

Capítulo 5

AVANÇOS DO DIAGNÓSTICO PRECOCE DO GLAUCOMA: TECNOLOGIAS E DESAFIOS NA PRÁTICA CLÍNICA

JOÃO VITOR BITTENCOURT VENERA¹
FRANCISCO WAGNER NETO¹
MANUELA ESTEVA MONTEIRO BRITO¹
BEATRIZ LUANA BARATTER DO CARMO¹
EDUARDA MARTINS PITTEL¹
GABRIELLA MOSER DOS SANTOS¹
THAIS LOPES FILIPUS¹
MARIA EDUARDA PINTO¹

¹Discente - Medicina no Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque (UNIFEBE).

Palavras-chave: Glaucoma; Diagnóstico Precoce; Tomografia de Coerência Óptica.

INTRODUÇÃO

O glaucoma compreende um grupo de neuropatias ópticas progressivas caracterizadas pela degeneração das células ganglionares da retina (CGR), neurônios do sistema nervoso central localizados na camada mais interna da retina e responsáveis pela transmissão das informações visuais ao cérebro (BAIR *et al.*, 2026). A doença é reconhecida como uma das principais causas de cegueira irreversível no mundo, afetando aproximadamente 7,75 milhões de pessoas, sendo 3,61 milhões com cegueira e 4,14 milhões com deficiência visual moderada a grave. Entre os casos globais de cegueira, 8,4% são atribuíveis ao glaucoma, caracterizando a patologia como um importante problema de saúde pública (VLEG, 2024).

No Brasil, o glaucoma também representa uma importante demanda para o sistema de saúde. Entre 2018 e 2024, foram registradas 50.062 internações hospitalares relacionadas à doença, com aumento de 45,9% no período. A Região Sudeste concentrou o maior número de internações, enquanto a Região Norte apresentou o maior crescimento proporcional. Além disso, os custos hospitalares associados às internações por glaucoma aumentaram de aproximadamente R\$3,3 milhões para R\$7,5 milhões no período analisado. Esses dados evidenciam o impacto crescente da doença sobre o Sistema Único de Saúde (SUS) e a existência de disparidades regionais no acesso e na assistência especializada (CARVALHO *et al.*, 2026).

Embora sua fisiopatologia ainda não seja completamente compreendida, sabe-se que o glaucoma apresenta natureza multifatorial. Seu desenvolvimento pode envolver aumento da resistência ao escoamento do humor aquoso, com consequente elevação da pressão intraocular (PIO), além de estresse mecânico, neurotóxico e isquêmico sobre o nervo óptico, alterações

vasculares, estresse oxidativo e processos neuroinflamatórios (BAIR *et al.*, 2026). A PIO elevada constitui o principal fator de risco modificável para o desenvolvimento e a progressão da doença. Entretanto, fatores vasculares também desempenham papel relevante, especialmente em situações nas quais o dano glaucomatoso ocorre ou progride mesmo na presença de níveis de PIO considerados dentro da normalidade (HIDALGO RAMOS *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a detecção precoce do glaucoma assume papel fundamental na prevenção da perda visual irreversível. Alterações funcionais importantes podem se tornar evidentes apenas após a ocorrência de perda significativa de células ganglionares da retina, o que limita a capacidade da perimetria de detectar algumas alterações muito iniciais (HIDALGO RAMOS *et al.*, 2025). A avaliação do CV permanece essencial para o diagnóstico funcional e o acompanhamento da doença, mas suas limitações na identificação de alterações iniciais têm estimulado a busca por métodos capazes de detectar precocemente mudanças estruturais e microvasculares associadas ao dano glaucomatoso.

Diante disso, este capítulo tem como objetivo analisar o papel dos métodos de avaliação estrutural e vascular na detecção precoce do glaucoma, com ênfase na tomografia de coerência óptica (OCT) e na angiografia por tomografia de coerência óptica (OCTA). Também são discutidos o uso da inteligência artificial (IA), as estratégias de rastreamento e os desafios para a implementação dessas tecnologias na prática clínica.

MÉTODO

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura realizada no período de julho a agosto de 2026, por meio de pesquisas nas bases de dados PubMed. Foram utilizados os descritores:

“glaucoma”, “early diagnosis”, “optical coherence tomography”, “artificial intelligence” e “screening”. A partir dessa busca, foram selecionados 12 artigos que atenderam integralmente aos critérios de elegibilidade, sendo posteriormente submetidos aos critérios de seleção.

Os critérios de inclusão foram: artigos nos idiomas português e inglês; publicados no período de 2004 a 2026 e que abordavam as temáticas propostas para esta pesquisa, incluindo estudos primários, revisões sistemáticas, metanálises e revisões de escopo, disponibilizados na íntegra. Os critérios de exclusão foram: artigos duplicados, disponibilizados apenas na forma de resumo, que não abordavam diretamente a proposta estudada (focando em diagnósticos tardios ou em intervenções terapêuticas sem relação com o objetivo desta revisão) e que não atendiam aos demais critérios de inclusão.

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade e seleção, foram incluídos 12 artigos, que foram submetidos à leitura minuciosa para a coleta dos dados. Os resultados foram apresentados de forma descritiva, organizados em categorias temáticas que abordam: o papel da Tomografia de Coerência Óptica (OCT) e da Angiografia por OCT (OCTA) no diagnóstico estrutural e microvascular; a aplicação de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) como suporte à decisão clínica e triagem; e os desafios e barreiras para a implementação dessas tecnologias na prática clínica, especialmente em contextos de recursos limitados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação estrutural por OCT

A OCT possibilita a análise quantitativa e não invasiva de estruturas relacionadas à neuropatia glaucomatosa, com destaque para a espessura da camada de fibras nervosas da retina

(CFNR), a morfologia da cabeça do nervo óptico e medidas maculares relacionadas às células ganglionares, como o GCC e o GCIPL. A evolução dos equipamentos, dos sistemas de domínio temporal para plataformas de domínio espectral e de fonte varrida, ampliou a resolução, a velocidade de aquisição e a possibilidade de acompanhar alterações estruturais ao longo do tempo (GEEVARGHESE *et al.*, 2021).

No glaucoma inicial, essa capacidade é relevante, mas não uniforme: um estudo de identificação de glaucoma precoce relatou sensibilidade de aproximadamente 71% entre suspeitos e de 85% em pacientes com glaucoma perimétrico inicial, com especificidade fixada em 90% (NOURI-MAHDAVI *et al.*, 2004). Em populações de maior risco, como pacientes diabéticos submetidos a rastreamento, a OCT identificou uma parcela relevante de suspeitos por alterações na CFNR, com boa concordância interexaminador (kappa de 0,85) na avaliação fotográfica do disco óptico (JOHNSON *et al.*, 2024). A interpretação, no entanto, deve considerar a variabilidade anatômica individual, a qualidade da aquisição, a miopia, a idade e outros fatores que modificam a aparência das estruturas analisadas, de modo que a classificação por bancos normativos não deve ser interpretada isoladamente (GEEVARGHESE *et al.*, 2021).

Esses achados são coerentes com a dificuldade de separar alterações patológicas de variações anatômicas normais no início da doença: a metanálise de referência mostra que a CFNR média e os parâmetros maculares relacionados às células ganglionares apresentam boa capacidade discriminativa (KANSAL *et al.*, 2018), enquanto o estudo de glaucoma precoce evidencia queda de sensibilidade em indivíduos suspeitos em comparação com pacientes com dano já manifesto no campo visual (NOURI-MAHDAVI *et al.*, 2004). Em fases avançadas, por sua vez, a redução da espessura estrutural

pode se aproximar de um limite inferior de mensuração, diminuindo a capacidade de detectar novas perdas.

Assim, a OCT deve ser interpretada como parte de um conjunto de evidências, que inclui a PIO, o aspecto do disco óptico e o campo visual, e não como substituta do exame clínico. Os dados em diabéticos reforçam seu papel como instrumento de triagem em grupos selecionados, mas não equivalem à confirmação diagnóstica de glaucoma (JOHNSON *et al.*, 2024).

OCTA e alterações microvasculares subclínicas

A OCTA permite visualizar e quantificar a microvasculatura retiniana e peripapilar sem contraste, sendo estudada no glaucoma para avaliar densidade vascular, perfusão do disco óptico e alterações maculares, sob a hipótese de que alterações microvasculares possam acompanhar ou, em certos contextos, anteceder alterações estruturais detectáveis pela OCT convencional (HIDALGO RAMOS *et al.*, 2025).

Uma revisão de escopo voltada a suspeitos de glaucoma descreve alterações subclínicas em parâmetros vasculares e associação entre redução da densidade vascular, alterações maculares e comprometimento de estruturas ganglionares. A heterogeneidade dos protocolos de aquisição e das populações estudadas, contudo, limita a comparação direta entre os trabalhos, e a presença isolada de uma alteração vascular não deve ser interpretada como diagnóstico de glaucoma (HIDALGO RAMOS *et al.*, 2025).

A OCTA acrescenta, assim, uma dimensão vascular à avaliação estrutural, mas a heterogeneidade de parâmetros e a influência de artefatos ainda impedem que seja considerada um marcador isolado e definitivo de diagnóstico ou progressão. Seu papel atual parece ser complementar, sobretudo em suspeitos, em glaucoma

de pressão normal e quando os achados estruturais e funcionais são discordantes, sendo necessários estudos longitudinais com padronização metodológica para definir seu valor prognóstico (HIDALGO RAMOS *et al.*, 2025).

Acompanhamento longitudinal e progressão

A avaliação transversal compara o exame do paciente a um banco normativo em determinado momento, sendo útil para identificar desvios estruturais, mas nem sempre capaz de distinguir uma variação anatômica estável de uma perda glaucomatosa em evolução. A análise longitudinal por exames seriados tem papel complementar, permitindo observar a velocidade e a consistência das mudanças na CFNR, na região macular e na cabeça do nervo óptico (GEEVARGHESE *et al.*, 2021).

Em suspeitos ou pacientes com doença inicial, a repetição padronizada da OCT pode evidenciar tendência de afinamento não reconhecida em um único exame, desde que se considere a qualidade de aquisição, a reprodutibilidade e a concordância com o campo visual. É importante ainda distinguir progressão estrutural (mudanças observadas ao longo do tempo) de predição de progressão, que busca estimar o comportamento futuro da doença, distinção relevante tanto para a avaliação de algoritmos de IA quanto para a comunicação com os pacientes.

Nesse sentido, o acompanhamento longitudinal tem valor clínico particular: a identificação de uma tendência consistente de afinamento pode ajudar a diferenciar uma característica anatômica estável de uma possível progressão, reduzindo tanto o risco de sobrediagnóstico quanto o de desconsiderar uma perda progressiva inicialmente dentro dos limites normati-

vos. Essa interpretação, porém, exige padronização e correlação com o campo visual e a avaliação oftalmológica.

Inteligência artificial e *deep learning*

Modelos de aprendizado de máquina e *deep learning* vêm sendo aplicados à análise automatizada de retinografias, OCT, OCTA, campos visuais e outros dados clínicos, auxiliando na identificação de padrões sugestivos de glaucoma, na priorização de encaminhamentos e em abordagens multimodais que combinam imagens e dados clínicos, ainda que a complexidade desses modelos dificulte a explicação da contribuição de cada variável para a decisão (GIRARD; SCHMETTERER, 2020; KURYSSHEVA *et al.*, 2024).

Dessa forma, tais modelos de *deep learning* apresentaram sensibilidade de aproximadamente 92% e especificidade de 93% para detecção de glaucoma em fotografias de fundo de olho, e de cerca de 90% e 87%, respectivamente, para exames de OCT, porém com desempenho superior em validações internas frente a validações externas, e capacidade reduzida quando a tarefa envolvia previsão de progressão em vez de diagnóstico transversal (LING *et al.*, 2025). Vale ainda distinguir evidência publicada de protocolo de pesquisa: um dos trabalhos citados corresponde a um protocolo de revisão Cochrane, que orienta uma avaliação futura e não deve ser apresentado como resultado definitivo de eficácia (VEMULAPALLI *et al.*, 2025).

A IA pode ampliar a capacidade de triagem e reduzir o tempo de leitura de exames, mas os resultados elevados em bases internas não garantem desempenho equivalente em populações externas. Há limitações associada a diferenças étnicas, etárias e epidemiológicas, além de variações de equipamentos e protocolos de aquisição (LING *et al.*, 2025; KURYSSHEVA *et al.*,

2024). Outra revisão reforça resultados heterogêneos e a necessidade de padronização no uso de redes neurais e imagens multimodais, destacando que a IA pode atuar como ferramenta complementar da prática clínica, mas não como solução isolada para a complexidade do glaucoma (GIRARD; SCHMETTERER, 2020; KURYSSHEVA *et al.*, 2024).

Por isso, a adoção clínica exige transparência sobre a tarefa do algoritmo: modelos que detectam alterações sugestivas não devem ser descritos como instrumentos de confirmação diagnóstica, modelos diagnósticos não devem ser apresentados como capazes de prever progressão, e um protocolo de revisão não deve ser confundido com evidência de eficácia já estabelecida (VEMULAPALLI *et al.*, 2025). A IA deve, portanto, ser empregada como apoio à decisão clínica, sob supervisão de profissionais habilitados e dentro de fluxos que permitam revisão e confirmação.

Rastreamento, telemedicina e estratificação de risco

O rastreamento do glaucoma envolve desafios distintos dos do diagnóstico de pacientes já encaminhados por suspeita clínica: em indivíduos assintomáticos, a baixa prevalência da doença e a ausência de um teste único capaz de confirmar ou excluir todos os casos podem aumentar falsos-positivos e encaminhamentos desnecessários, o que justifica o foco em grupos de maior risco.

Em diabéticos, por exemplo, a identificação de suspeitos por meio da OCT demonstra a possibilidade de incorporar exames estruturais a programas voltados a populações de maior risco ocular, sem que isso estabeleça a OCT como rastreamento universal (JOHNSON *et al.*, 2024). A literatura discute ainda modelos de rastreamento direcionado e multinível, nos quais testes mais acessíveis podem preceder

exames especializados, com telemedicina, sistemas automatizados e escores de risco como componentes potenciais, desde que articulados a uma rede capaz de realizar confirmação e tratamento oportuno (MOGHIMI; WEINREB, 2024).

A efetividade de um programa de rastreamento não depende apenas da sensibilidade da tecnologia, mas da prevalência da doença, dos custos, da capacidade de encaminhamento e dos danos de resultados falsos-positivos ou falsos-negativos; identificar um indivíduo de risco sem acesso subsequente à confirmação e ao cuidado pode produzir pouco benefício clínico. As barreiras à implementação, sobretudo em países em desenvolvimento, não se limitam à disponibilidade de equipamentos, incluindo também baixa conscientização da população, dificuldade de acesso a centros oftalmológicos, insuficiência de profissionais treinados e infraestrutura inadequada (MEETHAL *et al.*, 2024). Assim, programas de detecção só devem ser implementados quando houver condições para o manejo dos casos identificados, o que exige planejamento de saúde pública, análise de custo-efetividade e monitoramento de desigualdades regionais (MOGHIMI; WEINREB, 2024; MEETHAL *et al.*, 2024).

Em síntese, o benefício populacional depende da integração entre OCT, OCTA, campo visual, avaliação clínica, acompanhamento longitudinal, IA validada externamente, telemedicina e políticas públicas, superando tanto as limitações técnicas dos métodos quanto as barreiras estruturais e socioeconômicas que restringem o acesso ao diagnóstico precoce.

CONCLUSÃO

O glaucoma é uma condição complexa, multifatorial e associada à importante carga de deficiência visual. A OCT apresenta elevada

capacidade para identificar alterações estruturais relacionadas à neuropatia glaucomatosa, sobretudo em casos estabelecidos, mas sua interpretação nos estágios iniciais exige cautela devido à sobreposição entre variação anatômica normal e dano incipiente. A OCTA amplia a avaliação ao permitir o estudo de alterações microvasculares potencialmente subclínicas, embora ainda sejam necessários estudos longitudinais e protocolos mais padronizados para confirmar seu valor prognóstico.

A inteligência artificial e o *deep learning* demonstram desempenho promissor na análise automatizada de retinografias e exames de OCT. Entretanto, a diferença entre validação interna e externa, a menor capacidade de previsão de progressão e a heterogeneidade dos dados limitam sua adoção irrestrita. Os modelos devem ser utilizados como ferramentas de apoio à decisão, com validação em populações diversas, supervisão profissional e definição clara do desfecho que se pretende avaliar.

As evidências também favorecem a discussão de estratégias de rastreamento direcionado e multinível, especialmente para grupos de maior risco, em vez da adoção automática de rastreamento universal. Telemedicina, escores de risco e IA podem contribuir para ampliar o acesso, mas somente produzirão benefício efetivo quando integrados a uma rede capaz de confirmar o diagnóstico, oferecer tratamento e acompanhar os pacientes.

Dessa forma, nenhum método isolado é capaz de superar todas as limitações presentes ao longo do espectro do glaucoma. A integração entre métodos estruturais e vasculares, avaliação funcional, acompanhamento longitudinal e ferramentas de IA devidamente validadas pode favorecer a identificação mais precoce e o monitoramento mais adequado da doença, contribuindo para melhores estratégias de prevenção da perda visual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAIR, H. *et al.* Glaucoma. Handbook of Clinical Neurology, v. 218, p. 219, 2026.
- CARVALHO, P.C. *et al.* Internações hospitalares por glaucoma no Brasil (2018-2024): panorama epidemiológico, disparidades regionais e custos econômicos. Revista Brasileira de Oftalmologia, v. 85, e0033, 2026.
- GEEVARGHESE, A. *et al.* Optical coherence tomography and glaucoma. Annual Review of Vision Science, v. 7, p. 693, 2021. doi: 10.1146/annurev-vision-100419-111350.
- GIRARD, M.J.A.; SCHMETTERER, L. Artificial intelligence and deep learning in glaucoma: current state and future prospects. Progress in Brain Research, v. 257, p. 37, 2020. doi: 10.1016/bs.pbr.2020.07.002.
- HIDALGO RAMOS, R.A. *et al.* Optical coherence tomography angiography in detecting subclinical changes in glaucoma suspects: a scoping review. Cureus, v. 17, e88000, 2025. doi: 10.7759/cureus.88000.
- JOHNSON, N.A. *et al.* The use of optical coherence tomography for early glaucoma screening in a population of patients with diabetes. Ophthalmic Epidemiology, v. 31, p. 145, 2024. doi: 10.1080/09286586.2023.2214929.
- KANSAL, V. *et al.* Optical coherence tomography for glaucoma diagnosis: an evidence-based meta-analysis. PLOS ONE, v. 13, e0190621, 2018. doi: 10.1371/journal.pone.0190621.
- KURYSHEVA, N.I. *et al.* Application of artificial intelligence in glaucoma. Part 1. Neural networks and deep learning in glaucoma screening and diagnosis. Vestnik Oftalmologii, v. 140, p. 82, 2024. doi: 10.17116/oftalma202414003182.
- LING, X.C. *et al.* Deep learning in glaucoma detection and progression prediction: a systematic review and meta-analysis. Biomedicines, v. 13, p. 420, 2025. doi: 10.3390/biomedicines13020420.
- MEETHAL, N.S.K. *et al.* Barriers and potential solutions to glaucoma screening in the developing world: a review. Journal of Glaucoma, v. 33, S33, 2024. doi: 10.1097/IJG.0000000000002404.
- MOGHIMI, S.; WEINREB, R.N. Screening of glaucoma: consensus and directions. Journal of Glaucoma, v. 33, S75, 2024. doi: 10.1097/IJG.0000000000002449.
- NOURI-MAHDAVI, K. *et al.* Identifying early glaucoma with optical coherence tomography. American Journal of Ophthalmology, v. 137, p. 228, 2004. doi: 10.1016/j.ajo.2003.09.004.
- TUULONEN, A. *et al.* Missed opportunities in screening for glaucoma. Journal of Glaucoma, v. 33, S54, 2024. doi: 10.1097/IJG.0000000000002389.
- VEMULAPALLI, K. *et al.* Artificial intelligence for glaucoma. Cochrane Database of Systematic Reviews, v. 6, CD016114, 2025. doi: 10.1002/14651858.CD016114.
- VISION LOSS EXPERT GROUP - VLEG. Global estimates on the number of people blind or visually impaired by glaucoma: a meta-analysis from 2000 to 2020. Eye, v. 38, p. 2036, 2024. doi: 10.1038/s41433-024-02995-5.