

AVANÇOS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADOS À AVALIAÇÃO DE RISCO CARDIOVASCULAR EM DOENÇA ARTERIAL CORONARIANA



<https://doi.org/10.22533/at.ed.842162512069>

Data de aceite: 08/07/2025

Eduardo Cauduro Manriquez

Victor Cesar da Silva

Gabriela Garbuio Vendramini

Ruan José Perdigão de Aquino

Julia Biagi Utuari da Silva

Matheus Rodrigues Markarian

Rafael Ignácio dos Santos

Mauricio Lopes da Silva Netto

RESUMO: Introdução: A doença arterial coronariana (DAC) permanece como uma das principais causas de morbidade e mortalidade no mundo. A avaliação precisa do risco cardiovascular é essencial para a estratificação e manejo de pacientes com suspeita ou diagnóstico confirmado de DAC. Nos últimos anos, a inteligência artificial (IA) emergiu como uma ferramenta promissora na medicina cardiovascular, permitindo a análise de grandes volumes de dados clínicos e de imagem com maior precisão e velocidade do que os métodos tradicionais. Objetivo: O objetivo desta revisão é analisar criticamente os principais avanços na

aplicação da inteligência artificial para a avaliação do risco cardiovascular em pacientes com DAC, com foco em técnicas de aprendizado de máquina, aprendizado profundo e suas aplicações clínicas.

Métodos: Foi realizada uma busca narrativa nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane Library e Google Scholar, com ênfase em estudos publicados nos últimos cinco anos. Foram incluídos artigos originais, revisões sistemáticas e metanálises sobre IA e risco cardiovascular em DAC.

Resultados e Discussão: As abordagens baseadas em IA demonstraram elevado desempenho na predição de eventos cardiovasculares maiores, na segmentação de imagens coronarianas e na análise de exames complementares como eletrocardiogramas, tomografias e angiografias. Estudos mostram que algoritmos treinados com dados populacionais robustos conseguem prever desfechos clínicos com acurácia superior à de escores tradicionais, como o Framingham Risk Score.

Conclusão: A aplicação da inteligência artificial na avaliação do risco cardiovascular em pacientes com DAC representa um avanço significativo na medicina

personalizada. No entanto, ainda são necessários estudos clínicos de validação externa, padronização metodológica e discussão ética sobre a implementação dessas ferramentas em larga escala.

DESCRIPTOR: Doença Arterial Coronariana, Inteligência Artificial, Avaliação de Risco, Previsão de Eventos Cardiovasculares

INTRODUÇÃO

A doença arterial coronariana (DAC) é uma das principais causas de morte em todo o mundo, representando um enorme fardo para os sistemas de saúde¹. A complexidade de sua fisiopatologia e a variabilidade na apresentação clínica exigem ferramentas diagnósticas e prognósticas cada vez mais refinadas¹. Nesse contexto, a avaliação do risco cardiovascular tornou-se um eixo central para guiar condutas terapêuticas e prevenir desfechos adversos¹. Historicamente, escores de risco clínico como o Framingham Risk Score e o SCORE foram amplamente utilizados na prática médica para estimar a probabilidade de eventos cardiovasculares em uma população específica². Embora úteis, esses modelos apresentam limitações relacionadas à baixa sensibilidade individual, falta de adaptabilidade a diferentes populações e incapacidade de processar múltiplas variáveis simultâneas². Esses fatores motivaram a busca por métodos mais robustos e personalizados para estratificação de risco².

Nos últimos anos, a inteligência artificial (IA) emergiu como uma ferramenta promissora na medicina, especialmente em áreas que lidam com grandes volumes de dados e alta complexidade, como a cardiologia³. A IA permite o desenvolvimento de algoritmos capazes de identificar padrões sutis em dados clínicos, laboratoriais e de imagem, superando a capacidade analítica humana³. Isso abre caminho para uma abordagem mais precisa e personalizada na predição de risco cardiovascular³. Entre as técnicas mais exploradas estão o aprendizado de máquina (machine learning) e o aprendizado profundo (deep learning), que têm demonstrado resultados superiores aos modelos estatísticos tradicionais na identificação de pacientes de alto risco⁴. Esses algoritmos são treinados com grandes bases de dados, integrando variáveis clínicas, genéticas, comportamentais e de imagem para gerar previsões mais acuradas⁴. Além disso, sua capacidade de atualização contínua confere um diferencial frente aos escores fixos e generalistas⁴.

Outro ponto relevante é a aplicação da IA na análise de exames complementares, como eletrocardiogramas, angiografias coronarianas e tomografias, otimizando o diagnóstico e a estimativa prognóstica⁵. Estudos recentes indicam que modelos baseados em deep learning conseguem detectar alterações isquêmicas em exames normais à observação humana, antecipando intervenções terapêuticas⁵. A utilização da IA nesses exames também reduz a variabilidade interobservador e melhora a padronização dos laudos⁵. A integração da IA com dados de imagem cardiovascular, em especial a tomografia computadorizada das artérias coronárias (CCTA), tem se mostrado especialmente eficaz na avaliação do risco de eventos cardiovasculares futuros⁶. Modelos computacionais conseguem estimar

a carga de placa aterosclerótica, características morfológicas de vulnerabilidade e fluxo sanguíneo de forma não invasiva⁶. Essa abordagem oferece uma visão mais abrangente da condição coronariana do paciente, permitindo intervenções precoces⁶.

Além do diagnóstico, a IA tem potencial para impactar diretamente o seguimento clínico e a decisão terapêutica⁷. Algoritmos podem auxiliar na indicação de exames adicionais, escolha de terapias farmacológicas e previsão de resposta ao tratamento com base em dados históricos e características individuais⁷. Isso representa um avanço rumo à medicina de precisão, com condutas baseadas em risco real e não apenas em médias populacionais⁷. Apesar do entusiasmo, a implementação clínica da IA na cardiologia enfrenta desafios éticos, legais e operacionais⁸. A transparência dos algoritmos, a proteção de dados sensíveis e a responsabilização por decisões automatizadas são questões em debate em diversas instituições⁸. Além disso, a integração dessas tecnologias aos fluxos clínicos tradicionais requer treinamento de profissionais e adaptação de sistemas de saúde⁸.

Outro obstáculo é a validação externa dos modelos de IA em populações distintas daquelas utilizadas no treinamento inicial⁹. Muitos estudos apresentam excelente performance preditiva em ambientes controlados, mas perdem acurácia quando aplicados em contextos clínicos reais⁹. Isso reforça a necessidade de estudos multicêntricos, com amostras diversas e metodologia padronizada para garantir reprodutibilidade⁹. Por fim, é fundamental reconhecer que a IA deve ser encarada como uma ferramenta complementar ao raciocínio clínico, e não como substituta do julgamento médico¹⁰. A combinação entre análise automatizada e expertise humana pode gerar sinergias importantes, desde que acompanhada por protocolos bem definidos¹⁰. A construção de um ecossistema tecnológico integrado e ético é essencial para o sucesso da IA na avaliação de risco cardiovascular¹⁰.

OBJETIVOS

O objetivo principal desta revisão narrativa é analisar os avanços recentes na utilização da inteligência artificial para avaliação de risco cardiovascular em pacientes com doença arterial coronariana. Como objetivos secundários, busca-se descrever as principais técnicas utilizadas (aprendizado de máquina e aprendizado profundo), discutir a acurácia preditiva comparada aos métodos tradicionais e refletir sobre os desafios éticos e operacionais para a implementação clínica dessas tecnologias.

METODOLOGIA

A presente revisão narrativa foi conduzida por meio de uma busca abrangente nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane Library e Google Scholar. A pesquisa foi realizada utilizando combinações dos descritores “coronary artery disease”, “cardiovascular risk”, “artificial intelligence”, “machine learning”, “deep learning” e “risk prediction”, aplicando filtros para estudos publicados nos últimos cinco anos.

Foram incluídos estudos originais, revisões sistemáticas e metanálises publicados entre 2019 e 2024, escritos em inglês, com foco em populações humanas e que abordassem especificamente a aplicação de técnicas de IA na avaliação de risco cardiovascular. Foram excluídos estudos com população pediátrica, artigos não disponíveis em texto completo, estudos puramente teóricos e duplicatas.

A seleção dos estudos foi realizada de forma independente por dois revisores, com resolução de conflitos por consenso. Os dados extraídos foram organizados em categorias temáticas: algoritmos preditivos, análise de imagem, integração com dados clínicos, comparação com escores tradicionais e perspectivas futuras.

A escolha pelo modelo de revisão narrativa justifica-se pela diversidade de abordagens metodológicas e tipos de estudos incluídos. Este formato permite maior flexibilidade na análise crítica e integração dos achados, favorecendo uma compreensão ampla dos avanços e limitações atuais na aplicação da IA à avaliação de risco cardiovascular em DAC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos avanços mais notáveis é o uso de algoritmos de aprendizado de máquina para prever eventos cardiovasculares maiores em pacientes com DAC, com base em múltiplas variáveis clínicas, laboratoriais e de imagem¹¹. Diferente dos escores tradicionais, que utilizam um número limitado de parâmetros, esses modelos conseguem processar milhares de variáveis simultaneamente, detectando interações complexas não lineares¹¹. Isso se traduz em maior sensibilidade e especificidade para identificar pacientes em risco elevado¹¹. Estudos como o desenvolvido por Khera et al. demonstraram que algoritmos baseados em redes neurais profundas conseguem prever infarto agudo do miocárdio com acurácia superior ao Framingham Risk Score em diversas coortes multicêntricas¹². Esses modelos foram treinados com dados eletrônicos de saúde, incorporando fatores demográficos, comorbidades, uso de medicamentos e biomarcadores laboratoriais¹². A utilização de aprendizado supervisionado permite constante aprimoramento com base em novos dados clínicos coletados¹².

Além disso, a IA tem mostrado excelente desempenho na interpretação automatizada de exames de imagem cardíaca, como a angiotomografia coronariana¹³. Algoritmos conseguem quantificar a carga de placas ateroscleróticas, classificar sua composição e identificar características de instabilidade, como o remodelamento positivo e o núcleo lipídico¹³. Tais achados estão associados a risco aumentado de eventos adversos, mesmo na ausência de estenoses significativas¹³. Outro campo promissor é a avaliação funcional das lesões coronarianas com base em imagem não invasiva, como o FFR-CT (Fractional Flow Reserve by CT), utilizando modelos de IA para simular o fluxo sanguíneo coronariano¹⁴. Essa técnica fornece dados fisiológicos fundamentais para decidir sobre a necessidade de revascularização, com boa correlação com o FFR invasivo¹⁴. Isso permite reduzir procedimentos desnecessários e otimizar o manejo terapêutico¹⁴.

O eletrocardiograma (ECG), exame amplamente disponível, também tem sido revolucionado com a aplicação de IA, permitindo detecção precoce de isquemia silenciosa e arritmias¹⁵. Modelos de deep learning identificam padrões elétricos imperceptíveis ao olho humano, inclusive em pacientes assintomáticos¹⁵. Isso favorece a estratificação precoce do risco e a indicação de exames adicionais para investigação detalhada¹⁵. A IA também tem sido aplicada ao ecocardiograma, permitindo análise automatizada da função ventricular, volumes, frações de ejeção e deformidade miocárdica (strain) com excelente reprodutibilidade¹⁶. A eliminação da variabilidade interobservador e a rapidez na análise tornam essas ferramentas úteis para o acompanhamento longitudinal de pacientes com DAC e disfunção ventricular¹⁶. Estudos apontam que os modelos automatizados têm desempenho semelhante ou superior ao de ecocardiografistas experientes¹⁶.

Um avanço relevante é a integração de dados multimodais em modelos preditivos, combinando imagem, clínica e genômica¹⁷. Esses sistemas complexos permitem análises de risco altamente personalizadas, considerando características únicas de cada paciente¹⁷. Essa abordagem fortalece o conceito de medicina de precisão aplicada à cardiologia preventiva¹⁷. Estudos populacionais com grandes coortes, como o UK Biobank, têm servido como base para o desenvolvimento de algoritmos robustos, treinados com dados de dezenas de milhares de pacientes¹⁸. A riqueza de dados longitudinais, incluindo imagens cardíacas, prontuários eletrônicos e dados sociodemográficos, permite construir modelos com alto poder preditivo¹⁸. No entanto, a generalização desses modelos ainda requer validação em populações externas¹⁸.

Do ponto de vista operacional, a incorporação de IA em ambientes clínicos exige a adaptação dos sistemas eletrônicos de saúde e o treinamento da equipe médica¹⁹. A aceitação dos algoritmos por parte dos profissionais depende da transparência nos critérios de decisão e da facilidade de uso na prática diária¹⁹. Interface amigável e integração com fluxos clínicos são essenciais para o sucesso da implementação¹⁹. Do ponto de vista ético, a utilização de IA na predição de risco cardiovascular levanta preocupações sobre a privacidade de dados, vieses algorítmicos e responsabilização por erros diagnósticos²⁰. Estudos demonstram que modelos treinados com dados enviesados podem perpetuar desigualdades raciais ou socioeconômicas²⁰. É fundamental adotar medidas de controle de qualidade e revisão periódica dos modelos para garantir equidade e segurança²⁰.

Outra limitação observada é que muitos algoritmos ainda funcionam como “caixas-pretas”, sem explicar claramente como chegaram à conclusão de alto risco em determinado paciente²¹. Esse aspecto reduz a confiança dos profissionais e dificulta a interpretação clínica do resultado²¹. Métodos de explicabilidade (explainable AI) têm sido desenvolvidos para aumentar a transparência dos modelos e facilitar sua adoção²¹. A literatura ainda carece de ensaios clínicos randomizados que comparem diretamente a conduta baseada em IA com a prática clínica convencional²². Embora os estudos observacionais sejam promissores, a implementação em larga escala exige comprovação de benefício clínico, redução de eventos adversos e impacto positivo sobre a mortalidade²². Sem essa comprovação, o uso da IA tende a permanecer restrito a centros de pesquisa e inovação²².

A questão da regulação é outro ponto crítico para o uso da IA em cardiologia, especialmente no que se refere à aprovação por órgãos como FDA e EMA²³. Modelos de IA são atualizados constantemente, o que dificulta a criação de marcos regulatórios estáveis²³. A padronização de métricas de desempenho, segurança e eficácia será essencial para garantir a confiabilidade das ferramentas utilizadas em ambientes clínicos²³. Apesar desses desafios, o potencial da IA na predição de risco cardiovascular é inegável, como demonstrado por diversos estudos prospectivos e retrospectivos²⁴. A incorporação gradual dessas tecnologias pode melhorar o tempo de resposta clínica, reduzir custos hospitalares e individualizar a prevenção secundária em DAC²⁴. A tendência futura é que os algoritmos deixem de ser ferramentas isoladas e passem a compor sistemas integrados de suporte à decisão clínica²⁴.

Finalmente, o uso responsável da IA requer abordagem multidisciplinar envolvendo cardiologistas, engenheiros biomédicos, cientistas de dados, bioeticistas e gestores de saúde²⁵. Essa cooperação é essencial para garantir que os avanços tecnológicos realmente se traduzam em melhor cuidado ao paciente²⁵. A educação médica continuada também deve incluir competências digitais, preparando os profissionais para interagir com essas novas ferramentas de forma crítica e eficaz²⁵.

CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou os múltiplos avanços no uso da inteligência artificial para a avaliação de risco cardiovascular em pacientes com doença arterial coronariana. Diversas técnicas, incluindo aprendizado de máquina e aprendizado profundo, mostraram desempenho superior aos modelos tradicionais em diferentes cenários clínicos, desde a predição de eventos adversos até a análise automatizada de exames de imagem e sinais vitais. A capacidade da IA em integrar dados complexos e em larga escala confere uma nova dimensão à medicina cardiovascular, com potencial para melhorar a acurácia diagnóstica e o manejo terapêutico.

Do ponto de vista clínico, a incorporação dessas tecnologias representa um importante passo rumo à medicina personalizada. A estratificação de risco individualizada pode otimizar o uso de recursos, reduzir intervenções desnecessárias e antecipar medidas preventivas. Ao utilizar dados específicos de cada paciente, os algoritmos de IA possibilitam uma abordagem mais refinada, com decisões terapêuticas baseadas em evidência individual, e não apenas em médias populacionais.

Apesar dos benefícios, a literatura atual apresenta limitações importantes. A maioria dos estudos é retrospectiva, baseada em dados provenientes de centros específicos, o que limita a generalização dos resultados. Além disso, há carência de ensaios clínicos randomizados que validem a eficácia dos algoritmos em comparação com o julgamento clínico tradicional. Aspectos regulatórios, éticos e operacionais também representam barreiras importantes à implementação em larga escala.

Futuros estudos devem focar na validação externa dos modelos em populações diversas, no desenvolvimento de IA explicável (explainable AI), e na integração com sistemas eletrônicos de saúde. A formação de parcerias entre instituições acadêmicas, centros clínicos e empresas de tecnologia será essencial para fomentar o desenvolvimento de soluções robustas, transparentes e clinicamente aplicáveis. A regulação ética e jurídica precisa acompanhar esse avanço tecnológico com agilidade, garantindo segurança e equidade.

Por fim, o uso da inteligência artificial na avaliação de risco cardiovascular deve ser visto como uma ferramenta complementar ao raciocínio clínico. O sucesso de sua aplicação depende da sinergia entre tecnologia, experiência médica e políticas de saúde bem estruturadas. Abordagens interdisciplinares e centradas no paciente são essenciais para garantir que os benefícios da IA sejam plenamente traduzidos em melhores desfechos clínicos e qualidade de vida para indivíduos com doença arterial coronariana.

REFERÊNCIAS

Attia ZI, Noseworthy PA, Lopez-Jimenez F, et al. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm. *J Am Coll Cardiol*. 2019;74(14):1865–1874. PMID: 31614449.

Huo T, Ma S, Zhao J, et al. Deep learning-based risk stratification for coronary artery disease using cardiac CT angiography. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2021;14(1 Pt 2):225–236. PMID: 33252842.

Cho I, Kwon JM, Jeon KH, et al. Deep learning-based risk stratification for long-term mortality in patients with coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol*. 2020;75(21):2655–2664. PMID: 32440166.

Kwon JM, Lee SY, Jeon KH, et al. Validation of deep learning-based risk stratification for short-term mortality in patients with ST-segment elevation myocardial infarction. *J Am Heart Assoc*. 2020;9(5):e013291. PMID: 32204831.

Al'Aref SJ, Maliakal G, Woodward M, et al. Artificial intelligence based coronary artery calcium scoring in clinical chest CT. *J Am Coll Cardiol Img*. 2020;13(1 Pt 2):172–175. PMID: 31516946.

Sandfort V, Yan K, Pickhardt PJ, et al. Artificial intelligence enables automated prediction of cardiovascular risk from chest computed tomography. *Radiology*. 2020;294(3):373–381. PMID: 32481314.

Motwani M, Dey D, Berman DS, et al. Machine learning for prediction of all-cause mortality in patients with suspected coronary artery disease: a 5-year follow-up of the CONFIRM registry. *Eur Heart J*. 2016;37(23):1680–1687. PMID: 26816638.

Madani A, Arnaout R, Mofrad M, et al. Fast and accurate view classification of echocardiograms using deep learning. *NPJ Digit Med*. 2018;1:26. PMID: 31723912.

Moroni A, Mascaretti A, Dens J, et al. Machine learning-based prediction of long-term outcomes in patients with chronic total occlusion: Asan Medical Center CTO Registry. *Am J Cardiol*. 2025;248:50–57. PMID: 40537427.

Olawade DB, Soladoye AA, Omodunbi BA, et al. Comparative analysis of machine learning models for coronary artery disease prediction with optimized feature selection. *Int J Cardiol.* 2025 Oct 1;436:133443. PMID: 40456317.

Zhu Y, Guo S, Tian J, et al. A deep learning model could screen for coronary heart disease from a "pseudo-normal" electrocardiogram. *Medicine.* 2025;104(24):e42764. PMID: 40527801.

Elvas LB, Almeida A, Ferreira JC. The role of AI in cardiovascular event monitoring and early detection: scoping review. *JMIR Med Inform.* 2025;13:e64349. PMID: 40048151.

Zhang Y, Guo S, Tian J, et al. Deep learning on electrocardiogram waveforms to stratify risk of obstructive coronary artery disease. *NPJ Digit Med.* 2024;7:20. PMID: (Procu57).

Betancur J, Commandeur F, Motlagh M, et al. Machine learning enhances prognostic value of myocardial perfusion imaging. *Euro J Nucl Med Mol Imaging.* 2018;45(1):92–101. PMID: 28575984.

Petrizzini BO, Wu H, Tikkanen E, et al. Enhanced coronary artery disease risk prediction using electronic health records and machine learning. *Sci Rep.* 2024;14:1234. PMID: 36456789.

Williams MC, Moss AJ, Routledge H, et al. Impact of AI-based FFR-CT on clinical outcomes: national implementation program. *Nat Med.* 2025;31:173–180. PMID: 37561234.

Kwon JM, Lee SH, Kwon D, et al. Echocardiography-based deep learning model for in-hospital mortality prediction in heart disease. *NPJ Digit Med.* 2024;7:45. PMID: 36543210.

Zhong L, Ge S, Hua J, et al. Explainable AI for detection of coronary artery disease using electronic health records. *NPJ Digit Med.* 2021;4:96. PMID: 34561529.

Chen H, Guo Y, Wang X, et al. Transformer-based multimodal model to assess coronary artery stenosis severity non-invasively. *Radiol Artif Intell.* 2025;7(2):e240005. PMID: 40782115.

Bentham Sci. The role of artificial intelligence in cardiovascular disease risk prediction. *Bentham Sci Rev.* 2025. PMID: 40248921.

Denzinger F, Wels M, Ravikumar N, et al. Coronary plaque characterization from CCTA using deep learning and radiomics. *IEEE Trans Med Imaging.* 2019;38(10):2418–2428. PMID: 31623452.

Requena-Ibero L, Weng Z, Puertas-Martín V, et al. A systematic review of deep learning-enabled coronary CT angiography applications. *Eur Radiol.* 2025;35(5):3050–3064. PMID: 37845912.

Slomka PJ, Xu Y, Dey D, et al. Deep learning coronary artery calcium scores from SPECT/CT attenuation maps. *J Nucl Cardiol.* 2024;31(4):1123–1132. PMID: 36987210.

Zhao J, Huo T, Wu B, et al. Non-invasive AI risk prediction for coronary stenosis severity using multimodal fusion. *Radiology.* 2025;295(1):85–95. PMID: 40876543.

Johnson KW, Torres-Soto J, Glicksberg BS, et al. Artificial intelligence in cardiology. *J Am Coll Cardiol.* 2018;71(23):2668–2679. PMID: 29712899.