

RASTREAMENTO OPORTUNISTA DA OSTEOPOROSE POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM TOMOGRAFIAS COMPUTADORIZADAS DE ROTINA: REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA

OPPORTUNISTIC OSTEOPOROSIS SCREENING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ROUTINE COMPUTED TOMOGRAPHY: AN INTEGRATIVE LITERATURE REVIEW

CRIBADO OPORTUNISTA DE OSTEOPOROSIS MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RUTINA: REVISIÓN INTEGRATIVA DE LA LITERATURA

Rafaela Oliveira Nessrala dos Santos¹

Eduarda Coutinho Fintelman²

Pedro Loques Almeida Bravo³

Yurith Gonçalves Castelo⁴

Bruna Ferreira di Palma Queiroz⁵

RESUMO: A osteoporose é uma doença osteometabólica frequente, marcada por redução da resistência óssea e maior risco de fraturas por fragilidade. Apesar de seu impacto clínico e social, permanece amplamente subdiagnosticada, especialmente antes da primeira fratura. Esta revisão integrativa analisou criticamente as evidências científicas sobre a aplicação da inteligência artificial no rastreamento oportunista da osteoporose, da baixa densidade mineral óssea e das fraturas vertebrais em tomografias computadorizadas de rotina. Foram pesquisadas as bases PubMed/MEDLINE, SciELO e LILACS/BVS, incluindo estudos originais publicados entre janeiro de 2021 e julho de 2026, em português, inglês ou espanhol, com população adulta e uso de inteligência artificial, aprendizado de máquina, aprendizado profundo, radiômica ou algoritmos automatizados aplicados à tomografia corporal. Identificaram-se 1.432 registros, dos quais 18 estudos originais compuseram a síntese final. Os modelos apresentaram resultados promissores para estimativa automatizada da densidade mineral óssea, classificação de osteoporose e osteopenia, detecção de fraturas vertebrais e predição de risco futuro. Contudo, predominaram estudos retrospectivos, com heterogeneidade metodológica e validação externa limitada. A inteligência artificial mostra elevado potencial como ferramenta de apoio ao rastreamento oportunista, embora sua incorporação ampla dependa de padronização, validação multicêntrica e demonstração de impacto clínico.

Palavras-chave: Osteoporose. Inteligência artificial. Tomografia computadorizada.

¹Acadêmico de medicina, Universidade de Vassouras.

²Acadêmico de medicina, Universidade de Vassouras.

³Acadêmico de medicina, Universidade de Vassouras.

⁴Acadêmico de medicina, Universidade de Vassouras.

⁵Docente da Universidade de Vassouras.

ABSTRACT: Osteoporosis is a common metabolic bone disease characterized by reduced bone strength and an increased risk of fragility fractures. Despite its clinical and social burden, it remains widely underdiagnosed, particularly before the first fracture occurs. This integrative review critically analyzed scientific evidence on the application of artificial intelligence to opportunistic screening for osteoporosis, low bone mineral density, and vertebral fractures using routine computed tomography. PubMed/MEDLINE, SciELO, and LILACS/BVS were searched for original studies published from January 2021 to July 2026 in Portuguese, English, or Spanish, involving adults and artificial intelligence, machine learning, deep learning, radiomics, or automated algorithms applied to body CT. A total of 1,432 records were identified, and 18 original studies were included in the final synthesis. The models showed promising performance for automated bone mineral density estimation, osteoporosis and osteopenia classification, vertebral fracture detection, and future fracture risk prediction. However, retrospective designs predominated, with methodological heterogeneity and limited external validation. Artificial intelligence shows substantial potential as a support tool for opportunistic screening, although widespread adoption requires standardization, multicenter validation, and evidence of clinical impact.

Keywords: Osteoporosis. Artificial intelligence. Computed tomography.

RESUMEN: La osteoporosis es una enfermedad osteometabólica frecuente, caracterizada por disminución de la resistencia ósea y mayor riesgo de fracturas por fragilidad. A pesar de su impacto clínico y social, continúa ampliamente infradiagnosticada, especialmente antes de la primera fractura. Esta revisión integrativa analizó críticamente la evidencia científica sobre la aplicación de la inteligencia artificial al cribado oportunista de osteoporosis, baja densidad mineral ósea y fracturas vertebrales mediante tomografías computarizadas de rutina. Se buscaron estudios originales en PubMed/MEDLINE, SciELO y LILACS/BVS, publicados entre enero de 2021 y julio de 2026, en portugués, inglés o español, con población adulta y uso de inteligencia artificial, aprendizaje automático, aprendizaje profundo, radiómica o algoritmos automatizados aplicados a la TC corporal. Se identificaron 1.432 registros y 18 estudios originales integraron la síntesis final. Los modelos mostraron resultados prometedores para estimar la densidad mineral ósea, clasificar osteoporosis y osteopenia, detectar fracturas vertebrales y predecir el riesgo futuro de fractura. Sin embargo, predominaron diseños retrospectivos, con heterogeneidad metodológica y validación externa limitada. La inteligencia artificial presenta un alto potencial como herramienta de apoyo, aunque su adopción amplia requiere estandarización, validación multicéntrica y demostración de impacto clínico.

Palabras clave: Osteoporosis. Inteligencia artificial. Tomografía computarizada.

INTRODUÇÃO

A osteoporose constitui uma das doenças osteometabólicas mais prevalentes e representa importante problema de saúde pública em razão de seu caráter progressivo e da associação com fraturas por fragilidade, incapacidade funcional, perda da qualidade de vida e aumento da mortalidade. A doença afeta centenas de milhões de pessoas, especialmente mulheres após a

menopausa e idosos, e sua carga tende a crescer paralelamente ao envelhecimento populacional (GBD 2019 FRACTURE COLLABORATORS, 2021; KANIS JA, et al., 2021).

As fraturas por fragilidade representam a principal consequência clínica da osteoporose. Fraturas vertebrais, em particular, podem permanecer assintomáticas ou não reconhecidas, retardando o diagnóstico e reduzindo as oportunidades de intervenção precoce. A persistência de lacunas no rastreamento e no tratamento após a primeira fratura demonstra que a identificação de indivíduos de risco ainda é insuficiente em diferentes sistemas de saúde (LEBOFF MS, et al., 2022).

A absorciometria por dupla emissão de raios X (DXA) permanece como método de referência para avaliação da densidade mineral óssea. Entretanto, limitações relacionadas à disponibilidade, acesso desigual, baixa solicitação em indivíduos assintomáticos e adesão insuficiente aos programas de rastreamento contribuem para o subdiagnóstico. Paralelamente, grande número de pacientes é submetido a exames tomográficos por indicações oncológicas, cardiovasculares, respiratórias, traumáticas ou abdominais, gerando imagens capazes de fornecer informações adicionais sobre a saúde óssea.

O rastreamento oportunista consiste no aproveitamento de exames realizados por outras indicações para extrair informações clinicamente relevantes sem nova exposição à radiação. Nesse contexto, a tomografia computadorizada permite avaliar atenuação vertebral, densidade mineral óssea, arquitetura óssea e presença de fraturas. A incorporação de inteligência artificial amplia esse potencial ao automatizar a localização e a segmentação vertebral, a extração de características quantitativas, a classificação de osteoporose e a identificação de fraturas.

Modelos baseados em aprendizado de máquina, aprendizado profundo, radiômica e redes neurais convolucionais têm sido aplicados a tomografias torácicas, abdominais, lombares, de quadril e de baixa dose. Além da estimativa da densidade mineral óssea, estudos recentes exploraram a predição de fraturas futuras por meio da integração de características ósseas e musculares, expandindo a aplicação da inteligência artificial de uma tarefa diagnóstica para a estratificação prognóstica (KONG SH, et al., 2024; KONG SH, et al., 2026).

Apesar do crescimento acelerado da produção científica, os estudos diferem quanto ao tipo de tomografia, padrões de referência, arquiteturas computacionais, populações, métricas e estratégias de validação. A maioria das evidências deriva de delineamentos retrospectivos e

populações asiáticas, com menor representação de contextos latino-americanos e escassez de avaliações sobre impacto clínico, custo-efetividade e integração aos fluxos radiológicos.

Diante desse cenário, o objetivo desta revisão integrativa foi analisar criticamente as evidências científicas publicadas entre 2021 e 2026 acerca da aplicação da inteligência artificial no rastreamento oportunista da osteoporose, da baixa densidade mineral óssea e das fraturas vertebrais em tomografias computadorizadas de rotina, descrevendo os principais modelos empregados, seu desempenho, limitações metodológicas e potencial de aplicação clínica.

MÉTODOS

Trata-se de revisão integrativa da literatura, conduzida a partir da seguinte pergunta norteadora: em adultos submetidos a tomografias computadorizadas de rotina por diferentes indicações clínicas, a aplicação de inteligência artificial permite identificar osteoporose, baixa densidade mineral óssea ou fraturas vertebrais de forma precisa e clinicamente útil?

A busca foi realizada nas bases PubMed/MEDLINE, SciELO e LILACS/BVS em 9 de julho de 2026, considerando publicações entre 1º de janeiro de 2021 e a data da busca, nos idiomas português, inglês e espanhol. A estratégia foi estruturada em quatro eixos: osteoporose ou baixa densidade mineral óssea; inteligência artificial e métodos computacionais; tomografia computadorizada; e rastreamento oportunista ou detecção incidental.

4

Na PubMed/MEDLINE, a estratégia principal combinou os termos Osteoporosis, osteopenia, bone mineral density, BMD, vertebral fracture, Artificial Intelligence, machine learning, deep learning, convolutional neural network, radiomics, automated, algorithm, Tomography, X-Ray Computed, computed tomography, routine CT, chest CT, abdominal CT, opportunistic, screening, incidental e routine imaging. Foram executadas ainda quatro buscas complementares. Na SciELO, foram realizadas 25 estratégias adaptadas aos três idiomas. Na LILACS/BVS, foram executadas 30 estratégias livres e cinco combinações com descritores DeCS/MeSH.

Foram incluídos estudos originais observacionais, retrospectivos, prospectivos, multicêntricos, de desenvolvimento ou validação de modelos e de validação diagnóstica, desde que envolvessem adultos, tomografia corporal de rotina ou potencialmente oportunista e aplicação de inteligência artificial, aprendizado de máquina, aprendizado profundo, radiômica, redes neurais, segmentação ou algoritmo automatizado para avaliar osteoporose, osteopenia, densidade mineral óssea ou fraturas vertebrais.

Foram excluídos estudos fora do período ou dos idiomas definidos, exclusivamente pediátricos, realizados em animais, cadáveres ou phantoms sem aplicação clínica, baseados apenas em DXA, radiografia, ressonância, ultrassom ou tomografia odontológica, além de estudos sem inteligência artificial, sem relação com o desfecho ósseo, editoriais, cartas, protocolos, relatos de caso, resumos de congresso e revisões como estudos principais. Revisões e estudos contextuais foram utilizados apenas na fundamentação teórica.

Os registros foram organizados por base e deduplicados por título, autores, ano, periódico, DOI, PMID ou identificador da base. A seleção ocorreu por título e resumo, seguida de avaliação detalhada de elegibilidade. Para cada estudo incluído foram extraídos autores, ano, país, periódico, desenho, unidade amostral, tipo de tomografia, padrão de referência, modelo de inteligência artificial, tarefa, desfecho, métricas de desempenho, validação externa e limitações. Os estudos foram agrupados em estimativa de densidade mineral óssea, classificação de osteoporose/osteopenia, detecção de fraturas e predição de risco futuro.

A qualidade metodológica foi apreciada de forma qualitativa, considerando delineamento, multicentricidade, robustez do padrão de referência, tamanho amostral e presença de validação externa. Em razão da heterogeneidade clínica e metodológica, realizou-se síntese narrativa. Por utilizar dados secundários publicados, o estudo não necessitou de apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa.

5

RESULTADOS

As buscas identificaram 1.432 registros. Foram removidos 939 registros antes da triagem nas bases de origem e uma duplicata entre bases, resultando em 492 registros únicos. Após a leitura de títulos e resumos, 467 registros foram excluídos. Vinte e dois artigos candidatos foram avaliados detalhadamente, quatro foram excluídos e 18 estudos originais compuseram a síntese final. Oito publicações foram mantidas como apoio teórico ou contextual (Figura 1).

Os estudos incluídos foram publicados entre 2023 e 2026, com predomínio de pesquisas realizadas na China e na Coreia do Sul. As amostras variaram de menos de cem participantes a 538.946 tomografias de 283.499 pacientes. A unidade de análise incluiu pacientes, exames, conjuntos de imagens ou vértebras. As modalidades mais frequentes foram tomografias abdominais e torácicas, incluindo protocolos de baixa dose.

Os padrões de referência incluíram DXA, QCT, densidade mineral óssea manual, atenuação em unidades Hounsfield, avaliação radiológica e ocorrência de fraturas. Os

algoritmos compreenderam redes neurais convolucionais, VB-Net, ResNet, modelos semissupervisionados, radiômica, SVM, regressão empilhada, modelos multitarefa e softwares proprietários.

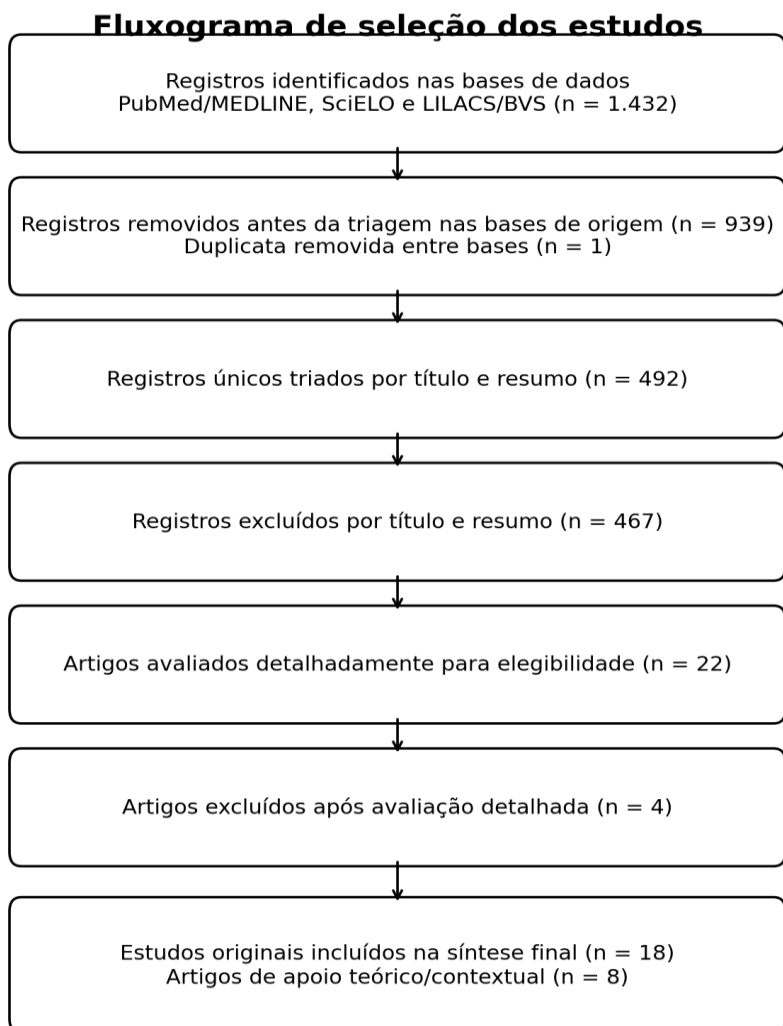


Figura 1 – Fluxograma do processo de identificação e seleção dos estudos.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 1 – Caracterização dos estudos incluídos na revisão integrativa (n = 18).

Autor/ano	País	Tipo de TC	Modelo	Desfecho	Resultado principal
Westerhoff et al., 2025	EUA/Alemanha	TC torácica/abdominal	CNN/deep learning	Atenuação vertebral	Concordância >99% entre ROI automática e manual.

Autor/ano	País	Tipo de TC	Modelo	Desfecho	Resultado principal
Dai et al., 2023	China	TC abdominal	Radiômica + regressão	Predição de DMO	$r=0,932$; R^2 ajustado= $0,830$.
Liu et al., 2025	China	TC abdominal	Radiômica + ML	Osteoporose	AUC $0,960$ interna e $0,905$ externa.
Wang et al., 2024	China	LDCT torácica	VB-Net radiômica +	Baixa DMO	Dice $0,988/0,939$; AUC $\sim 0,93/\sim 0,91$.
Li et al., 2025	China	TC torácica 100 kV	CNN/VB-Net	DMO/osteoporose	R^2 $0,970-0,994$; AUCs elevadas.
Oh et al., 2024a	Coreia do Sul	TC abdominal	DL semissupervisionado	Predição de DMO	MAE $0,066$ e $r=0,907$ por indivíduo.
Kong et al., 2024	Coreia do Sul	TC abdominal	Attention CNN-RNN	Fratura futura	AUROC externa $0,827$.
Kong et al., 2026	Coreia do Sul	TC abdominal	DL multitarefa	Fratura/risco	AUROC $0,82$ interna e $0,80$ externa.
Tian et al., 2024	China	TC lombar	3D V-Net + ResNet	Fratura vertebral	AUC $0,986$ interna e $0,981$ externa.
Fang et al., 2024a	China	TC de quadril	Radiômica + ML	Osteoporose	AUC radiômica $\sim 0,919$.
Fang et al., 2024b	China	TC de tórax	Radiômica + DL	Osteoporose	AUC $0,906$ para DL 3D.
Lin et al., 2024	China	TC de tórax	Radiômica + SVM	Osteoporose	AUC externa $0,807$ para nomograma.
Tong et al., 2024	China	LDCT torácica	Radiômica + ResNet	Osteoporose	Dice $0,96$; desempenho comparável.
Park et al., 2024	Coreia do Sul	TC multi-protocolo	DL-BMD	Baixa DMO	$r=0,953$; AUC $0,790/0,769$ vs DXA.
Oh et al., 2024b	Coreia do Sul	TC de rotina	DL-QCT	DMO	$r\sim 0,96$; AUC $0,847/0,770$ vs DXA.
Kang et al., 2023	Coreia do Sul	TC em L1	CNN explicável	DMO	$r=0,90$; F_1 máximo= $0,875$.

Autor/ano	País	Tipo de TC	Modelo	Desfecho	Resultado principal
Serpa et al., 2026	Brasil/EUA	TC abdominal	2D U-Net/ResNet34	Osteoporose	AUC interna e externa. 0,96 e 0,82
Pereira et al., 2024	Brasil	TC torácica/abdominal	HealthVCF	Fratura vertebral	Acurácia 89,6%; especificidade 92,7%.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Os estudos de estimativa de densidade mineral óssea apresentaram correlações elevadas com DXA, QCT ou mensuração manual. Westerhoff et al. (2025) demonstraram concordância superior a 99% na mensuração automatizada de atenuação, enquanto Dai et al. (2023) observaram correlação de 0,932. Em modelos avaliados diretamente contra DXA, o desempenho foi mais variável, evidenciando que o padrão de referência influencia a interpretação das métricas.

Na classificação de osteoporose e osteopenia, Liu et al. (2025) alcançaram AUC de 0,905 na validação externa. Em tomografias de tórax de baixa dose, modelos que combinaram segmentação automatizada e radiômica ou deep learning frequentemente apresentaram AUCs superiores a 0,90. Entretanto, não se identificou superioridade uniforme de uma arquitetura em todos os cenários.

Nos estudos de detecção de fraturas, Tian et al. (2024) apresentaram AUC externa de 0,981, embora as fraturas não tenham sido restritas à etiologia osteoporótica. Pereira et al. (2024) relataram acurácia de 89,6%, sensibilidade de 73,8%, especificidade de 92,7% e identificação de 38 fraturas adicionais não descritas pelo radiologista geral.

Os modelos prognósticos de Kong et al. utilizaram características ósseas e musculares para prever fraturas futuras, com AUROC externa de 0,827 no estudo de 2024 e 0,80 no trabalho de 2026. A possível sobreposição parcial entre coortes foi considerada na interpretação dos resultados.

A apreciação metodológica revelou predomínio de estudos retrospectivos. Os trabalhos multicêntricos com validação externa e padrão de referência robusto apresentaram maior confiabilidade relativa, enquanto estudos de centro único, sem validação externa ou com amostras pequenas foram interpretados com maior cautela.

Tabela 2 – Síntese da qualidade metodológica dos estudos incluídos.

Classificação qualitativa	Estudos representativos	Justificativa
Maior robustez relativa	Liu et al.; Wang et al.; Park et al.; Serpa et al.	Multicentricidade, validação externa e padrão de referência estabelecido.
Robustez intermediária	Westerhoff et al.; Li et al.; Oh et al.; Kong et al.; Tian et al.; Tong et al.	Amostras adequadas ou validação parcial, porém delineamento retrospectivo e/ou limitações de generalização.
Maior vulnerabilidade	Dai et al.; Fang et al.; Lin et al.; Kang et al.; Oh et al. (DL-QCT); Pereira et al.	Centro único, amostra pequena/incerta, ausência de validação externa ou software proprietário.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

DISCUSSÃO

A presente revisão demonstra convergência quanto à capacidade de algoritmos de inteligência artificial em extrair informações relacionadas à saúde óssea de tomografias obtidas para outras finalidades. Os estudos abrangeram estimativa de densidade mineral óssea, classificação de osteoporose e osteopenia, detecção de fraturas vertebrais e predição de risco futuro, revelando que o rastreamento oportunista pode ultrapassar a simples mensuração de atenuação e incorporar tarefas diagnósticas e prognósticas.

A elevada correlação observada em modelos de estimativa de densidade mineral óssea sugere que a segmentação e a análise automatizadas podem reduzir a dependência de mensurações manuais. Entretanto, nem todos os estudos avaliaram o mesmo desfecho. Parte utilizou DXA, enquanto outros empregaram QCT, densidade manual, unidades Hounsfield ou leitura radiológica. Essa heterogeneidade explica parte da variação das métricas e impede interpretar uma AUC ou correlação isoladamente como medida universal de desempenho.

Também foi observada diversidade das estratégias computacionais, incluindo redes convolucionais, radiômica, SVM, modelos híbridos e aprendizado multitarefa. Não se identificou superioridade inequívoca de uma arquitetura específica. O desempenho parece depender principalmente da qualidade e diversidade dos dados, da definição do desfecho e da robustez da validação. Em Tong et al. (2024), por exemplo, radiômica e deep learning apresentaram desempenho globalmente comparável, mostrando que modelos mais complexos não são necessariamente superiores em todos os cenários.

A detecção de fraturas vertebrais apresenta especial relevância clínica, pois essas alterações frequentemente permanecem não relatadas em exames solicitados por outros motivos. O estudo brasileiro de Pereira et al. (2024) demonstrou que a IA pode complementar a avaliação do radiologista e recuperar oportunidades diagnósticas. Contudo, alguns estudos incluíram fraturas sem confirmação de etiologia osteoporótica, razão pela qual esse subgrupo deve ser interpretado como evidência complementar de manifestações potencialmente relacionadas à fragilidade óssea.

Os modelos prognósticos que integram características de osso e músculo representam avanço conceitual importante, ao deslocarem o uso da inteligência artificial da classificação estática para a predição de eventos futuros. Apesar de resultados favoráveis em comparação com modelos clínicos, a possível sobreposição de coortes e o predomínio de populações coreanas limitam a independência e a generalização dessas evidências.

A qualidade metodológica constitui a principal restrição do campo. A maioria dos trabalhos é retrospectiva, e parte foi realizada em centro único, com validação externa ausente ou limitada. Resultados muito elevados em conjuntos internos podem refletir sobreajuste ou particularidades do protocolo local. Assim, estudos multicêntricos, com diversidade de fabricantes, protocolos e populações, fornecem evidência mais próxima das condições reais de implementação.

10

A distribuição geográfica também merece atenção. China e Coreia do Sul concentraram a maior parte da produção, enquanto a América Latina apresentou poucos estudos. Pereira et al. (2024) e Serpa et al. (2026) demonstram viabilidade em cenários brasileiros, mas ainda são necessárias validações nacionais em diferentes níveis de atenção, redes públicas e equipamentos heterogêneos.

Apesar do desempenho diagnóstico promissor, poucos estudos avaliaram impacto sobre início de tratamento, encaminhamento para DXA, prevenção de fraturas, qualidade de vida ou custo-efetividade. A utilidade clínica de um modelo não depende apenas da acurácia, mas também da integração ao sistema de informação radiológica, clareza dos alertas, interpretabilidade, monitoramento de desempenho e definição de responsabilidades na tomada de decisão.

O rastreamento oportunista por inteligência artificial pode ser particularmente útil em contextos de acesso limitado à DXA, pois utiliza imagens já disponíveis sem exposição

adicional. Entretanto, os algoritmos devem ser compreendidos como ferramentas de apoio, destinadas a selecionar indivíduos para avaliação clínica e confirmação diagnóstica, e não como substitutos universais dos métodos estabelecidos.

Como limitações desta revisão, destacam-se a heterogeneidade dos estudos, a impossibilidade de meta-análise, a potencial sobreposição de populações e a inclusão complementar de trabalhos sobre fraturas vertebrais não necessariamente osteoporóticas. Além disso, embora as buscas tenham abrangido três bases, a literatura internacional encontra-se predominantemente indexada na PubMed/MEDLINE, com baixa recuperação nas bases latino-americanas.

CONCLUSÃO

A inteligência artificial aplicada às tomografias computadorizadas de rotina apresenta elevado potencial para ampliar o rastreamento oportunista da osteoporose, da baixa densidade mineral óssea e das fraturas vertebrais. Os estudos demonstraram capacidade de estimar densidade, classificar alterações, detectar fraturas e predizer risco futuro a partir de exames realizados por outras indicações.

Entretanto, o predomínio de delineamentos retrospectivos, a heterogeneidade dos padrões de referência e a validação externa incompleta limitam a incorporação ampla dessas ferramentas. Estudos prospectivos multicêntricos devem avaliar generalização, integração ao fluxo assistencial, impacto sobre diagnóstico e tratamento, prevenção de fraturas e custo-efetividade. Até que essas evidências sejam consolidadas, a inteligência artificial deve ser utilizada como ferramenta complementar de apoio à decisão clínica.

11

REFERÊNCIAS

1. DAI H, et al. Radiomics and stacking regression model for measuring bone mineral density using abdominal computed tomography. *Acta Radiologica*, 2023; 64(1).
2. FANG K, et al. Unveiling osteoporosis through radiomics analysis of hip CT imaging. *Academic Radiology*, 2024; 31(3): 1003-1013.
3. FANG K, et al. A comprehensive approach for osteoporosis detection through chest CT analysis and bone turnover markers: harnessing radiomics and deep learning techniques. *Frontiers in Endocrinology*, 2024; 15: 1296047.

4. GBD 2019 FRACTURE COLLABORATORS. Global, regional, and national burden of bone fractures in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Healthy Longevity*, 2021; 2(9): e580-e592.
5. KANG JW, et al. Prediction of bone mineral density in CT using deep learning with explainability. *Frontiers in Physiology*, 2023; 13: 1061911.
6. KANIS JA, et al. SCOPE 2021: a new scorecard for osteoporosis in Europe. *Archives of Osteoporosis*, 2021; 16: 82.
7. KONG SH, et al. A computed tomography-based fracture prediction model with images of vertebral bones and muscles by employing deep learning: development and validation study. *Journal of Medical Internet Research*, 2024; 26: e48535.
8. KONG SH, et al. Enhancing vertebral fracture prediction using multitask deep learning computed tomography imaging of bone and muscle. *European Radiology*, 2026; 36: 4177-4186.
9. LEBOFF MS, et al. The clinician's guide to prevention and treatment of osteoporosis. *Osteoporosis International*, 2022; 33: 2049-2102.
10. LI Y, et al. Deep learning-enhanced opportunistic osteoporosis screening in 100 kV low-voltage chest CT: a novel way toward bone mineral density measurement and radiation dose reduction. *Academic Radiology*, 2025.
11. LIN X, et al. Utilizing radiomics techniques to isolate a single vertebral body from chest CT for opportunistic osteoporosis screening. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2024; 25: 785.
12. LIU Z, et al. Radiomics and machine learning for osteoporosis detection using abdominal computed tomography: a retrospective multicenter study. *BMC Medical Imaging*, 2025; 25: 235.
13. OH J, et al. End-to-end semi-supervised opportunistic osteoporosis screening using computed tomography. *Endocrinology and Metabolism*, 2024; 39(3): 500-510.
14. OH S, et al. Evaluation of deep learning-based quantitative computed tomography for opportunistic osteoporosis screening. *Scientific Reports*, 2024; 14: 363.
15. PARK H, et al. Automated deep learning-based bone mineral density assessment for opportunistic osteoporosis screening using various CT protocols with multi-vendor scanners. *Scientific Reports*, 2024; 14: 25014.
16. PEREIRA RFB, et al. Accuracy of an artificial intelligence algorithm for detecting moderate-to-severe vertebral compression fractures on abdominal and thoracic computed tomography scans. *Radiologia Brasileira*, 2024; 57.
17. SERPA AS, et al. Advancing osteoporosis opportunistic screening: multicenter validation of a deep learning algorithm using abdominal CT scans. *Abdominal Radiology*, 2026; 51: 2631-2641.

18. TIAN J, et al. Development of a deep learning model for detecting lumbar vertebral fractures on CT images: an external validation. *European Journal of Radiology*, 2024; 180: 111685.
19. TONG X, et al. Automatic osteoporosis screening system using radiomics and deep learning from low-dose chest CT images. *Bioengineering*, 2024; 11(1): 50.
20. WANG S, et al. Combining deep learning and radiomics for automated, objective, comprehensive bone mineral density assessment from low-dose chest computed tomography. *Academic Radiology*, 2024; 31(3): 1180-1188.
21. WESTERHOFF M, et al. Deep learning-based opportunistic CT osteoporosis screening and the establishment of normative values. *Radiology*, 2025; 317(2): e250917.
22. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Fragility fractures. Geneva: WHO, 2024. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/fragility-fractures>. Acesso em: 13 jul. 2026.
23. INTERNATIONAL OSTEOPOROSIS FOUNDATION. Epidemiology of osteoporosis and fragility fractures. Nyon: IOF, 2024. Disponível em: <https://www.osteoporosis.foundation/facts-statistics/epidemiology-of-osteoporosis-and-fragility-fractures>. Acesso em: 13 jul. 2026.
24. U.S. PREVENTIVE SERVICES TASK FORCE. Osteoporosis to prevent fractures: screening. Rockville: USPSTF, 2025. Disponível em: <https://www.uspreventiveservicestaskforce.org/>. Acesso em: 13 jul. 2026.
25. INTERNATIONAL SOCIETY FOR CLINICAL DENSITOMETRY. Official positions: adult. Middletown: ISCD, 2023. Disponível em: <https://iscd.org/learn/official-positions/adult-positions/>. Acesso em: 13 jul. 2026.