

**IMPACTO DE LA MEDICINA PERSONALIZADA EN LA EVOLUCION
DEL TRATAMIENTO QUIRUGICO: UNA REVISION BIBLIOGRAFICA.**

AUTORES:

Miguel Ángel Cuastumal Cuatin

María Fernanda Rueda Samaca

Juan Camilo Muñoz Wagner

TUTOR (A) TRABAJO DE GRADO:

Beatriz Alejandra Maldonado

PROGRAMA: Instrumentación Quirúrgica

UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI

FACULTAD DE SALUD

CALI 29/04/2025

Resumen

Introducción: La medicina personalizada (MP), se define como una práctica médica emergente que utiliza el perfil genético de un individuo para guiar decisiones sobre prevención, diagnóstico y tratamiento. **Objetivo:** El objetivo de esta revisión analizar el impacto de la MP en la evolución del tratamiento quirúrgico. **Materiales y Métodos:** Se realizó una revisión bibliográfica de documentos publicados entre 2020 y 2024, utilizando bases de datos como ScienceDirect y Springer. Se establecieron criterios de inclusión y exclusión para elegir los artículos. De un total de 135 artículos recopilados en las bases de datos se incluyeron 43 en la presente revisión. **Resultados:** La personalización de los tratamientos quirúrgicos basada en perfiles genómicos y biomarcadores, mejora la precisión y eficacia de las intervenciones, lo que se traduce en mejores resultados clínicos y una recuperación más rápida para los pacientes. Sin embargo, existen desafíos relacionados con la falta de estandarización en los procesos de fabricación de productos médicos personalizados y la necesidad de un marco regulatorio adecuado. Además, es importante actualizar los planes de estudio en las instituciones formadoras de profesionales de la salud para incluir la capacitación en genética y biología molecular. **Conclusiones:** La MP ofrece oportunidades significativas para mejorar la atención médica, al adaptar los tratamientos a las características individuales de los pacientes. No obstante, su implementación efectiva requiere superar desafíos tecnológicos y organizativos, así como una formación adecuada de los profesionales de la salud.

Palabras clave

Medicina personalizada, Genómica, Aprendizaje automático, Biomarcadores, Inteligencia artificial.

Abstract

Introduction: Personalized medicine (PM), is defined as an emerging medical practice that uses an individual's genetic profile to guide decisions about prevention, diagnosis, and treatment. **Objective:** The aim of this review is to analyze the impact of personalized medicine on the evolution of surgical treatment. **Materials and Methods:** A literature review of papers published between 2020 and 2024 was performed, using databases such as ScienceDirect and Springer. Inclusion and exclusion criteria were established to select articles. From a total of 135 articles collected in the databases, 43 were included in the present review. **Results:** Personalization of surgical treatments based on genomic profiles and biomarkers improves the precision and efficacy of interventions, which translates into better clinical outcomes and faster recovery for patients. However, there are challenges related to the lack of standardization in the manufacturing processes of personalized medical products and the need for an adequate regulatory framework. In addition, it is important to update curricula in health professional training institutions to include training in genetics and molecular biology. **Conclusions:** PM offers significant opportunities to improve medical care by tailoring treatments to individual patient characteristics. However, its effective

implementation requires overcoming technological and organizational challenges, as well as adequate training of healthcare professionals.

Keywords: Personalized medicine, Genomics, Machine learning, Biomarkers, Artificial intelligence.

Introducción

La medicina personalizada (MP) se define como una práctica médica emergente que utiliza el perfil genético de un individuo para guiar decisiones sobre prevención, diagnóstico y tratamiento. Este enfoque es crucial en oncología, ya que el cáncer puede variar significativamente entre individuos, lo que implica que los tratamientos deben ser adaptados a las necesidades específicas de cada paciente, aunque también puede utilizarse en otros padecimientos. La capacidad de personalizar el tratamiento no solo mejora la eficacia, sino que también minimiza los efectos secundarios, lo que es fundamental para la calidad de vida de los pacientes (1).

En los últimos años, la MP ha avanzado significativamente, transformando la atención médica al adaptar los tratamientos a las características genéticas y moleculares de cada paciente. Un aspecto destacado de la MP es su uso de biomarcadores, para clasificar subtipos de cáncer y guiar decisiones terapéuticas. En el cáncer de mama, por ejemplo, los biomarcadores ayudan a identificar a los pacientes que se beneficiarán de terapias dirigidas, lo que resulta en un enfoque más efectivo y menos tóxico que la quimioterapia convencional. Esto ha permitido implementar tratamientos que atacan específicamente las células cancerosas, mejorando los resultados clínicos y ofreciendo nuevas esperanzas a pacientes con cánceres previamente incurables (1,2).

En el ámbito quirúrgico, la MP se ha integrado significativamente a través de la impresión 3D, que ha revolucionado la planificación quirúrgica al permitir la creación de modelos anatómicos específicos para cada paciente. Estos modelos, generados a partir de imágenes médicas como tomografías computarizadas (CT, por sus siglas en inglés) y resonancias magnéticas (MR, por sus siglas en inglés), permiten a los cirujanos practicar y planificar intervenciones complejas con mayor precisión. Esto mejora la seguridad durante las operaciones y optimiza los resultados postoperatorios al adaptar mejor los implantes y prótesis a la anatomía del paciente (3–6). Del mismo modo, la farmacogenómica también se ha visto beneficiada de la MP al personalizar la dosificación de anestésicos y analgésicos según el perfil genético del paciente, lo que optimiza el efecto analgésico y minimiza la toxicidad, mejorando la experiencia del paciente durante y después de la cirugía (7–9).

Además de la oncología y el área quirúrgica, la MP ha mostrado gran potencial en áreas como la enfermedades neurodegenerativas y trastornos metabólicos. En el caso del Alzheimer y el Parkinson, la creación de modelos de tejido cerebral mediante bioimpresión 3D ofrece oportunidades significativas para la investigación y el descubrimiento de fármacos, permitiendo a los científicos estudiar las características de estas enfermedades en un entorno controlado (3).

Sin embargo, a pesar de los avances significativos y el gran potencial transformador de la MP, todavía existen desafíos para su implementación efectiva. Uno de los principales obstáculos es la complejidad de la heterogeneidad de las enfermedades, especialmente en el cáncer, como ya se ha mencionado antes, y es que la diversidad biológica y genética de los tumores dificulta la identificación de biomarcadores específicos, lo que a menudo resulta en un enfoque de “una talla para todos” que no satisface las necesidades individuales de los pacientes (1). Además, es necesario

superar las barreras tecnológicas y organizativas para incorporar la información de tipo genético de cada paciente a los sistemas de salud lo que también implica capacitar al personal médico y adaptar los sistemas de información de salud para manejar grandes volúmenes de datos complejos; si este tipo de inconvenientes no se abordan, es difícil alcanzar el máximo potencial de este nuevo enfoque en la medicina (3,6,8,10).

Otro aspecto importante que debe ser tenido en cuenta es el marco regulatorio para los productos médicos impresos en 3D y los sistemas de entrega terapéutica personalizados puesto que, actualmente no existe una estandarización en los procesos de fabricación y control de calidad, lo que deriva en preocupaciones sobre la seguridad y eficacia de estos productos. En ese sentido, una regulación adecuada es esencial para garantizar que los tratamientos personalizados sean seguros y efectivos para los pacientes (6). A lo anterior, es necesario sumar los desafíos éticos implícitos en la MP puesto que la manipulación de material genético genera mucho recelo aún entre la comunidad científica (4,7,11).

La MP en América Latina está en una fase de desarrollo y evolución, impulsada por los avances en genética y biología molecular. A medida que se acumulan datos genéticos y moleculares, se hace evidente que este nuevo enfoque puede ofrecer oportunidades significativas para mejorar la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de diversas enfermedades en la región (8). El objetivo de esta revisión es analizar el impacto de la medicina personalizada en la evolución del tratamiento quirúrgico.

Materiales y métodos

Para realizar esta revisión bibliográfica, se tuvieron en cuenta únicamente documentos publicados entre los años 2020 y 2024. Las bases de datos para utilizadas en la búsqueda de los artículos fueron ScienceDirect, Springer y Taylor & Francis, en las cuales se utilizaron las ecuaciones de búsqueda que se muestran a continuación:

Ecuaciones de búsqueda

- “surgical technology” AND “personalized medicine” AND (“advances” OR “innovation”)
- “robotic surgery” OR “3D printing” OR “bioprinting” AND “personalized medicine”
- “omics” AND “surgery” AND “personalized”
- “personalized medicine” AND “surgery” AND (“ethics” OR “legal”)
- “informed consent” AND “personalized medicine” AND “surgery”
- “justice” AND “equity” AND “personalized medicine”
- “medical education” AND “personalized medicine” AND “surgery”
- “health systems” AND “personalized medicine” AND “implementation”
- “health policy” AND “personalized medicine”

Por medio de las ecuaciones anteriores se obtuvo un total de 135 los cuales se distribuyen entre las bases de datos tal como se muestra en la tabla 1. Además, en la tabla 2 se muestra la distribución de los artículos por año.

Tabla 1. Distribución de artículos por base de datos

Base de datos	Total de artículos
ScienceDirect	55
Springer	41
Taylor & Francis	39
Total de artículos	135

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Distribución de artículos por año de publicación.

Año de publicación	Total de artículos
2020	15
2021	23
2022	27
2023	20
2024	50
Total de artículos	135

Fuente: Elaboración propia.

Antes de seleccionar los artículos más apropiados para la revisión se establecieron los criterios que se presentan a continuación:

Criterios de selección

Inclusión

1. Documentos que aborden directamente la medicina personalizada en el contexto de la cirugía, incluyendo estudios de caso, revisiones sistemáticas o investigaciones originales que analicen su impacto.
2. Artículos que discutan tecnologías específicas (como la cirugía robótica, la imagenología avanzada, la genómica, etc.) que han facilitado la personalización del tratamiento quirúrgico.
3. Literatura que explore los dilemas éticos y legales relacionados con la medicina personalizada en cirugía, tales como el consentimiento informado, la privacidad de los datos y la equidad en el acceso a tratamientos personalizados.

Exclusión

1. Documentos cuyo enfoque principal no es la medicina personalizada en el contexto quirúrgico. Esto incluye estudios que se centren únicamente en la medicina general, tratamientos no quirúrgicos o que no mencionen la personalización en su enfoque.
2. Documentos que se limiten a plantear modelos para aplicar la medicina personalizada sin mostrar pruebas de aplicación en un contexto real.

Una vez estuvieron definidos los criterios anteriores se realizó la revisión exhaustiva del contenido de los documentos y se descartaron 92 de acuerdo a las razones que se presentan en la tabla 3. De este modo se determinó que el total de artículos para llevar a cabo la revisión sería de 43 publicaciones.

Tabla 3. Motivo de descarte de los artículos no seleccionados para la revisión.

Razón de descarte	Total de artículos
Aborda aplicaciones de la medicina personalizada en otros ámbitos	4
Duplicado	6
Es un modelo	5
No se enfoca en medicina personalizada	6
No se enfoca en procedimientos quirúrgicos	70
Se enfoca principalmente en medicamentos	1
Total general	92

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Principales avances tecnológicos que han permitido la implementación de la medicina personalizada en el campo quirúrgico

Avances en cirugía oncológica

La implementación de la MP en el campo quirúrgico ha sido posible gracias a varios avances tecnológicos significativos que han transformado la forma en que se aborda el tratamiento del cáncer. En particular, la integración de diagnósticos moleculares, como la secuenciación del genoma completo (WGS, por sus siglas en inglés) y la secuenciación del exoma completo (WES, por sus siglas en inglés), ha revolucionado la identificación de mutaciones genéticas y biomarcadores en los tumores. Según Stenzinger et al.(11), estas herramientas permiten un perfil genómico exhaustivo, lo que facilita a los cirujanos tomar decisiones informadas sobre el tipo de intervención quirúrgica más adecuada para cada paciente.

Además, el testeo molecular se destaca como una herramienta fundamental en la identificación de mutaciones específicas y alteraciones en los tumores, especialmente en el contexto del cáncer de páncreas. Brozos et al.(12), enfatizan que este tipo de análisis es crucial para comprender las características únicas del cáncer de un paciente, lo que a su vez puede informar las estrategias de tratamiento. Por ejemplo, la identificación de alteraciones moleculares accionables, como las mutaciones en los genes BRCA1 y BRCA2, permite la utilización de terapias dirigidas, como los inhibidores de las enzimas PARP (por sus siglas en inglés) o terapias basadas en platino, que son más eficaces para tumores con perfiles genéticos específicos.

El conocimiento del perfil molecular de un tumor también impacta las decisiones quirúrgicas. Brozos et al.(12), señalan que, al entender las mutaciones presentes, los clínicos pueden evaluar mejor si un paciente es un candidato adecuado para la cirugía. Si se detectan mutaciones que indican un mal pronóstico o una alta probabilidad de recurrencia, el equipo quirúrgico puede optar por tratamientos alternativos, como quimioterapia o terapia dirigida, antes de considerar la cirugía. Este enfoque personalizado ha demostrado mejorar la supervivencia general de los pacientes en comparación con aquellos que reciben tratamientos estándar.

En el ámbito del cáncer colorrectal, Singh et al.(13), destacan la importancia de la terapia adyuvante post-cirugía, donde la elección de regímenes de quimioterapia, como FOLFOX y FOLFIRI, se basa en el subtipo molecular del cáncer, determinado a través del análisis de biomarcadores. Este enfoque busca optimizar la eficacia del tratamiento tras la resección quirúrgica de los tumores. Además, se enfatiza el uso de terapias antiangiogénicas, que se dirigen al receptor del factor de crecimiento endotelial vascular (VEGFR, por sus siglas en inglés) como tratamiento de primera línea después de la cirugía, lo que permite seleccionar tratamientos postquirúrgicos adecuados y mejorar la supervivencia general de los pacientes.

Por otro lado, los avances en la secuenciación de células individuales (SCS, por sus siglas en inglés) y la transcriptómica espacial (ST, por sus siglas en inglés) han permitido un análisis más detallado de la heterogeneidad tumoral. Yu y Ma (14), explican que la SCS revela subpoblaciones resistentes a tratamientos en el carcinoma hepatocelular (HCC, por sus siglas en inglés), lo que permite personalizar las terapias y optimizar las decisiones quirúrgicas. La ST, por su parte, combina la información de expresión génica con la arquitectura del tejido tumoral, proporcionando un mapa que ayuda a entender el comportamiento del tumor y a guiar la planificación quirúrgica.

Asimismo, los enfoques multi-ómicos (MOA, por sus siglas en inglés) integran datos de diferentes tipos ómicos, como genómica y proteómica, para identificar biomarcadores que se correlacionan con características del tumor y respuestas a tratamientos. Esto permite adaptar las estrategias quirúrgicas a la biología específica de cada tumor. Además, el *machine learning* (ML) y la bioinformática (MLB, por sus siglas en inglés) utilizan algoritmos para analizar grandes conjuntos de datos y predecir resultados en pacientes, ayudando a los cirujanos a estratificar a los pacientes según su riesgo y a personalizar los enfoques quirúrgicos, mejorando así los resultados en el tratamiento del CHC (14).

Avances en neurocirugía

En cuanto a neurocirugía, se desatacan las innovaciones descritas por Fábregas (15), y Hollunder et al.(16). Fábregas (15), destaca el monitoreo neurológico individualizado, que mejora la interpretación del monitoreo neurofisiológico intraoperatorio (IONM, por sus siglas en inglés) y ayuda a detectar lesiones nerviosas durante la cirugía. Este enfoque es especialmente relevante en técnicas mínimamente invasivas, donde el IONM proporciona retroalimentación en tiempo real, permitiendo a los cirujanos ajustar sus técnicas según la anatomía del paciente.

Por otro lado, Hollunder et al.(16), presentan avances en la estimulación cerebral profunda (DBS, por sus siglas en inglés), incluyendo la personalización basada en redes, que adapta la DBS a los perfiles de síntomas individuales. También señalan el enfoque de conexión neuronal, que estudia cómo interactúan las diferentes redes cerebrales para identificar objetivos de estimulación precisos, y la importancia de considerar las interacciones dinámicas entre estas redes. Además, la incorporación de biomarcadores basados en neuroimágenes puede guiar la selección del tratamiento y predecir resultados individuales.

Impresión 3D en cirugía

La tecnología de impresión 3D ha generado innovaciones significativas en diversos campos de la medicina, especialmente en la planificación quirúrgica, la ejecución de procedimientos y la educación médica. Esta tecnología permite la creación de modelos anatómicos precisos que ayudan a los cirujanos a visualizar estructuras complejas y lesiones, lo cual es fundamental para la planificación preoperatoria, particularmente en cirugías intrincadas. Según Tong et al.(17), estos modelos permiten a los médicos ensayar procedimientos y desarrollar estrategias quirúrgicas personalizadas, lo que resulta en cirugías más eficientes y mejores resultados para los pacientes.

Además, el uso de modelos biomédicos en 3D mejora la comprensión del sitio quirúrgico, reduciendo tanto el tiempo de las intervenciones como los costos asociados. Cano et al.(4), señalan que la personalización de implantes y herramientas quirúrgicas, adaptadas a la anatomía individual de los pacientes, contribuye no solo a obtener mejores resultados clínicos, sino también a disminuir las tasas de cirugías de revisión. Asimismo, estos modelos ayudan a mejorar la comunicación con los pacientes, permitiéndoles entender mejor su condición y las intervenciones planificadas, lo que aumenta su confianza y satisfacción en el proceso quirúrgico.

En este contexto, la personalización de terapias mediante la impresión 3D no se limita a la cirugía. Según Kalyan et al.(5), esta tecnología también ha permitido la creación de formulaciones de medicamentos adaptadas a las necesidades individuales de los pacientes, así como el desarrollo de implantes y prótesis específicas que mejoran la precisión de los procedimientos. La ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa, que integran la impresión 3D, ofrecen nuevas estrategias para regenerar tejidos u órganos dañados, lo que marca un avance significativo en el tratamiento de diversas patologías.

Por su parte, Bhuskute et al.(18), destacan que la MP se enfoca en ofrecer tratamientos adaptados a las características únicas de cada paciente, considerando factores genéticos, de estilo de vida y ambientales. Este enfoque contrasta con el modelo tradicional de “talla única” en medicina, al reconocer que los pacientes responden de manera diferente a las enfermedades debido a sus perfiles biológicos únicos. En este sentido, la impresión 3D se ha convertido en una herramienta clave para optimizar la administración de terapias, mejorando la eficacia de los tratamientos y reduciendo los efectos secundarios.

Uno de los avances más relevantes en el campo de la MP es la creación de sistemas de entrega de medicamentos complejos mediante la impresión 3D, los cuales mejoran la focalización y eficacia de los agentes terapéuticos, particularmente en casos complejos como el cáncer. Bhuskute et al.(18), también subrayan la importancia de la impresión 3D en la fabricación de implantes quirúrgicos específicos para cada paciente, lo que reduce las complicaciones postoperatorias y mejora los resultados quirúrgicos.

Alzoubi et al.(6), complementan esta visión destacando la importancia de la sostenibilidad en la impresión 3D, a través del uso de materiales reciclados y biodegradables, lo cual será esencial para el futuro de esta tecnología. Además, mencionan que, en el ámbito quirúrgico, la impresión 3D no solo facilita la creación de implantes personalizados, sino que también permite a los cirujanos utilizar modelos anatómicos impresos para planificar procedimientos complejos, reduciendo la duración de las cirugías y mejorando la precisión preoperatoria. Otro avance destacado es la bioimpresión 3D, que según Xu et al.(19), ha permitido la creación de andamios diseñados para imitar la matriz extracelular (ECM, por sus siglas en inglés), proporcionando un soporte estructural para el crecimiento celular. Estos andamios son esenciales en la medicina regenerativa y permiten estudiar el comportamiento de los tumores en un entorno controlado, lo que contribuye al desarrollo de modelos de tejidos específicos para cada paciente.

Para Alam et al.(3), una de las mayores utilidades de la impresión 3D ocurre en la oncología quirúrgica y la cirugía reconstructiva, donde se utiliza para reconstruir tejidos tras la resección de tumores y desarrollar guías quirúrgicas personalizadas. Además, en el tratamiento de trastornos neurodegenerativos, la impresión 3D permite la creación de andamios de tejido neuronal y plataformas para la entrega de fármacos implantables, mejorando la eficacia del tratamiento y los resultados clínicos en diversas disciplinas.

Machine Learning, robótica e inteligencia artificial

El análisis de elementos finitos autónomos (AFE, por sus siglas en inglés), permite a los cirujanos evaluar la resistencia ósea y el riesgo de fracturas de manera más precisa y eficiente. En primer lugar, se utilizan escaneos por tomografía computarizada (TC) de baja dosis, que ofrecen imágenes de alta calidad de la estructura ósea con menos exposición a la radiación. Esto es crucial para pacientes que necesitan múltiples imágenes, mejorando su seguridad y permitiendo un monitoreo más frecuente (10).

Otro avance importante es el uso de ML. Los algoritmos, como las redes neuronales convolucionales, permiten segmentar automáticamente los fémures a partir de las imágenes de TC, lo que ahorra tiempo y reduce la necesidad de experiencia técnica para preparar los datos. Además, AFE permite simulaciones más precisas del comportamiento mecánico de los huesos bajo diferentes condiciones de carga, teniendo en cuenta la forma compleja de los huesos y las propiedades de los materiales (10).

El sistema AFE también genera informes automáticos que resumen los hallazgos, incluyendo evaluaciones del riesgo de fractura, lo que proporciona a los cirujanos información clara y útil para tomar decisiones sobre tratamientos, como la necesidad de cirugía profiláctica en pacientes con tumores en el fémur. Sin embargo, a pesar de su gran utilidad demostrada, es importante validar clínicamente el AFE para asegurar que sus predicciones se alineen con los resultados clínicos reales, lo que mejora su credibilidad en la práctica médica (10).

La combinación de bioinformática, inteligencia artificial (IA) y ML ha permitido que las intervenciones quirúrgicas se adapten de manera más precisa a las necesidades individuales de los pacientes. Natarajan et al.(20), señalan que el análisis de grandes conjuntos de datos genéticos, proteómicos y clínicos facilita la identificación de estrategias quirúrgicas más efectivas para cada paciente. Esto se logra mediante el uso de algoritmos como Random Forest, que permiten predecir con mayor precisión los resultados quirúrgicos basados en la expresión genética, lo que resulta crucial para la personalización de las intervenciones.

En paralelo, Carini y Seyhan (2), destacan cómo la IA y el ML están revolucionando la MP al integrarse en la atención personalizada. Estas tecnologías no solo mejoran la toma de decisiones clínicas, sino que también permiten la detección temprana de enfermedades y el monitoreo en tiempo real de la salud de los pacientes mediante dispositivos portátiles y la Internet de las cosas médicas (IoMT, por sus siglas en inglés). Este enfoque facilita la identificación de biomarcadores de diagnóstico y pronóstico, permitiendo actuar antes de que se manifiesten los síntomas, lo que es clave para estrategias preventivas más efectivas. Sin embargo, también advierten sobre los desafíos éticos que plantea la IA, como la equidad y el sesgo, los cuales deben ser abordados para evitar agravar las disparidades en salud.

La capacidad de la IA para analizar grandes y complejos conjuntos de datos no solo es útil para la detección temprana, sino que también es crucial en el ámbito quirúrgico. La robótica quirúrgica, integrada con algoritmos de IA, ha mejorado la precisión y el control durante los procedimientos, reduciendo complicaciones y tiempos de recuperación (2). De manera similar, Liu et al.(21), subrayan cómo el uso del aprendizaje automático y la radiómica permite analizar características tumorales complejas, lo que resulta en una planificación quirúrgica más precisa para pacientes oncológicos. Esta integración tecnológica ha permitido desarrollar modelos predictivos que mejoran la estratificación del riesgo y optimizan los enfoques quirúrgicos, lo que es especialmente importante en casos de cáncer.

Por otro lado, las innovaciones en imágenes médicas, como la técnica RS-EPI DWI mencionada por Liu et al.(21), mejoran la calidad de las imágenes radiológicas, lo que facilita una mejor discriminación de los tejidos y contribuye a una planificación quirúrgica más detallada. Estas técnicas, junto con la integración de datos radiomáticos y clínico-patológicos mediante ML, permiten un diagnóstico más preciso y una personalización de las intervenciones quirúrgicas, algo que también ha sido destacado por Khatami et al.(22). De hecho, estos autores enfatizan la

necesidad de tecnologías como la patología digital y el análisis computacional para mejorar la personalización de los enfoques quirúrgicos, así como el cuidado postoperatorio.

En el campo de las enfermedades orbitarias, Engelmann y Merbs (23), destacan el uso de implantes personalizados diseñados mediante tecnología de Diseño Asistido por Computadora y la Fabricación Asistida por Computadora (CAD/CAM, por sus siglas en inglés) los cuales mejoran la precisión de las intervenciones quirúrgicas al adaptarse a la anatomía única de cada paciente. Además, subrayan la importancia de los avances en diagnóstico molecular, que permiten caracterizar mejor las enfermedades a nivel celular y guiar las decisiones terapéuticas de manera más efectiva. El uso de terapias neoadyuvantes, junto con los sistemas de navegación quirúrgica asistidos por computadora, refuerza este enfoque personalizado, optimizando tanto la planificación como la ejecución de las intervenciones.

Gadade et al.(1) y Xu y et al.(19), destacan cómo la cirugía asistida por robots y la IA han revolucionado la cirugía mínimamente invasiva, mejorando no solo la precisión de las resecciones, sino también los resultados postoperatorios. Estas tecnologías permiten que los cirujanos realicen intervenciones más específicas, minimizando el daño a los tejidos sanos y acelerando la recuperación de los pacientes. Además, la incorporación de protocolos quirúrgicos basados en biomarcadores y el análisis de grandes conjuntos de datos clínicos han optimizado la planificación quirúrgica según el perfil tumoral de cada paciente, lo que está alineado con los principios de la MP.

Farmacogenómica

La implementación de la MP en cirugía ha avanzado gracias a diversas innovaciones tecnológicas, destacando la integración de la farmacogenómica en los registros médicos electrónicos (EHR, por sus siglas en inglés). Esta incorporación facilita el acceso a la información genética del paciente, permitiendo alertas en tiempo real sobre riesgos genéticos y generando informes personalizados para optimizar las decisiones clínicas. Además, el desarrollo de interfaces de usuario intuitivas en los EHR simplifica la presentación de datos genéticos complejos, facilitando su interpretación y uso en los tratamientos. Las capacidades avanzadas de análisis de datos permiten identificar tendencias sobre el impacto de las variaciones genéticas en el metabolismo de medicamentos, mejorando así los protocolos terapéuticos. Un área clave es la adopción de vías de recuperación mejoradas (ERAS, por sus siglas en inglés), donde la información farmacogenómica permite ajustar los agentes farmacológicos utilizados en el proceso quirúrgico según el perfil genético del paciente, mejorando la seguridad y eficacia del tratamiento (7).

Nanotransportadores

Una de las mayores contribuciones a la MP es el uso de nanotransportadores, que permiten la entrega precisa de agentes terapéuticos a los sitios tumorales, maximizando la eficacia y minimizando efectos secundarios. Un aspecto destacado es el uso de teranósticos, donde los nanotransportadores combinan el tratamiento con el monitoreo en tiempo real, lo que facilita la personalización de los

tratamientos según la respuesta de cada paciente. Otro avance clave es la creación de combinaciones de medicamentos basadas en perfiles genéticos y moleculares, lo que optimiza los resultados al atacar vulnerabilidades tumorales específicas. Asimismo, se exploran nuevas estrategias de entrega mediante biomarcadores y mecanismos de respuesta a estímulos, mejorando aún más la precisión de las terapias contra el cáncer. En el ámbito quirúrgico, la integración de nanotransportadores con tecnologías de imagen permite un seguimiento en tiempo real durante las intervenciones, ayudando a los cirujanos a tomar decisiones más precisas y reducir el daño a tejidos sanos. Estos avances, junto con el uso de biomarcadores específicos del tumor, aseguran que las terapias estén personalizadas según las características moleculares de cada paciente (24).

Tecnologías de secuenciación

La MP ha avanzado significativamente, particularmente en el tratamiento del cáncer y otras enfermedades complejas, gracias a la integración de tecnologías como la secuenciación de nueva generación (NGS, por sus siglas en inglés) (20) y el análisis de ARN de una sola célula (scRNA-seq, por sus siglas en inglés). Estos avances han permitido a los investigadores y médicos adaptar los tratamientos a las características moleculares y genéticas de cada paciente, mejorando así la precisión y eficacia de las terapias. En el caso del cáncer oral avanzado y metastásico, Joshi et al.(25), subrayan la importancia de la NGS para identificar mutaciones genéticas y fusiones de genes, como UBE3C-LRP5, que pueden ofrecer nuevas vías para el tratamiento personalizado.

La incorporación de inmunoterapia y terapias dirigidas en un enfoque multidisciplinario permite un ajuste más preciso del tratamiento a las particularidades moleculares de cada paciente, lo que también resalta la necesidad de descubrir biomarcadores robustos que predigan mejor la respuesta a las terapias. De manera similar, Khatami et al.(22), abordan el uso de la secuenciación genética para reclasificar la enfermedad renal crónica (CKD, por sus siglas en inglés). Este enfoque permite dividir la CKD en subgrupos moleculares, lo que facilita la personalización de intervenciones terapéuticas más precisas. Este avance es un ejemplo de cómo las mismas herramientas de secuenciación que se utilizan en la oncología pueden aplicarse en otras áreas de la medicina.

El tratamiento del cáncer de próstata, por otro lado, ha visto avances aún más específicos con la aplicación de scRNA-seq, tal como lo presentan Feng et al.(26), esta tecnología permite un análisis a nivel celular del tumor, proporcionando información detallada sobre la heterogeneidad y la organización espacial de las células tumorales. Con ello, los investigadores pueden identificar mejor las dianas terapéuticas y diseñar tratamientos altamente personalizados. La integración de múltiples disciplinas, desde la transcriptómica hasta la inteligencia artificial, contribuye a decisiones más informadas en el campo quirúrgico, optimizando no solo el tratamiento postoperatorio, sino también la planificación quirúrgica misma, al mejorar la precisión en la identificación de márgenes quirúrgicos y la evaluación del comportamiento tumoral. Finalmente, Gadade et al.(1), destacan cómo las tecnologías avanzadas de imagen, como PET/CT y resonancia magnética, han complementado la MP en oncología quirúrgica. Estas herramientas permiten a los

cirujanos planificar las intervenciones con mayor exactitud, guiados por información molecular y de imagen detallada del tumor y su respuesta a los tratamientos.

Terapia dirigida y análisis de biomarcadores

La MP está en la vanguardia del tratamiento oncológico, impulsada por tecnologías innovadoras como CRISPR/Cas9 y la secuenciación de próxima generación (NGS, por sus siglas en inglés). Selvakumar et al.(27), destacan que estas herramientas son esenciales para identificar mutaciones genéticas en tumores, lo que permite personalizar y optimizar los tratamientos, disminuyendo efectos secundarios. De manera similar, Tufail et al.(28), subrayan la importancia de biomarcadores predictivos, como las mutaciones de PIK3CA, en el cáncer de mama, que guían las decisiones terapéuticas y ayudan a superar la resistencia a medicamentos. Estas innovaciones son complementadas por el uso de modelos preclínicos avanzados, como los xenoinjertos derivados de pacientes, que mejoran la evaluación de la eficacia del tratamiento.

En el tratamiento del cáncer de ovario, Liu et al.(29), enfatizan enfoques como el bloqueo del control inmune y la terapia dirigida a la angiogénesis, que buscan potenciar la respuesta del sistema inmunológico y limitar la formación de vasos sanguíneos en los tumores. Estas estrategias se centran en refinar los biomarcadores predictivos y personalizar tratamientos, incluyendo quimioterapia dirigida e inmunoterapia. La integración de análisis multiómicos en este contexto ayuda a identificar mejor a qué pacientes se les pueden ofrecer intervenciones quirúrgicas específicas. Qin et al.(30), aportan una perspectiva adicional al enfatizar la integración del análisis del microbioma en el tratamiento del cáncer de ovario, sugiriendo que ciertos grupos bacterianos pueden ser objetivos terapéuticos, especialmente en casos resistentes al platino. Esta investigación resalta la necesidad de biomarcadores predictivos relacionados con el microbioma para aumentar la eficacia de los tratamientos. La identificación de perfiles genéticos y mutaciones mediante tecnologías avanzadas también se discute en el contexto de la MP.

Asimismo, en cánceres urológicos, Khatami et al.(22), destacan cómo el perfil molecular mejora la selección de tratamientos, adaptándolos a las características específicas de cada tumor. La patología digital, por su parte, refina el análisis histológico, identificando marcadores moleculares que son cruciales para tomar decisiones quirúrgicas informadas. Marino et al.(31), por su parte, centran su atención en el cáncer de próstata, destacando la relevancia de las mutaciones en la línea germinal para adaptar los tratamientos. La integración del perfilado genético se sugiere como una práctica clínica esencial, mientras que las tecnologías de imagen, como la resonancia magnética multiparamétrica, mejoran la identificación y planificación quirúrgica de los tumores. En este sentido, Reynolds et al.(32), enfatizan que la MP en el cáncer colorrectal se basa en la comprensión de las alteraciones genómicas, permitiendo adaptar las terapias a las características de cada paciente y mejorar los resultados clínicos. El uso de marcadores genéticos como RAS, BRAF y PIK3CA es vital para guiar decisiones terapéuticas, con la expectativa de que la mayoría de los tumores se someterán a análisis genómicos en el futuro.

Zhou et al.(33), mientras tanto, enfatizan que la MP, al combinar datos moleculares con información clínica, maximiza los beneficios y minimiza los riesgos. Los biomarcadores tumorales son esenciales para la detección y pronóstico, y los avances en biología molecular han permitido un enfoque más preciso en el tratamiento del cáncer. La biopsia líquida y la edición genética son innovaciones que continúan mejorando la atención personalizada en oncología. Según Gadade et al.(1), estos biomarcadores aumentan la eficacia al identificar a pacientes que responderán mejor a terapias dirigidas, mejorando así tanto el diagnóstico como el seguimiento de la progresión o recurrencia del cáncer. Por ejemplo, la detección temprana mediante niveles de proteínas en suero no solo optimiza la atención al paciente, sino que también reduce la ineficacia de tratamientos, minimizando la exposición a toxicidad y costos innecesarios.

Adicionalmente, Xu et al.(19), señalan que el perfilado genómico y proteómico juega un papel crucial en la identificación de biomarcadores específicos. Este enfoque permite analizar la expresión genética y de proteínas en los tumores, lo que es fundamental para guiar decisiones quirúrgicas, como la extensión de la resección necesaria y la selección de terapias adyuvantes. Así, la información obtenida no solo se utiliza para diagnosticar, sino también para personalizar el tratamiento según las características particulares de cada tumor. Los biomarcadores son también vitales para la predicción y el pronóstico, ya que ayudan a estratificar a los pacientes según su riesgo, como en el caso de las mutaciones BRCA1/2. Esto permite evaluar la eficacia de las terapias en tiempo real, facilitando ajustes en el tratamiento mediante el uso de ADN tumoral circulante (ctDNA, por sus siglas en inglés), que indica la efectividad o resistencia al tratamiento.

Vacuna mRNA

Recientemente se han presentado innovaciones significativas en la MP para el tratamiento del cáncer cerebral, con un enfoque particular en el uso de vacunas de ácido ribonucleico mensajero (mRNA, por sus siglas en inglés). Estas vacunas se están aplicando para atacar antígenos tumorales específicos, lo que podría resultar en tratamientos más efectivos, especialmente para tumores agresivos como el glioblastoma. Además, se está explorando la combinación de vacunas de mRNA con otras inmunoterapias, como los anticuerpos monoclonales, con el objetivo de mejorar las respuestas inmunes antitumorales. Un hallazgo importante en esta área es la focalización en células dendríticas para la entrega de estas vacunas. Esta estrategia podría potenciar la activación de células T y generar respuestas inmunes más robustas (34).

Asimismo, es crucial identificar nuevos antígenos tumorales y biomarcadores, sugiriendo que ciertas proteínas de superficie celular podrían ser objetivos prometedores para las vacunas de mRNA. Para facilitar su administración, se están discutiendo avances tecnológicos relacionados con la estabilidad y eficiencia de entrega de estas vacunas, incluyendo el uso de nanopartículas lipídicas. La orientación específica del mRNA hacia las células dendríticas se considera un aspecto fundamental para mejorar la activación de células T y la respuesta inmune general. Por último, se enfatiza la importancia de integrar análisis genómicos y biomarcadores en la personalización de los planes de tratamiento. Esto se complementa con el uso de herramientas de monitoreo e

imágenes en tiempo real, que permiten ajustar las estrategias terapéuticas según la evolución del tumor (34).

Organoides derivados de pacientes

Los avances en la tecnología de organoides han revolucionado la MP para el tratamiento del cáncer, como destacan varios estudios. Yu et al.(35), resaltan el uso de organoides derivados de pacientes (PDO, por sus siglas en inglés) en cánceres gastrointestinales, que preservan las características moleculares y celulares de los tejidos tumorales originales. Esto permite desarrollar tratamientos personalizados y acelera las pruebas de medicamentos, simulando la heterogeneidad intratumoral para comprender mejor las respuestas a las terapias. La integración del perfil genómico con la tecnología PDO mejora la predicción de respuestas a medicamentos, posicionándolos como una alternativa superior a modelos preclínicos actuales. Le Compte et al.(36), complementan esta información al identificar subclones resistentes a tratamientos mediante organoides, hallando que la resistencia varía según la concentración del medicamento y el tiempo de exposición. Esto sugiere que las evaluaciones basadas en organoides pueden ofrecer información predictiva valiosa, especialmente en el desarrollo de estrategias personalizadas para el cáncer pancreático (PDAC, por sus siglas en inglés), que es notoriamente agresivo.

Por su parte, Qu et al.(37), destacan que los organoides permiten crear estructuras tridimensionales a partir de tejidos de pacientes, replicando características del tumor original y facilitando el desarrollo de tratamientos personalizados. Técnicas como CRISPR/Cas9 posibilitan modificaciones precisas en el ADN de los organoides, mejorando la comprensión del comportamiento tumoral y su respuesta a tratamientos. Además, la tecnología microfluídica permite la creación de tejidos complejos, aumentando la relevancia fisiológica de los modelos de organoides. Además, Xu et al.(19), subrayan que los organoides han transformado la modelización de enfermedades como los sarcomas. Estas versiones miniaturizadas de órganos mantienen las características genéticas y fenotípicas del tumor original, permitiendo pruebas de medicamentos personalizadas y una planificación de tratamientos más efectiva.

Imagenología

La investigación de Hua et al.(38), presenta innovaciones en MP a través de la imagenología biodinámica, utilizando holografía digital de baja coherencia para evaluar la quimiosensibilidad en pacientes con cáncer. Este enfoque permite identificar subconjuntos fenotípicos heterogéneos en biopsias, lo que facilita la predicción de la respuesta a la quimioterapia antes de iniciar el tratamiento. Un aspecto clave es la oncología comparada, que estudia las firmas biodinámicas del cáncer de esófago en humanos y del linfoma en células B caninas, sugiriendo que existen firmas espectrales comunes. Esto podría facilitar la aplicación universal de esta tecnología en la selección de terapias oncológicas. Además, se identifican biomarcadores persistentes que diferencian entre pacientes resistentes y sensibles a tratamientos, mejorando así la personalización del tratamiento. Xu et al.(19), destacan, por su parte, la importancia del perfilado genómico y proteómico en la identificación de biomarcadores específicos en tumores. Esta información es fundamental para

guiar decisiones quirúrgicas, como la extensión de la resección necesaria y la selección de terapias adyuvantes adaptadas a las características particulares de cada tumor.

La investigación de Hua et al.(38), también aborda otros avances tecnológicos que facilitan la MP en cirugía, como la tomografía de coherencia óptica (OCT, por sus siglas en inglés) y la técnica de imágenes biodinámicas (BDI, por sus siglas en inglés). Estas tecnologías permiten crear imágenes detalladas de tejidos vivos y evaluar la función celular en tiempo real, lo que resulta crucial durante los procedimientos quirúrgicos. El contraste dinámico mejora la visualización de los perfiles biodinámicos de los tumores, capturando el movimiento celular y las respuestas a medicamentos, proporcionando así información valiosa para los cirujanos. La fluctuación espectroscópica permite una comprensión más profunda del microambiente tumoral, ayudando a identificar áreas con mayor probabilidad de responder a terapias específicas.

Desafíos éticos y legales asociados con la medicina personalizada

Desafíos éticos

Si bien la MP ha representado un gran avance para la medicina al permitir que se puedan desarrollar tratamientos adaptados a las características individuales de cada paciente, también es verdad que la misma implica una serie de cuestiones de tipo ético y legal que deben ser resueltas a fin de garantizar resultados óptimos y beneficiosos para los pacientes que reciben esta forma de tratamiento (11,13). En ese sentido, uno de los primeros aspectos a abordar es el consentimiento informado. En la MP, el consentimiento va más allá de la simple autorización para recibir tratamiento. Implica que los pacientes comprendan de manera completa cómo se utilizarán sus datos genómicos y biomédicos, los riesgos asociados y los posibles usos futuros de esta información. El reto ético reside en la complejidad de estos procesos, ya que los pacientes a menudo no tienen los conocimientos técnicos suficientes para entender las implicaciones totales de las pruebas genéticas o los tratamientos basados en biomarcadores. Este dilema subraya la necesidad de desarrollar mecanismos de comunicación más claros y efectivos entre los médicos y los pacientes (8,22,25,27,28,31,33,37,39–42).

Otro aspecto crucial es la privacidad y seguridad de los datos. La MP depende de la recolección, almacenamiento y análisis de grandes volúmenes de datos sensibles, como la información genética de los pacientes. Esto genera preocupaciones sobre la posible vulnerabilidad de estos datos ante accesos no autorizados, hackeos o uso indebido (11,20,27). En un entorno donde la información genética podría utilizarse para discriminar en ámbitos como el empleo o el acceso a seguros, es esencial contar con marcos legales y éticos sólidos que protejan los derechos de los pacientes. La discriminación genética es un riesgo real, y su prevención debe ser una prioridad para los responsables de formular políticas de salud (1,2,8,19,28,39,42).

La equidad en el acceso a la MP también plantea un desafío ético considerable. Las terapias personalizadas, que a menudo son costosas y requieren infraestructura avanzada, pueden estar fuera del alcance de poblaciones con menos recursos económicos o que viven en áreas con menos acceso a tecnología médica avanzada. Esta disparidad puede exacerbar las desigualdades

existentes en los sistemas de salud, creando una brecha entre aquellos que pueden beneficiarse de estas innovaciones y aquellos que no. Garantizar que los avances en MP estén disponibles para todos, independientemente de su situación socioeconómica, es un imperativo ético que aún no ha sido resuelto (11,13,14,17).

Asimismo, surgen preocupaciones en torno a la utilidad clínica de algunos avances de la MP. A medida que se desarrollan nuevas terapias y tecnologías basadas en datos genómicos y moleculares, es esencial asegurarse de que estas innovaciones sean verdaderamente efectivas y seguras para los pacientes. El uso de tecnologías emergentes, como los nanotransportadores o la edición genética, plantea la necesidad de realizar evaluaciones rigurosas para garantizar que los beneficios superen los riesgos. El balance entre el riesgo y el beneficio debe ser cuidadosamente ponderado, evitando que los pacientes sean sometidos a tratamientos que aún no hayan sido debidamente validados o que puedan provocar efectos adversos a largo plazo (13,19,25,31,39).

Por otro lado, la implementación de tecnologías avanzadas como la impresión 3D y el bioprinting también genera dilemas éticos. La creación de medicamentos o implantes personalizados mediante estas técnicas está en una fase de desarrollo que, aunque prometedora, aún presenta incertidumbres sobre su seguridad y eficacia a largo plazo. Además, la aceptación pública de estas tecnologías es baja, lo que puede afectar su integración en el sistema de salud (4,17). Para superar este desafío, es necesario promover una mayor comprensión y conciencia pública sobre los beneficios y limitaciones de estas innovaciones, asegurando que los pacientes y la sociedad en general se sientan cómodos con su uso.

Por último, un reto ético relevante es la evaluación y regulación de las innovaciones en MP. A medida que estas terapias avanzadas ingresan en el mercado, los marcos regulatorios existentes deben ser actualizados para abordar las complejidades que estas nuevas tecnologías presentan. Además, los ensayos clínicos que involucren tratamientos personalizados deben garantizar que todos los participantes estén protegidos y que se respeten sus derechos como pacientes (19,24,40).

Desafíos legales

La MP, al ser un campo en constante evolución, presenta desafíos no solo en términos éticos, sino también legales. A medida que las tecnologías avanzan, es imperativo contar con un marco legal adecuado que regule el uso de datos genéticos, la creación de terapias personalizadas, y el desarrollo de nuevas herramientas diagnósticas y terapéuticas (14,20,27,28). En el ámbito legal, uno de los aspectos más cruciales es el cumplimiento normativo. Legislaciones como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR, por sus siglas en inglés) en la Unión Europea han establecido directrices claras sobre el manejo de los datos personales, en especial los datos sensibles relacionados con la salud y la genética (11). Sin embargo, el marco legal debe seguir evolucionando para abordar los desafíos específicos que presenta la MP, como la gobernanza del intercambio de datos entre distintos centros de salud a nivel internacional. Este intercambio plantea preguntas importantes sobre cómo proteger los derechos de los pacientes cuando los datos cruzan fronteras y se utilizan en diferentes contextos regulatorios (14).

La supervisión regulatoria también es un desafío importante. El rápido avance de las tecnologías utilizadas en la MP supera, en muchos casos, los marcos regulatorios existentes. Esto significa que los organismos reguladores deben adaptarse a un entorno en constante cambio, estableciendo directrices claras sobre la aprobación, monitoreo y uso de nuevas herramientas diagnósticas, terapias basadas en biomarcadores y tecnologías como la impresión 3D. Es esencial que estas tecnologías cumplan con altos estándares de seguridad y eficacia antes de ser aprobadas para su uso clínico (1,13,19).

La impresión 3D es uno de los avances más prometedores en la MP, ya que permite la creación de dispositivos médicos y medicamentos personalizados. Sin embargo, la falta de un marco regulatorio específico presenta riesgos. Por ejemplo, si un dispositivo impreso en 3D falla o causa daño a un paciente, es necesario definir claramente quién es responsable: el diseñador, el fabricante o el proveedor de atención médica que utilizó el dispositivo. Este vacío legal requiere atención urgente para evitar posibles conflictos de responsabilidad y garantizar la protección de los pacientes (4,17).

En cuanto al uso de biomarcadores y terapias personalizadas, también existen importantes cuestiones legales. Para que un biomarcador sea utilizado de manera efectiva en la práctica clínica, debe estar validado y estandarizado, lo que implica la creación de directrices que aseguren su fiabilidad. Además, en los casos donde las terapias basadas en estos biomarcadores no producen los resultados esperados, surge la cuestión de la responsabilidad legal. Es necesario establecer claramente quién es responsable en estos casos: los proveedores de salud, los investigadores o las compañías farmacéuticas. La falta de claridad en este aspecto podría derivar en litigios por mala práctica médica o por daños causados por productos defectuosos (1,13,21,33).

Otro tema relevante es el uso de tecnologías emergentes como los nanotransportadores. El desarrollo de terapias basadas en estas tecnologías requiere adherencia a estándares regulatorios rigurosos que aseguren la seguridad de los pacientes. Además, la supervisión legal debe garantizar que los procesos de formulación, fabricación y pruebas preclínicas de los nanotransportadores se realicen con controles de calidad estrictos antes de su aprobación (24).

Aspectos de propiedad intelectual

El desarrollo de nuevos biomarcadores y terapias personalizadas plantea importantes desafíos relacionados con los derechos de propiedad intelectual. Proteger estas innovaciones mientras se garantiza su accesibilidad para el uso clínico es un reto legal complejo (14). Es necesario encontrar un equilibrio entre las protecciones legales que salvaguarden los derechos de los inventores e investigadores y la necesidad de asegurar que estas innovaciones estén disponibles para mejorar la atención al paciente. Esto implica no solo asegurar que los descubrimientos científicos sean recompensados, sino también que las barreras económicas y legales no impidan el acceso a tratamientos personalizados que podrían tener un impacto significativo en la salud pública (19).

Discriminación genética

A medida que se utilizan pruebas genéticas y biomarcadores para adaptar tratamientos a las características individuales de cada paciente, surge el riesgo de que esta información sensible sea empleada de manera perjudicial, especialmente en ámbitos como el empleo y los seguros. La posibilidad de que la información sobre la composición genética de un paciente sea utilizada en su contra genera dilemas éticos significativos respecto a la posibilidad de que una persona sea discriminada dadas esas modificaciones genéticas. Aunque existen protecciones legales, como la Ley de no discriminación por información genética (GINA, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, es evidente que aún persisten vacíos que deben ser abordados. La GINA prohíbe la discriminación en el ámbito laboral y en seguros de salud, pero no cubre otros tipos de seguros, como el de vida o discapacidad, lo que deja a muchos pacientes vulnerables. Por lo tanto, es crucial implementar legislación más amplia que proteja a los individuos de la discriminación genética en todos los contextos (11,13,19).

Además, el cumplimiento normativo es esencial para asegurar que los datos personales, especialmente los genéticos, se manejen de manera adecuada. El GDPR en la Unión Europea establece directrices sobre el manejo de estos datos, pero el intercambio de información entre centros de salud, particularmente a nivel internacional, plantea nuevos desafíos legales que requieren directrices claras. La protección de los derechos de los pacientes debe ser una prioridad, garantizando que su información genética se utilice éticamente y no se convierta en un medio de discriminación (1,11,37).

Otro aspecto crítico es la validez y utilidad clínica de las pruebas genéticas. Para evitar decisiones de tratamiento inapropiadas que puedan derivar en discriminación, es esencial que los biomarcadores utilizados en la MP sean validados rigurosamente. La falta de validación podría llevar a resultados falsos, lo que a su vez podría afectar negativamente a la atención del paciente y contribuir a la discriminación (13,37).

La medicina personalizada en América Latina

América Latina (AL), presenta una diversidad genética y ambiental única que resulta de la mezcla interétnica ancestral de amerindios, europeos y africanos. Esta diversidad genética no solo influye en la susceptibilidad a diversas enfermedades, sino también en la distribución de alelos de riesgo y protección asociados con enfermedades multifactoriales. Por lo tanto, cualquier enfoque de MP en la región debe estar adaptado a las características genéticas y ambientales particulares de sus poblaciones. Este contexto genético único plantea un desafío importante, ya que las estrategias globales de MP podrían no ser directamente aplicables en la región sin una adecuada adaptación a estas variantes genéticas. Un factor crítico en la implementación de la MP en la región es la formación especializada de los profesionales de la salud. Actualmente, existe una carencia significativa de médicos e investigadores capacitados en biología molecular y genómica, áreas fundamentales para esta disciplina. De acuerdo con Panduro y Román (8), insisten es urgente crear programas educativos orientados a preparar a estos profesionales, dotándolos de las habilidades

necesarias para enfrentar los desafíos que la MP impone. La creación de programas formativos específicos en biología molecular y genómica es esencial para que AL pueda integrarse plenamente en este paradigma médico.

Otro obstáculo significativo es la baja inversión en investigación y desarrollo en la región. Con un promedio de solo el 0.7% del PIB destinado a estas actividades, AL está muy por detrás de regiones como Europa y Estados Unidos. Esta falta de recursos limita severamente el avance de iniciativas que podrían impulsar la MP en la región. Sin la inversión adecuada, resulta difícil financiar proyectos de investigación que permitan profundizar en la comprensión de las particularidades genéticas de las poblaciones latinoamericanas y desarrollar tratamientos personalizados eficaces. Además, los autores subrayan la importancia de la integración del conocimiento. La MP implica desglosar el conocimiento genético y clínico complejo en aplicaciones prácticas que puedan ser utilizadas por los profesionales de la salud en su práctica diaria. Para lograr esto, es fundamental fomentar la colaboración entre instituciones académicas, proveedores de atención médica y gobiernos. La creación de un marco regional adaptado a los factores genéticos y ambientales específicos de AL permitiría una implementación más efectiva de la MP en la región (8).

A pesar de los avances iniciales, la región aún enfrenta numerosos desafíos y oportunidades para implementar un enfoque integral de MP. Los esfuerzos actuales, aunque prometedores, son insuficientes para construir un paradigma de salud integral basado en esta disciplina. Los autores instan a realizar cambios profundos en los planes de estudio médicos y en los sistemas de salud de la región, que permitan a la MP convertirse en una realidad accesible y efectiva para todas las poblaciones. Solo a través de una reestructuración de estos sistemas será posible apoyar la implementación de la MP de manera generalizada en el subcontinente (8).

Implicaciones de la medicina personalizada para la formación de los profesionales de la salud y para la organización de los sistemas de salud

La implementación de la MP conlleva una serie de implicaciones de tipo social, educativo y, por supuesto del campo de la medicina, que deben ser abordados apropiadamente para garantizar el éxito de esta nueva forma de tratamiento, esto a su vez, no solo exige cambios en las tecnologías utilizadas, sino también en la formación de los profesionales de la salud y en la organización de los sistemas de salud, y en esa línea, uno de los principales desafíos identificados es la necesidad de actualizar los planes de estudio en las instituciones formadoras de profesionales de la salud (4,19,28,29,34). La genética y la bioinformática han cobrado una relevancia crucial, ya que la MP depende en gran medida de la interpretación precisa de los datos genómicos. Es fundamental que los futuros profesionales sean capacitados no solo en la práctica clínica convencional, sino también en áreas que antes no eran tan centrales en la medicina, como la genómica y la biología molecular. La alfabetización genómica permitirá a los profesionales interpretar pruebas genéticas y biomarcadores, aspectos esenciales para integrar la MP en su práctica diaria (8,19,37).

Además, la formación interdisciplinaria se ha vuelto indispensable. La MP requiere la colaboración de profesionales de diversas disciplinas, como oncólogos, genetistas, bioinformáticos y farmacólogos. Los programas educativos deben, por lo tanto, fomentar la capacidad de trabajar

en equipos multidisciplinarios, promoviendo la comunicación y el trabajo en conjunto entre diferentes especialidades. Esta integración de conocimientos es crucial para el éxito de la MP, ya que los tratamientos individualizados exigen una comprensión compleja de la biología, las tecnologías emergentes y la farmacología (3,34,39). Otro aspecto destacado es la importancia de una formación ética y legal adecuada. Los profesionales de la salud deben estar preparados para enfrentar desafíos éticos complejos relacionados con la privacidad de los datos genéticos, el consentimiento informado y la equidad en el acceso a tratamientos personalizados. La protección de los derechos de los pacientes es una prioridad, y los programas de formación deben incluir capacitación en estos temas para garantizar que los futuros profesionales puedan navegar con seguridad en este nuevo panorama (33,39,43).

La proficiencia tecnológica es otro componente esencial. Los avances en la MP, como el uso de la inteligencia artificial, el análisis de grandes volúmenes de datos y las herramientas de secuenciación genómica, requieren que los profesionales desarrollen habilidades técnicas específicas (4). La capacidad de interpretar estos datos y utilizarlos para tomar decisiones clínicas informadas es cada vez más crucial. De hecho, se resalta la importancia de que los profesionales mantengan un aprendizaje continuo para estar al día con los rápidos avances tecnológicos en este campo (1,43). Dado que la MP evoluciona constantemente, es necesario que los proveedores de atención médica participen activamente en programas de educación continua a lo largo de sus carreras. A nivel estructural, los sistemas de salud también deben adaptarse a la implementación de la MP. La integración del conocimiento clínico y genético debe traducirse en aplicaciones prácticas, lo que requiere que las instituciones de salud colaboren con centros académicos, gobiernos y la industria privada (28,31,43). La creación de un marco de gobernanza que garantice la seguridad y la eficacia de los tratamientos personalizados es fundamental, y es necesario que este marco regule no solo la aplicación de la MP, sino también el manejo ético de los datos (1).

En el caso de América Latina, los desafíos son aún más pronunciados, puesto que la diversidad genética y ambiental de la región, afecta la distribución de alelos de riesgo y protección frente a enfermedades. Esto requiere enfoques que se adapten a las características locales. Sin embargo, la baja inversión en investigación y desarrollo limita el progreso de la MP en el subcontinente. Para superar estos desafíos, se requiere una inversión significativa que permita el avance en la investigación sobre genética y su integración en los sistemas de salud. Por último, se subraya la importancia de que los profesionales de la salud desarrollen habilidades de comunicación efectivas. La MP involucra la transmisión de información compleja y sensible a los pacientes, lo que requiere que los proveedores de atención médica expliquen de manera clara y empática los hallazgos genéticos, los riesgos y las opciones de tratamiento. Esta comunicación es esencial para que los pacientes se sientan involucrados en el proceso de toma de decisiones y confíen en los tratamientos personalizados que se les ofrezcan (8).

Discusión

Uno de los avances más significativos es la integración de diagnósticos moleculares, que incluye técnicas como la WGS y la WES. Con esta información, los cirujanos pueden tomar decisiones informadas sobre el tipo de intervención quirúrgica más adecuada para cada paciente, adaptando el tratamiento a las características únicas de su enfermedad. Otro avance que ha resultado clave en la MP en cirugía es la incorporación de tecnologías como la cirugía asistida por robots e IA, mejorando la cirugía mínimamente invasiva, y aumentando el nivel de precisión de las resecciones y, con ello, mejorando los resultados postoperatorios, puesto que, con la capacidad de realizar intervenciones más específicas se minimiza el daño a los tejidos sanos y de este modo, se acelera la recuperación de los pacientes. En relación con esto, cabe destacar que la integración de protocolos quirúrgicos basados en biomarcadores y el análisis de grandes conjuntos de datos clínicos también ha optimizado la planificación quirúrgica, alineándose con los principios de la MP.

La farmacogenómica juega un papel crucial en este contexto, ya que su integración en los EHR facilita el acceso a la información genética del paciente. La combinación de estas capacidades avanzadas, junto con la integración de datos radiomáticos y clínico-patológicos mediante ML, permite un diagnóstico más preciso y una personalización de las intervenciones quirúrgicas. En el ámbito de las enfermedades orbitarias, por ejemplo, se menciona el uso de implantes personalizados diseñados mediante tecnología de CAD/CAM, que mejoran la precisión de las intervenciones al adaptarse a la anatomía única de cada paciente. Estos avances, junto con el uso de terapias neoadyuvantes y sistemas de navegación quirúrgica asistidos por computadora, refuerzan el enfoque personalizado en la medicina quirúrgica, optimizando tanto la planificación como la ejecución de las intervenciones.

Por otro lado, la implementación de la MP implica, en términos éticos y legales un conjunto de aspectos que deber ser atendidos a fin de la MP pueda desarrollarse y aplicarse exitosamente en el ámbito clínico, en el primer caso, uno de dichos aspectos es la manipulación de datos genéticos y el desarrollo de tratamientos adaptados a las características individuales de los pacientes. Además, existe mucha preocupación sobre la privacidad y la seguridad de los datos genéticos, puesto que recopilación y el uso de información genética sensible plantean interrogantes sobre cómo se protegen estos datos y quién tiene acceso a ellos.

Al mismo tiempo, la falta de estandarización en los procesos de fabricación y control de calidad de productos médicos personalizados, como los implantes impresos en 3D, también genera inquietudes sobre la seguridad y eficacia de estos tratamientos. La necesidad de un marco regulatorio adecuado es fundamental para garantizar que los tratamientos personalizados sean seguros y efectivos. Legislaciones como el Reglamento General de Protección de Datos en la Unión Europea establecen directrices claras sobre el manejo de datos personales, pero la rápida evolución de la tecnología médica requiere que estos marcos legales se actualicen constantemente. Es importante que los ensayos clínicos que involucren tratamientos personalizados garanticen la protección de los derechos de los participantes y que se respeten sus decisiones informadas.

En lo concerniente a la educación y la estructura de los sistemas de salud para integrar efectivamente la MP, se destaca que la implementación de la MP requiere no solo avances tecnológicos, sino también una reestructuración en la formación de los profesionales de la salud. Uno de los principales desafíos es la necesidad de actualizar los planes de estudio en las instituciones educativas que forman a los futuros profesionales de la salud. Por lo tanto, es fundamental que los profesionales sean capacitados en áreas como la genómica y la biología molecular, además de la práctica clínica convencional. La alfabetización genómica se presenta como un aspecto esencial para que los profesionales puedan interpretar pruebas genéticas y biomarcadores, lo que es vital para integrar la MP en su práctica diaria.

En términos de las implicaciones de estos resultados, vale decir que la capacidad de personalizar los tratamientos quirúrgicos en función de las características genéticas específicas de un tumor mejora la precisión y la eficacia de las intervenciones, lo que puede llevar a mejores resultados clínicos, menos complicaciones y una recuperación más rápida para los pacientes. Además, el uso de tecnologías como la patología digital y el análisis computacional permite una mejor caracterización de las enfermedades a nivel celular, lo que refuerza la personalización de los enfoques quirúrgicos y el cuidado postoperatorio.

Sin embargo, estos avances también plantean desafíos. La necesidad de contar con infraestructura adecuada y personal capacitado para manejar estas tecnologías es crucial. Además, la interpretación de los datos genómicos requiere un alto nivel de conocimiento y habilidades, lo que subraya la importancia de la formación continua de los profesionales de la salud en estas áreas. Desde el punto de vista educativo, la integración de la MP en la práctica clínica exige una actualización de los planes de estudio en las instituciones formadoras de profesionales de la salud. La capacitación en genética, bioinformática y biología molecular se vuelve esencial para que los futuros médicos y otros profesionales de la salud puedan interpretar adecuadamente los datos genómicos y biomarcadores.

En lo concerniente al tratamiento de diferentes tipos de cáncer, los resultados de esta revisión coinciden con los datos aportados por Saadh et al.(24), respecto a la necesidad de personalizar el tratamiento, ya sea a través de perfiles genómicos o nanotransportadores, destacando cómo las características específicas del tumor guían las decisiones terapéuticas. Además, estos autores resaltan la necesidad de minimizar los efectos secundarios y optimizar la administración de fármacos, ya sea mediante terapias dirigidas o sistemas de liberación más precisos, con el objetivo de mejorar los resultados clínicos en tratamientos oncológicos avanzados. En el mismo sentido, autores como Joshi et al.(25), Tufail et al.(28), y Liu et al.(29), coinciden en adaptar las estrategias terapéuticas a las características genómicas y a los biomarcadores de cada paciente, teniendo en cuenta la relevancia de estos últimos para predecir la respuesta a las terapias, algo que también comparten Gadade et al.(1). Y Reynolds et al.(32), añaden que las mutaciones genéticas son fundamentales para el tratamiento personalizado del cáncer, específicamente en el cáncer colorrectal, enfatizando la importancia de los biomarcadores, como las mutaciones RAS y BRAF, para mejorar el pronóstico. Sin embargo, también reconocen los desafíos que existen en la

traducción de descubrimientos biomoleculares a la práctica clínica, enfatizando la necesidad de realizar ensayos clínicos bien diseñados.

En cuanto al cáncer de próstata, Khatami et al.(22), subrayan la importancia del ctDNA y el aumento de ciertos micro ARN (miRNA, por sus siglas en inglés) como marcadores en el cáncer de testículo, sugiriendo su potencial en la individualización del tratamiento y pronóstico. En el caso del cáncer de próstata, destacan un nuevo marcador de mRNA que podría cambiar la forma en que se estratifican y tratan los pacientes con puntajes de Gleason altos. Al respecto, Feng et al.(26), aportan información crítica sobre la respuesta inmune en el cáncer de próstata, mostrando que la terapia con enzalutamida puede llevar a una disminución en la diversidad de las células T, lo que potencialmente promueve la resistencia al tratamiento.

Mientras que Marino et al.(31), resaltan las mutaciones germinales asociadas a este tipo de cáncer y enfatizan la relevancia del historial familiar y del cribado genético, sugiriendo que una evaluación más amplia podría mejorar la identificación de individuos en riesgo y guiar tratamientos más efectivos. Y Zhou et al.(33), destacan el papel crucial de los biomarcadores tumorales en la detección temprana y el pronóstico del cáncer, pero también subrayan los desafíos en su validación y la necesidad de estandarización, lo que podría influir en las estrategias de tratamiento personalizado.

En cuanto a la impresión 3D, los datos de esta revisión entre autores como Alzoubi et al.(6), y Tong et al.(17), así, por ejemplo, ambos subrayan que esta tecnología mejora la planificación quirúrgica al permitir a los cirujanos visualizar estructuras complejas y ensayar procedimientos, resultando en intervenciones más eficientes. Mientras que Cano et al.(4), complementan esta idea al señalar que los implantes adaptados a la anatomía individual no solo optimizan los resultados clínicos, sino que también reducen las tasas de cirugías de revisión. En un sentido similar, Alzoubi et al.(6), también comparte con Kalyan et al.(5), la idea de que la impresión 3D tiene aplicaciones más allá de la cirugía, como la creación de formulaciones de medicamentos personalizadas, mejorando así la eficacia de las terapias.

Sin embargo, a diferencia de los autores antes mencionados Alzoubi et al.(6), abordan aspectos económicos y de sostenibilidad que son menos prominentes para los otros autores. Aunque la inversión inicial en tecnologías de impresión 3D puede ser alta, los ahorros a largo plazo y la mejora de resultados justifican su adopción. Además, Alzoubi et al.(6), destacan las consideraciones éticas y ambientales del uso de la impresión 3D, señalando problemas de seguridad y el impacto ambiental, temas que no son tan profundizados por los otros autores.

De otro lado, al hablar del uso de organoides Alam et al.(3), destacan el uso de organoides tridimensionales para investigar el sarcoma, lo que permite una mejor replicación del microambiente tumoral y la identificación de estrategias terapéuticas personalizadas. Mogenet et al.(39), enfatizan la importancia de realizar pruebas moleculares en el cáncer de pulmón, facilitando decisiones terapéuticas basadas en alteraciones genéticas tratables. Por su parte, Phu et

al.(41), abogan por un enfoque que considere factores individuales y preferencias del paciente en el manejo del glaucoma de ángulo abierto, resaltando un enfoque más holístico.

A pesar de estas similitudes, existen diferencias notables entre estos autores, Alam et al.(3), se centran en la investigación sobre la resistencia a fármacos mediante organoides, mientras que Mogenet et al.(39), destacan la NGS para identificar mutaciones en el cáncer de pulmón. Phu et al.(41), enfatizan la importancia de los factores demográficos en la toma de decisiones clínicas, contrastando con el enfoque biomédico de los otros artículos. Los resultados de esta revisión complementan estas perspectivas al abordar las implicaciones éticas y legales de la MP, subrayando la necesidad de un marco regulatorio. En términos de eficacia, todos los autores coinciden en la necesidad de asegurar que las nuevas terapias sean efectivas. Alam et al.(3), y Mogenet et al.(39), discuten cómo sus enfoques pueden mejorar la supervivencia y la calidad de vida de los pacientes. Sin embargo, los resultados de esta investigación también enfatizan la necesidad de evaluaciones rigurosas para validar estas innovaciones en un entorno real.

Los desafíos éticos y legales en la MP se reflejan en las contribuciones de los autores analizados. Así, Gadade et al.(1), destacan la importancia de las pruebas genéticas y el consentimiento informado, enfatizando que la implementación de la MP requiere un marco ético que proteja los derechos de los pacientes. Esta preocupación se alinea con los datos de esta revisión, que también subraya la ética en el uso de tecnologías que afectan la privacidad del paciente. Además, Qu et al.(37), si bien, no discuten directamente los dilemas éticos, su énfasis en la calidad de los organoides resuena con las inquietudes sobre equidad y justicia en el acceso a tratamientos personalizados. La falta de técnicas de monitoreo en tiempo real sugiere también una necesidad de regulación, un aspecto que los datos obtenidos a este respecto también enfatizan. Por su parte, Xu et al.(19), plantean aspectos sobre la propiedad de datos y el uso de material biológico, mismos que los resultados obtenidos también presentan como relevantes.

Por último, en lo concerniente a la formación de profesionales de la salud y la organización de los sistemas de salud hay varias coincidencias y diferencias en los datos analizados, así, por ejemplo, autores como Marino et al.(31), Zhou et al.(33), y Reynolds et al.(32), coinciden en que la integración de la genética y los biomarcadores en el tratamiento de cualquier padecimiento es esencial para la práctica de la MP, lo que subraya la necesidad de una formación adecuada en estas áreas para los futuros profesionales de la salud. también resaltan cómo las mutaciones genéticas influyen en el pronóstico y la respuesta al tratamiento, lo que implica que el conocimiento en genética es fundamental para la formación médica y la toma de decisiones clínicas. mencionan la necesidad de experiencia en tecnologías de secuenciación y la interpretación de datos genómicos, por lo que se infiere que la formación educativa debe abordar estas habilidades técnicas. Lo anterior sugiere, además, que, a la formación médica tradicional, también es esencial integrar la educación en tecnología de datos y bioinformática en los planes de estudio.

Conclusiones

La MP representa un avance significativo en la atención médica, al permitir que los tratamientos se adapten a las características genéticas y biológicas de cada paciente. Este enfoque no solo mejora la eficacia de las terapias, sino que también minimiza los efectos secundarios, lo que resulta en una mejor calidad de vida para los pacientes. La identificación de biomarcadores específicos es crucial para el éxito de la MP, ya que permite a los médicos seleccionar las opciones de tratamiento más adecuadas y efectivas para cada individuo. Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación y la tecnología, la implementación efectiva de este nuevo enfoque enfrenta varios desafíos. La heterogeneidad de las enfermedades, especialmente en el cáncer, complica la identificación de biomarcadores y puede llevar a enfoques de “una talla para todos” que no satisfacen las necesidades individuales de los pacientes. Además, es fundamental superar las barreras tecnológicas y organizativas para integrar la información genética en los sistemas de salud, lo que requiere capacitación del personal médico y la adaptación de los sistemas de información para manejar grandes volúmenes de datos complejos. Por lo anterior la formación adecuada de los profesionales de la salud es esencial para la práctica efectiva de la MP. La integración de la genética y los biomarcadores en el tratamiento de diversas enfermedades subraya la necesidad de un enfoque educativo que prepare a los futuros médicos para enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades que ofrece la MP.

Referencias

1. Gadade DD, Jha H, Kumar C, Khan F. Unlocking the power of precision medicine: exploring the role of biomarkers in cancer management. *Futur J Pharm Sci* [Internet]. 2024 Jan 5 [cited 2024 Sep 4];10(1):1–15. Available from: <https://doi.org/10.1186/s43094-023-00573-2>
2. Carini C, Seyhan AA. Tribulations and future opportunities for artificial intelligence in precision medicine. *J Transl Med* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Sep 4];22(1):1–31. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05067-0>
3. Alam MI, Kashyap S, Balaji PG, Yadav AK, Flora SJS. 3D-Printed Medical Implants: Recent Trends and Challenges. *Biomedical Materials and Devices* [Internet]. 2024 [cited 2024 Sep 4];(1):1–21. Available from: <https://doi.org/10.1007/s44174-024-00221-0>
4. Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Perez-Mañanes R. Role of the orthopaedic surgeon in 3D printing: current applications and legal issues for a personalized medicine. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol* [Internet]. 2021 [cited 2024 Sep 4];65:138–51. Available from: <https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S1988885621000018>
5. Kalyan B, Mehrotra S, Marques SM, Kumar L, Verma R. 3D printing in personalized medicines: A focus on applications of the technology. *Mater Today Commun* [Internet]. 2023 Jun 1 [cited 2024 Sep 4];35. Available from: <https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S2352492823005664>
6. Alzoubi L, Aljabali AAA, Tambuwala MM. Empowering Precision Medicine: The Impact of 3D Printing on Personalized Therapeutic. *AAPS PharmSciTech* [Internet]. 2023 Dec 1 [cited 2024 Sep 4];24(8):1–33. Available from: <https://doi.org/10.1208/s12249-023-02682-w>

7. Gabriel RA, Burton BN, Urman RD, Waterman RS. Genomics Testing and Personalized Medicine in the Preoperative Setting. *Anesthesiol Clin* [Internet]. 2018 Dec 1 [cited 2024 Sep 4];36(4):639–52. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/abs/pii/S105532071930078X>
8. Panduro A, Roman S. Personalized medicine in Latin America. *Per Med* [Internet]. 2020 Sep 1 [cited 2024 Sep 4];17(5):339–43. Available from:
<https://tandfonline.proxyusc.elogim.com/doi/full/10.2217/pme-2020-0049>
9. Chaturvedi R, Alexander B, A'Court AM, Waterman RS, Burton BN, Urman RD, et al. Genomics testing and personalized medicine in the preoperative setting: Can it change outcomes in postoperative pain management? *Best Pract Res Clin Anaesthesiol* [Internet]. 2020 Jun 1 [cited 2024 Sep 4];34(2):283–95. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S1521689620300409>
10. Yosibash Z, Myers K, Trabelsi N, Sternheim A. Autonomous FEs (AFE) - A stride toward personalized medicine. *Computers and Mathematics with Applications* [Internet]. 2020 Dec 1 [cited 2024 Sep 4];80(11):2417–32. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S0898122120301164>
11. Stenzinger A, Edsjö A, Ploeger C, Friedman M, Fröhling S, Wirta V, et al. Trailblazing precision medicine in Europe: A joint view by Genomic Medicine Sweden and the Centers for Personalized Medicine, ZPM, in Germany. *Semin Cancer Biol* [Internet]. 2022 Sep 1 [cited 2024 Sep 4];84:242–54. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S1044579X21001565>
12. Brozos E, Toledano-Fonseca M, Costa-Fraga N, García-Ortiz MV, Díaz-Lagares Á, Rodríguez-Ariza A, et al. Pancreatic cancer biomarkers: A pathway to advance in personalized treatment selection. *Cancer Treat Rev* [Internet]. 2024 Apr 1 [cited 2024 Sep 19];125:1–7. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S030573722400046X>
13. Singh MP, Rai S, Pandey A, Singh NK, Srivastava S. Molecular subtypes of colorectal cancer: An emerging therapeutic opportunity for personalized medicine. *Genes Dis* [Internet]. 2021 Mar 1 [cited 2024 Sep 19];8(2):133–45. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S235230421930100X>
14. Yu B, Ma W. Biomarker discovery in hepatocellular carcinoma (HCC) for personalized treatment and enhanced prognosis. *Cytokine Growth Factor Rev* [Internet]. 2024 [cited 2024 Sep 19];1–10. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S1359610124000674>
15. Fábregas Julià. Intraoperative neurophysiological monitoring, personalized medicine and teamwork. *Rev Esp Anesthesiol Reanim* [Internet]. 2021 Feb 1 [cited 2024 Sep 19];68(2):53–5. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S234119292100024X>
16. Hollunder B, Rajamani N, Siddiqi SH, Finke C, Kühn AA, Mayberg HS, et al. Toward personalized medicine in connectomic deep brain stimulation. *Prog Neurobiol* [Internet]. 2022 Mar 1 [cited

- 2024 Sep 19];210:1–20. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S0301008221002252>
17. Tong H, Zhang J, Ma J, Zhang J. Perspectives on 3D printed personalized medicines for pediatrics. *Int J Pharm* [Internet]. 2024 Mar 25 [cited 2024 Sep 19];653:1–13. Available from:
<https://sciencedirect.proxyusc.elogim.com/science/article/pii/S0378517324001017>
 18. Bhuskute H, Shende P, Prabhakar B. 3D Printed Personalized Medicine for Cancer: Applications for Betterment of Diagnosis, Prognosis and Treatment. *AAPS PharmSciTech* [Internet]. 2022 Jan 1 [cited 2024 Oct 13];23(1):1–12. Available from: <https://doi.org/10.1208/s12249-021-02153-0>
 19. Xu R, Chen R, Tu C, Gong X, Liu Z, Mei L, et al. 3D Models of Sarcomas: The Next-generation Tool for Personalized Medicine. *Phenomics* [Internet]. 2024 Apr 1 [cited 2024 Oct 13];4(2):171–86. Available from: <https://doi.org/10.1007/s43657-023-00111-3>
 20. Natarajan K, Natarajan P, Muthusamy S, Ravi RK. A novel method for bioinformatics analysis in gene expression profiling framework for personalized healthcare applications. *Multimed Tools Appl* [Internet]. 2024 [cited 2024 Oct 13];1–33. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20066-5>
 21. Liu Z, Wang Y, Shen F, Zhang Z, Gong J, Fu C, et al. Radiomics based on readout-segmented echo-planar imaging (RS-EPI) diffusion-weighted imaging (DWI) for prognostic risk stratification of patients with rectal cancer: a two-centre, machine learning study using the framework of predictive, preventive, and personalized medicine. *EPMA Journal* [Internet]. 2022 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];13(4):633–47. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13167-022-00303-3>
 22. Khatami F, Nikfar S, Gholami K, Navard FG, Hasanzad M, Tamehrizadeh SS, et al. The importance of personalized medicine in urological cancers. *J Diabetes Metab Disord* [Internet]. 2022 Mar 1 [cited 2024 Oct 13];(21):841–52. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40200-021-00824-0>
 23. Engelmann AR, Merbs SL. Personalized Medicine in Orbital Surgery. *Curr Surg Rep* [Internet]. 2024 Oct 1 [cited 2024 Oct 13];(12):371–8. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40137-024-00424-w>
 24. Saadh MJ, Mustafa MA, Kumar A, Alamir HTA, Kumar A, Khudair SA, et al. Stealth Nanocarriers in Cancer Therapy: a Comprehensive Review of Design, Functionality, and Clinical Applications. *AAPS PharmSciTech* [Internet]. 2024 Aug 1 [cited 2024 Oct 13];25(6):1–24. Available from:
<https://doi.org/10.1208/s12249-024-02843-5>
 25. Joshi A, Ghosh A, Ramachandran V, Kuriakose M, Prabhaskar K, Kumar P. Precision Medicine and Clinical Trials in Advanced and Metastatic Oral Cancer. *J Maxillofac Oral Surg* [Internet]. 2024 Aug 1 [cited 2024 Oct 13];(23):772–82. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12663-024-02254-w>
 26. Feng DC, Zhu WZ, Wang J, Li DX, Shi X, Xiong Q, et al. The implications of single-cell RNA-seq analysis in prostate cancer: unraveling tumor heterogeneity, therapeutic implications and pathways towards personalized therapy. *Mil Med Res* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];11(21):1–20. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40779-024-00526-7>

27. Selvakumar SC, Preethi KA, Ross K, Tusubira D, Khan MWA, Mani P, et al. CRISPR/Cas9 and next generation sequencing in the personalized treatment of Cancer. *Mol Cancer* [Internet]. 2022 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];21(83):1–14. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12943-022-01565-1>
28. Tufail M, Hu JJ, Liang J, He CY, Wan WD, Huang YQ, et al. Predictive, preventive, and personalized medicine in breast cancer: targeting the PI3K pathway. *J Transl Med* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];22(1):1–37. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12967-023-04841-w>
29. Liu Z, Jing C, Kong F. From clinical management to personalized medicine: novel therapeutic approaches for ovarian clear cell cancer. *J Ovarian Res* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];17(1):1–27. Available from: <https://doi.org/10.1186/s13048-024-01359-7>
30. Qin X, Zhou J, Wang Z, Feng C, Fan J, Huang J, et al. Metagenomic analysis of the microbiome of the upper reproductive tract: combating ovarian cancer through predictive, preventive, and personalized medicine. *EPMA Journal* [Internet]. 2022 Sep 1 [cited 2024 Oct 13];13(3):487–98. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13167-022-00286-1>
31. Marino F, Totaro A, Gandi C, Bientinesi R, Moretto S, Gavi F, et al. Germline mutations in prostate cancer: a systematic review of the evidence for personalized medicine. *Prostate Cancer Prostatic Dis* [Internet]. 2023 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];26(4):655–64. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41391-022-00609-3>
32. Reynolds IS, O’Connell E, McNamara DA, Prehn JHM, Furney SJ, Burke JP. Clinical Oncogenomics and Personalized Medicine in Colorectal Cancer for the Surgeon: What We Need to Know and What the Future Holds. *SN Compr Clin Med* [Internet]. 2022 Mar 5 [cited 2024 Oct 13];4(1):1–9. Available from: <https://doi.org/10.1007/s42399-022-01144-x>
33. Zhou Y, Tao L, Qiu J, Xu J, Yang X, Zhang Y, et al. Tumor biomarkers for diagnosis, prognosis and targeted therapy. *Signal Transduct Target Ther* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];9(132):1–86. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01823-2>
34. Lin F, Lin EZ, Anekoji M, Ichim TE, Hu J, Marincola FM, et al. Advancing personalized medicine in brain cancer: exploring the role of mRNA vaccines. *J Transl Med* [Internet]. 2023 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];21(1):1–14. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12967-023-04724-0>
35. Yu Y ya, Zhu Y juan, Xiao Z zhen, Chen Y dong, Chang X song, Liu Y hong, et al. The pivotal application of patient-derived organoid biobanks for personalized treatment of gastrointestinal cancers. *Biomark Res* [Internet]. 2022 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];10(73):1–25. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40364-022-00421-0>
36. Le Compte M, De La Hoz EC, Peeters S, Fortes FR, Hermans C, Domen A, et al. Single-organoid analysis reveals clinically relevant treatment-resistant and invasive subclones in pancreatic cancer. *NPJ Precis Oncol* [Internet]. 2023 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];7(128):1–14. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41698-023-00480-y>
37. Qu S, Xu R, Yi G, Li Z, Zhang H, Qi S, et al. Patient-derived organoids in human cancer: a platform for fundamental research and precision medicine. *Molecular Biomedicine* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];5(1):1–21. Available from: <https://doi.org/10.1186/s43556-023-00165-9>

38. Hua Z, Li Z, Lim D, Ajrouch A, Karkash A, Jalal S, et al. Comparative oncology chemosensitivity assay for personalized medicine using low-coherence digital holography of dynamic light scattering from cancer biopsies. *Sci Rep* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];14(1):1–10. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52404-w>
39. Mogenet A, Greillier L, Tomasini P. The value of population screening in advancing personalized medicine in the field of lung cancer. *Pharmgenomics Pers Med* [Internet]. 2021 [cited 2024 Oct 13];14:987–96. Available from: <https://doi.org/10.2147/PGPM.S267437>
40. James JE, Joseph G. “It’s personalized, but it’s still bucket based”: the promise of personalized medicine vs. the reality of genomic risk stratification in a breast cancer screening trial. *New Genet Soc* [Internet]. 2022 [cited 2024 Oct 13];41(3):228–53. Available from: <https://doi.org/10.1080/14636778.2022.2115348>
41. Phu J, Agar A, Wang H, Masselos K, Kalloniatis M. Management of open-angle glaucoma by primary eye-care practitioners: toward a personalised medicine approach. *Clin Exp Optom* [Internet]. 2021 [cited 2024 Oct 13];104(3):367–84. Available from: <https://doi.org/10.1111/cxo.13114>
42. Howell D. Enabling patients in effective self-management of breathlessness in lung cancer: The neglected pillar of personalized medicine. *Lung Cancer Manag* [Internet]. 2021 Dec 1 [cited 2024 Oct 13];10(4):1–14. Available from: <https://doi.org/10.2217/lmt-2020-0017>
43. Koleva R, Szilberhorn L, Zelei T, Vellekoop H, Nagy B, Huygens S, et al. Financial incentives to promote personalized medicine in Europe: an overview and guidance for implementation. *Per Med* [Internet]. 2023 Jul 1 [cited 2024 Oct 13];20(4):305–19. Available from: <https://doi.org/10.2217/pme-2022-0145>