REVISÃO DE LITERATURA IDENTIFICADO

UM PASSO À FRENTE DA AMPUTAÇÃO: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL MULTIMODAL NA PREDIÇÃO PRECOCE DE DESFECHOS GRAVES DO PÉ DIABÉTICO — PERSPECTIVAS PARA A ATENÇÃO PRIMÁRIA À SAÚDE DO SUS.

ONE STEP AHEAD OF AMPUTATION: MULTIMODAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR EARLY PREDICTION OF SEVERE DIABETIC FOOT OUTCOMES — PERSPECTIVES FOR PRIMARY HEALTH CARE WITHIN BRAZIL'S UNIFIED HEALTH SYSTEM (SUS).

Pryscilla Lopes dos Santos Rodrigues[1], Maria Fernanda Sabino da Costa[1], Maria Vitória Ferreira de Lima[1], Layze Marinho Ramos[1], Sabrina Gomes de Oliveira[2].

1. Acadêmico do curso medicina do Centro Universitário de Maceio UNIMA AFYA.
2. Doscente do curso de medicina do Centro Universitário de Maceió UNIMA AFYA.
Autor correspondente: pryscilllalopes@hotmail.com

Eixo Temático: Saúde

RESUMO

Introdução: O pé diabético é uma complicação complexa e potencialmente devastadora do diabetes, marcada por alterações neuropáticas e vasculares que favorecem ulceração, infecção e falha da cicatrização. Quando não reconhecida precocemente, sua progressão pode culminar em amputação, comprometendo não apenas um membro, mas também mobilidade, autonomia e qualidade de vida. Diante do desafio de antecipar esses desfechos, a inteligência artificial multimodal emerge como estratégia inovadora ao integrar imagens e dados clínicos, laboratoriais e biomecânicos para identificar precocemente pacientes de maior risco e ampliar a oportunidade de intervenção antes que danos irreversíveis ocorram. Objetivo: Analisar as evidências sobre inteligência artificial multimodal na predição de desfechos graves do pé diabético e discutir perspectivas para a Atenção Primária à Saúde do Sistema Único de Saúde. Método: Revisão integrativa com busca estruturada em PubMed/MEDLINE e Biblioteca Virtual em Saúde, complementada por documento oficial do Ministério da Saúde, priorizando publicações de 2021 a agosto de 2026. Foram incluídos estudos de inteligência artificial aplicados à detecção, estratificação ou prognóstico do pé diabético, com ênfase na integração de diferentes modalidades de dados. Resultados: Evidenciaram-se aplicações em detecção de úlceras, estratificação de neuropatia, previsão de cicatrização e risco de amputação. Modelos multimodais combinaram imagens RGB e térmicas, profundidade, pressão plantar e variáveis clínicas, demonstrando potencial para estratificação individualizada. Entretanto, heterogeneidade metodológica, risco de viés, desempenho inferior em validação externa e escassez de estudos na atenção primária limitam a translação clínica. Conclusão: A inteligência artificial multimodal é promissora como apoio à avaliação do pé diabético, mas sua incorporação ao SUS requer validação prospectiva e multicêntrica, equidade algorítmica, custo-efetividade e integração aos fluxos assistenciais.

Palavras-chave: Pé Diabético. Inteligência Artificial. Atenção Primária à Saúde. Amputação. Avaliação de Risco.

ABSTRACT

Introduction: Diabetic foot is a complex and potentially devastating complication of diabetes, characterized by neuropathic and vascular changes that predispose to ulceration, infection, and impaired wound healing. When not recognized early, its progression may culminate in amputation, compromising not only a limb but also mobility, independence, and quality of life. Given the challenge of anticipating these outcomes, multimodal artificial intelligence emerges as an innovative strategy by integrating imaging with clinical, laboratory, and biomechanical data to identify high-risk patients early and expand opportunities for intervention before irreversible damage occurs. Objective: To analyze the evidence on multimodal artificial intelligence for predicting severe diabetic foot outcomes and discuss perspectives for Primary Health Care within the Brazilian Unified Health System. Method: An integrative review with a structured search in PubMed/MEDLINE and the Virtual Health Library, complemented by an official document from the Brazilian Ministry of Health, prioritizing publications from 2021 to August 2026. Studies applying artificial intelligence to the detection, stratification, or prognosis of diabetic foot

were included, with emphasis on the integration of different data modalities. Results: Applications were identified in ulcer detection, neuropathy stratification, prediction of wound healing, and amputation risk. Multimodal models combined RGB and thermal images, depth data, plantar pressure, and clinical variables, demonstrating potential for individualized risk stratification. However, methodological heterogeneity, risk of bias, lower performance in external validation, and the scarcity of studies in primary care limit clinical translation. Conclusion: Multimodal artificial intelligence is promising as a supportive tool for diabetic foot assessment, but its incorporation into the Brazilian Unified Health System requires prospective multicenter validation, algorithmic equity, cost-effectiveness, and integration into clinical care pathways.
Keywords: Diabetic Foot. Artificial Intelligence. Primary Health Care. Amputation. Risk Assessment.

INTRODUÇÃO

O diabetes mellitus impõe uma das maiores cargas às doenças crônicas, e o pé diabético figura entre suas complicações mais devastadoras por ameaçar não apenas a integridade de um membro, mas também a autonomia, a mobilidade e a qualidade de vida. Resultante da interação entre neuropatia periférica, doença arterial periférica, deformidades e alterações da cicatrização, essa condição favorece o desenvolvimento de úlceras que podem evoluir para infecção, hospitalização e amputação. Diante desse cenário, a identificação precoce de indivíduos sob maior risco tornou-se uma prioridade clínica. Nesse contexto, modelos de aprendizado de máquina despontam como ferramentas promissoras para ampliar a detecção, a estratificação e o prognóstico dessas lesões, embora desafios relacionados à validação e à generalização ainda limitem sua incorporação clínica.[1]

No Brasil, foram registradas 633.455 amputações de membros inferiores no Sistema Único de Saúde (SUS) entre 2008 e 2020, com aumento de 50,4% das amputações maiores e participação crescente do diabetes como diagnóstico primário.[2] Além de comprometer mobilidade, autonomia e qualidade de vida, esse cenário reforça o papel estratégico da Atenção Primária à Saúde (APS) no rastreamento, avaliação dos pés, estratificação de risco e coordenação do cuidado.[3]

A inteligência artificial (IA) pode ampliar a identificação precoce desses pacientes. Metaanálise de 16 estudos encontrou sensibilidade de 0,89, especificidade de 0,93 e área sob a curva (AUC) de 0,97 para identificação de úlceras por IA.[4] A abordagem multimodal avança ao integrar imagens RGB e térmicas, pressão plantar e dados clínico-laboratoriais, reunindo diferentes dimensões do risco.[5] Entretanto, limitada validação externa e escassez de estudos na APS dificultam sua translação clínica. Assim, este estudo objetivou analisar as evidências sobre IA multimodal na predição precoce de desfechos graves do pé diabético e discutir perspectivas de aplicação na APS do SUS.

MÉTODO

Trata-se de revisão integrativa da literatura, realizada em agosto de 2026 nas bases PubMed/MEDLINE e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), complementada por documento oficial do Ministério da Saúde. A busca combinou “Diabetic Foot”, “Diabetic Foot Ulcer”, “Artificial Intelligence”, “Machine Learning”, “Deep Learning”, “Multimodal”, “Risk Assessment”, “Wound Healing”, “Amputation” e “Primary Health Care”, utilizando AND e OR.

Foram priorizadas publicações de janeiro de 2021 a agosto de 2026, em português ou inglês, envolvendo adultos com diabetes e IA aplicada à detecção, estratificação ou prognóstico do pé diabético. Para o núcleo multimodal, consideraram-se estudos que integrassem pelo menos duas modalidades de informação; estudos unimodais foram mantidos quando relevantes para contextualização. Excluíram-se duplicatas, trabalhos sem relação com pé diabético ou IA e publicações sem dados suficientes. Após triagem de títulos e resumos e avaliação dos textos pertinentes, os achados foram sintetizados de forma narrativa e comparativa.

RESULTADOS

Os estudos demonstraram aplicações desde a detecção de lesões até a predição de desfechos. Chen et al.[4] encontraram sensibilidade de 0,89, especificidade de 0,93 e AUC de 0,97 para detecção de úlceras. Basiri et al.[6] estruturaram uma base multimodal de 269 pacientes, com 3.686 imagens RGB, 3.680 mapas de profundidade, 3.871 imagens térmicas e dados clínicos. Muscillo, Otesteanu e Menon[7] avaliaram 415 pares de imagens RGB e infravermelhas, observando superioridade das abordagens infravermelhas e híbridas sobre o RGB isolado.

O SoleFusion-Net integrou pressão plantar e dados clínicos de 504 pacientes, alcançando 83% de acurácia e AUC de até 0,962 na classificação da neuropatia.[8] Na predição de amputação, Tao et al.[9] avaliaram 1.332 pacientes e obtiveram AUC de 0,93 na validação interna e 0,843 na externa, evidenciando perda de desempenho em população independente. Pereira et al.[10] identificaram fatores clínicos e biomarcadores associados à cicatrização, enquanto Poradzka e Czupryniak[11] obtiveram AUC de 0,85 e acurácia de 82,21% para predição de não cicatrização em três meses.

Tabela 1. Principais evidências sobre IA aplicada ao pé diabético

Estudo	Dados	Amostra	Desfecho	Resultado
Chen et al.[4]	Imagens	16 estudos	Úlcera	Sens. 0,89; esp. 0,93; AUC 0,97
Basiri et al.[6]	RGB + térmica + profundidade + clínicos	269	Base multimodal	3.686 RGB; 3.871 térmicas
Muscillo et al.[7]	RGB + infravermelho	415 pares	Risco	Híbridos superiores ao RGB
Sheikh et al.[8]	Pressão plantar + clínicos	504	Neuropatia	Acurácia 83%; AUC até 0,962
Tao et al.[9]	Clínicos + laboratoriais	1.332	Amputação	AUC 0,93 interna; 0,843 externa
Poradzka; Czupryniak[11]	Clínicos	175	Não cicatrização	AUC 0,85; acurácia 82,21%

Fonte: elaboração própria a partir das referências 4, 6–11.

A possibilidade de utilização de tecnologias acessíveis também foi demonstrada. Cassidy et al.[12] avaliaram IA em smartphone em 81 pacientes e 203 fotografias, obtendo sensibilidade de 0,9157 e especificidade de até 0,9243. Bouallal, Douzi e Harba[13] integraram imagens RGB e térmicas, alcançando intersection over union médio de 97% na segmentação automatizada do pé.

Em conjunto, as evidências indicam que a multimodalidade pode integrar informações morfológicas, térmicas, biomecânicas e clínico-laboratoriais, aproximando os modelos da natureza multifatorial do pé diabético.[5–8] Contudo, ainda não há evidência de que sistemas multimodais reduzam amputações na APS, e a queda de desempenho observada na validação externa reforça a necessidade de cautela.[9]

Na APS, uma estratégia potencial seria combinar fotografias padronizadas por smartphone com informações clínicas já coletadas e, quando disponíveis, termografia ou pressão plantar, auxiliando na estratificação do risco e priorização do encaminhamento sem

substituir o julgamento profissional. Sua implementação no SUS requer validação prospectiva, custoefetividade, explicabilidade, equidade e adequada governança de dados.[8,9]

Tabela 2. Perspectivas para aplicação da IA multimodal na APS do SUS.

Dimensão	Potencial	Requisito
Acesso	Smartphone + dados da APS	Usabilidade e custo-efetividade
Estratificação	Integrar diferentes dados	Definir fluxos de encaminhamento
Segurança	Apoio à decisão	Supervisão e validação prospectiva
Equidade	Aplicação nacional	Validar populações diversas
Governança	Integração ao prontuário	Privacidade e interoperabilidade

Fonte: elaboração própria a partir da síntese das evidências e do contexto assistencial do SUS.[3–9,12]

CONCLUSÃO

A IA apresenta potencial para detecção de úlceras e predição de neuropatia, cicatrização e amputação, enquanto a abordagem multimodal permite integrar informações visuais, térmicas, biomecânicas e clínicas. Entretanto, heterogeneidade metodológica, limitada validação externa e escassez de estudos na atenção primária ainda impedem afirmar que esses sistemas reduzam amputações na prática.

No SUS, a IA multimodal pode apoiar a APS na identificação precoce de pacientes de maior risco e no direcionamento oportuno do cuidado, desde que precedida por validação multicêntrica em população brasileira, avaliação de custo-efetividade, explicabilidade e equidade algorítmica. Assim, estar “um passo à frente da amputação” significa transformar múltiplos sinais de risco em informação clínica acionável, favorecendo intervenções precoces e preservação da mobilidade e autonomia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Silva MA, Hamilton EJ, Russell DA, Game F, Wang SC, Baptista S, et al. Diabetic foot ulcer classification models using artificial intelligence and machine learning techniques: systematic review. J Med Internet Res. 2025;27:e69408. doi: 10.2196/69408. PMID: 40991939; PMCID: PMC12508669.

2. Portela FSO, Louzada ACS, da Silva MFA, Teivelis MP, Kuzniec S, Wolosker N. Editor's Choice - Analysis of lower limb amputations in Brazil's public health system over 13 years. Eur J Vasc Endovasc Surg. 2024;68(1):91-98. doi: 10.1016/j.ejvs.2024.02.028.
3. Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção Primária à Saúde. Nota Metodológica C4: Cuidado da pessoa com diabetes. Brasília, DF: Ministério da Saúde; 2025.
4. Chen Z, Liu X, Li S, Wu Z, Tan H, Yu F, et al. Diagnostic accuracy of artificial intelligence to identify diabetic foot ulcers: a systematic review and meta-analysis. J Tissue Viability. 2026;35(1):100975. doi: 10.1016/j.jtv.2025.100975. PMID: 41587522.
5. Yang L, Wang Y, Wang T, Zhou J, Lv J, Liang H. Advances in the application of artificial intelligence-driven multi-modal imaging technologies in the comprehensive diagnosis and treatment of diabetic foot ulcers. Rev Endocr Metab Disord. 2026;27(4):811-835. doi: 10.1007/s11154-026-10041-w. PMID: 42126765; PMCID: PMC13388648.
6. Basiri R, Manji K, LeLievre PM, Toole J, Kim F, Khan SS, Popovic MR. Protocol for metadata and image collection at diabetic foot ulcer clinics: enabling research in wound analytics and deep learning. Biomed Eng Online. 2024;23(1):12. doi: 10.1186/s12938-024-01210-6. PMID: 38287324; PMCID: PMC10826077.
7. Muscillo L, Otesteanu CF, Menon C. Machine learning approaches for diabetic plantar foot classification from RGB and thermal images. Discov Artif Intell. 2026. doi: 10.1007/s44163-026-01667-5.
8. Sheikh MM, Balachandra M, G NV, Maiya AG. SoleFusion-Net: an explainable multimodal deep learning framework for diabetic foot syndrome classification in type II diabetes mellitus. Sci Rep. 2026;16:15973. doi: 10.1038/s41598-026-42207-6. PMID: 41932959; PMCID: PMC13195104.
9. Tao H, You L, Huang Y, Chen Y, Yan L, Liu D, et al. An interpreting machine learning models to predict amputation risk in patients with diabetic foot ulcers: a multi-center study. Front Endocrinol (Lausanne). 2025;16:1526098. doi: 10.3389/fendo.2025.1526098. PMID: 40201760; PMCID: PMC11975565.
10. Pereira MG, Vilaça M, Braga D, Madureira A, da Silva J, Santos D, et al. Healing profiles in patients with a chronic diabetic foot ulcer: an exploratory study with machine learning. Wound Repair Regen. 2023;31(6):793-803. doi: 10.1111/wrr.13141. PMID: 38073283.
11. Poradzka AA, Czupryniak L. The use of the artificial neural network for three-month prognosis in diabetic foot syndrome. J Diabetes Complications. 2023;37(2):108392. doi: 10.1016/j.jdiacomp.2022.108392.
12. Cassidy B, Yap MH, Pappachan JM, Ahmad N, Haycocks S, O'Shea C, et al. Artificial intelligence for automated detection of diabetic foot ulcers: a real-world proof-of-concept clinical evaluation. Diabetes Res Clin Pract. 2023;205:110951. doi: 10.1016/j.diabres.2023.110951.
13. Bouallal D, Douzi H, Harba R. Diabetic foot thermal image segmentation using Double Encoder-ResUnet (DE-ResUnet). J Med Eng Technol. 2022;46(5):378-392. doi: 10.1080/03091902.2022.2077997. PMID: 35638349.