

ARTÍCULO ORIGINAL

TECNOLOGÍA CUÁNTICA Y PROGRESOS EN MEDICINA Quantum technology and advances in medicine

Juan José Díez

Académico de Número de la Sección de Medicina de la Real Academia de Doctores de España
juanjose.diez@salud.madrid.org

RESUMEN

La integración de la computación cuántica en la medicina marca una revolución tecnológica con potencial para transformar profundamente el diagnóstico, el tratamiento y la investigación biomédica. Gracias a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos con velocidad y precisión superiores a la computación clásica, esta tecnología puede detectar enfermedades en fases tempranas, mejorar la clasificación de tumores y optimizar la toma de decisiones clínicas. Los sensores cuánticos permiten detectar cambios mínimos en parámetros biológicos y biomarcadores, ampliando significativamente el alcance del diagnóstico precoz. Además, la resonancia magnética cuántica mejora la resolución y sensibilidad de las pruebas de imagen. Otra aplicación destacada es el desarrollo de gemelos digitales, modelos personalizados del cuerpo humano que simulan enfermedades y respuestas terapéuticas, y permiten realizar ensayos clínicos virtuales. La simulación cuántica de moléculas acelera el diseño de fármacos personalizados. Sin embargo, estas innovaciones se enfrentan a importantes desafíos: altos costes, falta de integración clínica, escasa formación profesional, ausencia de regulación y riesgos éticos relacionados con la equidad y la privacidad de los datos. A pesar de estar aún en fase experimental, la tecnología cuántica promete un impacto profundo y duradero en la medicina de precisión y la salud global.

PALABRAS CLAVE: Computación cuántica; medicina personalizada; diagnóstico precoz; sensores cuánticos; diseño de fármacos; gemelos digitales.

ABSTRACT

The integration of quantum computing into medicine marks a technological revolution with the potential to profoundly transform diagnosis, treatment, and biomedical research. Thanks to its ability to process large volumes of data with speed and accuracy superior to classical computing, this technology can detect diseases in early stages, improve tumor classification, and optimize clinical decision-making. Quantum sensors make it possible to detect minimal changes in biological parameters and biomarkers, significantly expanding the scope of early diagnosis. Furthermore, quantum magnetic resonance imaging is improving the resolution and sensitivity of imaging tests. Another notable application is the development of digital twins, personalized models of the human body that simulate diseases and therapeutic responses and enable virtual clinical trials. Quantum simulation of molecules accelerates the design of personalized drugs. However, these innovations face significant challenges: high costs, lack of clinical integration, limited professional training, lack of regulation, and ethical risks related to equity and data privacy. Although still in the experimental phase, quantum technology promises a profound and lasting impact on precision medicine and global health.

KEYWORDS: Quantum computing; personalized medicine; early diagnosis; quantum sensors; drug design; digital twins.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de los principios de la física cuántica para manipular partículas individuales y sus estados cuánticos representa una nueva era para el desarrollo científico y técnico, y cuenta con la capacidad de transformar conceptos previos al explotar las reglas no intuitivas del mundo subatómico. El enorme potencial que presenta esta tecnología puede transformar muchas áreas de la medicina que incluyen desde los procedimientos diagnósticos hasta el diseño de fármacos y los tratamientos personalizados.

De forma análoga a los bits utilizados en la computación clásica, la computación cuántica utiliza los cúbits como unidades básicas de la información. A diferencia de los bits clásicos, que pueden adoptar los valores de 0 o 1, los cúbits aprovechan dos fenómenos mecánicos claves: la superposición y el entrelazamiento. La superposición permite que los cúbits existan en un estado que representa tanto 0 como 1 simultáneamente, en lugar de un estado definido. Esta capacidad permite a las computadoras cuánticas procesar una gran cantidad de información en paralelo, lo que potencialmente resuelve problemas complejos con mayor rapidez que las computadoras clásicas. Además, los cúbits pueden entrelazarse, lo que significa que el estado de un cúbit puede depender del estado de otro, incluso cuando están separados por grandes distancias. Estas propiedades permiten a las computadoras cuánticas resolver problemas complejos de forma más eficiente, ya que pueden explorar múltiples posibilidades simultáneamente, en lugar de secuencialmente como ocurre con las computadoras clásicas (1,2).

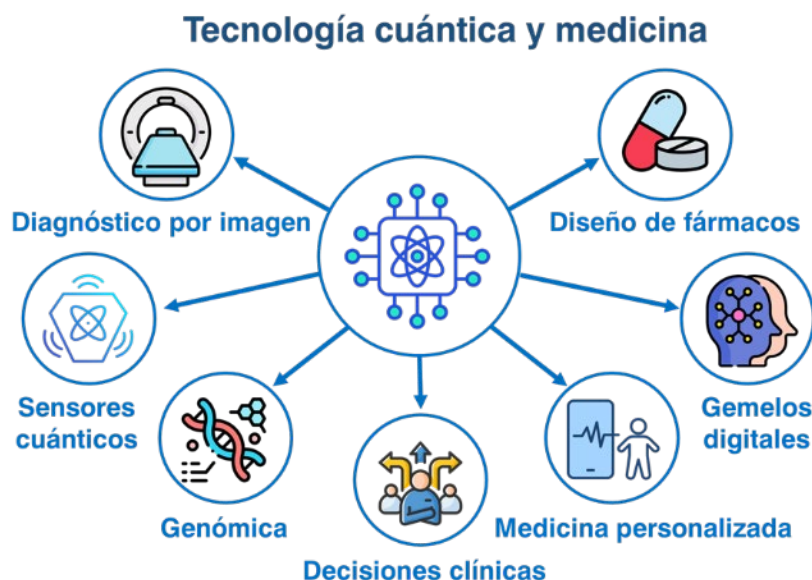


Figura 1. Principales aplicaciones de la tecnología de computación cuántica en medicina.

La capacidad de los sistemas cuánticos para gestionar grandes conjuntos de datos y realizar cálculos de elevada complejidad los posiciona como una herramienta transformadora para

el avance de la medicina de precisión y la toma de decisiones en el ámbito clínico. El número de posibles aplicaciones y las áreas de las ciencias médicas donde la computación cuántica puede generar novedades y beneficios es enorme y su exposición completa requeriría un análisis exhaustivo y dilatado. A continuación se ofrece una revisión sucinta que pretende mostrar un panorama general de las principales áreas de la medicina clínica donde la computación cuántica ha mostrado avances prometedores y perspectivas esperanzadoras para su aplicación directa a los pacientes (figura 1).

2. APLICACIONES DIAGNÓSTICAS

Una de las propiedades más asombrosas de la computación cuántica es su capacidad para analizar enormes volúmenes de datos biomédicos con una velocidad muy superior a la que conocemos con la computación clásica. Esta característica tendrá una aplicación inmediata en la mejoría de la precisión diagnóstica.

Los algoritmos cuánticos, como las redes neuronales cuánticas, tienen el potencial de procesar conjuntos de datos médicos complejos con mayor eficiencia que los sistemas clásicos, identificando patrones sutiles que a menudo pasan desapercibidos. Esta capacidad es especialmente útil en el diagnóstico de enfermedades como el cáncer y los trastornos neurodegenerativos, donde la detección temprana es crucial para el éxito del tratamiento. Algunos algoritmos cuánticos han demostrado potencial para detectar tumores en etapas tempranas de su desarrollo, así como para clasificar subtipos de tumores con mayor exactitud y precisión. A modo de ejemplo, la integración de capas cuánticas en redes neuronales ha permitido no sólo un mejor rendimiento en la identificación de cánceres de mama en fases iniciales, sino también una mayor capacidad para diferenciar entre subtipos histológicos (3,4).

La medicina moderna emplea un gran número de sensores destinados al control clínico de biomarcadores o signos vitales. Los más conocidos incluyen sensores de glucosa para el control de la diabetes, sensores de presión arterial, oxímetros, sensores de frecuencia cardíaca, respiratorios y de temperatura corporal (5). A pesar de que la utilidad de estos dispositivos está fuera de duda, las tecnologías cuánticas transformarán y ampliarán notablemente sus usos clínicos. Los sensores cuánticos permitirán detectar cambios muy pequeños en los parámetros biológicos, como campos magnéticos cerebrales o cardíacos, con una precisión extrema, lo que permitiría realizar diagnósticos más tempranos de enfermedades neurológicas, cardíacas o de otra índole. La tecnología cuántica también tiene su aplicación en la identificación de concentraciones extremadamente bajas de moléculas, como marcadores tumorales o proteínas asociadas a enfermedades neurodegenerativas, lo que ampliará aún más las aplicaciones prácticas de los nuevos sensores (6-9).

El diagnóstico por la imagen es tal vez una de las áreas de la medicina que se beneficiarán de forma más relevante de la tecnología cuántica en la medida en que ésta podrá mejorar la resolución de las pruebas de imagen tradicionales. Un ejemplo es la resonancia magnética cuántica que aporta mayor resolución, menor tiempo de escaneo y, por tanto, mejor sensibilidad en la detección de lesiones más pequeñas (10). Con ello se podrá facilitar el rendimiento diagnóstico de tumores de pequeño tamaño, microlesiones cerebrales o en otros órganos y enfermedad vascular en fases iniciales.

Algunos estudios han mostrado la utilidad de los modelos mejorados cuánticamente para optimizar los flujos de trabajo de diagnóstico (11). Se han diseñado redes neuronales híbridas clásicas-cuánticas para la detección de la enfermedad de Alzheimer, entrenadas con un conjunto de formado por miles de resonancias magnéticas que pueden alcanzar precisiones diagnósticas muy elevadas (12).

El uso de modelos computacionales mejorados cuánticamente ha permitido el análisis de lesiones cutáneas con precisiones superiores a las alcanzadas con modelos clásicos, y superando significativamente las evaluaciones visuales tradicionales realizadas por clínicos expertos, lo que implica una mayor precisión y eficiencia computacional (13).

En el área oncológica, la computación cuántica ha demostrado mejorar la precisión de las imágenes e identificar diferencias sutiles en algunos tumores, lo que se traduce en una detección más temprana de las lesiones y, por tanto, una mejor planificación quirúrgica. Los algoritmos mejorados por la computación cuántica demostraron la capacidad de integrar múltiples tipos de datos de pacientes, lo que permite recomendaciones de tratamiento personalizadas y una mejor toma de decisiones en casos complejos de cáncer (6,9).

El uso de algoritmos de aprendizaje automático cuántico podría superar a los algoritmos clásicos en tareas de clasificación radiómica, tales como la predicción de supervivencia y la estratificación de riesgo en cohortes de tomografía por emisión de positrones (PET) oncológico, siempre que se utilicen técnicas de mitigación de errores para contrarrestar la actual inestabilidad del hardware cuántico (14). Por otro lado, la computación cuántica ha mostrado utilidad en la reducción de ruido en mamografía, detección de bordes en imágenes de cáncer de mama y clasificación de cáncer, mostrando potencial para optimizar la eficiencia computacional y la precisión diagnóstica en radiómica (9).

Por su parte, las tecnologías basadas en puntos cuánticos están revolucionando el diagnóstico por imagen permitiendo la detección a nivel de célula única y la obtención de imágenes con resolución submicrométrica. Un ejemplo de ello es el uso de puntos cuánticos conjugados con anticuerpos en inmunohistoquímica, lo que permite la detección simultánea de múltiples proteínas en células individuales con alta sensibilidad y especificidad. La combinación de puntos cuánticos con amplificación de señal basada en ADN ha permitido superar a la inmunohistoquímica convencional, permitiendo la obtención de perfiles

moleculares detallados en células individuales. Los puntos cuánticos se han utilizado también en técnicas de superresolución, como la obtención de imágenes tridimensionales de la distribución de receptores en la membrana plasmática con resoluciones superiores a los métodos clásicos. Todo ello contribuirá también a una mayor sensibilidad en los diagnósticos con lo que podríamos tener acceso a iniciar tratamientos en fases más tempranas de la enfermedad (10,15-17).

3. MODELOS DIGITALES

Las tecnologías cuánticas permiten crear gemelos digitales, es decir, modelos digitales detallados de órganos o sistemas del cuerpo humano, lo que puede llegar a ser de extraordinaria utilidad en la práctica clínica. Los modelos permiten la simulación personalizada de escenarios clínicos, facilitando la predicción de la evolución de las enfermedades o sus respuestas a los tratamientos (18-20).

A modo de ejemplo podemos señalar que se han desarrollado modelos computacionales que replican la dinámica cardíaca a nivel individual, permitiendo simular arritmias, planificar procedimientos como la resincronización cardíaca y predecir la respuesta a dispositivos implantables (18). La computación cuántica puede optimizar la simulación de la electrofisiología y la mecánica cardíaca, facilitando la personalización y la toma de decisiones clínicas en tiempo real. Los modelos digitales de huesos y articulaciones se han utilizado para predecir la progresión de enfermedades como la artrosis o para planificar cirugías ortopédicas. La integración de datos de imágenes, genómica y sensores portátiles puede beneficiarse de algoritmos cuánticos para mejorar la precisión y velocidad de las simulaciones (21). Los gemelos digitales pulmonares y de sistemas biológicos permiten, a su vez, simular la función respiratoria o la respuesta inmunológica ante infecciones o terapias, lo que es útil en la planificación de tratamientos personalizados y en la investigación de nuevas intervenciones (21,22).

La mayoría de estas aplicaciones se encuentran en fases preclínicas o de validación, pero no es aventurado afirmar que la computación cuántica podría ser clave para superar las limitaciones computacionales actuales y llevar los gemelos digitales a la práctica clínica rutinaria. Los gemelos digitales pueden optimizar la planificación de procedimientos diagnósticos y terapéuticos al modelar intervenciones y predecir resultados antes de realizarlos en el paciente real. Podrían incluso realizarse ensayos clínicos virtuales mediante cohortes de gemelos digitales que permitan probar hipótesis, optimizar diseños y reducir la necesidad de ensayos en humanos, acelerando así el desarrollo de nuevas terapias (18-20).

4. DESARROLLO DE FÁRMACOS

El desarrollo de algoritmos para la simulación molecular es crucial para el descubrimiento de fármacos. Las computadoras clásicas tienen dificultades para simular la naturaleza cuántica de moléculas complejas debido a la gran cantidad de variables involucradas, ya que deben considerar cada estado posible de cada partícula de forma independiente. Este enfoque puede llegar a ser extremadamente impracticable con sistemas moleculares complejos. Las computadoras cuánticas, no obstante, pueden modelar estas interacciones con mayor precisión y eficiencia, aprovechando propiedades cuánticas como la superposición y el entrelazamiento. La simulación cuántica permite predecir la estructura y el comportamiento de las proteínas y modelar interacciones moleculares complejas. Esta metodología persigue la optimización de las moléculas candidatas, así como el análisis de los mecanismos de acción de los fármacos, con mayor precisión que los métodos tradicionales, lo que persigue acelerar el descubrimiento de nuevos medicamentos y el diseño de sistemas de liberación de fármacos más eficaces y personalizados (23,24).

Las computadoras clásicas tienen dificultades con este tipo de simulación a medida que aumenta la complejidad molecular, pero las computadoras cuánticas pueden modelar con mayor precisión estas interacciones, reduciendo significativamente el tiempo y el coste del proceso de desarrollo de fármacos. Además, el diseño de fármacos así concebido podría complementarse con un análisis de posibles efectos secundarios antes de entrar en la fase de producción (23).

Por otra parte, la computación cuántica presenta el potencial de acelerar no sólo el descubrimiento de fármacos, sino el diseño de los ensayos clínicos al mejorar las estrategias actuales. Los enfoques de aprendizaje automático cuántico y optimización pueden transformar pasos clave en la simulación de ensayos clínicos, la selección de centros y las estrategias de identificación de cohortes, reduciendo así la carga económica general y aumentando el rendimiento. Además, podrían reducirse los costes de los ensayos clínicos y evitarse algunos efectos adversos, lo que permitiría una optimización de los procedimientos. La integración de algoritmos cuánticos en el diseño y la optimización de ensayos clínicos no solo busca mejorar la eficiencia y la precisión de las simulaciones, la selección del centro y la identificación de la cohorte, sino que también podría garantizar que los ensayos sean más inclusivos, personalizados y, en última instancia, más efectivos para determinar la seguridad y la eficacia de nuevas terapias (25).

5. GENÓMICA Y MEDICINA PERSONALIZADA

La tecnología cuántica supera a los métodos actuales en lo que se refiere al análisis de grandes cantidades de datos genéticos y clínicos, y lo hace de forma más rápida, de modo

que nos permitirá conocer las anomalías genéticas que presenta un paciente determinado y diseñar, por tanto, de una forma personalizada, la molécula más adecuada para dirigirse a la diana correspondiente (23,26). Esto resultaría especialmente útil en algunos tumores producidos por mutaciones que son susceptibles de terapias dirigidas.

Hasta la fecha, los métodos utilizados para simular interacciones moleculares y predecir la interacción de los fármacos con sus receptores resultan costosos y consumen mucho tiempo (27). Las computadoras cuánticas, sin embargo, pueden simular estas interacciones a nivel cuántico, proporcionando modelos más precisos del comportamiento molecular en un tiempo notablemente reducido. Ello posibilita la identificación de fármacos candidatos con mayor precisión y rapidez, reduciendo además los costes de los procedimientos. Esta tecnología se ha empleado ya en la aplicación de algoritmos cuánticos para acelerar el descubrimiento de medicamentos para enfermedades neurológicas o en el estudio de los ARN utilizados en vacunas (28). Estos son algunos ejemplos de cómo la computación cuántica está transformando la genómica y la medicina personalizada al permitir el análisis de interacciones genéticas complejas a una escala que actualmente es imposible lograr con las computadoras clásicas (28).

De forma parecida la computación cuántica se está estudiando para calcular las trayectorias óptimas de radiación en tratamientos para el cáncer y minimizar el daño a los tejidos sanos, maximizando el impacto en las células tumorales. Las herramientas de segmentación con tecnología cuántica mejoran la planificación de la radioterapia al adaptar la dosis de radiación a cada paciente. Las redes neuronales cuánticas se han empleado para identificar geometrías tumorales complejas con mayor precisión. Las herramientas de imagen adaptativa basadas en tecnología cuántica han resultado prometedoras para optimizar los ajustes en tiempo real durante la planificación de los tratamientos radioterápicos (9,29).

La computación cuántica se ha empleado también en la planificación neuroquirúrgica para abordar tareas complejas como el registro de imágenes en tiempo real y sus actualizaciones intraoperatorias. Existen métodos para alinear resonancias magnéticas preoperatorias e intraoperatorias, que podrían reducir sensiblemente la carga computacional y mejorar la precisión en el seguimiento de las lesiones cerebrales durante la cirugía. Todos estos avances, aún en fase experimental, sugieren que la mayor precisión y velocidad permitiría a los cirujanos localizar mejor las estructuras cerebrales críticas y realizar ajustes intraoperatorios, incrementando así la seguridad y la eficacia de los procedimientos (30,31).

6. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Aunque aún estamos en una fase incipiente, las ventajas que se vislumbran para el futuro de las aplicaciones médicas de la tecnología cuántica son esperanzadoras. La detección

temprana de enfermedades y la precisión en los diagnósticos reducirá la morbimortalidad de enfermedades crónicas. El descubrimiento acelerado de nuevos fármacos y terapias personalizadas podrá revolucionar el área de la terapéutica tal como lo conocemos ahora. Los algoritmos cuánticos podrán mejorar la interpretación de imágenes médicas, la clasificación de tumores y la planificación de tratamientos. Además, la computación cuántica puede aportar ventajas en el análisis causal de datos médicos complejos, incluso en escenarios con muestras pequeñas, como enfermedades raras, permitiendo descubrir relaciones clínicas que antes eran inaccesibles (32).

Indudablemente, los pacientes con enfermedades neoplásicas se encuentran entre los principales beneficiarios de las nuevas tecnologías. Pero no son los únicos, como lo demuestran los análisis avanzados de neuroimagen y la identificación precoz de patrones anormales en pacientes con enfermedades neurodegenerativas (6,33). Los pacientes con enfermedades raras también pueden obtener beneficio de las simulaciones moleculares cuánticas que permiten optimizar el desarrollo de moléculas y desarrollar, por tanto, un tratamiento personalizado más eficaz. Los pacientes con enfermedades crónicas complejas o los que necesitan un control intensivo de parámetros biológicos también pueden obtener gran beneficio de los sensores cuánticos para el seguimiento en tiempo real, detección de anomalías e intervenciones terapéuticas más precisas y con menores retrasos (23,33).

Es evidente que en el momento actual existen limitaciones sustanciales a la hora de la aplicación práctica de estos nuevos avances técnicos. La adopción clínica generalizada aún enfrenta desafíos técnicos y éticos, como la escalabilidad del hardware y la mitigación de errores, que requieren innovación y colaboración interdisciplinaria (8,9). Hemos de reconocer que la mayoría de las tecnologías de computación cuántica se encuentran todavía en una fase experimental y, por tanto, fuera del alcance de la mayoría de los pacientes y sistemas sanitarios. El acceso a los computadores cuánticos es restringido, los costes de adquisición, operación y mantenimiento son elevados, lo que circunscribe su aplicación generalizada, especialmente en ámbitos de recursos limitados (6,7). Por su parte, los profesionales de la salud pueden encontrar serias dificultades debidas a la falta de integración de las soluciones cuánticas en los sistemas de información clínica o en los flujos de trabajo hospitalarios. Además, existen pocos estudios clínicos a gran escala que demuestren de manera fehaciente sus beneficios en comparación con las tecnologías tradicionales. Tampoco disponemos de un marco regulatorio específico para el desarrollo y aprobación de algoritmos o dispositivos cuánticos en medicina (8,9). Por otro lado, nos encontramos ante la necesidad todavía no cubierta de formación de profesionales de la salud en el área de las tecnologías cuánticas, lo que también condiciona la aplicación de estos procedimientos en la práctica clínica.

7. ASPECTOS ÉTICOS

No debemos olvidar tampoco los aspectos éticos del uso de las tecnologías cuánticas en la práctica médica. La complejidad técnica, el elevado coste y la limitación de personal capacitado para su uso son factores condicionantes de una posible falta de equidad en la aplicación de estas tecnologías en la vida real. Las diferencias entre sistemas sanitarios avanzados y otros con escasez de recursos puede generar inequidades en el acceso a diagnósticos tempranos y, por tanto, a tratamientos más precoces y precisos. Esta situación puede generar marginación de algunos pacientes vulnerables y hacer que solo centros de referencia en países desarrollados adopten estas tecnologías, excluyendo a poblaciones enteras de sus potenciales beneficios (34,35). La confidencialidad de los datos es otro de los aspectos éticos destacables debido al enorme volumen de datos clínicos, genéticos y de otra índole que se pueden manejar con el empleo de estos procedimientos. No disponemos actualmente de un marco regulatorio específico para las tecnologías cuánticas, pero resulta claro que existe una necesidad de proteger la confidencialidad de los datos personales de los pacientes y de regular el consentimiento informado (35,36).

8. DIFICULTADES Y DESAFÍOS

Finalmente, caber señalar que la puesta en marcha de cualquier tecnología novedosa conlleva dificultades y desafíos que afectan tanto a profesionales como a pacientes. Los profesionales pueden verse abrumados por la complejidad técnica de la computación cuántica y sus algoritmos, lo que puede actuar como un factor limitante a la hora de aplicar procedimientos y transmitirlos a los pacientes. A ello se suma la dificultad intrínseca que ya presentan las enfermedades raras donde las lagunas de conocimiento y las áreas de incertidumbre tanto diagnósticas como terapéuticas son más evidentes (37,38). La presión asistencial, la escasez de tiempo en las consultas, así como la falta de recursos para la capacitación específica de profesionales puede impedir que clínicos interesados adquieran competencias para trabajar con recursos tecnológicos avanzados y comunicar resultados complejos de forma adaptada a las necesidades de los pacientes (8,39).

Es necesaria también la participación de los pacientes, especialmente en lo que se refiere a su compromiso de recolección de datos clínicos. Pero también el paciente informado debe participar de forma responsable en la toma de decisiones clínicas. Los consentimientos informados deben ser claros, completos, adaptados y dinámicos, incluyendo información comprensible sobre el funcionamiento, limitaciones y riesgos de las tecnologías cuánticas (40). Debe, en resumen, fomentarse una comunicación abierta, bidireccional y continuada entre médico y paciente para resolver dudas, reducir incertidumbres y fortalecer la relación médico-paciente (41).

9. CONCLUSIÓN

Aunque muchas de las aplicaciones de la computación cuántica aún se encuentran en fases experimentales o de validación, la integración de la tecnología cuántica en la medicina promete transformar la investigación biomédica, el diagnóstico precoz y la medicina de precisión en los próximos años (10,33,42).

A medida que la tecnología cuántica continúe evolucionando se expandirán sus aplicaciones en atención sanitaria y es esperable que alcancemos con ello soluciones que sobrepasarán con mucho las actualmente disponibles. Realizar diagnósticos más precisos y tempranos, ofrecer terapias personalizadas, mejorar nuestro conocimiento de enfermedades complejas y descubrir nuevos fármacos de forma más rápida y eficiente son algunas de las aplicaciones que hoy nos parecen revolucionarias pero que en las próximas décadas podremos tener a nuestro alcance gracias a las nuevas tecnologías.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Flother, F.F.; Griffin, P.F. How can quantum technologies be applied in healthcare, medicine and the life sciences? *Res. Dir. Quantum Technol.* 2023;1:1-5. doi: 10.1017/qut.2023.1.
2. Ur Rasool R, Ahmad HF, Rafique W, Qayyum A, Qadir J, Anwar Z. Quantum computing for healthcare: A review. *Future Internet* 2023;15:94. <https://doi.org/10.3390/fi15030094>
3. Xiang Q, Li D, Hu Z, Yuan Y, Sun Y, Zhu Y, Fu Y, Jiang Y, Hua X. Quantum classical hybrid convolutional neural networks for breast cancer diagnosis. *Sci Rep.* 2024 Oct 21;14(1):24699. doi: 10.1038/s41598-024-74778-7.
4. Shukla AK, Dwivedi S, Singh D, Singh SK, Tripathi D, Dewangan RK. Optimized breast cancer diagnosis using self-adaptive quantum metaheuristic feature selection. *Sci Rep.* 2025 Jun 6;15(1):19900. doi: 10.1038/s41598-025-05014-z.
5. Guarducci S, Jayousi S, Caputo S, Mucchi L. Key Fundamentals and Examples of Sensors for Human Health: Wearable, Non-Continuous, and Non-Contact Monitoring Devices. *Sensors (Basel).* 2025 Jan 19;25(2):556. doi: 10.3390/s25020556.
6. Fairburn SC, Jehi L, Bicknell BT, Wilkes BG, Panuganti B. Applications of quantum computing in clinical care. *Front Med (Lausanne).* 2025 Apr 23;12:1573016. doi: 10.3389/fmed.2025.1573016.
7. Cordier BA, Sawaya NPD, Guerreschi GG, McWeeney SK. Biology and medicine in the landscape of quantum advantages. *J R Soc Interface.* 2022 Nov;19(196):20220541. doi: 10.1098/rsif.2022.0541.
8. Durant TJS, Knight E, Nelson B, Dudgeon S, Lee SJ, Walliman D, Young HP, Ohno-Machado L, Schulz WL. A primer for quantum computing and its applications to healthcare and biomedical research. *J Am Med Inform Assoc.* 2024 Aug 1;31(8):1774-1784. doi: 10.1093/jamia/ocae149.

9. Rahimi M, Asadi F. Oncological Applications of Quantum Machine Learning. *Technol Cancer Res Treat.* 2023 Jan-Dec;22:15330338231215214. doi: 10.1177/15330338231215214.
10. Yukawa H, Kono H, Ishiwata H, Igarashi R, Takakusagi Y, Arai S, Hirano Y, Suhara T, Baba Y. Quantum life science: biological nano quantum sensors, quantum technology-based hyperpolarized MRI/NMR, quantum biology, and quantum biotechnology. *Chem Soc Rev.* 2025 Mar 31;54(7):3293-3322. doi: 10.1039/d4cs00650j.
11. Schetakis N, Aghamalyan D, Griffin P, Boguslavsky M. Review of some existing QML frameworks and novel hybrid classical-quantum neural networks realising binary classification for the noisy datasets. *Sci Rep.* 2022 Jul 13;12(1):11927. doi: 10.1038/s41598-022-14876-6.
12. Jenber Belay A, Walle YM, Haile MB. Deep Ensemble learning and quantum machine learning approach for Alzheimer's disease detection. *Sci Rep.* 2024 Jun 20;14(1):14196. doi: 10.1038/s41598-024-61452-1.
13. Li Z, Chen Z, Che X, Wu Y, Huang D, Ma H and Dong Y (2022), A classification method for multi-class skin damage images combining quantum computing and Inception-ResNet-V1. *Front. Phys.* 10:1046314. doi: 10.3389/fphy.2022.1046314
14. Moradi S, Spielvogel C, Krajnc D, Brandner C, Hillmich S, Wille R, Traub-Weidinger T, Li X, Hacker M, Drexler W, Papp L. Error mitigation enables PET radiomic cancer characterization on quantum computers. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2023 Nov;50(13):3826-3837. doi: 10.1007/s00259-023-06362-6.
15. Phafat B, Bhattacharya S. Quantum Dots as Theranostic Agents: Recent Advancements, Surface Modifications, and Future Applications. *Mini Rev Med Chem.* 2023;23(12):1257-1272. doi: 10.2174/1389557522666220405202222.
16. Wu K, He R. Perspective: magnetic quantum sensors for biomedical applications. *Nanotechnology.* 2025 Feb 27;36(15). doi: 10.1088/1361-6528/adb635.
17. Yukawa H, Sato K, Baba Y. Theranostics applications of quantum dots in regenerative medicine, cancer medicine, and infectious diseases. *Adv Drug Deliv Rev.* 2023 Sep;200:114863. doi: 10.1016/j.addr.2023.114863.
18. Thangaraj PM, Benson SH, Oikonomou EK, Asselbergs FW, Khera R. Cardiovascular care with digital twin technology in the era of generative artificial intelligence. *Eur Heart J.* 2024 Dec 1;45(45):4808-4821. doi: 10.1093/eurheartj/ehae619.
19. Sadée C, Testa S, Barba T, Hartmann K, Schuessler M, Thieme A, Church GM, Okoye I, Hernandez-Boussard T, Hood L, Shmulevich I, Kuhl E, Gevaert O. Medical digital twins: enabling precision medicine and medical artificial intelligence. *Lancet Digit Health.* 2025 Jun 14:100864. doi: 10.1016/j.landig.2025.02.004.
20. Trayanova NA, Prakosa A. Up digital and personal: How heart digital twins can transform heart patient care. *Heart Rhythm.* 2024 Jan;21(1):89-99. doi: 10.1016/j.hrthm.2023.10.019.
21. Drummond D, Gonsard A. Definitions and Characteristics of Patient Digital Twins Being Developed for Clinical Use: Scoping Review. *J Med Internet Res.* 2024 Nov 13;26:e58504. doi: 10.2196/58504.
22. Masison J, Beezley J, Mei Y, Ribeiro H, Knapp AC, Sordo Vieira L, Adhikari B, Scindia Y, Grauer M, Helba B, Schroeder W, Mehrad B, Laubenbacher R. A modular computational

- framework for medical digital twins. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2021 May 18;118(20):e2024287118. doi: 10.1073/pnas.2024287118.
23. Hassanzadeh P. Towards the quantum-enabled technologies for development of drugs or delivery systems. *J Control Release*. 2020 Aug 10;324:260-279. doi: 10.1016/j.jconrel.2020.04.050.
 24. Pal S, Bhattacharya M, Lee SS, Chakraborty C. Quantum Computing in the Next-Generation Computational Biology Landscape: From Protein Folding to Molecular Dynamics. *Mol Biotechnol*. 2024 Feb;66(2):163-178. doi: 10.1007/s12033-023-00765-4.
 25. Doga H, Bose A, Sahin ME, Bettencourt-Silva J, Pham A, Kim E, Andress A, Saxena S, Parida L, Robertus JL, Kawaguchi H, Soliman R, Blankenberg D. How can quantum computing be applied in clinical trial design and optimization? *Trends Pharmacol Sci*. 2024 Oct;45(10):880-891. doi: 10.1016/j.tips.2024.08.005.
 26. Bonde B, Patil P, Choubey B. The Future of Drug Development with Quantum Computing. *Methods Mol Biol*. 2024;2716:153-179. doi: 10.1007/978-1-0716-3449-3_7.
 27. Cao Y, Romero J, Olson JP, Degroote M, Johnson PD, Kieferová M, Kivlichan ID, Menke T, Peropadre B, Sawaya NPD, Sim S, Veis L, Aspuru-Guzik A. Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing. *Chem Rev*. 2019 Oct 9;119(19):10856-10915. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00803.
 28. Chow JCL. Quantum Computing in Medicine. *Med Sci (Basel)*. 2024 Nov 17;12(4):67. doi: 10.3390/medsci12040067.
 29. Cavinato S, Felser T, Fusella M, Paiusco M, Montangero S. Optimizing radiotherapy plans for cancer treatment with Tensor Networks. *Phys Med Biol*. 2021 Jun 16;66(12). doi: 10.1088/1361-6560/ac01f2.
 30. Lee B, Liu CY, Apuzzo ML. Quantum computing: a prime modality in neurosurgery's future. *World Neurosurg*. 2012 Nov;78(5):404-8. doi: 10.1016/j.wneu.2012.07.013.
 31. Mohamed AA, Sargent E, Moriconi C, Williams C, Shah SM, Lucke-Wold B. Quantum Computing in the Realm of Neurosurgery. *World Neurosurg*. 2025 Jan;193:8-14. doi: 10.1016/j.wneu.2024.09.131.
 32. Kawaguchi H. Application of quantum computing to a linear non-Gaussian acyclic model for novel medical knowledge discovery. *PLoS One*. 2023 Apr 5;18(4):e0283933. doi: 10.1371/journal.pone.0283933.
 33. Bisiani J, Anugu A, Pentyala S. It's Time to Go Quantum in Medicine. *J Clin Med*. 2023 Jul 5;12(13):4506. doi: 10.3390/jcm12134506.
 34. Baynam G, Bowman F, Lister K, Walker CE, Pachter N, Goldblatt J, Boycott KM, Gahl WA, Kosaki K, Adachi T, Ishii K, Mahede T, McKenzie F, Townshend S, Slee J, Kiraly-Borri C, Vasudevan A, Hawkins A, Broley S, Schofield L, Verhoef H, Groza T, Zankl A, Robinson PN, Haendel M, Brudno M, Mattick JS, Dinger ME, Roscioli T, Cowley MJ, Olry A, Hanauer M, Alkuraya FS, Taruscio D, Posada de la Paz M, Lochmüller H, Bushby K, Thompson R, Hedley V, Lasko P, Mina K, Beilby J, Tift C, Davis M, Laing NG, Julkowska D, Le Cam Y, Terry SF, Kaufmann P, Eerola I, Norstedt I, Rath A, Suematsu M, Groft SC, Austin CP, Draghia-Akli R, Weeramanthri TS, Molster C, Dawkins HJS. Improved Diagnosis and Care for Rare Diseases through Implementation of Precision Public Health Framework. *Adv Exp Med Biol*. 2017;1031:55-94. doi: 10.1007/978-3-319-67144-4_4.

35. Braconi D, Nadwa H, Bernardini G, Santucci A. Omics and rare diseases: challenges, applications, and future perspectives. *Expert Rev Proteomics*. 2025 Mar;22(3):107-122. doi: 10.1080/14789450.2025.2468300.
36. Barrera LA, Galindo GC. Ethical aspects on rare diseases. *Adv Exp Med Biol*. 2010;686:493-511. doi: 10.1007/978-90-481-9485-8_27.
37. Stoller JK. The Challenge of Rare Diseases. *Chest*. 2018 Jun;153(6):1309-1314. doi: 10.1016/j.chest.2017.12.018.
38. Devisetti L. Embracing the unknown: investigating medical communication around uncertainty and the implications on patient and family well-being. *Orphanet J Rare Dis*. 2024 Feb 26;19(1):37. doi: 10.1186/s13023-024-03050-y.
39. Wright B, Lennox A, Graber ML, Bragge P. Closing the loop on test results to reduce communication failures: a rapid review of evidence, practice and patient perspectives. *BMC Health Serv Res*. 2020 Sep 23;20(1):897. doi: 10.1186/s12913-020-05737-x.
40. Chau M, Rahman MG, Debnath T. From black box to clarity: Strategies for effective AI informed consent in healthcare. *Artif Intell Med*. 2025 Sep;167:103169. doi: 10.1016/j.artmed.2025.103169.
41. Priolo M, Tartaglia M. The Right to Ask, the Need to Answer-When Patients Meet Research: How to Cope with Time. *Int J Environ Res Public Health*. 2023 Mar 4;20(5):4573. doi: 10.3390/ijerph20054573.
42. Suvvari TK, Konakanchi VSBP, Muppavarapu RS, Arigapudi N. The Potential Role of Quantum Computing in Biomedicine and Healthcare: The Next Frontier Beyond Artificial Intelligence. *Cureus*. 2025 Apr 22;17(4):e82759. doi: 10.7759/cureus.82759.