

Nuevos enfoques en el tratamiento del glaucoma: dispositivos y farmacología

New approaches in the treatment of glaucoma: devices and pharmacology

Giovanna Carolina Coronel Banda

ORCID: 0009-0000-3235-8865

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Silvia Vanessa Damian Lemache

ORCID: 0009-0008-1574-0753

Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador

Alexander Ramiro Naranjo Noboa

ORCID: 0009-0001-4679-3590

Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Carolina Elizabeth Naranjo Noboa

ORCID: 0000-0002-0044-5638

Universidad de las Américas, Ecuador

Bruna Valentina Avalos Jaramillo

ORCID: 0009-0001-7142-6012

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Eliana Gissel Pila Guilcamaigua

ORCID: 0009-0005-0552-7009

Investigadora independiente, Ecuador

Luis Daniel Barroso Guato

ORCID: 0009-0008-2188-3136

Universidad de Guayaquil, Ecuador

Juan José Aguirre Maldonado

ORCID: 0009-0000-7375-2383

Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

RESUMEN

El glaucoma es una enfermedad neurodegenerativa crónica que constituye una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial. A pesar de los avances en su diagnóstico y manejo, el control adecuado de la presión intraocular (PIO) sigue siendo el pilar fundamental del tratamiento. En los últimos años, han surgido nuevos enfoques terapéuticos que incluyen tanto innovaciones farmacológicas como el desarrollo de dispositivos médicos diseñados para mejorar la eficacia, seguridad y adherencia al tratamiento. Entre los avances farmacológicos destacan las nuevas formulaciones de agentes hipotensores oculares, así como compuestos dirigidos a dianas moleculares específicas que buscan frenar la progresión del daño glaucomatoso. Por otro lado, los dispositivos microinvasivos para el manejo del glaucoma (MIGS, por sus siglas en inglés) han revolucionado el abordaje quirúrgico, ofreciendo alternativas menos invasivas y con menores riesgos en comparación con las técnicas tradicionales. Este artículo revisa de manera narrativa los avances más recientes en el tratamiento del glaucoma, analizando su impacto clínico, las evidencias disponibles y las posibles limitaciones, con el objetivo de proporcionar una visión integral que facilite la toma de decisiones en la práctica clínica y fomente un manejo más personalizado de esta patología compleja.

Palabras clave: Glaucoma, Tratamiento, Dispositivos, Farmacología, Neuroprotección, Presión intraocular, Cirugía mínimamente invasiva.

ABSTRACT

Glaucoma is a chronic neurodegenerative disease that is one of the main causes of irreversible blindness worldwide. Despite advances in its diagnosis and management, adequate control of intraocular pressure (IOP) continues to be the fundamental pillar of treatment. In recent years, new therapeutic approaches have emerged that include both pharmacological innovations and the development of medical devices designed to improve treatment efficacy, safety, and adherence. Among the pharmacological advances, new formulations of ocular hypotensive agents stand out, as well as compounds directed at specific molecular targets that seek to slow the progression of glaucomatous damage. On the other hand, microinvasive devices for the management of glaucoma (MIGS) have revolutionized the surgical approach, offering less invasive alternatives with lower risks compared to traditional techniques. This article narratively reviews the most recent advances in the treatment of glaucoma, analyzing its clinical impact, the available evidence and possible limitations, with the aim of providing a comprehensive vision that facilitates decision-making in clinical practice and encourages more personalized management of this complex pathology.

Keywords: Glaucoma, Treatment, Devices, Pharmacology, Neuroprotection, Intraocular pressure, Minimally invasive surgery.

INTRODUCCIÓN

El glaucoma es una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial, afectando a millones de personas y representando un desafío significativo para la salud pública (1). Esta enfermedad ocular crónica se caracteriza por un daño progresivo del nervio óptico, generalmente asociado con un aumento de la presión intraocular, aunque otros factores también pueden contribuir a su desarrollo (2). A lo largo de las últimas décadas, los avances en el conocimiento de su fisiopatología han permitido el desarrollo de enfoques terapéuticos más efectivos y personalizados (3). Tradicionalmente, el manejo del glaucoma se ha basado en el uso de fármacos hipotensores, procedimientos láser y cirugía convencional (4). Sin embargo, la aparición de nuevos dispositivos médicos y opciones farmacológicas innovadoras ha ampliado el arsenal terapéutico, ofreciendo alternativas menos invasivas y con perfiles de seguridad mejorados (5). Este artículo revisa los desarrollos recientes en el tratamiento del glaucoma, con un enfoque particular en las tecnologías emergentes y los agentes farmacológicos de última generación. Además, se analizan los beneficios, limitaciones y perspectivas futuras de estas estrategias, brindando una visión integral para optimizar el manejo clínico de esta compleja patología oftalmológica (6).

METODOLOGÍA

La metodología empleada para esta revisión narrativa se basó en una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas como PubMed, Scopus y ScienceDirect. Se utilizaron términos MeSH y DeCS relacionados con el tema, incluyendo "glaucoma", "tratamiento", "dispositivos médicos" y "farmacología", combinados mediante operadores booleanos como AND, OR y NOT para refinar los resultados. Los criterios de inclusión abarcaron artículos publicados en los últimos 10 años, escritos en inglés o español, estudios originales, revisiones sistemáticas y metaanálisis que abordaran avances en dispositivos y tratamientos farmacológicos para el glaucoma. Se excluyeron estudios duplicados, publicaciones en idiomas distintos al inglés o español y aquellos que no presentaran información relevante o actualizada sobre el tema. En total, se revisaron 85 artículos, de los cuales 18 fueron seleccionados por cumplir con los criterios establecidos y aportar información significativa para el análisis. Esta metodología permitió garantizar un enfoque riguroso y actualizado en la recopilación de evidencia científica sobre los nuevos enfoques terapéuticos en el manejo del glaucoma.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción al glaucoma: epidemiología y fisiopatología

El glaucoma es una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial, afectando a más de 76 millones de personas en 2020, con una proyección de alcanzar los 111 millones para 2040. Esta enfermedad ocular crónica y progresiva se caracteriza por la degeneración del nervio óptico, generalmente asociada a un aumento de la presión intraocular (PIO), aunque también puede desarrollarse con valores normales de PIO. Su impacto es particularmente significativo en poblaciones envejecidas y en regiones con acceso limitado a servicios oftalmológicos, como África subsahariana y ciertas áreas de Asia (1).

Desde el punto de vista epidemiológico, el glaucoma primario de ángulo abierto (GPAA) es la forma más común, representando aproximadamente el 74% de los casos globales. Factores de riesgo como la edad avanzada, antecedentes familiares, ascendencia africana o hispana, y enfermedades sistémicas como la hipertensión arterial o la diabetes mellitus, contribuyen a su prevalencia. Por otro lado, el glaucoma primario de ángulo cerrado (GPAC) es más frecuente en poblaciones asiáticas y mujeres mayores, debido a características anatómicas específicas del ojo que predisponen al cierre angular (1).

La fisiopatología del glaucoma es compleja y multifactorial. En el caso del GPAA, el principal mecanismo subyacente es una disfunción en el drenaje del humor acuoso a través de la malla trabecular y el canal de Schlemm, lo que lleva a un aumento crónico de la PIO. Este incremento genera un daño mecánico y vascular en las células ganglionares de la retina y sus axones, resultando en una pérdida progresiva del campo visual. Por su parte, el GPAC se origina por un bloqueo físico del ángulo iridocorneal, que impide el flujo normal del humor acuoso hacia el sistema de drenaje ocular (2).

Además, se ha identificado que procesos neurodegenerativos independientes de la PIO también desempeñan un rol crucial en la patogénesis del glaucoma. Estos incluyen estrés oxidativo, disfunción mitocondrial y alteraciones en la microglía, que contribuyen al daño neuronal progresivo. Estos hallazgos han ampliado nuestra comprensión de la enfermedad más allá del control exclusivo de la PIO, abriendo nuevas vías para su manejo terapéutico (2).

Avances en dispositivos de drenaje para el glaucoma

El glaucoma es una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial, y su manejo se centra en la reducción de la PIO para prevenir el daño progresivo del nervio óptico. En este contexto, los dispositivos de drenaje han emergido como una herramienta clave, especialmente en casos donde el tratamiento farmacológico o las intervenciones quirúrgicas convencionales, como la trabeculectomía, no han logrado un control adecuado de la PIO (3).

En los últimos años, el desarrollo de dispositivos de drenaje ha experimentado importantes avances tecnológicos que buscan mejorar la eficacia, seguridad y comodidad del paciente. Entre estas innovaciones destacan los dispositivos de drenaje mínimamente invasivos, que han ganado popularidad debido a su perfil menos invasivo y su capacidad para integrarse con procedimientos quirúrgicos combinados, como la cirugía de cataratas (3).

Uno de los avances más significativos es el diseño de dispositivos más pequeños y biocompatibles que reducen el riesgo de complicaciones postoperatorias. Ejemplos notables incluyen el iStent y el Hydrus Microstent, que se implantan en el sistema trabecular para mejorar el flujo del humor acuoso hacia el sistema venoso. Estos dispositivos han demostrado ser efectivos en la reducción de la PIO con menos efectos adversos en comparación con las técnicas quirúrgicas tradicionales (3,4).

Por otro lado, los dispositivos subconjuntivales, como el XEN Gel Stent, han ampliado las opciones terapéuticas al crear una vía directa para el drenaje del humor acuoso hacia el espacio subconjuntival. Este enfoque combina la eficacia de las cirugías filtrantes clásicas con un procedimiento menos traumático y una recuperación más rápida para el paciente. Además, investigaciones recientes están explorando materiales avanzados, como polímeros biodegradables y recubrimientos antifibróticos, que buscan prolongar la funcionalidad de estos dispositivos al minimizar la formación de cicatrices (4).

A pesar de estos avances, es importante reconocer que los dispositivos de drenaje no están exentos de limitaciones. La selección del dispositivo adecuado depende de factores individuales del paciente, como el tipo de glaucoma, la severidad de la enfermedad y la respuesta previa a tratamientos. Asimismo, algunos dispositivos presentan riesgos potenciales, como migración, obstrucción o hipotonía ocular, lo que subraya la necesidad de un seguimiento posquirúrgico riguroso (4).

Técnicas mínimamente invasivas en cirugía de glaucoma

Las técnicas mínimamente invasivas en cirugía de glaucoma, conocidas como MIGS, representan un avance significativo en el manejo quirúrgico de esta enfermedad crónica. Estas técnicas están diseñadas para reducir la PIO con un perfil de seguridad más alto y una recuperación más rápida en comparación con las intervenciones quirúrgicas tradicionales, como la trabeculectomía o los dispositivos de drenaje (5).

Los procedimientos MIGS se caracterizan por ser menos invasivos, emplear dispositivos de pequeño tamaño y tener un impacto menor en los tejidos oculares. Esto resulta en un menor riesgo de complicaciones graves, como infecciones o hipotensión ocular excesiva, lo que los convierte en una opción atractiva para pacientes con glaucoma en etapas iniciales o moderadas (5).

Entre los dispositivos más utilizados en estas técnicas se encuentran los stents trabeculares, como el iStent y el Hydrus, que mejoran el drenaje del humor acuoso a través de la vía trabecular natural. Por otro lado, los implantes supracoroideos, como el CyPass (que fue retirado del mercado por preocupaciones de seguridad a largo plazo), buscan facilitar el drenaje hacia el espacio supracoroideo. También destacan los dispositivos subconjuntivales, como el Xen Gel Stent, que crean una nueva vía de drenaje hacia el espacio subconjuntival, similar a la trabeculectomía, pero con menor manipulación quirúrgica (5,6).

Además de los dispositivos, las técnicas MIGS incluyen procedimientos como la goniotomía asistida con Kahook Dual Blade y la canaloplastia, que optimizan las vías de drenaje naturales del ojo sin necesidad de implantes permanentes. A pesar de sus ventajas, es importante considerar que las técnicas MIGS suelen tener un efecto reductor de la PIO más moderado en comparación con las cirugías tradicionales. Por ello, su indicación se limita generalmente a pacientes con glaucoma leve a moderado o como procedimientos complementarios en combinación con cirugía de catarata (6).

El desarrollo continuo de dispositivos y técnicas MIGS refleja el compromiso de la comunidad oftalmológica por mejorar la calidad de vida de los pacientes con glaucoma. Sin embargo, queda pendiente evaluar su eficacia a largo plazo mediante estudios clínicos robustos y comparativos. Asimismo, es crucial individualizar la elección del tratamiento considerando las características del paciente, la severidad del glaucoma y las expectativas terapéuticas (6).

Nuevos enfoques farmacológicos: análogos de prostaglandinas y otros agentes

En los últimos años, los avances en farmacología han permitido el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas para el manejo del glaucoma, una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial. Dentro de este contexto, los análogos de prostaglandinas han destacado como una de las opciones más efectivas y ampliamente utilizadas para reducir la PIO, un factor clave en la progresión de esta enfermedad (7).

Los análogos de prostaglandinas, como latanoprost, bimatoprost, travoprost y tafluprost, actúan incrementando el drenaje del humor acuoso a través de la vía uveoescleral. Este mecanismo no solo resulta en una disminución sostenida de la PIO, sino que también se asocia con un perfil de seguridad favorable. Estos agentes suelen administrarse una vez al día, lo que mejora la adherencia al tratamiento en comparación con otras opciones terapéuticas que requieren múltiples aplicaciones diarias. Sin embargo, algunos efectos secundarios, como el enrojecimiento ocular, el oscurecimiento del iris y el crecimiento de pestañas, pueden limitar su uso en ciertos pacientes (7).

Además de los análogos de prostaglandinas, han surgido otros agentes farmacológicos innovadores que ofrecen alternativas prometedoras. Entre ellos destacan los inhibidores de la rho-quinasa (ROCK), como netarsudil, que reducen la PIO mediante la mejora del flujo trabecular y la disminución de la producción de humor acuoso. Estos compuestos también presentan propiedades neuroprotectoras potenciales, lo que podría ser beneficioso para preservar la función visual a largo plazo (7,8).

Otro grupo emergente incluye los agonistas de receptores adrenérgicos alfa-2 y los inhibidores de anhidrasa carbónica. Aunque estos agentes ya se empleaban previamente en la práctica clínica, las formulaciones más recientes buscan optimizar su eficacia y minimizar los efectos adversos. Asimismo, las combinaciones farmacológicas fijas han ganado relevancia al simplificar los regímenes terapéuticos y mejorar la adherencia del paciente (8).

Es importante mencionar que el desarrollo de nuevos fármacos para el glaucoma está estrechamente vinculado a una mejor comprensión de los mecanismos moleculares subyacentes a la enfermedad. Esto ha llevado a la identificación de dianas terapéuticas innovadoras, como los moduladores del flujo linfático ocular y los agentes antioxidantes con capacidad neuroprotectora (8).

Terapias combinadas: dispositivos y farmacología

Las terapias combinadas en el tratamiento del glaucoma han ganado relevancia en la última década, integrando dispositivos innovadores y avances farmacológicos para optimizar el control de la PIO. Esta estrategia busca maximizar la eficacia terapéutica mientras minimiza los efectos secundarios y mejora la adherencia del paciente al tratamiento (9).

En el ámbito de los dispositivos, los implantes de drenaje y los sistemas de liberación controlada de fármacos han demostrado ser herramientas prometedoras. Por ejemplo, los MIGS ofrecen una opción menos invasiva que las cirugías tradicionales, reduciendo la PIO mediante la mejora del flujo del humor acuoso. Además, se han desarrollado implantes biodegradables que liberan medicamentos antiglaucomatosos de manera sostenida, eliminando la necesidad de instilaciones diarias y mejorando la adherencia terapéutica (9).

En cuanto a la farmacología, las combinaciones de medicamentos en un solo envase han facilitado el manejo del glaucoma, especialmente en pacientes con regímenes complejos. Estas combinaciones suelen incluir agentes que actúan en diferentes mecanismos fisiopatológicos, como análogos de prostaglandinas, inhibidores de la anhidrasa carbónica o bloqueadores beta. La sinergia entre estos compuestos permite una reducción más significativa de la PIO en comparación con el uso de monoterapias (9,10).

La integración de dispositivos y farmacología ha abierto nuevas posibilidades terapéuticas. Por ejemplo, algunos sistemas de liberación intraocular combinan implantes quirúrgicos con fármacos antiglaucomatosos, proporcionando un control prolongado de la PIO con una intervención mínima. Asimismo, los avances en nanotecnología han permitido el desarrollo de nanopartículas que transportan medicamentos directamente a los tejidos oculares afectados, aumentando la eficacia y reduciendo los efectos adversos sistémicos (10).

A pesar de los avances, persisten desafíos importantes. La selección del tratamiento adecuado requiere una evaluación cuidadosa de cada paciente, considerando factores como el estadio del glaucoma, las comorbilidades y la respuesta individual a las terapias previas. Además, es fundamental realizar estudios a largo plazo para evaluar la seguridad y efectividad de estas estrategias combinadas en poblaciones diversas (10).

Terapias dirigidas a la neuroprotección del nervio óptico

El glaucoma es una enfermedad neurodegenerativa crónica que afecta al nervio óptico, siendo una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial. Aunque la reducción de la PIO sigue siendo el pilar fundamental del tratamiento, en los últimos años se han explorado terapias dirigidas específicamente a la neuroprotección del nervio óptico, con el objetivo de preservar la función visual y retardar la progresión de la enfermedad (11).

La neuroprotección en el glaucoma busca prevenir o minimizar el daño axonal y la muerte de las células ganglionares de la retina (CGR), que son fundamentales para la transmisión de señales visuales al cerebro. Entre las estrategias farmacológicas más prometedoras se encuentran los agentes antioxidantes, los inhibidores del glutamato y los moduladores de canales iónicos. Los antioxidantes, como la coenzima Q10 y el resveratrol, han mostrado potencial para reducir el estrés oxidativo, un factor clave en la apoptosis de las CGR. Por otro lado, los inhibidores del glutamato, como la memantina, actúan bloqueando la excitotoxicidad mediada por este neurotransmisor, un mecanismo implicado en el daño neuronal en el glaucoma (11).

Asimismo, los factores neurotróficos han ganado atención como herramientas terapéuticas. Estos compuestos promueven la supervivencia y regeneración de las CGR. Ejemplos destacados incluyen el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) y el factor de crecimiento nervioso (NGF). Aunque su aplicación clínica aún enfrenta desafíos relacionados con su administración eficaz y segura, los estudios preclínicos han demostrado resultados alentadores (11,12).

En cuanto a dispositivos innovadores, se han desarrollado sistemas de liberación controlada de fármacos que permiten una administración sostenida y localizada de agentes neuroprotectores. Estos dispositivos minimizan los efectos adversos sistémicos y mejoran la adherencia al tratamiento. Por ejemplo, implantes biodegradables que liberan medicamentos como brimonidina han mostrado potencial para proteger las CGR más allá de su efecto hipotensor (12).

Además, la investigación en terapias génicas y celulares está abriendo nuevas posibilidades en el campo de la neuroprotección. La transferencia génica dirigida a aumentar la expresión de factores neurotróficos o a modular vías apoptóticas específicas representa una frontera prometedora. De manera similar, los trasplantes de células madre ofrecen esperanza para la regeneración del tejido dañado, aunque esta área aún se encuentra en etapas iniciales de desarrollo (12).

Innovaciones en la administración de fármacos: sistemas de liberación sostenida

El tratamiento del glaucoma ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, no solo en términos de farmacología, sino también en los métodos de administración de medicamentos. En este contexto, los sistemas de liberación sostenida han surgido como una solución prometedora para abordar los desafíos asociados al tratamiento convencional, como la adherencia al régimen terapéutico y la optimización del control de la PIO (13).

Uno de los principales obstáculos en el manejo del glaucoma es la dependencia de las gotas oftálmicas, que requieren aplicaciones frecuentes y precisas. Este enfoque tradicional a menudo se ve limitado por la baja adherencia del paciente, problemas de dosificación y efectos secundarios sistémicos. Frente a estas limitaciones, los sistemas de liberación sostenida ofrecen una alternativa que permite una administración constante y controlada del fármaco durante periodos prolongados (13).

Entre las innovaciones más destacadas se encuentran los implantes biodegradables y no biodegradables. Los implantes biodegradables, como los dispositivos intracamerales que liberan bimatoprost o dexametasona, se diseñan para descomponerse gradualmente en el ojo, eliminando la necesidad de extracción quirúrgica. Estos dispositivos no solo mejoran la adherencia al tratamiento, sino que también minimizan los picos y valles en las concentraciones del fármaco, proporcionando un control más estable de la PIO. Por otro lado, los implantes no biodegradables, aunque requieren procedimientos adicionales para su extracción, ofrecen una liberación prolongada y predecible de medicamentos, siendo útiles en casos específicos (13).

Otra innovación relevante son los insertos oculares, como los sistemas de liberación basados en polímeros, que se colocan en el saco conjuntival o en el canal lagrimal. Estos dispositivos permiten una dosificación continua y controlada sin interferir significativamente con la visión o el confort del paciente. Asimismo, se están desarrollando lentes de contacto terapéuticas que combinan corrección visual con la liberación sostenida de medicamentos antiglaucomatosos (14).

En cuanto a los materiales utilizados en estos sistemas, se han explorado polímeros avanzados como el ácido poliláctico (PLA), el ácido poliglicólico (PGA) y sus copolímeros. Estos materiales no solo son biocompatibles, sino que también pueden ajustarse para liberar fármacos a ritmos específicos según las necesidades clínicas (14).

Finalmente, es importante destacar que estos avances no solo buscan mejorar la eficacia terapéutica, sino también reducir los efectos adversos asociados a las fluctuaciones farmacológicas y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Aunque todavía existen desafíos relacionados con los costos y la aceptación generalizada de estas tecnologías, su integración en la práctica clínica promete transformar significativamente el manejo del glaucoma en los próximos años (14).

Uso de biomarcadores en el manejo y tratamiento del glaucoma

El uso de biomarcadores en el manejo y tratamiento del glaucoma ha emergido como una herramienta prometedora para mejorar el diagnóstico temprano, monitorear la progresión de la enfermedad y optimizar las estrategias terapéuticas. En el contexto de esta patología neurodegenerativa crónica, que representa una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial, la identificación de biomarcadores específicos puede ofrecer un enfoque más personalizado y eficaz en su manejo (15).

Entre los biomarcadores más estudiados en el glaucoma se encuentran aquellos relacionados con la estructura y función del nervio óptico. La medición del grosor de la capa de fibras nerviosas de la retina mediante tomografía de coherencia óptica (OCT) se ha consolidado como un estándar en la evaluación estructural. Este parámetro permite detectar cambios sutiles en las etapas iniciales de la enfermedad, incluso antes de que se manifiesten alteraciones funcionales en el campo visual. Asimismo, la evaluación del grosor del complejo de células ganglionares ha mostrado ser un complemento valioso, proporcionando información adicional sobre la integridad de las células neuronales afectadas por el glaucoma (15).

En cuanto a los biomarcadores funcionales, las pruebas avanzadas de perimetría visual, como la perimetría de doble frecuencia y la perimetría automatizada estándar, siguen siendo esenciales para evaluar el impacto funcional del daño glaucomatoso. No obstante, investigaciones recientes han explorado técnicas más novedosas, como la electroretinografía multifocal y los potenciales evocados visuales, que podrían ofrecer una evaluación más precisa y temprana de los cambios funcionales (15,16).

Además de los biomarcadores estructurales y funcionales, los avances en la investigación molecular han identificado una variedad de biomarcadores humorales que podrían desempeñar un papel crucial en el futuro del manejo del glaucoma. Por ejemplo, se ha estudiado la relación entre el aumento de ciertos marcadores inflamatorios, como las citoquinas y quimioquinas, y el daño glaucomatoso progresivo. Asimismo, la detección de niveles alterados de metabolitos específicos en el humor acuoso y el plasma podría proporcionar pistas sobre los mecanismos patológicos subyacentes y ayudar a predecir la respuesta al tratamiento (16).

El desarrollo de dispositivos médicos que integren la medición continua o periódica de estos biomarcadores también está ganando terreno. Tecnologías como los sensores implantables para monitorear la PIO en tiempo real y los sistemas portátiles para evaluar parámetros estructurales y funcionales están configurando un nuevo paradigma en la gestión del glaucoma (16).

Perspectivas futuras y desafíos en el tratamiento del glaucoma

El tratamiento del glaucoma, una de las principales causas de ceguera irreversible a nivel mundial, enfrenta constantes desafíos y evoluciona con la incorporación de nuevos enfoques terapéuticos. A pesar de los avances en dispositivos y farmacología, aún persisten retos significativos que impactan en los resultados clínicos y en la calidad de vida de los pacientes. Este apartado aborda las perspectivas futuras y los desafíos en el manejo de esta enfermedad (17).

En primer lugar, la adherencia al tratamiento sigue siendo un desafío crítico. Muchos pacientes con glaucoma dependen del uso diario de medicamentos tópicos, lo que puede resultar en un cumplimiento subóptimo debido a factores como efectos secundarios, dificultad para la administración o falta de comprensión sobre la progresión asintomática de la enfermedad. En este contexto, los sistemas de liberación sostenida de fármacos, como implantes biodegradables o insertos intracamerales, representan una prometedora alternativa para mejorar la adherencia y la eficacia del tratamiento (17).

Por otro lado, el desarrollo de nuevos agentes farmacológicos continúa siendo un área de interés. Aunque los medicamentos actuales, como los análogos de prostaglandinas y los inhibidores de la anhidrasa carbónica, han demostrado eficacia en la reducción de la PIO, existe una necesidad urgente de terapias que aborden otros mecanismos patogénicos del glaucoma, como la neuroprotección y la mejora del flujo sanguíneo ocular. Las investigaciones en terapias génicas y moléculas dirigidas a vías específicas brindan esperanza para tratamientos más personalizados (17).

El avance en dispositivos quirúrgicos también ha transformado el panorama del manejo del glaucoma. Los dispositivos de cirugía mínimamente invasiva para glaucoma (han ganado popularidad debido a su perfil de seguridad y recuperación rápida. Sin embargo, es necesario realizar estudios a largo plazo que evalúen su eficacia sostenida en comparación con procedimientos tradicionales. Además, la estandarización de las indicaciones para su uso sigue siendo un tema pendiente (18).

Otro desafío importante es el diagnóstico temprano y el monitoreo continuo de la enfermedad. Las tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial (IA) y los dispositivos portátiles, tienen el potencial de revolucionar la detección precoz y el seguimiento del glaucoma. Sin embargo, su implementación requiere superar barreras relacionadas con el costo, la accesibilidad y la capacitación profesional (18).

Finalmente, es esencial abordar las inequidades globales en el acceso al diagnóstico y tratamiento del glaucoma. En regiones con recursos limitados, la falta de infraestructura y personal capacitado exacerba la carga de esta enfermedad. Por lo tanto, las estrategias futuras deben incluir enfoques integrales que combinen innovación tecnológica con políticas de salud pública (18).

CONCLUSIÓN

En conclusión, los avances recientes en el tratamiento del glaucoma han abierto nuevas posibilidades tanto en el ámbito farmacológico como en el desarrollo de dispositivos médicos. La incorporación de fármacos con mecanismos de acción innovadores, como los moduladores del flujo uveoescleral y agentes neuroprotectores, ha permitido optimizar el control de la presión intraocular y abordar de manera más integral la progresión de la enfermedad. Paralelamente, los dispositivos quirúrgicos mínimamente invasivos han revolucionado el manejo quirúrgico del glaucoma, ofreciendo opciones con menores riesgos y tiempos de recuperación más cortos en comparación con las técnicas tradicionales. Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten desafíos importantes, como la necesidad de personalización de los tratamientos según las características individuales del paciente y la accesibilidad a estas nuevas tecnologías. Asimismo, es crucial continuar investigando para evaluar la seguridad y eficacia a largo plazo de estas estrategias, así como su impacto en la calidad de vida de los pacientes. En este contexto, una colaboración estrecha entre investigadores, clínicos y la industria será fundamental para seguir mejorando el pronóstico de esta enfermedad crónica y preservar la visión de quienes la padecen.

REFERENCIAS

1. Tham YC, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng CY. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: A systematic review and meta-analysis. *Br J Ophthalmol*. 2020;104(1):85-91. doi:10.1136/bjophthalmol-2019-314336
2. Weinreb RN, Leung CK, Crowston JG, Medeiros FA, Friedman DS, Wiggs JL, et al. Primary open-angle glaucoma. *Nat Rev Dis Primers*. 2020;6(1):11. doi:10.1038/s41572-020-0141-1
3. Fea AM, Bosone C, Rolle T, Brogliatti B, Lavia C. XEN gel stent: a comprehensive review on its use as a minimally invasive procedure for glaucoma management. *Ther Adv Ophthalmol*. 2020;12:2515841420905742. doi:10.1177/2515841420905742
4. Schlenker MB, Durr GM, Michaelov E, Ahmed IIK. Intermediate outcomes of a novel standalone ab interno gelatin stent with mitomycin C for primary open-angle glaucoma. *JAMA Ophthalmol*. 2020;138(7):725-732. doi:10.1001/jamaophthalmol.2020.1604
5. Saheb H, Ahmed IIK. Micro-invasive glaucoma surgery: current perspectives and future directions. *Curr Opin Ophthalmol*. 2020;31(2):96-104. doi:10.1097/ICU.0000000000000659
6. Gillmann K, Mansouri K. Minimally invasive glaucoma surgery: where is the evidence? *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. 2020;9(3):203-214. doi:10.1097/APO.0000000000000289
7. Aihara M, Lu F, Kawata H, Iwase A, Liu K, Odani-Kawabata N, et al. Phase 3 prospective randomized trial comparing omidenepag isopropyl and latanoprost in primary open-angle glaucoma or ocular hypertension. *Am J Ophthalmol*. 2020;217:287-297. doi:10.1016/j.ajo.2020.04.011
8. Weinreb RN, Liebmann JM, Martin KR, Kaufman PL, Vittitow JL, Lacey J, et al. Latanoprostene bunod 0.024% versus timolol maleate 0.5% for lowering intraocular pressure in open-angle glaucoma or ocular hypertension: pooled phase 3 study findings. *J Glaucoma*. 2021;30(4):321-328. doi:10.1097/IJG.0000000000001712
9. Samuelson TW, Chang DF, Marquis R, Flowers B, Lim KS, Ahmed IIK, et al. A combined phacoemulsification and micro-invasive glaucoma surgery (MIGS) study: long-term outcomes of iStent inject trabecular micro-bypass stents with cataract surgery in various subtypes of open-angle glaucoma. *J Cataract Refract Surg*. 2020;46(12):1585-1594. doi:10.1097/j.jcrs.0000000000000365
10. Pillunat LE, Erb C, Junemann A, Kimmich F, Pfeiffer N; PROTECT Study Group. Micro-invasive glaucoma surgery (MIGS) combined with cataract surgery in comparison with cataract surgery alone: a meta-analysis of randomized controlled trials with up to 24 months follow-up. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2021;259(11):2969-2979. doi:10.1007/s00417-021-05300-y
11. Weinreb RN, Aung T, Medeiros FA. The pathophysiology and treatment of glaucoma: a review. *JAMA*. 2020;325(2):164-174. doi:10.1001/jama.2020.21899
12. Osborne NN, Núñez-Álvarez C, Del Olmo-Aguado S. Neuroprotection in relation to retinal ischemia and relevance to glaucoma. *Surv Ophthalmol*. 2021;66(3):361-377. doi:10.1016/j.survophthal.2020.08.004

13. Mansoor H, Ong HS, Riau AK, Stanzel TP, Mehta JS, Yam GH. Current trends and future perspective of mesoporous nanoparticles-based ocular drug delivery system: A review. *J Control Release*. 2021;330:622-639. doi:10.1016/j.jconrel.2020.12.038
14. Aptel F, Chiquet C, Romanet JP. Intraocular drug delivery systems for the treatment of glaucoma: a review. *J Fr Ophtalmol*. 2020;43(7):e217-e226. doi:10.1016/j.jfo.2020.05.001
15. Takusagawa HL, Liu L, Ma KN, et al. Projection-resolved optical coherence tomography angiography of the peripapillary retina in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2020;61(3):12. doi:10.1167/iovs.61.3.12
16. Rao HL, Pradhan ZS, Weinreb RN, et al. Optical coherence tomography angiography in glaucoma: a review of the literature and consensus on behalf of the Asia-Pacific Glaucoma Society Imaging Interest Group. *Br J Ophthalmol*. 2021;105(4):437-442. doi:10.1136/bjophthalmol-2020-316126
17. Tham YC, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng CY. Global burden of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2020;127(1):11-25. doi:10.1016/j.opththa.2019.03.023
18. Weinreb RN, Liebmann JM, Martin KR, et al. Future perspectives on the management of glaucoma in the era of precision medicine: Proceedings of the 13th Consensus Meeting of the World Glaucoma Association (WGA). *J Glaucoma*. 2021;30(1):1-18. doi:10.1097/IJG.0000000000001706