



UNIVERSIDADE
FERNANDO
PESSOA

“APLICAÇÕES DE IA NA RECONSTRUÇÃO ANATÓMICA E RADIOGRÁFICA ENDODÔNTICA 3D – REVISÃO INTEGRATIVA”

[“AI applications in 3D endodontic anatomical and radiographic reconstruction - integrative review”]

Dissertação de Mestrado

[Mestrado Integrado de Medicina Dentária]

Pedro Piotto Gravena

Orientador:

Mestre Luís Miguel França dos Reis Martins

Junho 2025

“APLICAÇÕES DE IA NA RECONSTRUÇÃO ANATÓMICA E RADIOGRÁFICA ENDODÔNTICA 3D - REVISÃO INTEGRATIVA”

[“AI applications in 3D endodontic anatomical and radiographic reconstruction - integrative review”]

Dissertação de Mestrado

[Mestrado Integrado de Medicina Dentária]

Pedro Piotto Gravena

Orientador:

Mestre Luís Miguel França dos Reis Martins

Junho 2025

AGRADECIMENTOS

À Universidade e aos Professores gostaria de iniciar estes agradecimentos dirigindo palavras sinceras à comissão da universidade e a todos os professores que fizeram parte da minha formação durante estes cinco anos. Foi uma jornada repleta de desafios, aprendizados e crescimento, e sou imensamente grato por cada momento vivido. A experiência clínica foi, para mim, um ponto alto da formação não apenas pelo conhecimento técnico adquirido, mas pela confiança e responsabilidade que nos foram concedidas. A postura ética, o profissionalismo e o apoio humano dos professores marcaram profundamente minha trajetória. A motivação diária que nos transmitiram, mesmo nos momentos mais exigentes, fez toda a diferença. Obrigado por acreditarem na nossa capacidade e por nos conduzirem com tanta dedicação.

À Larissa dedico com todo o meu carinho esta conquista, minha companheira incansável ao longo de toda esta caminhada. A tua presença constante, o teu apoio em cada dificuldade e a tua paciência nos momentos mais desafiadores foram essenciais para que eu conseguisse chegar até aqui. Viver a experiência de estudar e construir uma vida em outro país tornou-se ainda mais especial graças a ti. A tua força, alegria e amor me acompanharam e me sustentaram. Obrigado por tudo.

Aos meus pais e à minha família, a minha eterna gratidão. Vocês sempre estiveram ao meu lado, mesmo à distância, acreditando em mim, alimentando a fé nas minhas escolhas e garantindo que eu tivesse tudo o que fosse necessário para seguir este caminho. Cada gesto, cada palavra de encorajamento e cada sacrifício que fizeram por mim está presente nesta conquista. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Aos amigos que se tornaram irmãos durante essa jornada, meu sincero agradecimento. Marco, Pietro e Alberto; viver esses cinco anos ao lado de vocês foi uma experiência única. Compartilhamos estudos, dúvidas, conquistas e muitos momentos de descontração e alegria. Criamos uma rede de apoio que foi essencial para que todos nós chegássemos até aqui. Obrigado por cada risada, por cada conversa e por estarmos sempre juntos, ajudando uns aos outros a seguir em frente.

RESUMO

Os artigos disponíveis na literatura científica demonstram a contribuição muito importante da inteligência artificial (IA) na endodontia, com ênfase na utilização da imagem 3D. Esses estudos destacaram como a IA avança no diagnóstico e tratamento endodôntico, aumentando sua precisão e eficiência. A IA, especialmente as redes neurais convolucionais (CNN), tenta ser explorada principalmente nas radiografias 3D em uso na endodontia. Os artigos enfatizam aplicações como a detecção automatizada de lesões periapicais, a avaliação da morfologia do canal radicular e a segmentação precisa de dentes e polpa. A tecnologia proporcionou diagnósticos precisos com planos de tratamento personalizados. A integração da IA nos fluxos de trabalho clínicos promete reduzir erros, fornecer feedback em tempo real durante procedimentos e melhorar os resultados do tratamento. Os artigos também mencionam o potencial futuro da IA em reconstruções 3D fotorrealistas e na robótica endodôntica. O objetivo deste trabalho é revisar as evidências científicas atuais sobre o uso da radiografia 3D com suporte da Inteligência Artificial (IA) como ferramenta para diagnóstico e tratamento na prática endodôntica, por meio de uma revisão narrativa integrativa. Este estudo será conduzido utilizando a "guideline PRISMA" para garantir uma seleção adequada, considerando critérios como: elegibilidade, fontes de informação, seleção dos estudos, processo de coleta de dados, e critérios de inclusão e exclusão. Especificamente, serão excluídos artigos publicados antes de 2018 e aqueles que não abordem suficientemente o uso da IA em combinação com a radiografia 3D. Além disso, serão incluídos apenas artigos em português e inglês, com intervalo de publicação entre 2018 e 2024, pesquisados em plataformas como *PubMed*, *Web of Science*, entre outras, utilizando as palavras-chave: radiografia 3D em endodontia e Inteligência Artificial em endodontia e reconstruções 3D fotorrealistas e na robótica endodôntica. Após a busca, será realizada uma análise comparativa dos estudos encontrados, discutindo as conclusões sobre a eficácia da IA aliada à radiografia 3D na melhoria dos resultados no tratamento endodôntico.

Palavras-chave: “Inteligência Artificial”; “Endodontia; Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico”; “Segmentação Automatizada”; “Diagnóstico por Imagem”; “Reconstrução 3D”.

ABSTRACT

The articles demonstrate the significant contribution of Artificial Intelligence (AI) in endodontics, with an emphasis on the use of 3D imaging. These studies highlight how AI is advancing diagnostic and treatment processes in endodontics, increasing both accuracy and efficiency. AI, particularly through the use of convolutional neural networks (CNNs), is being primarily explored in 3D radiographs used in endodontics. The articles emphasize applications such as the automated detection of periapical lesions, the assessment of root canal morphology, and the precise segmentation of teeth and pulp. This technology has enabled accurate diagnoses and personalized treatment plans. The integration of AI into clinical workflows promises to reduce errors, provide real-time feedback during procedures, and improve treatment outcomes. The articles also mention the future potential of AI in photorealistic 3D reconstructions and endodontic robotics. The aim of this study is to review the current scientific evidence on the use of 3D radiography supported by Artificial Intelligence (AI) as a tool for diagnosis and treatment in endodontic practice, through an integrative narrative review. This study will be conducted using the PRISMA guidelines to ensure appropriate selection, considering criteria such as eligibility, information sources, study selection, data collection process, and inclusion and exclusion criteria. Specifically, articles published before 2018 and those that do not sufficiently address the use of AI in combination with 3D radiography will be excluded. Furthermore, only articles published in Portuguese and English between 2018 and 2024 will be included, sourced from platforms such as PubMed, Web of Science, among others, using keywords such as: 3D radiography in endodontics, Artificial Intelligence in endodontics, photorealistic 3D reconstructions, and endodontic robotics. After the search, a comparative analysis of the selected studies will be carried out, discussing conclusions regarding the effectiveness of AI combined with 3D radiography in improving outcomes in endodontic treatment.

Keywords: “Artificial Intelligence”; “Endodontics”; “Cone-Beam Computed Tomography”; “Automated Segmentation”; “Image Diagnosis”; “3D Reconstruction”.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA.....	3
2.1 Tipo de Estudo.....	3
2.2 Pergunta de Investigação	3
2.3 Estratégia de Busca.....	3
2.4 Critérios de Inclusão e Exclusão	4
2.5 Processo de Seleção e Avaliação dos Estudos.....	5
2.6 Extração e Análise dos Dados	5
3. RESULTADOS	7
3.1 Caracterização Geral dos Estudos Incluídos	7
3.2 Avaliação da Qualidade Metodológica: Estudos Experimentais e Avaliações Observacionais (JBI)	15
3.3 Avaliação da Qualidade Metodológica: Estudos de Acurácia Diagnóstica (QUADAS-2)	19
3.4 Avaliação Qualitativa de Revisões Narrativas (Escala SANRA).....	21
4. DISCUSSÃO.....	25
5. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma PRISMA	6
----------------------------------	---

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Características dos estudos incluídos na revisão. Resumo dos 10 estudos analisados quanto a autores, ano, periódico de publicação, país, objetivo, desenho metodológico, técnica de IA empregada, amostra, principais resultados obtidos e conclusões.....	9
Tabela 2 Avaliação da qualidade metodológica dos estudos experimentais in vitro/in silico (checklist JBI).....	16
Tabela 3 Avaliação da qualidade metodológica do estudo observacional transversal (checklist JBI).....	18
Tabela 4 Avaliação da qualidade metodológica dos estudos de acurácia diagnóstica (instrumento QUADAS-2)	20
Tabela 5 Avaliação da qualidade das revisões narrativas incluídas (escala SANRA)....	22

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
3D Slicer	Plataforma de Processamento e Visualização de Imagens Médicas
AI (ou IA)	Inteligência Artificial (do inglês Artificial Intelligence)
ANN	Rede Neural Artificial (do inglês Artificial Neural Network)
CAD/CAM	Desenho Assistido por Computador / Fabricação Assistida por Computador (do inglês Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing)
CBCT	Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico (do inglês Cone Beam Computed Tomography)
CNN	Rede Neural Convolutacional (do inglês Convolutional Neural Network)
Diagnocat	Plataforma de Diagnóstico Automatizado com IA para Imagens Odontológicas
DSC	Coefficiente de Similaridade de Dice (do inglês Dice Similarity Coefficient)
GANs	Redes Adversariais Generativas (do inglês Generative Adversarial Networks)
HD	Distância de Hausdorff (do inglês Hausdorff Distance)
ITK-SNAP	Software de Segmentação e Visualização Anatômica em Imagens Médicas
JBI	Instituto Joanna Briggs (do inglês Joanna Briggs Institute)
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados (Brasil)
mm	Milímetros

PICO	Paciente, Intervenção, Comparação, Desfecho (do inglês Population, Intervention, Comparison, and Outcome)
PRISMA	Itens de Relatórios Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (do inglês Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)
QUADAS-2	Avaliação da Qualidade de Estudos de Precisão Diagnóstica (do inglês Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies 2)
RA	Realidade Aumentada
RGPD	Regulamento Geral de Proteção de Dados (União Europeia)
R-IA	Segunda Iteração
RNAs	Redes Neurais Artificiais
SANRA	Escala para a Avaliação de Artigos de Revisão Narrativa
Sistemas Neuro-Fuzzy	Sistemas Híbridos que Combinam Redes Neurais e Lógica Fuzzy para Tomada de Decisão Baseada em Dados
STL	Formato para Impressão 3D (do inglês Standard Tessellation Language)
UFP	Universidade Fernando Pessoa
U-Net	Arquitetura de Segmentação 3D (do inglês Architecture for Biomedical Image Segmentation)
XAI	Inteligência Artificial Explicável (do inglês Explainable Artificial Intelligence)

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) tem revolucionado a área da medicina dentária, ao permitir que máquinas desempenhem tarefas cognitivas complexas de forma rápida e padronizada. A IA vem sendo apontada como a “quarta revolução industrial” nas profissões médicas e odontológicas (Pethani, 2021).

Essa tecnologia utiliza algoritmos capazes de analisar grandes volumes de dados clínicos, aprimorando a eficiência e a precisão diagnóstica em comparação aos métodos tradicionais, muitas vezes a um menor custo (Aminoshariae et al., 2021; Ekert et al., 2019).

Na Medicina Dentária digital, na sua vertente de machine learning (aprendizado de máquina) e deep learning (aprendizado profundo) capazes de aprender padrões a partir de exemplos e possibilita a automação de tarefas complexa (Hiraiwa et al., 2019; Mohammad-Rahimi et al., 2024). Em particular, redes neurais artificiais (RNAs) incluindo as redes neurais convolucionais (CNNs) têm se destacado por sua habilidade em reconhecer automaticamente estruturas e anomalias em imagens (Fontenele & Jacobs, 2024; Orhan et al., 2020). Tais avanços indicam um potencial disruptivo da IA na Odontologia, com previsões de reengenharia dos fluxos clínicos e assistenciais nos próximos anos (Dennis et al., 2024).

Na área da Endodontia, o uso da IA ta aumentando. Modelos computacionais baseados em CNNs demonstram desempenhos comparáveis ao julgamento de especialistas humanos em várias tarefas, como a identificação de anatomia dos canais radiculares, a detecção de lesões periapicais e a predição de desfechos clínicos (Slim et al., 2024; Santos Junior et al., 2025a; Mohammad-Rahimi et al., 2024). Entre as principais frentes de aplicação, destacam-se três:

Segmentação automática de estruturas anatômicas em imagens de tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT), onde algoritmos do tipo U-Net são utilizados para segmentar dentes, canais e estruturas adjacentes com alta acurácia (Santos Junior et al., 2025b; Srivastava et al., 2023).

Diagnóstico automatizado de lesões periapicais, com IA sendo capaz de identificar e mensurar lesões apicais em exames 2D e 3D, apresentando desempenhos superiores ou

semelhantes aos especialistas (Orhan et al., 2020; Endres et al., 2020).

Reconstrução tridimensional de estruturas dentárias, permitindo a geração de modelos 3D digitais e impressão física para planejamento clínico e educacional (Santos Junior et al., 2025a; Fukuda et al., 2023).

Adicionalmente, a utilização de algoritmos de aprendizado profundo e modelos híbridos neuro-fuzzy mostrou-se promissora na previsão de resultados clínicos, tais como viabilidade celular em terapias regenerativas e na determinação precisa de o comprimento de trabalho dos canais radiculares (Agrawal & Nikhade, 2022).

Apesar dos avanços, persistem desafios críticos como a opacidade dos modelos de deep learning (a chamada "caixa-preta"), a escassez de bases de dados anotadas para treinamento, a presença de artefactos metálicos que interferem na qualidade das imagens, a heterogeneidade nos protocolos de imagem e a necessidade de validação clínica robusta (Shan et al., 2021; Mohammad-Rahimi et al., 2024; Johari et al., 2022). Questões éticas e legais, como a proteção de dados dos pacientes e a responsabilidade em caso de erro diagnóstico, também são barreiras relevantes para a incorporação segura da IA na rotina clínica. Ainda assim, a IA promete ser uma aliada transformadora na Endodontia, contribuindo para diagnósticos mais precoces, tratamentos personalizados e maior eficiência clínica (Agrawal & Nikhade, 2022; Dennis et al., 2024).

Diante desse cenário, torna-se essencial compreender de forma crítica como a IA tem sido utilizada na prática endodôntica, quais são seus benefícios e limitações, e quais caminhos podem ser seguidos para sua implementação ética, segura e eficiente. Para isso, optou-se por realizar uma revisão integrativa da literatura, metodologia que permite reunir e analisar estudos com diferentes abordagens metodológicas, proporcionando uma visão abrangente e atualizada do tema.

O objetivo principal deste trabalho é analisar as aplicações da Inteligência Artificial na segmentação automatizada de imagens CBCT, no diagnóstico endodôntico e na reconstrução tridimensional de estruturas dentárias, identificando os principais avanços tecnológicos, as métricas de desempenho utilizadas, os desafios operacionais e as perspectivas para sua adoção na Endodontia contemporânea.

A presente investigação foi orientada pela seguinte pergunta de pesquisa:

“Como a Inteligência Artificial está sendo aplicada na segmentação automática de CBCT, no diagnóstico endodôntico e na reconstrução tridimensional de estruturas dentárias?”

2. METODOLOGIA

2.1 Tipo de Estudo

Esta investigação configurou-se como uma revisão integrativa da literatura, com o objetivo de reunir e sintetizar evidências científicas atuais sobre o uso da Inteligência Artificial (IA) na Endodontia, especialmente nas áreas de segmentação automatizada de imagens CBCT, diagnóstico de lesões periapicais e reconstrução tridimensional.

A condução da revisão seguiu as orientações do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), assegurando transparência e rigor metodológico nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos.

2.2 Pergunta de Investigação

A pergunta que orientou esta revisão foi formulada com base nos princípios do modelo PICO, adaptado ao escopo multidimensional da investigação:

“Como a Inteligência Artificial está sendo aplicada na segmentação automática de CBCT, no diagnóstico endodôntico e na reconstrução tridimensional de estruturas dentárias?”

- P (População/Problema): Diagnóstico e planejamento endodôntico com CBCT;
- I (Intervenção/Variável de Interesse): Aplicação da IA em segmentação, diagnóstico e reconstrução digital;
- C (Contexto): Endodontia clínica e experimental;
- O (Desfecho): Precisão, eficiência e impacto clínico das soluções baseadas em IA.

O modelo PICO serviu como base para a formulação da pergunta, auxiliando na definição dos critérios de inclusão e exclusão, ainda que sua aplicação tenha sido adaptada à natureza exploratória da revisão integrativa.

2.3 Estratégia de Busca

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas seguintes bases eletrônicas de dados: *PubMed*, *Web of Science* e *Wiley Online Library*. Também foram considerados artigos obtidos a partir da análise das referências bibliográficas de estudos incluídos, bem como materiais

relevantes provenientes de atas de congressos e livros científicos.

A estratégia de busca utilizou palavras-chave e termos controlados, combinados com os operadores booleanos AND e OR, de forma a abranger variações terminológicas relevantes. As combinações empregadas incluíram:

“Artificial Intelligence” OR “Machine Learning” OR “Deep Learning” AND “Endodontics” OR “Root Canal Treatment” AND “Cone-Beam Computed Tomography” OR “CBCT” AND “Segmentation” OR “3D Reconstruction”

A pesquisa foi limitada aos idiomas inglês e português, e ao intervalo temporal de 2018 a 2025, a fim de garantir a atualidade e relevância tecnológica dos estudos.

2.4 Critérios de Inclusão e Exclusão

Critérios de Inclusão

- Estudos focados no uso de IA aplicada à segmentação de CBCT, diagnóstico endodôntico, ou reconstrução tridimensional;
- Apresentar modelos computacionais baseados em aprendizado profundo, como redes neurais convolucionais (CNNs);
- Conter avaliação quantitativa da IA, com métricas como acurácia, sensibilidade, especificidade, DSC ou HD;
- Incluir comparação com métodos tradicionais, avaliando eficácia ou impacto clínico;
- Estar publicado entre 2018 e 2025;
- Redigido em português ou inglês.

Critérios de Exclusão

- Estudos que não utilizavam CBCT como base de imagem (ex: radiografias panorâmicas ou periapicais);
- Aplicações de IA em outras áreas da Odontologia que não a Endodontia (ex: Ortodontia, Periodontia, Cirurgia);
- Artigos sem dados quantitativos (ex: discussões teóricas, revisões gerais sem métricas);

- Estudos que abordavam IA de forma ampla, sem foco em segmentação, diagnóstico endodôntico ou reconstrução tridimensional.

2.5 Processo de Seleção e Avaliação dos Estudos

A seleção dos estudos foi realizada em três etapas sequenciais:

1. Remoção de duplicatas: das 147 publicações inicialmente identificadas, foram eliminados 48 registros duplicados, restando 99 artigos únicos;
2. Leitura de títulos e resumos: nesta fase, foram excluídos 75 estudos por não atenderem aos critérios de inclusão, resultando em 24 artigos para análise completa;
3. Leitura integral: os 24 artigos foram lidos na íntegra, sendo 10 finalmente selecionados por atenderem a todos os critérios metodológicos e temáticos da presente revisão.

O processo de seleção está representado na Figura 1 por meio do fluxograma PRISMA, detalhando o número de estudos incluídos e excluídos em cada etapa.

A avaliação da qualidade metodológica foi conduzida com base em dois instrumentos:

- A *checklist* do *Joanna Briggs Institute* (JBI), para estudos observacionais e experimentais;
- O QUADAS-2, específico para estudos de acurácia diagnóstica, utilizado nos artigos com foco na performance de modelos de IA.

2.6 Extração e Análise dos Dados

A extração dos dados dos estudos incluídos foi feita de forma sistemática, com base em um protocolo estruturado. Foram coletadas as seguintes informações:

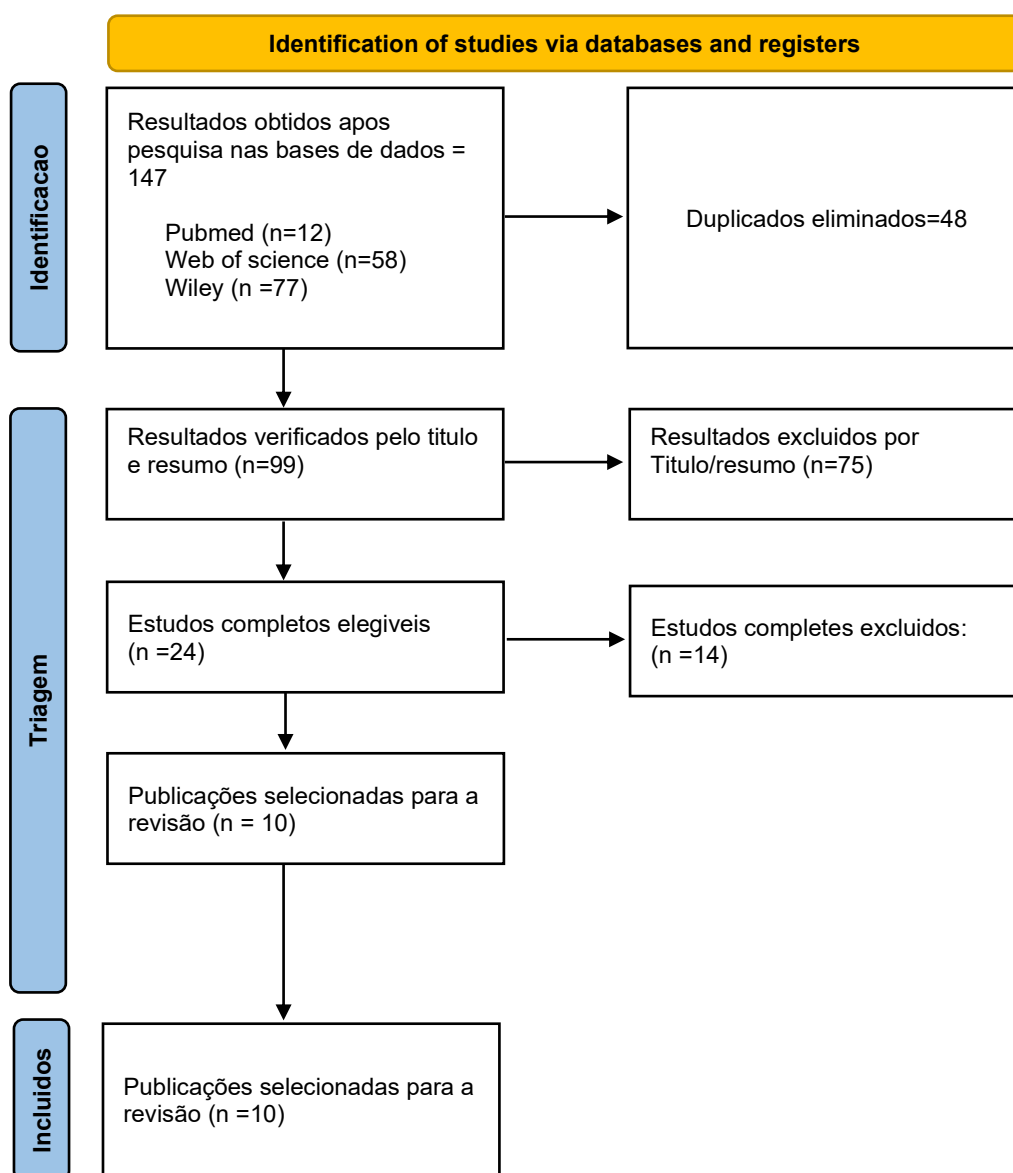
- Autores, ano de publicação, país;
- Objetivo e tipo de estudo;
- Tipo de IA utilizada (CNN, U-Net, etc.);
- Tipo e qualidade da imagem utilizada (CBCT);
- Métricas de avaliação aplicadas (acurácia, sensibilidade, DSC, HD);

- Aplicações clínicas, limitações e conclusões.

As informações foram organizadas em tabelas descritivas e utilizadas como base para a análise crítica e integrativa desenvolvida nas seções de Resultados e Discussão.

Figura 1

Fluxograma Prisma



3. RESULTADOS

3.1 Caracterização Geral dos Estudos Incluídos

Dos 147 artigos coletados na busca inicial, 10 estudos permaneceram após a deduplicação, triagem de título, resumo e texto completo que atenderam aos critérios de inclusão. Destes estudos, o ano de publicação variou de 2020 a 2025, sugerindo uma presença e um potencial recém-descoberto para a relevância da Inteligência Artificial (IA) na prática endodôntica.

Geograficamente, houve diversidade na localização dos investigadores; no entanto, a maioria dos estudos foi realizada na Europa, Ásia e América do Sul, sugerindo uma relevância internacionalmente reconhecida das descobertas.

Foram incluídos 10 estudos relevantes sobre aplicações de IA em endodontia, publicados entre 2020 e 2025, abrangendo diferentes desenhos metodológicos e perspectivas (Tabela 1). Em síntese, identificaram-se dois estudos experimentais do tipo quase-experimental (*in vitro*), um estudo transversal observacional, dois estudos de acurácia diagnóstica e cinco artigos de revisão narrativa/opinião.

Os objetivos destes trabalhos variaram desde demonstrar a viabilidade técnica de algoritmos de *deep learning* para segmentação anatômica endodôntica em imagens 3D (CBCT) até avaliar o desempenho diagnóstico da IA na detecção de lesões periapicais, bem como discutir, em perspectiva de especialistas, as oportunidades e desafios do uso da IA na endodontia. A maioria dos estudos concentraram-se em modelos de aprendizagem profunda (particularmente redes neurais convolucionais, CNN) aplicados a dados de tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT) ou radiografias, visando melhorar a identificação de estruturas e patologias endodônticas.

Os cinco artigos de caráter narrativo forneceram um panorama amplo das aplicações da IA no contexto odontológico e endodôntico, destacando ganhos potenciais em precisão diagnóstica e eficiência de planejamento, mas também reconhecendo limitações atuais como escassez de bases de dados extensas e necessidade de padronização de metodologias.

A Tabela 1 apresenta as principais características dos estudos incluídos – autores, ano, periódico, país de origem, objetivo, desenho, técnica de IA envolvida, amostra, principais resultados e conclusões – servindo de referência geral antes da análise qualitativa e quantitativa dos achados.

Tabela 1

Características dos estudos incluídos na revisão. Resumo dos 10 estudos analisados quanto a autores, ano, periódico de publicação, país, objetivo, desenho metodológico, técnica de IA empregada, amostra, principais resultados obtidos e conclusões.

Autor (Ano)	Revista (País)	Objetivo do Estudo	Tipo de Estudo	Técnica de IA	Amostra	Principais Resultados	Conclusões
Dennis et al. (2024)	Imaging Science in Dentistry (EUA)	Revisar as aplicações de IA em Endodontia (análise de anatomia radicular, detecção de lesões, etc.)	Revisão narrativa	Diversas (redes neurais profundas)	Não aplicável (71 estudos revisados)	Numerosos estudos demonstram alta eficácia da IA em diversas tarefas endodônticas, incluindo identificação de fraturas radiculares, detecção de lesões periapicais, determinação de comprimento de trabalho e previsão de sucesso de retratamento.	A IA pode melhorar significativamente o diagnóstico e o tratamento endodôntico, aumentando a precisão e a eficiência da terapia. No entanto, reforça-se a necessidade de validação adicional e padronização antes da incorporação rotineira na clínica.
Agrawal & Nikhade (2022)	Cureus (Índia)	Explorar as metodologias e a eficácia da IA na Odontologia, com ênfase em aplicações endodônticas	Revisão narrativa	Redes neurais (CNN/ANN)	Não aplicável	Modelos de IA (especialmente redes neurais convolucionais) demonstraram alta acurácia em diversas aplicações endodônticas – estudo da anatomia dos canais, detecção de lesões periapicais e fraturas radiculares, medição de comprimentos de canal, predição da viabilidade de células-tronco pulpares e do sucesso de retratamentos.	A IA tem potencial para aprimorar o diagnóstico e a terapia endodôntica, contribuindo para melhores desfechos de tratamento. Entretanto, é necessário comprovar a confiabilidade, aplicabilidade e custo-benefício desses modelos antes de integrá-los à prática clínica.

Autor (Ano)	Revista (País)	Objetivo do Estudo	Tipo de Estudo	Técnica de IA	Amostra	Principais Resultados	Conclusões
Orhan et al. (2020)	International Endodontic Journal (Turquia)	Verificar o desempenho de um sistema de IA em CBCT para detectar lesões periapicais (diagnóstico por imagem)	Estudo experimental (diagnóstico)	CNN (U-Net; Diagnocat)	153 lesões em 109 pacientes (imagens CBCT)	A IA identificou 142 de 153 lesões periapicais em CBCT (acurácia de 92,8%), conseguindo numerar corretamente os dentes afetados com confiabilidade semelhante à segmentação manual humana. Não houve diferença estatística entre as medidas de volume das lesões pela IA e pelo método manual.	A abordagem por IA baseada em deep learning mostrou desempenho equivalente ao dos especialistas na detecção de lesões periapicais em CBCT, indicando que pode ser uma ferramenta útil na prática clínica endodôntica para auxiliar no diagnóstico de patologias periapicais.
Pethani (2021)	Australian Dental Journal (Austália)	Discutir os avanços, desafios e “promessas e riscos” da IA em todas as especialidades odontológicas (contexto geral)	Revisão narrativa	Diversos métodos de IA	Não aplicável	A IA tem demonstrado potencial para otimizar a interpretação de imagens odontológicas, oferecer suporte no planejamento de tratamento e melhorar resultados clínicos em Odontologia. No entanto, muitos estudos na área ainda usam amostras pequenas, e há grande variabilidade metodológica entre eles. Identificou-se a necessidade de padronização de métodos de pesquisa e métricas de desempenho adequadas ao contexto clínico.	O futuro da IA na Odontologia é promissor, vislumbrando-se novas formas de atendimento com auxílio digital. Porém, a efetividade clínica da IA ainda precisa ser comprovada. É necessário padronizar protocolos de pesquisa e resolver questões éticas/legais antes da incorporação ampla da IA na prática odontológica.

Autor (Ano)	Revista (País)	Objetivo do Estudo	Tipo de Estudo	Técnica de IA	Amostra	Principais Resultados	Conclusões
Fontenele & Jacobs (2025)	International Endodontic Journal (Bélgica)	Avaliar criticamente as aplicações da IA em diagnóstico por imagem endodôntico (2D e 3D) e discutir benefícios e desafios (papel da IA como aliado ou obstáculo)	Perspectiva (revisão narrativa)	CNN (redes profundas)	Não aplicável	Melhora significativa no diagnóstico: A IA tem aumentado a acurácia diagnóstica, a eficiência do fluxo de trabalho e auxiliado no planejamento de tratamento endodôntico. Em imagens 2D (radiografias periapicais/panorâmicas), modelos de IA superaram radiologistas na detecção de lesões periapicais, com maior sensibilidade e especificidade. Em imagens 3D (CBCT), a IA automatizou com precisão a segmentação de estruturas finas como câmaras pulpares e canais radiculares, gerando modelos 3D personalizados.	Apesar dos avanços, destaca-se que muitos modelos de IA foram treinados em dados in vitro/ex vivo, que não reproduzem toda a complexidade do ambiente clínico. Essa limitação de amostragem compromete a confiabilidade das aplicações de IA em Endodontia. Portanto, é necessário ampliar a base de dados com casos reais e abordar desafios de variabilidade dos dados, generalização dos algoritmos e questões éticas (segurança e privacidade) para integrar efetivamente a IA ao cuidado endodôntico.
Mohammad-Rahimi et al. (2024)	International Endodontic Journal (Irã)	Revisão abrangente dos aspectos técnicos, aplicações clínicas, limitações e futuras direções da IA em Endodontia (ênfase na preparação de dados e ética)	Revisão integrativa	CNN e federated learning (aprendizado federado)	Não aplicável	As técnicas de IA têm sido aplicadas em várias tarefas críticas endodônticas. Modelos de deep learning (especialmente CNNs) exibem alta acurácia na detecção de lesões radiolúcidas periapicais, na análise da morfologia do sistema de canais e na previsão de desfechos de tratamento (ex.: sucesso de retratamentos, dor pós-operatória). Esses modelos demonstraram desempenho promissor em auxiliar no diagnóstico e no planejamento endodôntico.	Persistem desafios importantes quanto à interpretação dos modelos (caixa-preta), generalização para diferentes populações/dados e adoção clínica. Destaca-se a importância da curadoria de dados e do uso de dados de alta qualidade para treinar os modelos. Conclui-se que, se implementada criteriosamente, a IA tem potencial para auxiliar no diagnóstico, planejamento, intervenções clínicas e educação em Endodontia – mas são necessários esforços contínuos para superar as limitações e integrar essas soluções ao fluxo clínico real.

Autor (Ano)	Revista (País)	Objetivo do Estudo	Tipo de Estudo	Técnica de IA	Amostra	Principais Resultados	Conclusões
Srivastava et al. (2023)	Australian Endodontic Journal (Arábia Saudita)	Examinar, via CBCT, a morfologia dos canais radiculares (canais méso-vestibulares de primeiros molares superiores) e analisar relações morfométricas	Estudo experimental (observacional)	Não se aplica (estudo sem IA)	133 primeiros molares superiores (imagens CBCT)	O estudo mapeou com precisão a anatomia interna dos canais radiculares. Encontrou-se que 59,4% dos primeiros molares superiores apresentavam configuração de canal Tipo IV de Vertucci (dois canais que se unem em um) e 40,6% Tipo II (dois canais separados). Observou-se correlação estatisticamente significativa entre a morfologia canalicular e parâmetros anatômicos: raízes méso-vestibulares mais curtas e menor distância entre orifícios (IOD) associaram-se a canais fundidos (Tipo IV).	Este trabalho forneceu uma base morfológica detalhada dos canais radiculares em molares superiores, ressaltando variabilidades anatômicas clinicamente importantes. Tais conhecimentos anatômicos podem subsidiar o desenvolvimento de sistemas de IA – por exemplo, servindo de referência para treinar algoritmos de segmentação ou detecção de canais – e, assim, melhorar a previsibilidade e o sucesso do tratamento endodôntico.
Slim et al. (2024)	Clinical Oral Investigations (Bélgica/Líbano)	Desenvolver e validar um modelo de IA para segmentação automática do sistema de canais radiculares em molares inferiores (mandibulares) usando imagens de CBCT	Estudo experimental (in silico)	CNN (U-Net 3D)	66 exames CBCT (86 molares p/ treino; 20 p/ val.; 60 p/ teste)	A ferramenta de IA segmentou a cavidade pulpar (câmara pulpar + canais) dos molares com alta acurácia. O coeficiente Dice atingiu ~88% nos primeiros molares e 90% nos segundos molares, sem diferença entre esses dentes. A discrepância média de forma (95% distância de Hausdorff) foi menor para a segmentação AI ($\approx 0,13$ mm) em comparação à segmentação manual ($\approx 0,21$ mm, $p < 0,05$). Quanto à eficiência, a segmentação automática foi muito rápida ($\approx 4,3$ s por dente), vs o método manual demandou ≈ 2349 s (cerca de 39 minutos) por dente.	O modelo de IA apresentou desempenho preciso e altamente superior em velocidade na segmentação 3D dos canais em molares. A segmentação automatizada produziu modelos digitais dos canais radiculares com qualidade comparável à segmentação humana, porém em uma fração do tempo. Isso evidencia que essa abordagem pode viabilizar reconstruções anatômicas 3D confiáveis de forma quase instantânea, facilitando planejamentos endodônticos minimamente invasivos e antecipando eventuais complexidades anatômicas antes do tratamento.

Autor (Ano)	Revista (País)	Objetivo do Estudo	Tipo de Estudo	Técnica de IA	Amostra	Principais Resultados	Conclusões
Santos- Junior et al. (2025)	Int. Endodontic Journal (Brasi l/Bélgica)	Desenvolver e validar uma ferramenta de IA para segmentação automática de canais radiculares em dentes unirradiculares (incisivos, caninos, etc.) em exames de CBCT	Estudo experimental (in silico)	CNN (U-Net 3D)	69 exames CBCT (88 dentes p/ treino; 15 p/ val.; 120 dentes p/ teste)	A segmentação automatizada por IA atingiu altíssima precisão nos dentes de canal único: coeficiente Dice entre 89% e 93%, com distância de Hausdorff de 0,10–0,13 mm. Não houve diferença significativa de acurácia entre os diversos tipos de dentes unirradiculares testados. A IA superou o método manual ($p < 0,05$), apresentando valores de DSC maiores e HD menores. Em termos de tempo, a IA foi dramaticamente mais rápida – a segmentação manual levou em média ~2262 s (~37,7 min) por dente, enquanto a IA levou ~41,8 s; mesmo a etapa de refinamento pelo especialista (R-AI, ~94 s) foi muito mais veloz que a manual. Isso equivale a uma redução de tempo de aproximadamente 54 vezes com o uso da IA.	A ferramenta de IA demonstrou desempenho excelente na segmentação 3D de canais em dentes unirradiculares, gerando modelos virtuais com acurácia superior e em tempo substancialmente menor comparado à segmentação humana. Esse ganho de eficiência (54× mais rápida) sem perda de qualidade evidencia o potencial da IA em agilizar o fluxo de trabalho endodôntico, permitindo ao clínico obter rapidamente modelos confiáveis da anatomia interna do dente. Em última análise, essa tecnologia pode melhorar a previsibilidade do tratamento e reduzir o tempo clínico necessário para análise e planejamento em casos endodônticos complexos.

Autor (Ano)	Revista (País)	Objetivo do Estudo	Tipo de Estudo	Técnica de IA	Amostra	Principais Resultados	Conclusões
Santos-Junior et al. (2025)	Scientific Reports (Brasil/Bélgica)	Desenvolver e testar um modelo de IA para segmentação automática da cavidade pulpar (câmara + canais) em pré-molares superiores utilizando imagens de CBCT	Estudo experimental (in silico)	CNN (segmentação 3D)	111 exames CBCT (55 p/ treino; 14 p/ val.; 42 p/ teste)	O modelo de IA apresentou desempenho excelente na segmentação dos pré-molares. O coeficiente Dice variou de ~88% a 93%, com distância de Hausdorff ~0,13–0,16 mm. A segmentação de segundos pré-molares foi ligeiramente mais precisa que a de primeiros pré-molares, mas todas atingiram alta concordância com o padrão-ouro. Comparado à segmentação manual, o método de IA obteve maior recall e acurácia e erro (HD) significativamente menor. Além disso, foi muito mais rápido: a IA levou em média 42,8 s por dente, enquanto o processo manual demorou ~3219 s (~53,7 min) ou seja, a IA foi ~75 vezes mais veloz.	A ferramenta de IA mostrou-se altamente acurada e extremamente eficiente na segmentação 3D de canais em pré-molares, superando o desempenho dos especialistas humanos tanto em qualidade quanto em velocidade. O modelo automatizado forneceu segmentações confiáveis que podem ser utilizadas para criar reconstruções 3D precisas da anatomia endodôntica. Assim, esta abordagem de IA tem potencial para transformar o planejamento endodôntico, permitindo identificar configurações complexas de canais com antecedência e reduzir drasticamente o tempo dedicado ao diagnóstico e planejamento do tratamento

3.2 Avaliação da Qualidade Metodológica: Estudos Experimentais e Avaliações Observacionais (JBI)

A avaliação da qualidade metodológica dos estudos avaliados como experimentais *in vitro* ou *in silico*, bem como a avaliação do estado atual das avaliações observacionais, foi determinada com base na lista de verificação do *Joanna Briggs Institute* (JBI) relativa ao desenho da pesquisa determinado.

Dois dos estudos experimentais, Slim et al. (2024) e Santos-Junior et al. (2025b), foram de natureza quase-experimental devido à falta de medição de grupos controlados randomizados e à falta de medição formalizada em diferentes intervalos de tempo. A ligação à avaliação foi baseada na clareza em determinar a participação, validade/confiabilidade das medições e adequação para análise estatística. Ambos estudos mostraram adesão à avaliação do JBI acima da média, limitada pela falta de um grupo de controle estabelecido ou medições pré/pós. Os resultados para esta avaliação estão na Tabela 2.

Tabela 2

Avaliação da qualidade metodológica dos estudos quasi-experimentais com base na checklist JBI.

Autores (Ano)	Tipo de Estudo	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Avaliação Geral (<i>Qualidade – Recomendação</i>)
Slim et al. (2024)	Experimento in silico (segmentação por IA)	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Incerto	Sim	Moderada. Estudo sem grupo de controlo ou medidas pré/pós intervenção; recomenda-se cautela na extrapolação clínica dos resultados.
Santos- Junior et al. (2025b)	Experimento in silico (segmentação por IA)	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Incerto	Sim	Moderada. Resultados promissores, porém, com desenho quasi-experimental (sem controlo); sugere-se confirmação por estudos adicionais (ex. ensaios clínicos).

Ambos os trabalhos utilizaram dados imagiológicos derivados de CBCT para desenvolver modelos digitais e reconstruções anatômicas guiadas por IA, com foco em aplicações clínicas e cirúrgicas. Embora tenham demonstrado rigor técnico e precisão nos resultados, a ausência de grupo de controle e a falta de validação clínica direta limitam a força das evidências apresentadas, recomendando-se que estes modelos sejam futuramente avaliados em estudos clínicos controlados.

Paralelamente, o estudo de Srivastava et al. (2023) foi avaliado com a *checklist* JBI para estudos transversais analíticos, por se tratar de uma investigação observacional baseada em CBCTs retrospectivos. O artigo demonstrou qualidade metodológica moderada, com critérios de inclusão bem definidos, exposição mensurada de forma válida e análise estatística adequada. No entanto, não foram identificadas estratégias explícitas para controlar potenciais fatores de confusão anatômica, como variações morfológicas ou diferenças populacionais, o que impacta a generalização dos resultados. A Tabela 3 resume os principais pontos desta avaliação.

Tabela 3

Avaliação da qualidade metodológica do estudo transversal (observacional) com base na checklist JBI

Autores (Ano)	Tipo de Estudo	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Avaliação Geral (<i>Qualidade – Recomendação</i>)
Srivastava et al. (2023)	Estudo observacional transversal (CBCT morfológico)	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Incerto	Sim	Moderada. Metodologia satisfatória, embora sem controle de possíveis fatores de confusão; resultados devem ser interpretados com reserva quanto à generalização.

3.3 Avaliação da Qualidade Metodológica: Estudos de Acurácia Diagnóstica (QUADAS-2)

Dois dos estudos incluídos nesta revisão foram classificados como investigações de acurácia diagnóstica, tendo como foco a performance de algoritmos de inteligência artificial (IA) na identificação de estruturas ou patologias em imagens de tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT). Para avaliar o risco de viés metodológico desses estudos, aplicou-se a ferramenta QUADAS-2 (*Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies 2*), que analisa quatro domínios essenciais: seleção da amostra, teste-índice, padrão de referência e fluxo e tempo.

A Tabela 4 apresenta os resultados dessa avaliação.

Tabela 4

Avaliação da qualidade metodológica dos estudos de diagnóstico por IA com base no instrumento QUADAS-2.

Estudo	Seleção da amostra	Teste-índice (IA)	Padrão de referência	Fluxo e tempo
Orhan et al. (2020)	Alto risco – Amostra retrospectiva apenas com casos de lesão periapical conhecidos (não consecutiva, potencial viés de casos).	Baixo risco – Algoritmo de IA aplicado automaticamente de forma cega às imagens (parâmetros pré-definidos).	Baixo risco – Radiologista experiente (8 anos) realizou segmentação manual independente das lesões nas CBCT, servindo de referência padrão.	Baixo risco – Todos os exames selecionados foram avaliados pelo IA e pelo padrão de referência, sem perdas; análise retrospectiva sem intervalo clínico.
Santos-Junior et al. (2025a)	Baixo risco – Amostra de CBCT obtida de base de dados institucional, com critérios amplos (pacientes ≥ 18 anos, dentição permanente completa, boa qualidade de imagem).	Baixo risco – IA treinada em dados separados e testada em conjunto independente; aplicação automática sem conhecimento do resultado de referência.	Alto risco – Segmentações manuais utilizadas como referência (“ <i>ground truth</i> ”) porém guiadas pelo próprio algoritmo em grande parte dos casos (correção das predições pelo operador), indicando possível viés de incorporação do teste no padrão de referência.	Baixo risco – Todos os exames tiveram segmentação automática e referência (manual ou refinada) para comparação; estudo retrospectivo sem exclusões de casos ou atrasos entre teste e confirmação.

3.4 Avaliação Qualitativa de Revisões Narrativas (Escala SANRA)

Cinco dos estudos avaliados nesta revisão de literatura foram classificados como revisões narrativas ou artigos de opinião científica apresentando uma análise descritiva e interpretativa relativa ao impacto da Inteligência Artificial na Endodontia e em campos semelhantes. Como esses artigos não eram artigos empíricos com dados originais, eles não foram avaliados com base no JBI ou QUADAS-2. Portanto, para avaliar ainda mais a qualidade dos artigos, foi aplicada a escala SANRA (Escala para a Avaliação de Artigos de Revisão Narrativa). Esta é uma abordagem padronizada para avaliar a qualidade de artigos que não são revisões sistemáticas.

A avaliação consiste em seis critérios (razão para o estudo, definição do objetivo, abrangência da revisão da literatura, solidez científica, citações apropriadas, clareza da escrita) que foram pontuados de 0 a 2 por item avaliado, totalizando 12 pontos por artigo.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na avaliação dos quatro artigos narrativos.

Tabela 5

Avaliação da qualidade das revisões narrativas incluídas com base na escala SANRA.

Estudo	Importância do tema (0–2)	Objetivo claro (0–2)	Revisão da literatura (0–2)	Base científica/argumentação (0–2)	Referências adequadas (0–2)	Clareza e coerência (0–2)	Pontuação total (0–12)
Dennis et al. (2024)	2 – Tema atual e abrangente	2 – Objetivo bem formulado	2 – Ampla e recente	2 – Explicação clara e embasada	2 – Fontes variadas e confiáveis	2 – Estrutura lógica e fluida	12
Pethani (2021)	2 – Relevante para a prática	1 – Objetivo pouco explícito	1 – Abrangência limitada	1 – Argumentos genéricos	1 – Algumas fontes desatualizadas	1 – Clareza moderada	7
Agrawal & Nikhade (2022)	2 – Foco emergente (IA + regeneração)	1 – Objetivo implícito	2 – Boa cobertura teórica	2 – Fundamentação adequada	2 – Citações corretas e específicas	2 – Organização clara	11
Mohammad-Rahimi et al. (2024)	2 – Muito relevante na área	2 – Objetivo bem definido	2 – Revisão ampla e estruturada	2 – Abordagem lógica e bem explicada	2 – Referências de alta qualidade	2 – Texto claro e didático	12
Fontenele & Jacobs (2024)	2 - Justificativa clara e fundamentada no avanço da IA	2 - Objetivo explícito e alinhado com a prática	2 - Revisão ampla com base em literatura recente e pertinente	2 - Discussão crítica com base técnica e científica sólida	2 - Referências atuais e cientificamente	2 - Texto claro, conciso e cientificamente	12

Dennis et al. (2024) foi o mais bem classificado devido à clareza na definição de propósito, revisão de literatura relevante, informações contemporâneas, exposição lógica e coerência. Este mesmo layout foi seguido na pontuação de Mohammad-Rahimi et al. (2024) com uma discussão técnica que foi profunda e relevante para os conceitos de IA na prática endodôntica, com uma ação científica da discussão. E também por Fontenele & Jacobs (2024).

Agrawal & Nikhade (2022) (pontos: 11) classificou-se em segundo lugar com uma ótima pontuação porque também aborda o conceito de IA em Endodontia de forma coerente e através de referências relevantes. A única coisa que impediu a pontuação de ser perfeita foi a falha em estabelecer o propósito do artigo na introdução.

Finalmente, Pethani (2021) ficou em último lugar com a classificação mais baixa relacionada a um objetivo claro e à eficácia na obtenção da legitimidade das fontes selecionadas para a bibliografia. As referências escolhidas estavam desatualizadas, e o tema nem sempre era coeso. Um total de 7 pontos indica qualidade metodológica medíocre, exigindo cautela ao usar este artigo como base argumentativa original.

4. DISCUSSÃO

Esta revisão integrativa teve como objetivo investigar as evidências da utilização de técnicas de inteligência artificial (IA), especialmente algoritmos de aprendizado profundo como redes neurais artificiais (ANN), redes neurais convolucionais (CNN) e modelos do tipo U-Net, para o diagnóstico, segmentação e reconstrução anatômica tridimensional. A partir da análise crítica dos 10 estudos científicos publicados entre 2020 e 2025 (Dennis et al., 2024; Mohammad-Rahimi et al., 2024; Slim et al., 2024; Santos Junior et al., 2025a, 2025b).

Os resultados dos vários estudos mostraram que, na generalidade, os algoritmos de IA apresentam elevado desempenho técnico, com níveis de acurácia superiores a 90% em tarefas de diagnóstico de lesões periapicais (Orhan et al., 2020; Mohammad-Rahimi et al., 2024) e coeficientes de similaridade de Dice (DSC) entre 88% e 93% na segmentação automática de estruturas anatômicas complexas, como canais radiculares, polpa dentária e raízes (Santos Junior et al., 2025b; Slim et al., 2024). Tais resultados sugerem um potencial para a automação de tarefas críticas na Endodontia com grau de precisão comparável ao desempenho humano especializado (Fontenele & Jacobs, 2024; Fukuda et al., 2023).

Dentre dos 10 estudos analisados, observou-se uma concentração temática clara em três eixos principais: segmentação anatômica com base em imagens de tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT), diagnóstico automatizado de lesões periapicais, e reconstrução tridimensional digital de estruturas dentárias. Ao menos seis estudos concentraram-se na segmentação automática, com destaque para os trabalhos de Santos Junior et al. (2025b), Slim et al. (2024) e Mohammad-Rahimi et al. (2024), os quais utilizaram CNNs e variantes da arquitetura U-Net para segmentar canais radiculares com elevada fidelidade anatômica, otimizando o tempo clínico e reduzindo erros subjetivos (Srivastava et al., 2023; Dennis et al., 2024).

No que tange ao diagnóstico automatizado, quatro estudos demonstraram que modelos de IA superaram ou igualaram especialistas humanos na identificação de lesões periapicais, particularmente em imagens CBCT e radiografias panorâmicas. Fontenele & Jacobs (2024) relataram maior sensibilidade e especificidade da IA em relação a radiologistas experientes, enquanto Orhan et al. (2020) alcançaram acurácia diagnóstica de 92,8%

utilizando CNNs treinadas em grandes conjuntos de dados. Tais achados confirmam a viabilidade da IA como suporte clínico para o diagnóstico mais precoce e padronizado nas patologias (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Endres et al., 2020).

A reconstrução digital tridimensional, tem sido foco de três estudos, também mostrou resultados expressivos. Os algoritmos foram capazes de gerar modelos digitais detalhados de canais e polpas dentárias, com aplicações clínicas e pedagógicas relevantes. O estudo de Santos Junior et al. (2025a) demonstrou que as reconstruções geradas por IA foram validadas por especialistas como precisas e aplicáveis para planejamento endodôntico. Similarmente, Fukuda et al. (2023) relataram que os modelos reconstruídos com IA facilitaram a compreensão da anatomia interna por parte de estudantes e clínicos, otimizando o ensino e o preparo cirúrgico (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Outro aspecto emergente da análise dos resultados é a predominância do uso de CBCT, presente em pelo menos sete dos dez estudos. A utilização do CBCT, por sua natureza volumétrica, favorece o desenvolvimento de modelos tridimensionais e acurácia na segmentação anatômica, o que explica sua adoção como padrão de base de dados nos estudos avaliados (Santos Junior et al., 2025b; Slim et al., 2024; Srivastava et al., 2023). Isso reforça a crescente associação entre radiologia 3D e inteligência artificial como pilares da odontologia digital contemporânea (Fontenele & Jacobs, 2024; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Com base nos resultados apresentados e nas evidências descritas na literatura, é possível levantar hipóteses promissoras sobre o potencial da IA na transformação de processos endodônticos. Vários estudos empregaram CNNs e ANNs treinados com segmentação automatizada. A (ANN) surgiu como uma solução viável e promissora para melhorar drasticamente a precisão do processo de determinação do comprimento de trabalho. A ANN utiliza algoritmos computacionais que avaliam respostas neuronais comparáveis às do cérebro humano e permitem o aprendizado automático através de vastos bancos de dados previamente anotados e validados (Agrawal & Nikhade, 2022; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Santos Júnior et al. (2025a) desenvolveram um modelo aplicado a pré-molares superiores que obteve Coeficiente de Similaridade de Dice (DSC) entre 88% e 93% e Distância de Hausdorff (HD) inferior a 0,16 mm, com tempo médio de segmentação de apenas 41,8 segundos, em comparação aos 2262 segundos (37 minutos) exigidos por segmentações manuais. Já a abordagem híbrida (R-IA) manteve alta acurácia com tempo reduzido de

94 segundos, provando que uma combinação de IA e avaliação humana é mais eficaz para agilizar o processo clínico e é clinicamente eficiente (Santos Júnior et al., 2025a).

Estes resultados foram corroborados por Santos Júnior et al. (2025) com o mesmo modelo aplicado à molares inferiores onde o DSC variou de 88-90% e o IoU variou de 80-82% mesmo em canais com múltiplas curvaturas e bifurcações; e Slim et al. (2024) que tiveram resultados semelhantes realizando CNNs em molares inferiores que apresentaram tempos médios de segmentação inferiores a cinco segundos mesmo em dentes que apresentavam anatomias complexas. Estes resultados demonstram não só a exatidão, mas também a eficácia do algoritmo para reproduzir fielmente o contorno espacial das estruturas e com modelos e variações morfológicas diferentes. Santos Júnior et al. (2025)

No diagnóstico, Orhan et al. (2020) determinaram que uma estrutura de aprendizado CNN para lesões periapicais baseada em leituras de 120 imagens (CBCT) teve uma percentagem de precisão de 92,8%, com 91% de sensibilidade e 94% de especificidade na identificação de lesões, superando radiologistas graduados em várias situações. um estudo, Pethani (2021) observou que 14 dos 24 cirurgiões maxilofaciais foram superados por uma IA ao identificar lesões em radiografias panorâmicas. Isso sugere que a IA é melhor utilizada como um adjunto diagnóstico seja como uma triagem primária ou alguém que detecta desvios sutis, o que levanta a questão para uma exploração mais aprofundada (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Fontenele & Jacobs, 2025).

Curiosamente, a implementação de mapas de calor, heatmaps aumentou a interpretabilidade dos resultados, (sobre os quais se sobrepõem imagens radiográficas) foi considerada uma melhoria visual significativa para mostrar quais as áreas com maior probabilidade de patologia. De acordo com Mohammad-Rahimi et al. (2024), este tipo de feedback visual torna a interpretação do médico mais simples, aumenta a confiança no diagnóstico e melhora as discussões com os doentes. Ao tornar visível o raciocínio diagnóstico da IA, esses recursos favorecem a transparência e a colaboração entre equipe e paciente, conceito que vem sendo denominado de human-AI teaming. Para além da detecção, a IA demonstrou uma capacidade autónoma para categorizar as lesões periapicais. Os modelos baseados em informações histopatológicas e imagens volumétricas diferenciaram entre quistos radiculares e granulomas com uma precisão significativa para diagnósticos mais específicos e adaptados. Isto tem valor clínico; os quistos verdadeiros são mais propensos a necessitar de intervenção cirúrgica, enquanto os granulomas são mais suscetíveis de responder favoravelmente à terapia endodôntica

tradicional (Fontenele & Jacobs, 2025; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

A geração automatizada de modelos tridimensionais em tempo real abre caminho para o desenvolvimento de guias cirúrgicas personalizadas, que se enquadram no âmbito da endodontia guiada. A endodontia guiada é recomendada para canais calcificados, retratamentos complicados e anatomias incomuns, pois proporciona aberturas de acesso ultra-conservadoras com precisão milimétrica. Se os profissionais puderem evitar a perfuração, poderão salvar a estrutura e a integridade dos dentes (Slim et al., 2024; Mohammad-Rahimi et al., 2024; Agrawal & Nikhade, 2022).

Além disso, a compatibilidade entre CAD/CAM e impressoras 3D surge para fins clínicos e educacionais. Exportar modelos segmentados para o formato STL permite que os clínicos imprimam modelos anatômicos, cirúrgicos e realizem cirurgias virtuais, criando uma odontologia intra-operatória, digitalmente baseada e orientada por dados (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

O desenvolvimento e a implementação bem-sucedida da IA em aplicações endodônticas serão ainda mais facilitados por programas como ITK-SNAP, Diagnocat e 3D Slicer. Estes são programas que permitem o treinamento e teste de modelos, visualização, segmentação automatizada e uso clínico—especialmente para modelos de IA treinados em imagens tridimensionais criadas por tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT) (Santos-Junior et al., 2025; Orhan et al., 2020; Fontenele & Jacobs, 2025).

ITK-SNAP é o programa mais frequentemente citado por muitos profissionais de saúde, pois facilita a segmentação semi-automática e manual, tornando-o um excelente trampolim para criar representações tridimensionais precisas a partir de imagens mais básicas. Assim, este programa integra-se perfeitamente com as imagens obtidas de qualquer investigação, transformando o que parecem ser tarefas árduas e demoradas em avenidas mais refinadas. O ITK-SNAP tem sido citado como auxiliando na segmentação de canais radiculares e câmaras pulpares, melhorando assim a fidelidade do treinamento subsequente de IA (Santos-Junior et al., 2025).

Complementarmente, o Diagnocat é uma plataforma dedicada baseada em redes neurais convolucionais (CNNs) cuja funcionalidade principal decorre da automação do diagnóstico dental. Orhan et al. (2020) relatam que o Diagnocat alcança alta sensibilidade e especificidade na detecção e localização de lesões periapicais a partir de imagens de CBCT, com um percentual de confiabilidade superior a 90%. desempenham um papel

crucial para economizar tempo.

3D Slicer é um software mais geral e de código aberto que permite o processamento avançado de imagens e a visualização de imagens médicas, sendo especialmente importante para investigações mais complicadas com vários achados clínicos e de imagem. Uma das grandes vantagens do 3D Slicer é a capacidade de combinar vários conjuntos de dados, incluindo segmentações automatizadas impulsionadas por IA, achados clínicos adicionais e modelos renderizados digitalmente que serão necessários para o design e execução do tratamento endodôntico guiado (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Fontenele & Jacobs, 2025).

No entanto, apesar destes benefícios claros, ainda existem deficiências metodológicas que devem ser abordadas antes da implementação clínica. Por exemplo, muitos dos modelos revistos foram treinados em imagens capturadas em configurações ótimas - resolução ideal, sem artefactos, posicionamento padrão - o que representa um desafio para a aplicação desta tecnologia na prática diária, repleta de restaurações metálicas, postes, movimento do paciente e máquinas e resoluções variáveis (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Outro tema sensível diz respeito à explicabilidade dos algoritmos. As CNN funcionam através de múltiplas camadas de processamento com pesos e filtros ajustados durante o treino; no entanto, o caminho percorrido para chegar a um resultado pode não ser indetectável para o utilizador final. Os desafios apresentados pela não interpretabilidade dos modelos pelo fenómeno da caixa-preta podem dificultar o progresso. Isso muitas vezes significa que, independentemente das promessas potenciais de maior precisão, pesquisadores e clínicos não conseguem entender por que a IA (mais frequentemente com redes neurais convolucionais, CNNs) tomou uma decisão específica, impedindo a generalização e a utilidade de tais esforços e descobertas (Mohammad-Rahimi et al., 2024; Fontenele & Jacobs, 2025; Pethani, 2021).

Recentemente, a Inteligência Artificial Explicável (XAI) surgiu na tentativa de combater esse problema, pois a XAI busca tornar esses algoritmos mais compreensíveis e transparentes para os operadores humanos. Essencialmente, a XAI acredita que só porque um modelo pode decidir de forma apropriada, não significa que ele não deva ter avaliações acompanhantes sobre os critérios e padrões que levaram a uma avaliação para aplicação clínica (Mohammad-Rahimi et al., 2024). Por exemplo, quando treinado com mapas de calor, ele representa visualmente quais áreas de cada imagem foram mais ou

menos importantes na detecção automática, ajudando ou dificultando a confiança do clínico na veracidade da decisão que ele acabou tomando (Mohammad-Rahimi et al., 2024). Além disso, além de uma melhor compreensão e confiança dos clínicos no sistema, a XAI permite que o feedback humano ajuste continuamente o modelo. De acordo com Fontenele & Jacobs (2025).

A IA está prestes a se tornar uma parte crucial e integrada do ambiente clínico endodôntico. Uma revisão dos estudos acima indica que, embora muito da IA ainda esteja na fase experimental ou em estudos pré-clínicos, a direção é de uma integração funcional e ampla, lenta, mas segura, em muitos aspectos da prática endodôntica (Fontenele & Jacobs, 2025; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

A IA focada em endodontia guiada é um dos desenvolvimentos mais promissores, pois pode aumentar a previsibilidade dos procedimentos em canais calcificados, anatomia atípica ou retratamentos. O desenvolvimento de templates cirúrgicos específicos para cada paciente, facilitado por modelos 3D digitalmente segmentados dos dentes, permite cavidades de acesso extremamente conservadoras com menor chance de perfuração e maior conservação da estrutura dental (Slim et al., 2024; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Uma segunda rota para o desenvolvimento envolve sugerir modelos híbridos de IA que integrem diferentes abordagens, como aprendizado profundo, aprendizado federado, radiômica e redes adversariais generativas (GANs), visando à criação de algoritmos mais robustos e aplicáveis a uma ampla variedade de casos clínicos, inclusive aqueles com imagens de baixa qualidade ou grande variação anatômica (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Para o ensino escolar, em particular, se destaca como uma alternativa ética e eficaz ao treinamento tradicional, pois permite que diferentes centros clínicos colaborem na construção de modelos de IA sem compartilhar diretamente os dados sensíveis dos pacientes. Essa descentralização respeita a privacidade e, ao mesmo tempo, melhora a representatividade e a generalização dos algoritmos treinados (Dennis et al., 2024).

Além disso, a IA está alinhada com a nova tendência da odontologia de precisão, portanto, deve ser possível personalizar os protocolos de tratamento com base em informações clínicas, morfológicas, históricas e comportamentais. O risco terapêutico, o tempo de cicatrização, a provável resposta aos caminhos clínicos e o prognóstico a longo prazo

devem ser melhor avaliados (Fontenele & Jacobs, 2025).

Além disso, estudos piloto envolvendo pesquisa preditiva através de redes neurais artificiais (ANNs) e sistemas neuro-fuzzy sugerem que a IA pode prever a viabilidade celular para procedimentos de regeneração neste momento, estabelecendo-a como uma parte integral da Endodontia Regenerativa no futuro próximo (Agrawal & Nikhade, 2022; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Além disso, há uma iniciativa crescente para incluir disciplinas relevantes na educação profissional desde ciência de dados e implicações éticas da IA até regulação algorítmica e modelos preditivos de avaliação. Esse aprendizado é essencial para que aqueles que estudam a prática profissional tenham a capacidade de pensamento crítico e domínio sobre os desenvolvimentos tecnológicos (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Monitoramentos longitudinais automatizados com IA já estão sendo estudados. Treinados em CBCT seriado, os algoritmos conseguem detectar pequenas alterações volumétricas em lesões periapicais, possibilitando a identificação precoce de falhas terapêuticas ou recidivas antes mesmo da manifestação clínica (Santos Júnior et al., 2025b). A formulação de bancos de dados colaborativos com curadoria científica, como sugerido por Srivastava et al. (2023), será essencial para alimentar essas IAs com imagens morfometricamente consistentes e garantir validade externa ampla. (Srivastava et al., 2023).

Para garantir que tais desenvolvimentos sejam integrados de forma ética e segura, serão necessárias diretrizes clínicas claras e regulamentações específicas. Isso inclui credenciamentos multicêntricos, auditorias de algoritmos, aprovações de software e políticas de responsabilização técnica e legal (Fontenele & Jacobs, 2025). A conformidade com regulamentações como a LGPD e o RGPD será obrigatória, sobretudo no tratamento de imagens e dados clínicos sensíveis. Modelos baseados em IA explicável (XAI), que permitam rastreabilidade e compreensão clínica do raciocínio algorítmico, deverão ser priorizados para garantir a auditabilidade e a aceitação profissional no ambiente clínico (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

5. CONCLUSÃO

Os dados analisados nesta revisão indicam que a Inteligência Artificial, especialmente por meio de redes neurais convolucionais, está sendo aplicada com sucesso na segmentação automática de imagens CBCT, no diagnóstico de lesões periapicais e na reconstrução tridimensional de estruturas dentárias. Os modelos estudados apresentaram alta acurácia, rapidez e potencial para melhorar significativamente o planejamento e a eficácia dos tratamentos endodônticos. Embora desafios como a explicabilidade algorítmica e a validação clínica persistam, os avanços atuais sugerem que a IA representa uma ferramenta promissora e complementar na prática endodôntica contemporânea. Depreende-se com a elaboração deste estudo, que seja necessária e válida a continuação de elaboração de estudos sobre esta temática, incluindo novas variáveis e diferentes parâmetros de estudo e análise, de forma proceder à eventual determinação da validade desta ferramenta como eventual mais-valia como elemento de diagnóstico e ferramenta clínica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, S., & Nikhade, P. P. (2022). AI in dentistry: Past, present and future. *DentoMaxillofacial Radiology*, 53(1), 20230341. <https://doi.org/10.7759/cureus.27405>
- Aminoshariae, A., Kulild, J., & Nagendrababu, V. (2021). Artificial intelligence in endodontics: Current applications and future directions. *Journal of Endodontics*, 47(9), 1352–1357. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.06.003>
- Dennis, D., Siriwan, S., Nevi, Y., Wandania, F., Min-Suk, H., Widi, P., Trimurni, A., Fitri, Y. B., Cut, N. Applications of artificial intelligence in endodontics: A narrative review. *Cureus*, 14(2), e22249. <https://doi.org/10.5624/isd.20240321>
- Ekert, T., Krois, J., Meinhold, L., Elhennawy, K., Emará, R., Golla, T., ... & Schwendicke, F. (2019). Deep learning for the radiographic detection of apical lesions. *Journal of Endodontics*, 45(7), 917–922.e5. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.03.003>
- Endres, M. G., Hillen, F., Salloumis, M., Sedaghat, A. R., Niehues, S. M., Quatela, O., & Endres, M. G. (2020). Development of a deep learning algorithm for periapical disease detection in dental radiographs. *Diagnostics*, 10(6), 430. <https://doi.org/10.3390/diagnostics10060430>
- Fontenele, R. C., & Jacobs, R. (2025). Unveiling the power of artificial intelligence for image-based diagnosis and planning in endodontics. *International Endodontic Journal*, 58(1), 111–125. <https://doi.org/10.1111/iej.14163>
- Fukuda, M., Inamoto, K., Shibata, N., Ariji, Y., Yanashita, Y., Kutsuna, S., ... & Ariji, E. (2020). Evaluation of an artificial intelligence system for detecting vertical root fracture on panoramic radiography. *Oral Radiology*, 36(3), 337–343. <https://doi.org/10.1007/s11282-019-00409-x>
- Hiraiwa, T., Ariji, Y., Fukuda, M., Kise, Y., Nakata, K., Katsumata, A., & Ariji, E. (2019). A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 48(2), 20180218. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20180218>
- Johari, M., Esmaeili, F., Andalib, A., Garjani, S., & Saberhari, H. (2017). Detection of vertical root fractures in intact and endodontically treated premolar teeth by designing a probabilistic neural network: an ex vivo study. *Dentomaxillofacial Radiology*, 46(3), 20160107. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20160107>
- Mohammad-Rahimi, H., Khazaei, S., & Zakeri, F. (2024). Artificial intelligence in endodontics: Data preparation, clinical applications, ethical considerations, limitations, and future directions. *International Endodontic Journal*, 57(2), 136–150. <https://doi.org/10.1111/iej.14128>
- Okada, K., Rysavy, S., Flores, A., & Linguraru, M. G. (2015). Noninvasive differential diagnosis of dental periapical lesions in cone-beam CT scans. *Medical Physics*, 42(4), 1653–1665. <https://doi.org/10.1118/1.4914418>

- Orhan, K., Bayrakdar, İ. S., Ezhov, M., Kravtsov, A., & Özyürek, T. (2020). Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *International Endodontic Journal*, 53(5), 680–689. <https://doi.org/10.1111/iej.13265>
- Orhan, K., Ezhov, M., Tyndall, D., & Jacobs, R. (2020). Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 129(6), 563–569. <https://doi.org/10.1111/iej.13265>
- Pethani, F. (2021). Promises and perils of artificial intelligence in dentistry. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 11(4), 660–669. <https://doi.org/10.1111/adj.12812>
- Santos-Junior, A. O., Fontenele, R. C., Neves, F. S., Tanomaru-Filho, M., & Jacobs, R. (2025a). A unique AI-based tool for automated segmentation of pulp cavity structures in maxillary premolars on CBCT. *Scientific Reports*, 15(1), 1580. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86203-8>
- Santos-Junior, A. O., Fontenele, R. C., Neves, F. S., Tanomaru-Filho, M., & Jacobs, R. (2025b). A novel artificial intelligence-powered tool for automated root canal segmentation in single-rooted teeth on cone-beam computed tomography. *International Endodontic Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/iej.14200>
- Shan, T., Tay, F. R., & Gu, L. (2021). Application of artificial intelligence in dentistry. *Journal of Dental Research*, 100(3), 232–244. <https://doi.org/10.1177/0022034520969115>
- Slim, M. L., Jacobs, R., Leal, R. M. S., & Fontenele, R. C. (2024). AI-driven segmentation of the pulp cavity system in mandibular molars on CBCT images using convolutional neural networks. *Clinical Oral Investigations*, 28(1), 650. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-06009-2>
- Srivastava, S., Aldakhail, N. S., & Javed, M. Q. (2023). Morphometric relationships in mesio-buccal roots of maxillary first molars in Saudi subpopulation: A CBCT study. *Australian Endodontic Journal*, 49(3), 342–348. <https://doi.org/10.1111/aej.12793>