, tanto en el diagnóstico como en la terapéutica de estos tumores [19, 20].

Tanto el ¹¹¹In-octreotido, como el ¹¹¹In-pentetreotido han sido, durante muchos años, los radiofármacos más usados para el diagnóstico y seguimiento de los TNE que sobreexpresan los receptores SSTR, así como para seleccionar a los pacientes que van a ser tratados con derivados de somatostatina. Hay pocas publicaciones en las que se aborda el correregistro de imágenes de SPECT y CT en el estudio de este tipo de patología. La más amplia es la de Krausz Y y cols [21], que incluye a

72 pacientes con diferentes tipos de TNE. Mientras que las imágenes corregistradas no brindaron información adicional en 48 de los casos, se mejoraron los hallazgos del SPECT en 23 pacientes (32%) y se cambió el manejo clínico en el 14 % de los casos.

Gabriel M y cols [22] estudiaron el valor diagnóstico de la imagen fusionada utilizando ^{99m}Tc -octreotido en 53 pacientes con TNE. De forma general, el SPECT, la CT y el SPECT/CT encontraron 18, 18 y 27 verdaderos positivos y 16, 21 y 25 verdaderos negativos, respectivamente. Mientras las otras técnicas tuvieron un número significativo de falsos positivos y negativos, el SPECT/CT solo tuvo un falso negativo y ningún falso positivo. Estos resultados evidencian la ventaja de esta modalidad de imagen corregistrada.

La metaiodobencilguanidina marcada con ^{123}I (^{123}I -MIBG), análoga de la norepinefrina, se emplea para visualizar los TNEs que secretan catecolaminas como los feocromocitomas o los paragangliomas, mostrando una sensibilidad del 90% y un valor predictivo positivo del 100%. Sin embargo, es poco útil para los TNEs del tracto gastrointestinal, en los cuales solo debe ser usado para definir a los pacientes con metástasis que pudieran beneficiarse de la terapia con ^{131}I -MIBG [2, 23].

Identificación del ganglio centinela

La correcta identificación del ganglio centinela juega un rol importante en el manejo del paciente oncológico, la cual se realiza mediante la tinción con azul de metileno o por linfografía con el empleo de radiofármacos. En este caso, la imagen fusionada de SPECT/CT ha mostrado una gran ventaja respecto a las imágenes gammagráficas planas usadas tradicionalmente, ya que facilita el acceso quirúrgico y mejora la tasa de detección [4,

13]. Diversos estudios demuestran que las imágenes de SPECT/CT son capaces de detectar entre un 13 % y 50 % de ganglios no visualizados mediante gammagrafía convencional, con una sensibilidad total reportada en el rango de 70-90 % [4, 13]. Por otra parte, se ha reportado que estas imágenes corregistradas han sido capaces de detectar un 75 % de ganglios no visualizados mediante la tinción con azul de metileno [4], lo cual cambia el manejo del paciente.

Otros tumores

En el caso de los carcinomas diferenciados de tiroideos, comúnmente se realizan gammagrafías de cuerpo entero después de la administración oral de ^{131}I o ^{123}I con el objetivo de detectar enfermedad residual o metastásica, ya que muestran una sensibilidad superior a las modalidades anatómicas. Sin embargo, las imágenes de ^{131}I resultan muy difíciles de interpretar y con frecuencia es complejo localizar anatómicamente las zonas captantes y, por consiguiente, se registran falsos positivos. Las imágenes fusionadas de SPECT/CT ayudan a una localización más precisa de las lesiones y a diferenciar mejor el tejido maligno de las áreas de captación fisiológica del radiofármaco en más del 50 % de los pacientes, por lo cual se incrementa sustancialmente el valor diagnóstico de la prueba [4].

En la Figura 1 se muestra una imagen gammagráfica de cuerpo entero tras la administración de ^{131}I en un paciente masculino con antecedentes de tiroidectomía "total" por carcinoma diferenciado de tiroides. El SPECT/CT realizado permitió la localización precisa del tejido residual, lo cual facilitó la cirugía para reseca el mismo.

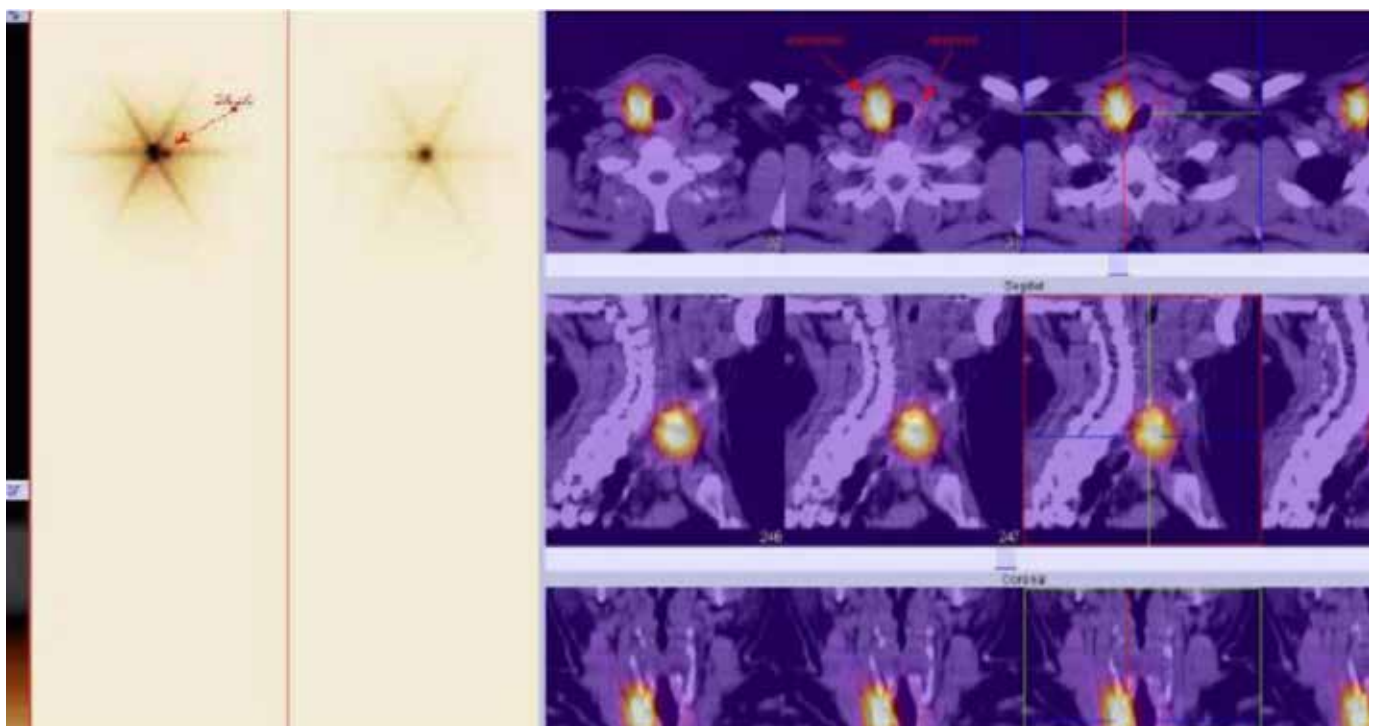


Figura 1. Paciente masculino con antecedentes de tiroidectomía total por carcinoma diferenciado del tiroides. A) Imagen gammagráfica de cuerpo entero tras la administración de ^{131}I . B) El SPECT/CT muestra la localización precisa del tejido residual.

Este tipo de tecnología híbrida ha mostrado su valor en el estudio del proceso de angiogénesis en los tumores con radiofármacos, tales como el anticuerpo monoclonal bezacisumab, dirigido contra el receptor del factor de crecimiento del endotelio vascular; péptidos dirigidos contra la integrina $\alpha_v\beta_3$ o contra metaloproteasas de la matriz, marcados con diferentes radionucleidos, así como diferentes moléculas marcadas para la detección de la hipoxia o la apoptosis [2, 13]. Estos procesos son importantes en el manejo clínico del paciente oncológico.

Sergiacomi y cols [24] evaluaron la eficacia del SPECT/CT con ^{99m}Tc -MIBI para el estudio de las neoplasias de pulmón. La correlación de esta modalidad híbrida con histopatología mostró una especificidad de 91.6 %, una sensibilidad 90.9 % y una exactitud diagnóstica de 91.3 %.

El SPECT/CT ha mostrado ser útil para definir las lesiones primarias o metastásicas del esqueleto, dudosas después del estudio gammagráfico convencional, sobre todo en aquellas que se encuentran en columna y pelvis, ayudando a establecer un mejor acceso para la toma de las biopsias [2, 4, 13].

En la Figura 2 se pueden apreciar lesiones metastásicas en zonas ilíacas derecha e izquierda mediante estudio gammagráfico con ^{99m}Tc -MDP en un paciente

masculino con adenocarcinoma de próstata. El estudio de CT muestra solo la lesión en ilíaco izquierdo debido a que la metástasis en la región contralateral es aún muy incipiente.

En general, las imágenes de fusión de SPECT/CT resultan útiles en el manejo del paciente oncológico ya que: 1) ayudan en la decisión médica sobre la necesidad o no de la realización de futuras terapéuticas; 2) permiten establecer la procedencia del cambio inter- e intramodalidad terapéutica, incluso al inicio de un tratamiento; 3) brindan una valiosa información de pronóstico.

Tanto el SPECT/CT, como el PET/CT son técnicas híbridas que cada vez ganan más importancia como componentes de apoyo a la verdadera medicina personalizada a la que se aspira en la actualidad [8].

Empleo del SPECT/CT para optimizar la dosimetría

La complementación entre las imágenes de biodistribución del compuesto marcado que ofrece el SPECT, con la información anatómica derivada de la CT, ofrece la posibilidad de incrementar la exactitud de los cálculos de las dosis absorbidas por pacientes sometidos a la terapia con radionucleidos y, por tanto, optimizar los procesos de planificación de la terapia, predicción de la

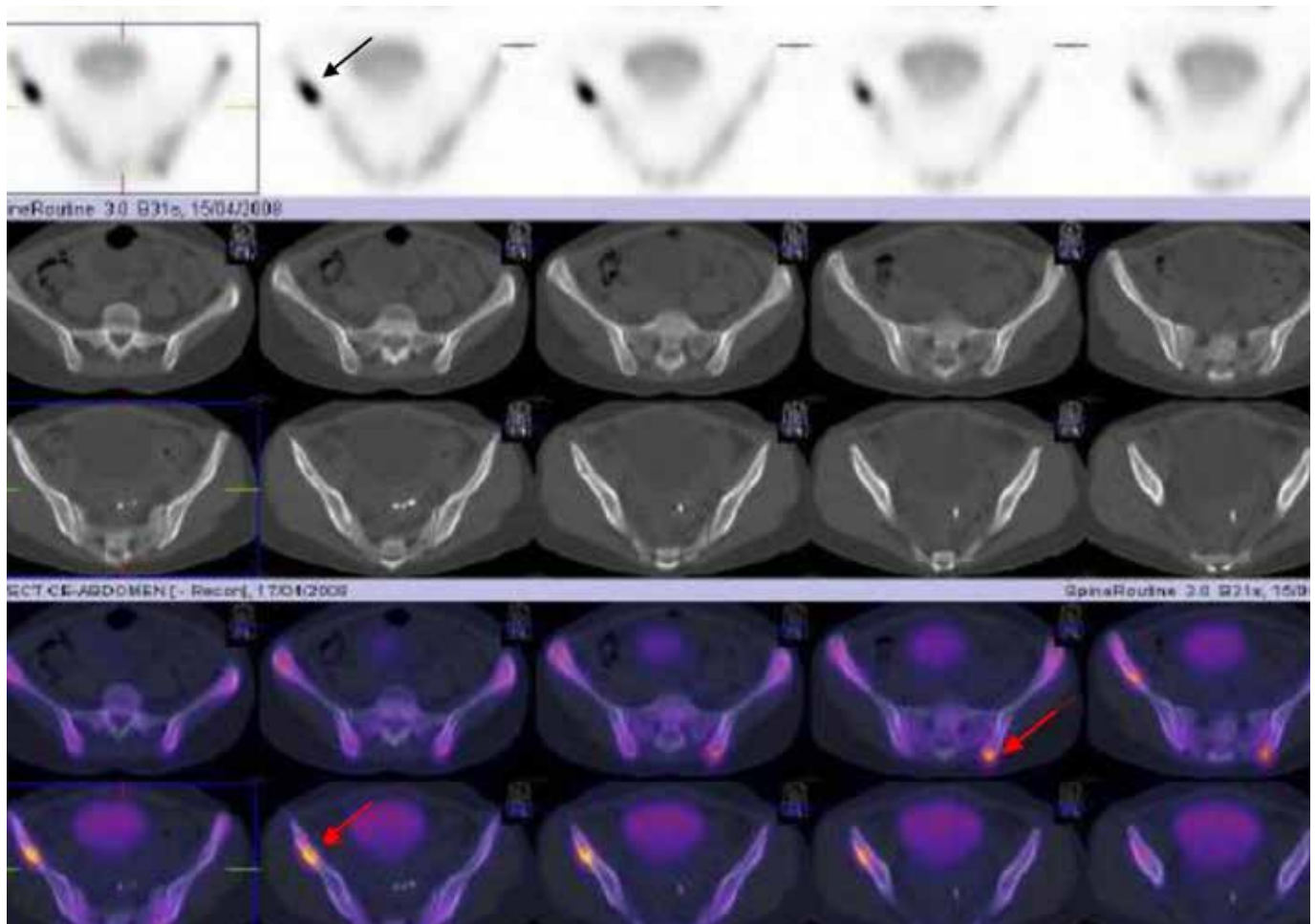


Figura 2. Exploración de SPECT/CT en paciente masculino con adenocarcinoma de próstata. **A)** Estudio gammagráfico con ^{99m}Tc -MDP que muestra (señaladas con flechas negras) lesiones óseas metastásicas en huesos ilíacos izquierdo y derecho (esta última incipiente). **B)** Estudio de CT en el que se aprecia solo lesión metastásica en ilíaco izquierdo. **C)** Estudio de fusión en el cual ambas lesiones metastásicas se muestran señaladas con flechas rojas.

respuesta a los tratamientos y evaluación de la correlación entre la eficacia terapéutica y las dosis que reciben los órganos y tejidos diana.

Las imágenes híbridas de SPECT/CT han potenciado el empleo de métodos de planificación de tratamientos paciente-específico, evidenciando resultados muy positivos en el tratamiento del cáncer de tiroides con ¹³¹I, en la radioinmunoterapia de los linfomas no Hodgkin con ⁹⁰Y-ibritumomab tiuxetan o ¹³¹I-tositumomab, y en la terapia radionucleídica de los tumores neuroectodérmicos (feocromocitomas, neuroblastomas, paragangliomas) con ¹³¹I-MIBG [4].

Los estudios SPECT/CT han brindado la posibilidad de combinar la información anatómica (CT) y funcional (SPECT) para obtener distribuciones tridimensionales de las dosis absorbidas y emplear herramientas de análisis de valor adicional como los histogramas de dosis-volumen, curvas de isodosis, etc., incrementando la precisión de los estudios dosimétricos en la terapia con radionúclidos. Los datos aportados por estas técnicas permiten corregirle a los datos primarios los factores que afectan la exactitud de los cálculos, tales como la atenuación y dispersión de la radiación, el fondo radiactivo, las interacciones en el colimador, el efecto de volumen parcial, etc. Igualmente la información que brindan permite identificar con mayor precisión datos elementales para garantizar la exactitud de los cálculos dosimétricos, como por ejemplo el volumen y posición de los órganos diana y tejidos diana, así como su composición. Estos últimos son vitales para el empleo de métodos de cálculo que se basan en simulaciones con códigos de Monte Carlo, que proporcionan una mejor distribución regional y espacial de las dosis absorbidas [25].

Aplicaciones en Cardiología

Como ejemplo del marcado interés que existe en las imágenes híbridas cardiológicas, se puede citar el premio anual que concedió la Sociedad de Medicina Nuclear de EE.UU. al estudio de SPECT/CT cardíaco [26].

El SPECT/CT y la corrección de la atenuación

La atenuación no homogénea de los fotones en el tórax es una de las limitaciones más importantes a la hora de valorar los estudios de perfusión miocárdica. Esta provoca una aparente no uniforme distribución regional del radiofármaco, incluso en corazones normales, lo cual limita la especificidad de los estudios. Este problema puede ser resuelto mediante correcciones de la atenuación. Sin embargo, tanto la motilidad del corazón como la respiración del paciente hacen aún más compleja esta tarea [4]. Preuss y cols [27] reportan la utilidad de la CT de baja dosis (<0.5 mSv) para la corrección de la atenuación en los estudios de perfusión miocárdica con SPECT/CT. En este sentido es vital la correcta alineación que debe existir entre el SPECT y la CT con el fin de evitar errores en la corrección [4]. Se ha reportado que cuando se considera de manera adecuada la corrección de la atenuación y el efecto del volumen parcial, es posible cuantificar los valores de actividad absoluta, lo que permite la evaluación del flujo absoluto y la reserva coronaria a partir de las imágenes de SPECT de perfusión miocárdica, aunque esto aún requiere de trabajos con muestras mayores de pacientes para validarlo de forma adecuada [4].

En la Figura 3 se muestra un estudio de SPECT de perfusión miocárdica con ^{99m}Tc-MIBI a un paciente masculino con corrección por atenuación mediante CT. El

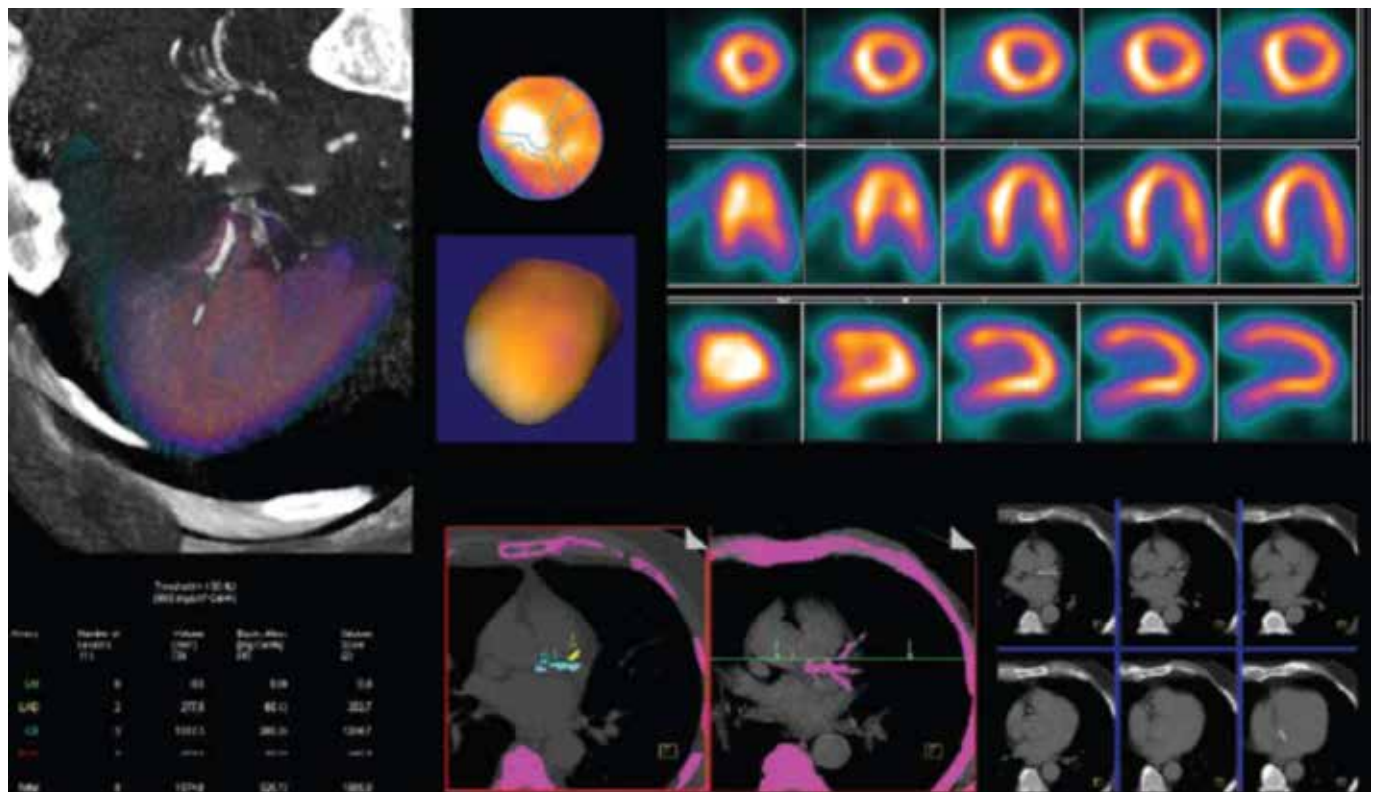


Figura 3. Estudio de SPECT de perfusión miocárdica corregido por atenuación a partir de las imágenes de CT. Paciente con hiper captación septal debida a hipertrofia ventricular izquierda a predominio de hipertrofia septal.

caso no presentaba enfermedad de arterias coronarias; sin embargo, las imágenes muestran una hipercaptación septal por hipertrofia ventricular izquierda a predominio de hipertrofia septal.

El SPECT/CT y la correlación con el score de calcio

Ya que la calcificación arterial casi siempre representa aterosclerosis, la detección de calcio por CT es un método sensible, pero no específico para el diagnóstico de la enfermedad coronaria (EC) obstructiva [28]. La presencia de calcio en las arterias coronarias es cuantificada usando el score de Agatson (calcium coronary score, CCS) basado en el coeficiente de atenuación expresado en unidades de Hounsfield (HU) y en la extensión del área de los depósitos de calcio [29]. Varios estudios han mostrado que el CCS está directamente relacionado con el total de la carga aterosclerótica presente en los vasos coronarios epicárdicos y con los hallazgos de la coronariografía [30, 31], así como presencia de lesiones en los estudios de perfusión miocárdica [32]. En este sentido, la aplicación del SPECT/CT en Cardiología ha alcanzado una nueva dimensión diagnóstica con la popularización del estudio para determinar el score de calcio como alternativa no invasiva, con escasa tasa de radiación para el paciente en casos no sintomáticos con factores de riesgo de enfermedad coronaria. Si el resultado es positivo se puede continuar con un SPECT de perfusión miocárdica antes de indicarse una coronariografía, mientras que si resulta negativo no es necesario continuar con otros estudios que encarecerían el proceso diagnóstico. Por la experiencia de los estudios de perfusión miocárdica con el uso del PET/CT, se discute, incluso, eliminar los estudios de reposo, lo cual disminuye la dosis de radiación recibida por los pacientes [4]. No obstante, se requiere de estudios con muestras de pacientes mayores para una mejor evaluación de este planteamiento.

La perfusión miocárdica y la angiografía coronaria mediante CT

La angio-CT tiene una excelente sensibilidad diagnóstica en los territorios proximales de las arterias coronarias >1,5 mm y serias limitaciones para estudiar las ramas más pequeñas, mientras que el SPECT tiene limitaciones en el caso de enfermedad coronaria de múltiples vasos o de la arteria coronaria izquierda [33]. Por lo tanto, las imágenes híbridas ofrecen una información superior más completa, sobre todo, para identificar el "vaso culpable" [34, 35]. Por ejemplo, Risplery y cols [35] reportaron una significativa mejoría en la especificidad (de 63 % a 95 %) y del valor predictivo positivo (de 31 % a 77 %) para detectar EC angiográficamente cuantificada en un grupo de 56 pacientes. Sin embargo, las limitantes principales de este tipo de estudio han sido, por una parte, la elevada dosis de radiación que recibe el paciente y, por otra, la necesidad de usar equipos de CT de 64 y 128 cortes para lograr imágenes óptimas, debido a las interferencias en la adquisición que producen la contracción cardíaca y el desplazamiento pulmonar. La menor calidad de las CT unidas a los equi-

pos híbridos con el SPECT, en relación con las angio-CT dedicadas, obliga a mantener a los pacientes con una frecuencia cardíaca baja y estable (≤ 65 latidos/min), lo cual no siempre es posible [29]. El desarrollo de SPECT con CT de 64 cortes ha venido a suplir esta dificultad [36]. Otra tendencia prometedora es el empleo de agentes de contraste con la CT de baja dosis para delinear los vasos y que, además, muestra diferencias en el aclaramiento de las zonas dañadas en el miocardio [4].

Otra de las aplicaciones del SPECT/CT en cardiología ha sido en las unidades de emergencia médica o de dolor torácico agudo donde son útiles para discriminar, en determinados casos, si la causa del dolor es de origen coronario o no. Este estudio alcanza su mayor utilidad cuando existe un dolor atípico con electrocardiograma (ECG) no concluyente, las enzimas cardíacas son normales y el score de calcio es negativo, lo cual permite excluir con alta seguridad diagnóstica la causa coronaria del dolor.

Aplicaciones en el diagnóstico de patologías neurológicas y psiquiátricas

La corrección de atenuación en las imágenes de SPECT cerebral resulta de gran importancia para mejorar su calidad y para facilitar una mejor interpretación de las mismas [4]. En este sentido el empleo de la CT ha mostrado ser superior a la corrección realizada por el método de Chang, en especial para definir las lesiones limitrofes [4]. Un ejemplo de lo anteriormente planteado es el caso en que se necesite realizar un análisis semicuantitativo de regiones de interés, así como ubicar de forma más precisa las mismas en estudios de transportadores presinápticos con ^{123}I -2 β -carbometoxi-3 β -(4-iodofenil) tropano (DaTSCAN) o postsinápticos de dopamina con ^{123}I -iodobenzamina, respectivamente; los cuales se emplean para valorar la enfermedad de Parkinson, ya que en ambos casos la relación entre estriado y fondo permite diferenciar entre hallazgos normales o patológicos que reflejen una disminución de la densidad de receptores o del transportador [4, 37].

Por su parte, la CT de baja dosis ha mostrado ser útil durante los estudios de SPECT/CT de perfusión cerebral. Sulkin y col [38] demostraron que la realización de la CT, de forma conjunta con el SPECT, aportaba un valor diagnóstico adicional al estudio, pues el 25% de las imágenes de CT de baja dosis mostró lesiones patológicas, como infartos, atrofia cerebral, ventrículos dilatados, calcificaciones de los ganglios basales, hematoma subdural y meningioma, por los que los autores sugieren, incluso, reportar por separado los hallazgos de la CT y del SPECT de perfusión cerebral.

Conclusiones

Las imágenes corregidas de SPECT/CT han ido ganando un lugar relevante en el estudio de las enfermedades oncológicas, ya que los hallazgos de las mismas aumentan la sensibilidad y la especificidad de los estudios gammagráficos y reduce la cantidad de hallazgos no concluyentes. La superioridad del SPECT/CT sobre

el SPECT se ha reportado también para las imágenes en estudios cardiovasculares y neurológicos, aunque se requieren resultados con un número mayor de pacientes para demostrar esto de forma categórica. La incorporación de nuevos avances tecnológicos y de novedosos radiofármacos auguran un peso cada vez más relevante del SPECT/CT en la práctica clínica.

Agradecimientos

El colectivo de autores expresa su agradecimiento al Prof. Dr. José M. Castro Beiras, Madrid, España, por brindar las imágenes presentadas en el presente trabajo.

Referencias bibliográficas

- SEO Y, APARICI CA, HASEGAWA BH. Technological Development and Advances in SPECT/CT. *Semin Nucl Med.* 2008; 38(3): 177-198.
- HISTED SN, LINDENBERG ML, MENA E, et. al. Review of Functional/ Anatomic Imaging in Oncology. *Nucl Med Commun* 2012; 33(4): 349-361.
- O'CONNOR MK, KEMP BJ. Single-photon emission computed tomography/computed tomography: basic instrumentation and innovations. *Semin Nucl Med.* 2006; 36(4): 258-266.
- BUCK AK, NEKOLLA S, ZIEGLER S, et. al. SPECT/CT. *J Nucl Med* 2008; 49(8): 1305-1319.
- TAMAM M, MULAZIMOGLU M, EDIS N, OZPACACI T. The Value of Attenuation Correction in Hybrid Cardiac SPECT/CT on Inferior Wall According to Body Mass Index. *World J Nucl Med.* 2016; 15(1): 18-23.
- BHARGAVA P, HE G, SAMARGHANDI A, DELPASSAND ES. Pictorial review of SPECT/CT imaging applications in clinical nuclear medicine. *Am J Nucl Med Mol Imaging.* 2012; 2(2): 221-231.
- MAURER AH. Combined imaging modalities: PET/CT and SPECT/CT. *Health Phys* 2008; 95(5): 571-576.
- DELBEKE D, SCHÖDER H, MARTIN WH, WAHL RL. Hybrid imaging (SPECT/CT and PET/CT): improving therapeutic decisions. *Semin Nucl Med.* 2009; 39(5): 308-340.
- CIARMIELLO A, GIOVANNINI E, MENICONI M, et. al. Hybrid SPECT/CT imaging in neurology. *Curr Radiopharm.* 2014; 7(1): 5-11.
- FLOTATS A, KNUUTI J, GUTBERLET M, et. al. Hybrid cardiac imaging: SPECT/CT and PET/CT. A joint position statement by the European Association of Nuclear Medicine (EANM), the European Society of Cardiac Radiology (ESCR) and the European Council of Nuclear Cardiology (ECNC). *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2011; 38(1): 201-212.
- SCHILLACI O. Hybrid SPECT/CT: a new era for SPECT imaging?. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2005; 32(5): 521-524.
- KOHL G. The evolution and state-of-the-art principles of multislice computed tomography. *Proc Am Thorac Soc.* 2005; 2(6):470-476.
- FERRO-FLORES G, ARTEAGA DE MURPHY C. Estado actual y futuro de la gammagrafía SPECT/CT con Radiofármacos de 99mTc. *Rev Invest Clin.* 2007; 59(5): 373-381.
- ACTON PD, KUNG HF. Small animal imaging with high resolution single photon emission tomography. *Nucl Med Biol.* 2003; 30: 889-895.
- MEIKLE SR, KENCH P, KASSIOU M, BANATI RB. Small animal SPECT and its place in the matrix of molecular imaging technologies. *Phys Med Biol.* 2005; 50: R45-R61.
- Gerdekoohi SK, Vosoughi N, Tanha K, et al. Implementation of absolute quantification in small-animal SPECT imaging: Phantom and animal studies. *J Appl Clin Med Phys.* 2017; 18(4): 215-223.
- BEEKMAN FJ, van der Have F, VASTENHOUW B, van der Linden AJA, et al. U-SPECT-I: a novel system for submillimeter-resolution tomography with radiolabeled molecules in mice. *J Nucl Med.* 2005; 46: 1194-200.
- CARRASQUILLO JA, CHEN CC. Molecular imaging of neuroendocrine tumors. *Semin Oncol.* 2010; 37(6): 662-679.
- GOLDSMITH SJ. Update on nuclear medicine imaging of neuroendocrine tumors. *Future Oncol* 2009; 5(1): 75-84.
- BOMBARDIERI E, COLIVA A, MACCAURO M, et. al. Imaging of neuroendocrine tumours with gamma-emitting radiopharmaceuticals. *Q J Nucl Med Mol Imaging.* 2010; 54(1): 3-15.
- KRAUSZ Y, KEIDAR Z, KOGAN I, et. al. SPECT/CT hybrid imaging with 111In-pentetreotide in assessment of neuroendocrine tumours. *Clin Endocrinol (Oxf).* 2003; 59: 565-573.
- GABRIEL M, HAUSLER F, BALE R, MONCAYO R, et. al. Image fusion analysis of 99mTc-HYNICTyr3-octreotide SPECT and diagnostic CT using an immobilization device with external markers in patients with endocrine tumours. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2005; 32: 1440-1451.
- MAXWELL JE, HOWE JR. Imaging in neuroendocrine tumors: an update for the clinician. *Int J Endocr Oncol.* 2015; 2(2): 159-168.
- SERGIACOMI G, SCHILLACI O, LEPORACE M, LAVIANI F, et. al. Integrated multislice CT and Tc-99m sestamibi SPECT-CT evaluation of solitary pulmonary nodules. *Radiol Med (Torino).* 2006; 111: 213-24.
- PRIDEAUX AR, SONG H, HOBBS RF, et. al. Three-dimensional radiobiologic dosimetry: application of radiobiologic modeling to patient-specific 3-dimensional imaging-based internal dosimetry. *J Nucl Med.* 2007; 48: 1008-1016.
- 2006 Image of the year: focus on cardiac SPECT/CT. *J Nucl Med.* 2006; 47:14N-15N.
- PREUSS R, WEISE R, LINDNER O, et. al. Optimisation of protocol for low dose CT-derived attenuation correction in myocardial perfusion SPECT imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2008; 35: 1133-1141.
- O'ROURKE RA, BRUNDAGE BH, FROELICHER VF, et. al. American College of Cardiology/ American Heart Association Expert Consensus Document on electron-beam computed tomography for the diagnosis and prognosis of coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol.* 2000; 36: 326-40.
- BERETTA M. Avances en cardiología nuclear: fusión de imágenes. *SPECT/TC, PET/TC.* *Rev. Urug. Cardiol.* 2012; 27(1). Disponible en: www.scielo.edu.uy/pdf/ruc/v27n1/v27n1a09/pdf [consulta: abril de 2017].
- GEPNER AD, YOUNG R, DELANEY JA, et. al. Comparison of Carotid Plaque Score and Coronary Artery Calcium Score for Predicting Cardiovascular Disease Events: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *J Am Heart Assoc.* 2017; 6(2): e005179.
- BUDOFF MJ, GUL KM. Expert review on coronary calcium. *Vasc Health Risk Manag.* 2008; 4(2): 315-324.
- SCHEPIS T, GAEMPERLI O, KOEPFLI P, et. al. Added value of coronary artery calcium score as an adjunct to gated SPECT for the evaluation of coronary artery disease in an intermediate-risk population. *J Nucl Med.* 2007; 48: 1424-1430.
- PICCINELLI M, GARCIA E. Multimodality image fusion for diagnosing coronary artery disease. *J Biomed Res.* 2013; 27(6): 439-451.
- GAEMPERLI O, SCHEPIS T, VALENTA I, et. al. Cardiac image fusion from stand-alone SPECT and CT: Clinical experience. *J Nucl Med.* 2007; 48: 696-703.
- RISPLER S, KEIDAR Z, GHERSIN E, et. al. Integrated single-photon emission computed tomography and computed tomography coronary angiography for the assessment of hemodynamically significant coronary artery lesions. *J Am Coll Cardiol.* 2007; 49: 1059-1067.
- GAEMPERLI O, SCHEPIS T, KALFF V, et. al. Validation of a new cardiac image fusion software for three-dimensional integration of myocardial perfusion SPECT and stand-alone 64-slice CT angiography. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2007; 34: 1097-1106.
- SAEED U, COMPAGNONE J, AVIV RI, et. al. Imaging biomarkers in Parkinson's disease and Parkinsonian syndromes: current and emerging concepts. *Transl Neurodegener.* 2017; 6: 8.
- SULKIN TV, COUSENS C. SPECTCT cerebral perfusion scintigraphy; is the low dose CT component of diagnostic value?. *Clin Radiol.* 2008; 63: 289-298.
- BLANKESPOOR SC, WU X, KALKI K, et. al. Attenuation correction of SPECT using x-ray CT on an emission-transmission CT system: Myocardial perfusion assessment. *IEEE Trans Nucl Sci.* 1996; 43: 2263-2274.
- PLOUX L, MASTRIPOPOLITO R. In vivo radiolabel quantification in small-animal models. *Nucl Med Biol.* 1999; 25: 737-742.

Recibido: 15 de mayo de 2017

Aceptado: 17 de octubre de 2017