

Título: Inteligencia Artificial en Imagen Molecular: Avances en Biomarcadores Radiómicos para Medicina de Precisión

Title: Artificial Intelligence in Molecular Imaging: Advances in Radiomic Biomarkers for Precision Medicine

Autores: Gilberto Hernandez Acosta^{1*} 0009-0005-5418-580X

gilberticohdezacosta@gmail.com

Raydel Antigua Mezquía¹ 0009-0005-1261-6034 raidel1709@gmail.com

¹Facultad de biología, Universidad de la Habana, La Habana, Cuba

Resumen: La integración de la inteligencia artificial (IA) en imagen molecular representa una revolución en el campo de la medicina de precisión, permitiendo el análisis exhaustivo de biomarcadores radiómicos para el diagnóstico y pronóstico personalizado de enfermedades. Por lo que se analizarán los avances más significativos en la aplicación de técnicas de IA para la extracción y análisis de biomarcadores radiómicos en imagen molecular, evaluando su impacto en la medicina de precisión. Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura publicada abarcando los últimos 10 años. La implementación de redes neuronales convolucionales mostró una mejora significativa en la estratificación de riesgos y la predicción de respuesta al tratamiento. Entonces se concluye que la integración de IA en el análisis de biomarcadores radiómicos ha transformado significativamente la medicina de precisión, permitiendo una caracterización más precisa de las enfermedades y facilitando decisiones terapéuticas personalizadas.

Palabras Clave: Inteligencia Artificial; Imagen Molecular; Medicina de Precisión

Abstract: The integration of artificial intelligence (AI) in molecular imaging represents a revolution in the field of precision medicine, enabling an exhaustive analysis of radiomic biomarkers for the personalized diagnosis and prognosis of diseases. Therefore, the most significant advances in the application of AI techniques for the extraction and analysis of radiomic biomarkers in molecular imaging will be analyzed, evaluating their impact on precision medicine. For this,

a systematic review of the literature published over the last 10 years was conducted. The implementation of convolutional neural networks showed a significant improvement in risk stratification and treatment response prediction. It is concluded that the integration of AI in the analysis of radiomic biomarkers has significantly transformed precision medicine, allowing a more accurate characterization of diseases and facilitating personalized therapeutic decisions.

Keywords: Artificial Intelligence; Molecular Imaging; Precision Medicine

Introducción

La medicina de precisión ha emergido como un enfoque innovador en el tratamiento y diagnóstico de enfermedades, particularmente en oncología, al considerar las características individuales de cada paciente, como su perfil genómico, proteómico y metabólico [1]. En este contexto, la imagen molecular ha adquirido un papel crucial al proporcionar información no invasiva sobre los procesos biológicos en los tejidos a nivel celular y molecular. Sin embargo, el análisis manual de estas imágenes presenta limitaciones debido a la complejidad y volumen de los datos generados [2].

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado el análisis de imágenes médicas al permitir la extracción automatizada de características relevantes y patrones ocultos, lo que ha dado lugar al desarrollo de biomarcadores radiómicos. Estos biomarcadores, derivados de algoritmos avanzados de aprendizaje automático, han demostrado ser herramientas prometedoras para predecir respuestas terapéuticas, clasificar subtipos tumorales y evaluar el pronóstico de diversas enfermedades [3,4]. En particular, la integración de IA en la radiómica ha permitido superar barreras tradicionales al combinar datos de imágenes con información clínica y genómica, facilitando así un enfoque más holístico y personalizado en la toma de decisiones médicas [5].

Los avances recientes en algoritmos de aprendizaje profundo (deep learning) han mejorado significativamente la capacidad de la IA para procesar imágenes moleculares complejas, como aquellas obtenidas mediante tomografía por emisión de positrones (PET) y resonancia magnética funcional (fMRI). Estas tecnologías no solo permiten la identificación de patrones sutiles en las imágenes, sino que también ofrecen una mayor precisión y reproducibilidad en

comparación con los métodos convencionales [6]. Además, la implementación de estas herramientas en la práctica clínica ha comenzado a transformar el paradigma de la medicina de precisión al optimizar la selección de tratamientos y reducir los costos asociados [7].

En este trabajo, exploraremos los avances recientes en el uso de inteligencia artificial aplicada a la imagen molecular, con un enfoque particular en el desarrollo de biomarcadores radiómicos. Se discutirán los retos actuales, las oportunidades futuras y el impacto potencial de estas tecnologías en la medicina de precisión.

Metodología

Se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre IA y análisis de imágenes médicas moleculares, abarcando los últimos 10 años como criterio de inclusión. De este modo se garantiza la novedad de los resultados presentados.

Las búsquedas se llevaron a cabo en PubMed, Elsevier, Scielo, Scopus y Web of Science, usando términos clave relacionados con inteligencia artificial, imagen molecular, biomarcadores radiómicos y medicina de precisión, combinados mediante operadores booleanos.

Resultados

En los últimos años, el desarrollo de biomarcadores radiómicos impulsados por inteligencia artificial (IA) ha mostrado un progreso significativo en la personalización de la medicina de precisión. Los estudios recientes han demostrado que la combinación de algoritmos avanzados de aprendizaje automático con datos derivados de imágenes moleculares mejora la capacidad de identificar características tumorales específicas y predecir respuestas terapéuticas [8]. En particular, la integración de la radiómica con el aprendizaje profundo ha permitido la extracción automatizada de características complejas de imágenes médicas, lo que ha resultado en una mayor precisión y reproducibilidad en el diagnóstico y la estratificación de pacientes [9].

Un ejemplo destacado del impacto de la IA en la imagen molecular es su aplicación en la evaluación de tumores mediante tomografía por emisión de positrones (PET) y resonancia magnética (RM). Aerts et al. [4] demostraron que

los biomarcadores radiómicos derivados de imágenes PET (Tomografía por Emisión de Positrones) pueden predecir el pronóstico de pacientes con cáncer de pulmón no microcítico con una precisión superior a la de los métodos tradicionales. Este estudio marcó un hito al mostrar cómo los datos no invasivos pueden codificar el fenotipo tumoral y proporcionar información clínica relevante.

Por otro lado, Lambin et al. [3] destacaron que la radiómica puede actuar como un puente entre la imagen médica y la medicina personalizada al combinar datos de imágenes con información genómica y clínica. Este enfoque integrado ha permitido la identificación de subgrupos de pacientes con diferentes perfiles moleculares y respuestas terapéuticas, lo que subraya el potencial de la IA para transformar la práctica clínica.

Además, se han logrado avances significativos en la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo en el análisis de imágenes moleculares. Litjens et al. [6] realizaron una revisión exhaustiva sobre el uso del aprendizaje profundo en el análisis de imágenes médicas, destacando su capacidad para superar las limitaciones de los métodos tradicionales. En particular, los modelos de redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado ser efectivos en la detección de patrones complejos en imágenes médicas y en la reducción de la variabilidad interobservador.

La aplicación de IA en la práctica clínica ha mostrado resultados prometedores en la optimización de tratamientos personalizados. Por ejemplo, Yasaka y Abe [7] señalaron que los algoritmos de aprendizaje profundo aplicados a imágenes de resonancia magnética pueden mejorar la precisión diagnóstica en enfermedades neurológicas y oncológicas, reduciendo el tiempo necesario para el análisis y mejorando los resultados clínicos.

Avesani et al. [10] demostraron que los modelos radiómicos basados en tomografía computarizada (CT) y aprendizaje profundo pueden predecir la mutación BRCA (Breast Cancer gene) y la supervivencia libre de progresión en pacientes con cáncer de ovario. Aunque los modelos tradicionales mostraron limitaciones en su rendimiento, la inclusión de variables clínicas mejoró significativamente la precisión predictiva. Este estudio subrayó la importancia de

la armonización de datos y la integración de la radiómica con información clínica para avanzar hacia una medicina personalizada.

Según el informe de la Fundación Instituto Roche [11], la IA está transformando la medicina de precisión al permitir la identificación de biomarcadores específicos y al facilitar la toma de decisiones clínicas basadas en grandes volúmenes de datos. Este informe también resalta los desafíos éticos y regulatorios asociados con la implementación de estas tecnologías en entornos clínicos, lo que subraya la necesidad de un marco normativo robusto para garantizar su uso seguro y efectivo.

Madrid García [12] analizó cómo el aprendizaje profundo y los modelos de lenguaje de gran escala (LLMs) están revolucionando el análisis de datos médicos, incluyendo imágenes y registros clínicos. Además, destacó la importancia de la explicabilidad en los modelos de IA para garantizar su adopción en la práctica clínica, así como la necesidad de validación externa para mejorar su confianza y aplicabilidad. Este análisis refuerza el papel central de la IA en la mejora de los sistemas de salud modernos.

Martí-Bonmatí [13] destacó iniciativas como PRIMAGE y CHAIMELEON, que buscan garantizar la interoperabilidad entre sistemas y mejorar la calidad de los datos en oncología. Estas iniciativas han demostrado cómo la IA puede integrarse en la medicina de precisión para facilitar la identificación de patrones relevantes en imágenes médicas, lo que contribuye al desarrollo de modelos más robustos y reproducibles.

La implementación de infraestructuras de datos para inteligencia artificial en imagen médica ha sido clave para abordar los retos de interoperabilidad y calidad de datos. Kondylakis et al. [14] analizaron las experiencias de cinco proyectos europeos (Primage, CHAIMELEON, ProCancer-I, INCISIVE y EuCanImage), destacando cómo la armonización de datos y el desarrollo de modelos de datos comunes han mejorado la reproducibilidad y la aplicabilidad clínica de los modelos de IA. Este estudio enfatizó la importancia de establecer estándares compartidos para maximizar el impacto de la IA en la investigación médica y la práctica clínica.

En conjunto, los resultados de estos estudios subrayan el papel fundamental de la inteligencia artificial en la evolución de los biomarcadores radiómicos. Aunque aún existen desafíos, como la necesidad de estandarización y validación clínica, los avances actuales muestran un camino claro hacia la integración de estas tecnologías en la medicina de precisión.

Discusión

Los resultados de esta revisión sistemática ponen de manifiesto el impacto significativo de la inteligencia artificial (IA) en el desarrollo y aplicación de biomarcadores radiómicos en la medicina de precisión. La combinación de algoritmos avanzados de aprendizaje automático y aprendizaje profundo con datos de imágenes moleculares ha demostrado mejorar la identificación de características tumorales específicas y predecir respuestas terapéuticas con una precisión y reproducibilidad superiores a los métodos tradicionales.

Conclusiones

La integración de la IA en el análisis de biomarcadores radiómicos representa un avance significativo en la medicina de precisión, proporcionando herramientas poderosas para el diagnóstico, pronóstico y seguimiento personalizado de enfermedades.

Los sistemas basados en IA han demostrado una capacidad superior para identificar patrones sutiles en imágenes moleculares, superando las limitaciones del análisis visual tradicional.

Referencias

1. Jameson JL, Longo DL. Precision medicine—personalized, problematic, and promising. *N Engl J Med*. 2015;372(23):2229–2234.
2. Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: Images are more than pictures, they are data. *Radiology*. 2016;278(2):563–577.
3. Lambin P, Leijenaar RT, Deist TM, et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine. *Nat Rev Clin Oncol*. 2017;14(12):749–762.

4. Aerts HJWL, Velazquez ER, Leijenaar RTH, et al. Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach. *Nat Commun*. 2014;5:4006.
5. Bi WL, Hosny A, Schabath MB, et al. Artificial intelligence in cancer imaging: Clinical challenges and applications. *CA Cancer J Clin*. 2019;69(2):127–157.
6. Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. A survey on deep learning in medical image analysis. *Med Image Anal*. 2017;42:60–88.
7. Yasaka K, Abe O. Deep learning and artificial intelligence in radiology: Current applications and future directions. *PLoS Med*. 2018;15(11):e1002707.
8. Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, et al. Artificial intelligence in radiology. *Nat Rev Cancer*. 2018;18(8):500–510.
9. Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, et al. A guide to deep learning in healthcare. *Nat Med*. 2019;25(1):24–29.
10. Avesani G, Tran HE, Cammarata G, et al. CT-Based Radiomics and Deep Learning for BRCA Mutation and Progression-Free Survival Prediction in Ovarian Cancer Using a Multicentric Dataset. *Cancers*. 2022;14:2739.
11. Fundación Instituto Roche. Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Medicina Personalizada de Precisión. Informes Anticipando. 2023. ISBN edición online: 978-84-09-53025-0.
12. Madrid García A. Papel y aplicación de las técnicas de inteligencia artificial en medicina. Presentación en el Servicio de Reumatología. 2024.
13. Martí-Bonmatí L. Inteligencia artificial en imagen médica. *An RANM*. 2024;141(02):111-118. DOI: 10.32440/ar.2024.141.02.rev02.
14. Kondylakis H, Kalokyri V, Sfakianakis S, et al. Data infrastructures for AI in medical imaging: a report on the experiences of five EU projects. *Eur Radiol Exp*. 2023;7:20.