



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
INSTITUTO DE INGENIERÍA BIOLÓGICA Y MÉDICA
IBM2101 – IMÁGENES BIOMÉDICAS
SEGUNDO SEMESTRE DEL 2022

Proyecto Semestral

PET/CT

Profesor: Carlos A. Sing Long
Estudiantes: María Smith, Iván Vergara
Fecha de entrega: 05 de diciembre del 2022

Introducción

Durante el curso de Imágenes Biomédicas se estudiaron distintas técnicas de formación y procesamiento de imágenes, con su historia, conceptos matemáticos y físicos detrás de ellas, avances tecnológicos y aplicaciones clínicas. En este proyecto se presenta una técnica híbrida de formación de imágenes, PET/CT, su desarrollo e implementación clínica. Además se ahonda en un tipo de problema que se presenta al intentar reconstruir la imagen PET utilizando este método, este radica en la discordancia entre ambas imágenes generando una imagen fusionada inconsecuente.

Se analiza un estudio realizado en pacientes con enfermedades neurodegenerativas que resuelve este problema a través de un método de corrección de movimiento (MC) enfocado en el movimiento de cabeza. La solución propuesta mejora significativamente la calidad de la imagen y la cinética del trazador medido derivado de imágenes PET/CT dinámicas y proyecta su aplicación para otro tipo de movimientos.

Luego del análisis de esta propuesta, se detecta una posibilidad para mejorar el proceso de reconstrucción y se opta por combinar dos técnicas de retro-proyección, en el dominio del espacio, Hilbert, y en el dominio de la frecuencia, Fourier, generando una imagen con mayor claridad y minimizando la presencia de artefactos.

Lo anterior fue modelado en código, lo que permitió realizar simulaciones de la implementación de esta técnica en imágenes médicas. Los resultados obtenidos permiten concluir que una imagen con corrección de movimiento es mucho más precisa, ya que minimiza los errores que podrían presentarse a causa de la imprecisión de la información en una imagen de PET/CT obtenida con movimiento del paciente.

Problema y estado del arte

Dentro de las técnicas de formación de imágenes biomédicas se encuentra el CT, computed tomography scan, que es ocupado para analizar anatómicamente el cuerpo humano y el PET, positron emission tomography, que se ocupa generalmente para observar cambios en funcionamiento de ciertos órganos o tejidos corporales a partir de un trazador inyectado al paciente.

Estas dos técnicas fueron combinadas por primera vez a principios de los años 90, donde comenzaron a usar la precisión de la localización de estructuras anatómicas que lograba la CT para mejorar la corrección de atenuación del PET (Beyer et al., 2011). Además, el uso de la tomografía computarizada reduce el tiempo total de adquisición de PET. Luego de varios estudios se concluye que este método híbrido tiene un gran potencial para el análisis de la información funcional y anatómica, por ejemplo, casos oncológicos, cardiológicos o neurológicos (Tsai y Liu, 2012).

El proceso de adquisición de la imagen comienza por la CT, luego se mueve el paciente al campo de visión del escáner PET y se obtienen los datos por posición corporal. Los datos del PET son reconstruidos usando las imágenes de la CT, luego se muestran ambas imágenes junto a su fusión (Sureshbabu y Mawlawi, 2005).

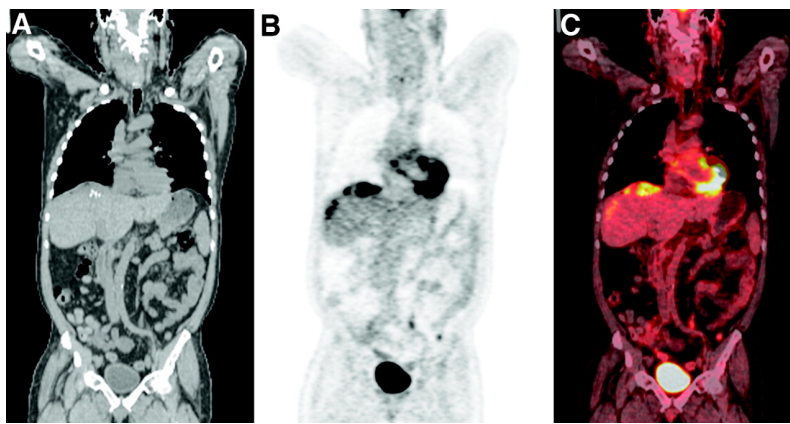


Figura 1: Imagen CT (A), Imagen PET con corrección de atenuación por CT (B) e Imagen fusionada PET/CT (C)

Este método híbrido mejora la imagen obtenida si es usado de manera precisa por un buen tecnólogo médico, sin embargo, el uso de la CT para la reconstrucción del PET puede conducir a la aparición de artefactos por implantes metálicos, movimiento respiratorio o involuntario, medio de contraste que intensifica CT y truncamiento por diferencia de campo de visión entre CT y PET (Sureshababu y Mawlawi, 2005).

Estos artefactos pueden guiar al médico tratante a un mal diagnóstico, por poca claridad de la imagen, por ejemplo localización de tumores, mala interpretación de tamaños o discordancia de lesiones en órganos. Se muestra un ejemplo a continuación, en el cual un sujeto con lesiones en el hígado, puede mostrarse como un sujeto con lesiones en hígado y pulmón.

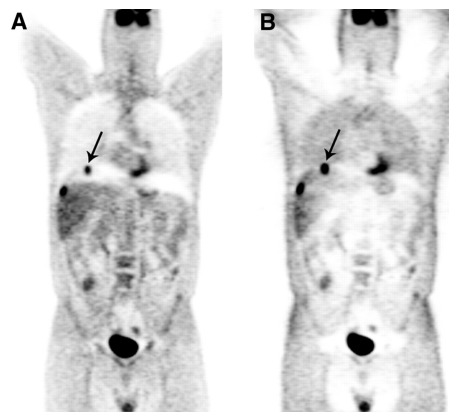


Figura 2: Lesión de hígado mal localizada a pulmón derecho (flecha) por movimiento respiratorio (A) Imagen sin corrección de atenuación muestra solo lesiones en hígado (B)

Un estudio publicado el año 2011 establece un mecanismo para corregir el artefacto producido por movimiento, específicamente de cabeza, que genera discrepancia entre las imágenes de TC y PET dinámicas.

El mecanismo, Movement Correction, consiste en primero registrar la imagen CT en cada marco del PET dinámico, luego reconstruye los marcos PET con la corrección de atenuación basada en la CT, usando un algoritmo que maximiza la información mutua normalizada, y finalmente

realinea todos los marcos PET en la misma posición, maximizando el coeficiente de correlación normalizado.

Al estudiar el método en pacientes, utilizaron dos trazadores que representan relaciones señal/ruido altas y moderadas, (FDG) y (FDDNP) respectivamente, para validar y evaluar el método MC propuesto. En estos observaron movimiento de cabeza en todos los individuos, especialmente en los últimos marcos de PET con un desplazamiento promedio de 6.92 mm. Los desplazamientos que ocurrieron con mayor frecuencia fueron la traslación en la dirección z, con promedio 5.32 mm, y la rotación del eje x, con promedio 5.19°.

La siguiente figura compara las imágenes formadas generalmente por la técnica híbrida PET/CT con uso del trazador FDDNP y luego aquellas formadas al aplicarle el método MC presentado en el estudio. Se puede observar una reducción en los artefactos en la región temporal y una mejor separación de hemisferios (Ye et al., 2014).

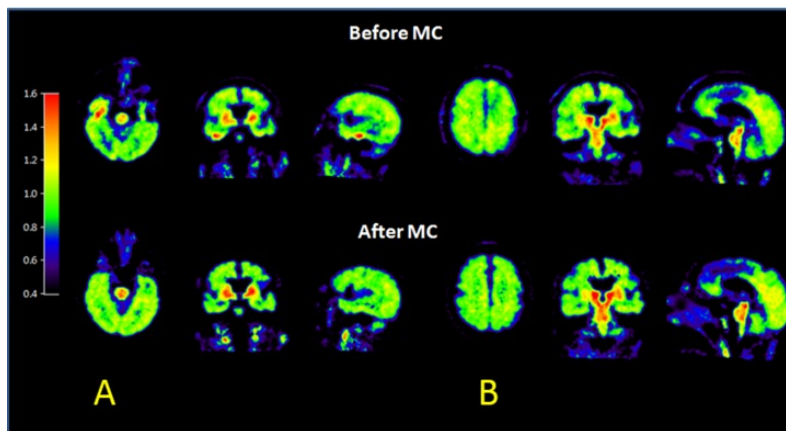


Figura 3: Resultados de aplicación de MC en paciente con movimiento de cabeza y trazador FDDNP

La siguiente figura compara las imágenes PET/CT formadas con uso del trazador FDG que representa una relación señal/ruido más alta que el trazador FDDNP. (Ye et al., 2014). En la parte izquierda se puede ver la disminución del artefacto por corrección de atenuación luego de la aplicación MC. En la parte derecha se puede ver una distribución más uniforme y brillante luego de la aplicación de MC.

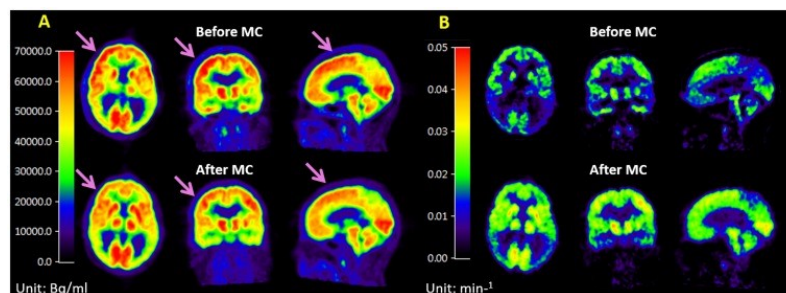


Figura 4: Resultados de aplicación de MC en paciente con movimiento de cabeza y trazador FDG

Solución propuesta

La imágenes de Tomografía Axial Computada se obtienen mediante la aplicación de la Transformada Inversa de Radon al sinograma obtenido. La Transformada de Radon está dada por:

$$\mathcal{R}[f](\theta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy$$

Para la reconstrucción de la imagen se pueden utilizar técnicas en el dominio de la frecuencia y en el dominio del espacio. Durante el desarrollo de este proyecto, se evaluaron ambos métodos, además de una imagen elaborada a partir de la suma de las reconstrucciones en ambos dominios, la que, luego de la evaluación de los artefactos presentes en ella y de su resolución, se escogió como la imagen a utilizar. Por lo tanto, lo que realiza el código en primer lugar, es reconstruir la imagen tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo, para luego sumar ambos resultados.

De esta manera, en este proyecto se propone una mecanismo de movement correction que, a diferencia del presentado en el estudio, realiza una corrección del movimiento en la imagen de CT. Además, la reconstrucción de las imágenes es realizada mediante una combinación de técnicas de reconstrucción en el dominio del espacio y en el dominio de la frecuencia. La imagen de CT obtenida permite la atenuación de la imagen de PET, generando una imagen de PET/CT con mayor cantidad de información.

Código

Como se mencionó anteriormente, la reconstrucción de la imagen es realizada mediante la combinación de las reconstrucciones en el dominio del espacio y en el dominio de la frecuencia.

Para la reconstrucción en el dominio de la frecuencia, el programa realiza primeramente un filtrado de tipo rampa, el que es transformado al dominio de la frecuencia, al igual que la imagen de sinograma, posteriormente son multiplicados entre sí, lo que es equivalente a convolucionar en el dominio de Fourier. Por último, al resultado obtenido se le aplica la transformada inversa de Fourier, para regresar al dominio del espacio. Por último, se realiza la retroproyección utilizando un nuevo sistema coordenado centrado en el origen de la imagen, y sumando las retroproyecciones generadas en cada ángulo.

Para encontrar la retroproyección filtrada usando técnicas en el dominio del espacio, se utilizó la transformada de Hilbert. El código opera utilizando la derivada como un operador capaz de resaltar las curvas de la imagen, permitiendo obtener la retroproyección a través del sinograma original. De esta manera, la imagen obtenida fue la siguiente:

Comparando ambos resultados, como se verá en el apartado de simulaciones, se puede observar a simple vista que la imagen obtenida mediante técnicas en el dominio de Fourier es mucho más clara que la obtenida mediante métodos en el dominio del espacio. Pese a lo anterior, se puede notar que ninguno de los dos es exactamente igual a la imagen original, ya que ambos presentan artefactos que interfieren con la imagen final. Como solución alternativa surgió la opción de sumar ambos resultados por separado, lo que generó una imagen más clara y más semejante a la imagen original, por lo que se determinó este como el método a utilizar.

En cuanto a las transformaciones espaciales para corregir el movimiento del paciente, las rotaciones fueron utilizando la función `rotate` de la librería `Image`, mientras que las traslaciones fueron realizadas utilizando una matriz de rotación.

Todo el código para este proyecto fue desarrollado en Python y es de *software open source*¹.

Simulaciones

Para evaluar el desempeño del código desarrollado, se testeó utilizando una imagen del fantasma de Shepp-Logan, imagen estándar en la evaluación de técnicas de procesamiento de imágenes, la que se muestra a continuación:



Figura 5: Fantasma de Shepp-Logan

En primer lugar, se rotó la imagen para simular el movimiento que podría tener la cabeza del paciente, se escogió un desplazamiento de 12 mm en la dirección horizontal, de 2 mm en la dirección vertical y una rotación de 6° , lo anterior fue implementado considerando un tamaño de cabeza de 25 cm, lo que implica una relación de 1 px:1 mm. La imagen obtenida, con la que se realizaron todas las simulaciones se presenta a continuación:

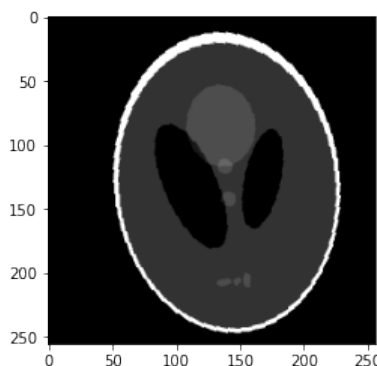


Figura 6: Imagen con movimiento

Continuando, se les calculó la Transformada de Radón a ambas imágenes, simulando la información que hubiese sido obtenida por el transductor en el caso ideal y en el caso con movimiento. Los sinogramas obtenidos se presentan en la Figura 7.

¹Repositorio de GitHub: <https://github.com/ivanvlam/IBM2101/tree/main/Proyecto>

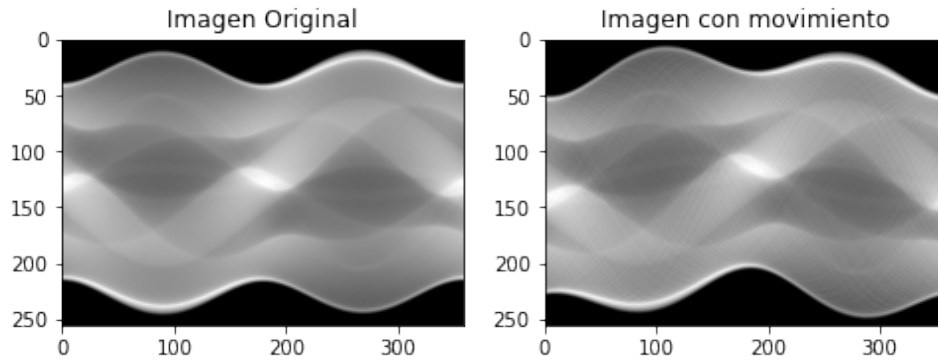


Figura 7: Transformadas de Radón

Se puede evidenciar a simple vista como varían los sinogramas con el sutil movimiento aplicado, lo que se debe principalmente a la pérdida de la simetría existente en el contorno de la imagen.

Como se mencionó anteriormente, se optó por realizar una reconstrucción de la imagen original mediante una combinación entre dos retroproyecciones filtradas, una utilizando técnicas en el dominio de la frecuencia y una utilizando técnicas en el dominio del espacio. A continuación se presentan las 3 imágenes obtenidas luego de la reconstrucción:

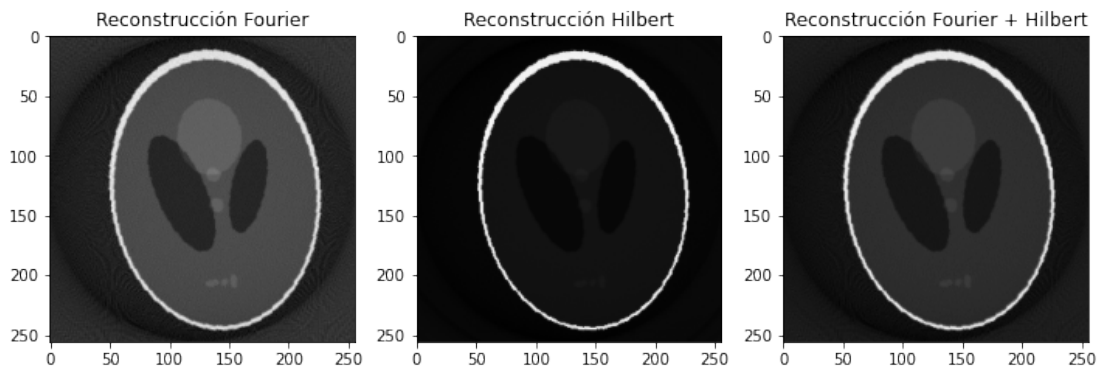


Figura 8: Imágenes reconstruidas

Utilizando la imagen obtenida, se simuló lo que ocurriría si se intentara atenuar una imagen con la información de la reconstrucción del sinograma obtenido tras el movimiento del paciente.

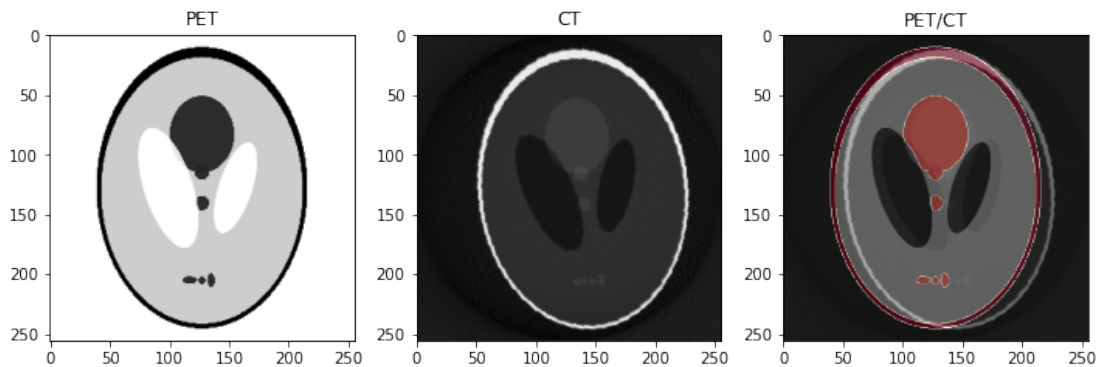


Figura 9: Imagen de PET/CT con movimiento del paciente

Se puede apreciar como se genera una imagen que no es precisa, debido a que la atenuación obtenida mediante la imagen de CT no coincide espacialmente con la imagen de PET. Lo anterior genera alteraciones en la imagen que podrían confundirse con artefactos generados por la reconstrucción de la imagen o, incluso, ocultar información relevante que podría estar en la imagen.

Para evaluar el método propuesto, se aplicó la reversión del movimiento a la imagen obtenida tras la reconstrucción. Lo anterior se logró revirtiendo la rotación y la traslación de la imagen, lo que permitió centrarla nuevamente. De esta manera, se obtuvo la siguiente imagen:

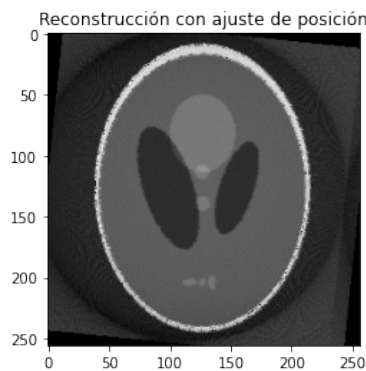


Figura 10: Imagen reconstruida con ajuste de posición

Utilizando la imagen con ajuste de posición, se repitió el procedimiento realizado anteriormente, que permite simular como sería la atenuación de una imagen, obtenida mediante PET, con la información de un CT, tras el ajuste de posición.

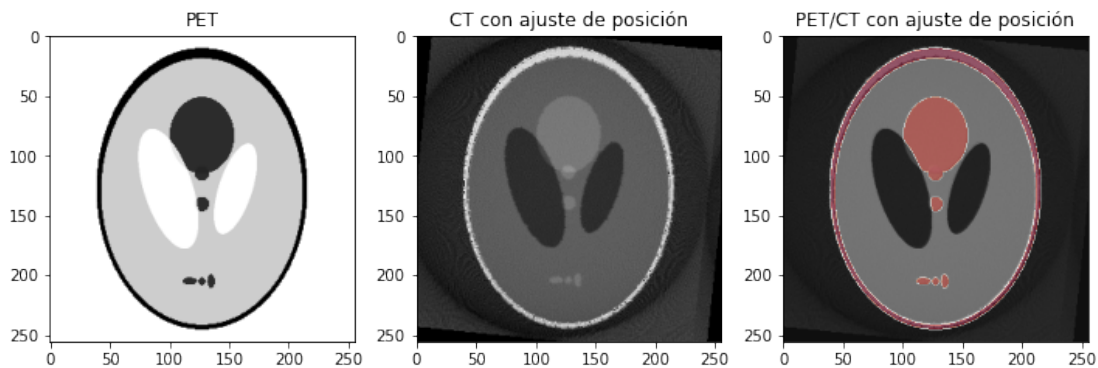


Figura 11: Imagen de PET/CT con ajuste de posición

Se puede apreciar como en la imagen de PET/CT con ajuste de posición no se presentan las alteraciones obtenidas en la imagen de PET/CT sin ajuste de posición, lo que entrega un resultado mucho más claro, casi sin pérdidas de información.

Finalmente, se compararon ambas imágenes obtenidas tras la combinación PET/CT. Ambas imágenes de PET/CT obtenidas se presenta a continuación:

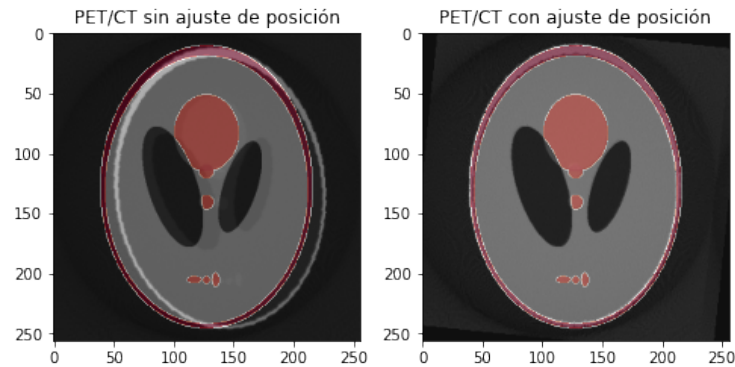


Figura 12: Imágenes de PET/CT obtenidas con y sin ajuste de posición

Analizando ambas imágenes lado a lado, es clara la diferencia en cuanto a la claridad de la información que cada una entrega, debido a que, como se mencionó anteriormente, la imagen de PET/CT con ajuste de posición no presenta las alteraciones obtenidas en la imagen de PET/CT sin ajuste de posición. Si bien la imagen con corrección de movimiento fue obtenida obviando los errores que podrían presentarse en la toma de muestras, como la cantidad de movimiento que presenta el paciente, es claro que una imagen corregida es mucho más precisa y facilita la lectura de un profesional de salud, minimizando los errores que podrían presentarse en el diagnóstico, a causa de la imprecisión de la información en la imagen de PET/CT.

Conclusión

Durante el proceso de formación de las imágenes PET/CT, se pueden producir movimientos del paciente, lo que deriva a una discordancia entre la imagen CT y la imagen PET al ser fusionadas, esto genera un problema para analizar y diagnosticar al paciente.

Se estudia un método de corrección de movimiento que fue creado para corregir artefactos producto de movimiento de cabeza. A partir de este se implementa un código para corregir artefactos producto de cualquier movimiento, optimizando el proceso de reconstrucción aplicando y sumando dos técnicas distintas de retro-proyección para obtener una imagen más precisa y con mayor cantidad de información veraz.

El método desarrollado para corregir el artefacto generado por movimiento demuestra ser favorable para la formación de imágenes utilizando la técnica PET/CT. Este mejora en un gran porcentaje la imagen, considerando lo anatómico como lo funcional, que es lo que se busca al utilizar esta técnica híbrida de formación de imágenes. Se espera que su aplicación abarque tanto pacientes con movimientos involuntarios predominantes como Parkinson o síndrome de Tourette, como pacientes con poco acatamiento.

Referencias

- Beyer, T., Townsend, D. W., Czernin, J., & Freudenberg, L. S. (2011). The future of hybrid imaging—part 2: PET/CT. *Insights into Imaging*. <https://doi.org/10.1007/s13244-011-0069-4>
- Smith, M., & Vergara, I. (2022). *Código desarrollado para el proyecto semestral de Imágenes Biomédicas IBM2101*. <https://github.com/ivanvlam/IBM2101/tree/main/Proyecto>
- Sureshbabu, W., & Mawlawi, O. (2005). PET/CT Imaging Artifacts. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. <https://tech.snmjournals.org/content/33/3/156.full>
- Tsai, Y.-J., & Liu, C. (2012). Pitfalls on PET/CT Due to Artifacts and Instrumentation. *Seminars in nuclear medicine*. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2021.06.015>
- Ye, H., Wong, K.-P., Wardak, M., Dahlbom, M., Kepe, V., Barrio, J. R., Nelson, L. D., Small, G. W., & Huang, S.-C. (2014). Automated Movement Correction for Dynamic PET/CT Images: Evaluation with Phantom and Patient Data. *PLoS One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103745>