

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA CITOMETRIA DE FLUXO PARA O DIAGNÓSTICO DA LEUCEMIA MIELOIDE AGUDA: DESEMPENHO DIAGNÓSTICO, TEMPO DE ANÁLISE E VIABILIDADE CLÍNICA

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN FLOW CYTOMETRY FOR THE DIAGNOSIS OF ACUTE
MYELOID LEUKEMIA: DIAGNOSTIC PERFORMANCE, ANALYSIS TIME AND
CLINICAL FEASIBILITY

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA CITOMETRÍA DE FLUJO PARA EL DIAGNÓSTICO
DE LA LEUCEMIA MIELOIDE AGUDA: DESEMPEÑO DIAGNÓSTICO, TIEMPO DE
ANÁLISIS Y VIABILIDAD CLÍNICA

Ricardo Cansian¹
Gustavo Carbonera Pinto²
Luís ricardo Amador Costa³
Gabriel de Souza Petrini⁴
Lucas de Souza Petrini⁵
Henrique Fontana Manzochi⁶

RESUMO: A leucemia mieloide aguda (LMA) é uma neoplasia clonal agressiva, cuja incidência cresce com o envelhecimento populacional e cujo diagnóstico depende da interpretação especializada da citometria de fluxo. Este estudo teve como objetivo analisar o desempenho de modelos de inteligência artificial (IA) aplicados à análise automatizada da citometria de fluxo no diagnóstico da LMA, considerando acurácia, tempo de processamento e viabilidade de implementação. Trata-se de revisão narrativa, estruturada segundo a escala SANRA, com buscas nas bases PubMed e LILACS em março e julho de 2026, que incluiu cinco estudos originais publicados entre 2018 e 2026. As amostras variaram de 200 a 5.333 e incluíram comparações com condições não neoplásicas, indivíduos saudáveis e outras leucemias agudas. Os algoritmos analisaram as amostras em 7 a 84 segundos, ante 15,6 a 20 minutos do hematologista, e alcançaram especificidade de 99,79% e precisão de 92,31% na detecção de LMA em amostras de boa qualidade, além de acurácia de 90% na detecção de doença residual mínima. Conclui-se que a IA é um suporte de alto desempenho, que não substitui o especialista, e que sua adoção no Brasil requer validação local, sobretudo no sistema público.

Palavras-chave: Leucemia mieloide aguda. Citometria de fluxo. Inteligência artificial.

¹Estudante de medicina, Universidade positivo.

²Estudante de medicina, Universidade positivo.

³Estudante de medicina, Universidade positivo.

⁴Estudante de medicina, Universidade positivo.

⁵Estudante de medicina, centro Universitário de pinhais.

⁶Estudante de medicina, Universidade positivo.

ABSTRACT: Acute myeloid leukemia (AML) is an aggressive clonal neoplasm whose incidence is rising with population aging and whose diagnosis depends on expert interpretation of flow cytometry. This study aimed to analyze the performance of artificial intelligence (AI) models applied to automated flow cytometry analysis in the diagnosis of AML, considering accuracy, processing time and feasibility of implementation. This is a narrative review, structured according to the SANRA scale, with searches in the PubMed and LILACS databases in March and July 2026, which included five original studies published between 2018 and 2026. Sample sizes ranged from 200 to 5,333 and included comparisons with non-neoplastic conditions, healthy individuals and other acute leukemias. The algorithms analyzed samples in 7 to 84 seconds, compared with 15.6 to 20 minutes for a hematologist, and achieved a specificity of 99.79% and a precision of 92.31% in detecting AML in good-quality samples, as well as an accuracy of 90% in detecting minimal residual disease. AI is a high-performance support tool that does not replace the specialist, and its adoption in Brazil requires local validation, especially in the public health system.

Keywords: Leukemia. Myeloid. Acute. Flow cytometry. Artificial intelligence.

RESUMEN: La leucemia mieloide aguda (LMA) es una neoplasia clonal agresiva, cuya incidencia aumenta con el envejecimiento de la población y cuyo diagnóstico depende de la interpretación especializada de la citometría de flujo. Este estudio tuvo como objetivo analizar el desempeño de modelos de inteligencia artificial (IA) aplicados al análisis automatizado de la citometría de flujo en el diagnóstico de la LMA, considerando la exactitud, el tiempo de procesamiento y la viabilidad de implementación. Se trata de una revisión narrativa, estructurada según la escala SANRA, con búsquedas en las bases PubMed y LILACS en marzo y julio de 2026, que incluyó cinco estudios originales publicados entre 2018 y 2026. Las muestras variaron de 200 a 5.333 e incluyeron comparaciones con condiciones no neoplásicas, individuos sanos y otras leucemias agudas. Los algoritmos analizaron las muestras en 7 a 84 segundos, frente a 15,6 a 20 minutos del hematólogo, y alcanzaron una especificidad del 99,79% y una precisión del 92,31% en la detección de la LMA en muestras de buena calidad, además de una exactitud del 90% en la detección de la enfermedad residual mínima. La IA es un apoyo de alto desempeño que no sustituye al especialista, y su adopción en Brasil requiere validación local, sobre todo en el sistema público.

Palabras clave: Leucemia mieloide aguda. Citometría de flujo. Inteligencia artificial.

INTRODUÇÃO

A leucemia mieloide aguda (LMA) é uma neoplasia maligna clonal de células-tronco hematopoiéticas, caracterizada pela proliferação de blastos mieloides com bloqueio da diferenciação celular. Essa condição resulta em hematopoiese ineficaz e em citopenias potencialmente fatais. A doença acomete predominantemente adultos mais velhos, com idade mediana ao diagnóstico de 68 anos, e mais de dois terços dos casos são diagnosticados em pacientes com mais de 55 anos (DINARDO CD, et al., 2023).

A incidência da LMA vem aumentando progressivamente ao longo do tempo, sobretudo em razão do envelhecimento populacional, do maior número de sobreviventes de câncer expostos a terapias modificadoras do ácido desoxirribonucleico (DNA) e da ampliação do acesso aos métodos diagnósticos (EL CHAER F, et al., 2026). Diante do caráter agressivo da doença, a rapidez e a precisão do diagnóstico são determinantes para o início oportuno do tratamento e para o prognóstico do paciente (DINARDO CD, et al., 2023).

A citometria de fluxo é um dos pilares do diagnóstico da LMA, pois permite caracterizar o imunofenótipo das células blásticas e acompanhar a resposta ao tratamento. Entretanto, sua interpretação convencional depende de análise manual, realizada por profissionais experientes, o que a torna demorada e sujeita à variabilidade entre observadores e entre laboratórios (XIE W, et al., 2025).

Nesse cenário, a inteligência artificial (IA) vem sendo aplicada à análise da citometria de fluxo como estratégia para auxiliar a interpretação diagnóstica, reduzindo a subjetividade e aumentando a reprodutibilidade e a padronização dos resultados. Além disso, essa ferramenta pode identificar características e padrões imunofenotípicos imperceptíveis à análise humana, otimizando a velocidade diagnóstica e contribuindo para a qualidade do cuidado de pacientes com LMA (XIE W, et al., 2025).

Apesar desse potencial, ainda é necessário compreender o desempenho real desses modelos, as condições que influenciam seus resultados e os desafios para sua incorporação à prática clínica, especialmente em países com acesso desigual a laboratórios especializados, como o Brasil. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar o desempenho de modelos de IA aplicados à análise automatizada de dados da citometria de fluxo para o diagnóstico da LMA. Especificamente, buscou-se avaliar a eficácia e a acurácia diagnóstica dos modelos computacionais, por meio das taxas de sensibilidade, especificidade e precisão relatadas, e, como objetivo secundário, avaliar a viabilidade de implementação da IA no diagnóstico da LMA, considerando o tempo de processamento e a acessibilidade do processo.

MÉTODOS

Trata-se de revisão narrativa da literatura, estruturada conforme os critérios da escala SANRA (*Scale for the Assessment of Narrative Review Articles*). As buscas foram realizadas nas bases de dados PubMed e Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS) em março e julho de 2026, com atualização em outubro de 2026, utilizando-se os

descritores "acute myeloid leukemia", "flow cytometry", "artificial intelligence" e "machine learning", combinados pelos operadores booleanos AND e OR.

Foram adotados os seguintes critérios de inclusão: (a) estudos originais, observacionais ou de validação clínica (*clinical trials* e *clinical studies*); (b) publicados entre 2018 e 2026, em inglês, português ou espanhol; (c) que aplicassem modelos de IA ou de aprendizado de máquina à análise de dados de citometria de fluxo; (d) que incluíssem amostras de pacientes com LMA, com finalidade diagnóstica ou de detecção de doença residual mínima; e (e) que relatassem ao menos uma métrica de desempenho diagnóstico (acurácia, sensibilidade, especificidade ou precisão) ou o tempo de análise.

Foram excluídos: (a) artigos de revisão, editoriais, cartas, comentários e *preprints*; (b) estudos que aplicassem a IA a outros tipos de dados, como morfologia celular, imagens de lâminas, citometria de imagem ou dados genômicos e transcriptômicos; (c) estudos com foco em prognóstico, resposta terapêutica ou caracterização imunológica, sem finalidade diagnóstica; e (d) estudos que não abordassem especificamente a LMA ou que não apresentassem análise separada desses pacientes. Por se tratar de revisão narrativa, entre os estudos elegíveis foram selecionados aqueles que representassem diferentes aplicações da IA na citometria de fluxo (detecção de doença residual, classificação diferencial das leucemias agudas, padronização da análise entre instituições e validação clínica em tempo real) e que apresentassem os dados necessários à análise.

A busca resultou em 52 registros no PubMed e em nenhum registro no LILACS. Um estudo adicional foi identificado por busca manual nas referências dos artigos selecionados, totalizando 53 registros. A seleção foi realizada em duas etapas: leitura dos títulos e resumos e, em seguida, leitura na íntegra dos estudos potencialmente elegíveis. Foram excluídos 48 registros, sendo 13 artigos de revisão ou editoriais e 35 estudos que não atendiam aos critérios de inclusão ou que, embora elegíveis, apresentavam aplicações semelhantes às dos estudos selecionados. Ao final, cinco estudos compuseram a análise.

De cada estudo, foram extraídos o objetivo e a abordagem utilizada, o número de amostras, os grupos de comparação, as etapas de processamento dos dados, o tempo de análise e as métricas de desempenho diagnóstico. Os achados foram organizados em quadro-síntese e analisados de forma descritiva. Por se tratar de revisão de literatura baseada em dados publicados, sem envolvimento direto de seres humanos, não foi necessária a apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa.

RESULTADOS

Os cinco estudos incluídos foram publicados entre 2018 e 2025 e avaliaram modelos de aprendizado de máquina aplicados à citometria de fluxo com diferentes finalidades: detecção de doença residual, classificação das leucemias agudas, diferenciação entre LMA e condições não neoplásicas e validação clínica de sistemas de análise em tempo real (Quadro 1).

Quadro 1 - Síntese dos estudos incluídos sobre a aplicação da inteligência artificial à citometria de fluxo na LMA, 2018-2025.

Estudo (periódico)	Objetivo e abordagem	Principais achados
KO BS, et al., 2018 (EBioMedicine)	Algoritmo de aprendizado de máquina validado clinicamente para detecção de doença residual por citometria de fluxo multicolor na LMA e na síndrome mielodisplásica.	Acurácia de 90% na detecção de doença residual mínima; redução do tempo de análise em relação à interpretação manual pelo hematologista.
MONAGHAN SA, et al., 2022 (Am J Clin Pathol)	Aprendizado de máquina para classificação das leucemias agudas e distinção de citopenias não neoplásicas a partir de dados de citometria de fluxo.	Comparação entre leucemias agudas e condições não neoplásicas.
ZHONG P, et al., 2022 (Diagnostics)	Diagnóstico das leucemias agudas por citometria de fluxo multiparamétrica com auxílio de IA.	Inclusão de comparações com outros tipos de leucemia aguda; redução do tempo de análise em relação à interpretação manual pelo hematologista.
WANG YF, et al., 2025 (Comput Biol Med)	Estrutura de aprendizado de máquina para análise padronizada entre instituições, diferenciando LMA de condições não neoplásicas.	Pré-processamento em quatro etapas: padronização dos parâmetros entre painéis, correção da sobreposição entre canais de fluorescência, seleção aleatória de células e normalização dos dados.
ZUROMSKI LM, et al., 2025 (Cytometry B Clin Cytom)	Validação clínica de sistema de aprendizado de máquina em tempo real para detecção de LMA por citometria de fluxo.	Especificidade de 99,79% e precisão de 92,31% na detecção de LMA em amostras de boa qualidade.

Fonte: CANSIAN R, et al., 2026; dados extraídos dos estudos incluídos.

Os estudos retrospectivos analisados demonstraram que o desempenho diagnóstico da IA variou de acordo com a qualidade da amostra, como a presença de baixa quantidade de blastos, e com a capacidade do algoritmo de processar o banco de dados. Foram analisadas de 200 a 5.333 amostras; alguns estudos utilizaram exclusivamente amostras de pacientes com LMA, outros as compararam com condições não neoplásicas, e outros incluíram comparações com indivíduos saudáveis ou com outros tipos de leucemia aguda (KO BS, et al., 2018; ZHONG P, et al., 2022; WANG YF, et al., 2025).

Os modelos de análise apresentaram quatro etapas principais de pré-processamento: padronização dos parâmetros entre diferentes painéis, correção da interferência entre canais de fluorescência, seleção aleatória de células por amostra e normalização dos dados para comparação. Essas etapas visam garantir a compatibilidade entre painéis distintos e a qualidade dos dados analisados (WANG YF, et al., 2025).

Em relação ao tempo de diagnóstico, enquanto um médico hematologista levou de 15,6 a 20 minutos para diagnosticar a LMA, os algoritmos de IA analisaram a amostra em 7 a 84 segundos (KO BS, et al., 2018; ZHONG P, et al., 2022).

Quanto ao desempenho, um dos estudos demonstrou especificidade de 99,79% e precisão de 92,31% na detecção de LMA quando as amostras estavam em boas condições (ZUROMSKI LM, et al., 2025). Outro estudo relatou acurácia de 90% na detecção de doença residual mínima (KO BS, et al., 2018). Além disso, a abordagem de aprendizado de máquina também foi aplicada à classificação das leucemias agudas e à sua distinção de citopenias não neoplásicas (MONAGHAN SA, et al., 2022).

DISCUSSÃO

Os resultados desta revisão indicam que os modelos de IA aplicados à citometria de fluxo alcançam elevado desempenho na detecção da LMA e reduzem o tempo de análise de minutos para segundos. Considerando o caráter agressivo da doença, essa otimização temporal é clinicamente relevante, pois pode viabilizar o início mais precoce da terapia e impactar diretamente o prognóstico do paciente (DINARDO CD, et al., 2023).

Por outro lado, o desempenho dos algoritmos mostrou-se dependente da qualidade das amostras, com resultados inferiores em situações como a baixa quantidade de blastos. Esse achado reforça que a IA não elimina a necessidade de controle pré-analítico rigoroso e de revisão especializada dos casos limítrofes. Da mesma forma, a heterogeneidade entre painéis, citômetros e protocolos institucionais representa um obstáculo à generalização dos modelos, o que explica a importância das etapas de padronização e normalização descritas para a análise entre diferentes instituições (WANG YF, et al., 2025).

A aplicação da IA à detecção de doença residual mínima amplia sua utilidade para além do diagnóstico inicial, uma vez que a avaliação da doença residual tem papel relevante na estratificação de risco e no acompanhamento da resposta terapêutica na LMA (KO BS, et al., 2018; DINARDO CD, et al., 2023). Ainda assim, a acurácia relatada deve ser interpretada com

cautela, pois depende das características da população estudada e do método de referência adotado.

Os achados também sustentam que a tecnologia não substitui o julgamento do especialista, mas atua como suporte de alto desempenho, reduzindo as restrições operacionais dos laboratórios e a variabilidade analítica (XIE W, et al., 2025). Nessa perspectiva, os sistemas automatizados podem funcionar como triagem e como segunda leitura, priorizando os casos suspeitos e liberando o hematologista para a análise dos casos mais complexos.

No contexto brasileiro, essa discussão ganha relevância adicional. A desigualdade no acesso a laboratórios com citometria de fluxo especializada entre as regiões do país reforça a necessidade de que as soluções de IA sejam validadas e adaptadas à realidade dos serviços de saúde locais, sobretudo na rede pública, antes de qualquer adoção em larga escala. Os estudos analisados foram desenvolvidos em contextos internacionais, com populações, equipamentos e painéis próprios, o que limita a transposição direta de seus resultados.

Esta revisão apresenta limitações. Por se tratar de revisão narrativa, não houve síntese quantitativa dos resultados, e o número reduzido de estudos incluídos, associado à heterogeneidade de desenhos, amostras, finalidades e métricas de desempenho, impede a comparação direta entre os modelos. Além disso, a predominância de estudos retrospectivos limita a avaliação do impacto dessas ferramentas na rotina assistencial. Recomenda-se a realização de estudos prospectivos e multicêntricos, incluindo amostras brasileiras e métricas padronizadas, para avaliar o desempenho, o custo e a viabilidade de implementação da IA no diagnóstico da LMA.

7

CONCLUSÃO

A aplicação da IA à análise da citometria de fluxo representa um avanço no diagnóstico da LMA, com elevado desempenho diagnóstico e redução do tempo de processamento de minutos para segundos em relação à análise manual. Essa tecnologia não substitui o julgamento do especialista, mas atua como suporte de alto desempenho, reduzindo as restrições operacionais dos laboratórios e a variabilidade analítica.

No Brasil, a desigualdade no acesso a laboratórios especializados torna necessária a validação dessas soluções na realidade local, sobretudo na rede pública. A viabilidade de sua implementação depende do refinamento contínuo dos algoritmos e da padronização dos

processos, de modo a integrar a inovação tecnológica ao cuidado humanizado e promover melhores prognósticos aos pacientes.

REFERÊNCIAS

1. DINARDO CD, et al. Acute myeloid leukaemia. *The Lancet*, 2023; 401(10393): 2073-2086.
2. EL CHAER F, et al. The global epidemiology of acute myeloid leukaemia. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2026; 23(2): 107-120.
3. KO BS, et al. Clinically validated machine learning algorithm for detecting residual diseases with multicolor flow cytometry analysis in acute myeloid leukemia and myelodysplastic syndrome. *EBioMedicine*, 2018; 37: 91-100.
4. MONAGHAN SA, et al. A machine learning approach to the classification of acute leukemias and distinction from nonneoplastic cytopenias using flow cytometry data. *American Journal of Clinical Pathology*, 2022; 157(4): 546-553.
5. WANG YF, et al. A machine learning framework for cross-institute standardized analysis of flow cytometry in differentiating acute myeloid leukemia from non-neoplastic conditions. *Computers in Biology and Medicine*, 2025; 193: 110394.
6. XIE W, et al. Research advances in the adjunctive diagnosis of acute myeloid leukemia. *Frontiers in Oncology*, 2025; 15: 1634935.
7. ZHONG P, et al. Diagnosis of acute leukemia by multiparameter flow cytometry with the assistance of artificial intelligence. *Diagnostics*, 2022; 12(4): 827.
8. ZUROMSKI LM, et al. Clinical validation of a real-time machine learning-based system for the detection of acute myeloid leukemia by flow cytometry. *Cytometry Part B: Clinical Cytometry*, 2025; 108(5): 392-403.