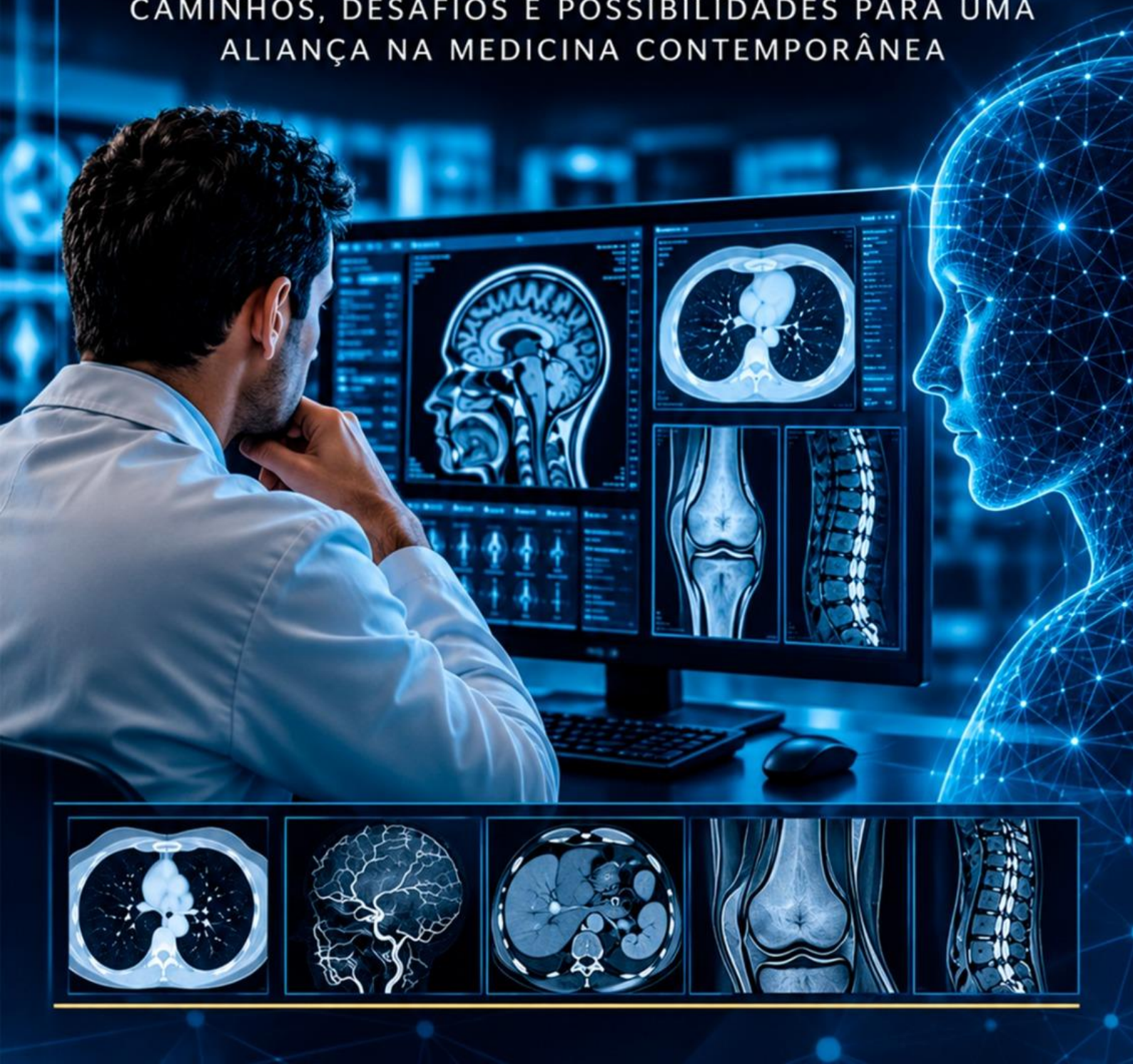
SEVEN
EDITORA
2026

JOÃO PEDRO COELHO SANTOS
AUTOR E ORGANIZADOR

RADIOLOGIA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

CAMINHOS, DESAFIOS E POSSIBILIDADES PARA UMA ALIANÇA NA MEDICINA CONTEMPORÂNEA



SEVEN
EDITORA
2026

JOÃO PEDRO COELHO SANTOS
AUTOR E ORGANIZADOR

RADIOLOGIA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

CAMINHOS, DESAFIOS E POSSIBILIDADES PARA UMA ALIANÇA NA MEDICINA CONTEMPORÂNEA





EDITORA-CHEFE
Profa. Dra. Samantha Peixoto Pereira

EDITOR-EXECUTIVO
Fernanda Chaves Aloisio
Nathan Albano Valente

AUTOR & ORGANIZADOR
João Pedro Coelho Santos

PRODUÇÃO EDITORIAL
Seven Publications Company

EDIÇÃO DE ARTE
Evellyn Thais de Souza

EDIÇÃO DE TEXTO
Fernanda Chaves Aloisio

BIBLIOTECÁRIA
Bruna Heller

IMAGENS DE CAPA
Evellyn Thais de Souza

2026 by Seven Editora
Copyright © Seven Editora
Copyright do Texto © 2026 Os Autores
Copyright da Edição © 2026 Seven Editora

Os autores são exclusivamente responsáveis pelo conteúdo da obra, pela apresentação dos dados e por sua correção e confiabilidade. As opiniões expressas não representam necessariamente a posição oficial da Seven Publications Company. São permitidos o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de qualquer forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Seven Publications Company está comprometida com a garantia da a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação.
Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

O conteúdo deste livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional

CONSELHO EDITORIAL
Adriana Barni Truccolo - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Adriana Barretta Almeida - Universidade Federal do Paraná
Alessandre Gomes de Lima - Faculdade de Medicina da Universidade do Porto
Anderson Nunes da Silva - Universidade Federal do Norte do Tocantins
Antonio da Costa Cardoso Neto - Universidade de Flores, Buenos Aires
Antônio Alves de Fontes-Júnior - Universidade Cruzeiro do Sul
Ariane Fernandes da Conceição - Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Arnaldo Oliveira Souza Júnior - Universidade Federal do Piauí, CEAD
Caio Vinicius Efigenio Formiga - Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Charles Henrique Andrade de Oliveira - Universidade de Pernambuco
Egas José Armando - Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique
Inaldo Kley do Nascimento Moraes - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Irlane Maia de Oliveira - Universidade Federal de Mato Grosso
Janyel Trevisol - Universidade Federal de Santa Maria
Jorge Fernando Silva de Menezes - Universidade de Aveiro
Jorge Luís Pereira Cavalcante - Fundação Universitária Iberoamericana
Kleber Farinazo Borges - Universidade de Brasília
Luiz Gonzaga Lapa Junior - Universidade de Brasília
Mara Lucia da Silva Ribeiro - Universidade Federal de São Paulo
Marcelo Silva de Carvalho - Universidade Federal de Alfenas
Marcos Garcia Costa Morais - Universidade Estadual da Paraíba
Maria Gorete Valus - Universidade Estadual de Campinas
Mônica Maria de Almeida Brainer - Instituto Federal de Goiás, Campus Ceres
Moacir Silva de Castro - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Paulo Roberto Duailibe Monteiro - Universidade Federal Fluminense
Pedro Henrique Ferreira Marçal - Universidade Vale do Rio Doce
Rafael Braga Esteves - Universidade de São Paulo
Telma Regina Stroparo - Universidade Estadual de Ponta Grossa
Valéria Raquel Alcantara Barbosa - Fundação Oswaldo Cruz
Wanderson Santos de Farias - Universidade do Desenvolvimento Sustentável
Yuni Saputri M.A - Universidade Nalanda, Índia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

E61

Radiologia e Inteligência Artificial [recurso eletrônico] : Caminhos, Desafios e Possibilidades para uma Aliança na Medicina Contemporânea / João Pedro Coelho Santos [organizador]. – São José dos Pinhais, PR: Editora Seven, 2026.
Dados eletrônicos (1 PDF).

ISBN 978-65-6109-499-3

1. Radiologia. 2. Inteligência. 3. Diagnóstico. I. Santos, João Pedro Coelho. II. Título.

CDU 001.8

Índice para catálogo sistemático:
1 Medicina e Saúde 001.8

Bruna Heller - Bibliotecária - CRB10/2348

DOI: 10.56238/livrosindi2026145-001

Seven Publications Company
CNPJ: 43.789.355/0001-14
editora@sevenevents.com.br
São José dos Pinhais/PR

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Carlos e Carla.

Ao meu pai, Carlos, médico, que me ensinou, muito antes da faculdade, a admirar a Medicina. Foi por meio de seu exemplo que aprendi a enxergar nessa profissão não apenas uma escolha, mas um propósito.

À minha mãe, Carla, apaixonada pela pesquisa e pelo conhecimento, que me ensinou a questionar, investigar e compreender que a ciência avança quando temos a coragem de buscar novas respostas.

De um, herdei o amor pela Medicina. Da outra, a inquietação pela pesquisa.

E foi do encontro dessas duas inspirações que nasceu esta obra.

EPÍGRAFE

"Eu não pensei; investiguei."

Wilhelm Conrad Röntgen

APRESENTAÇÃO

A conclusão da graduação em Medicina representa o encerramento de uma etapa importante, mas também o início de novas escolhas, responsabilidades e expectativas. Ao longo da formação médica, somos apresentados a diferentes especialidades, cada uma com suas particularidades, desafios e possibilidades de atuação. Entretanto, à medida que nos aproximamos do exercício profissional, surge a necessidade de refletir não apenas sobre aquilo que desejamos fazer, mas também sobre o tipo de médico que pretendemos nos tornar.

Foi nesse momento de reflexão sobre o meu futuro profissional que a Radiologia e o Diagnóstico por Imagem passaram a despertar meu interesse de maneira mais intensa. A possibilidade de compreender o organismo humano por meio das imagens, associando conhecimento anatômico, raciocínio clínico e recursos tecnológicos, fez com que eu começasse a enxergar nessa especialidade um caminho possível para minha trajetória médica. Quanto mais procurava conhecer sua rotina, suas áreas de atuação e suas perspectivas, mais percebia que a Radiologia ocupava uma posição singular na Medicina contemporânea.

Esse interesse, inicialmente relacionado à escolha da residência médica, acabou me conduzindo a uma questão que eu não havia imaginado encontrar com tanta intensidade. Durante minhas leituras e pesquisas sobre a especialidade, deparei-me repetidamente com discussões acerca dos avanços da inteligência artificial e de sua crescente utilização na interpretação de imagens médicas. O que começou como uma busca por informações sobre uma possível carreira transformou-se, gradualmente, em uma inquietação sobre o próprio futuro da profissão que eu pretendia seguir.

Confesso que, em um primeiro momento, essas discussões despertaram em mim sentimentos distintos. De um lado, o entusiasmo diante das possibilidades oferecidas por tecnologias capazes de identificar alterações, reconhecer padrões e contribuir para diagnósticos cada vez mais precisos. De outro, a preocupação natural de quem está iniciando a vida profissional e se depara com previsões de que determinadas atividades médicas poderão ser profundamente modificadas ou até substituídas por sistemas automatizados.

Diante desse cenário, comecei a me fazer perguntas que, acredito, também estejam presentes nas reflexões de muitos estudantes e médicos interessados pela Radiologia. Estaria eu escolhendo uma especialidade cujo futuro poderia ser ameaçado pelo avanço tecnológico? Até que ponto um algoritmo seria capaz de substituir a experiência, o raciocínio clínico e a responsabilidade de um médico radiologista? E, sobretudo, seria realmente necessário compreender a inteligência artificial como uma concorrente do profissional, ou haveria espaço

para uma relação de complementaridade entre o conhecimento humano e os recursos computacionais?

À medida que procurava respostas, percebi que minhas dúvidas não poderiam ser esclarecidas apenas por opiniões, previsões ou discursos sobre o futuro da Medicina. Era necessário compreender o que a literatura científica efetivamente demonstrava, quais aplicações já apresentavam resultados consistentes e quais limitações ainda impediam que a inteligência artificial assumisse determinadas responsabilidades na prática clínica. Foi assim que uma preocupação inicialmente pessoal passou a adquirir contornos de investigação científica.

Esse processo de aprofundamento também modificou minha maneira de compreender a própria Radiologia. Passei a perceber que sua importância não se limita à identificação de alterações em exames de imagem. O trabalho do radiologista envolve interpretação contextualizada, correlação com informações clínicas, comunicação com outros profissionais e participação em decisões que podem influenciar diretamente a condução terapêutica e a vida dos pacientes. Por essa razão, discutir o futuro da especialidade exige considerar dimensões que ultrapassam a capacidade técnica de qualquer sistema computacional.

Foi justamente essa compreensão que me motivou a transformar minhas inquietações em uma obra. Como médico em início de trajetória, não tenho a pretensão de apresentar respostas definitivas sobre uma área que continua evoluindo em ritmo acelerado. Tampouco pretendo minimizar os desafios que a inteligência artificial representa para a formação e o exercício da Radiologia. Meu propósito é reunir conhecimentos, examinar evidências científicas e construir uma reflexão que possa contribuir para o entendimento das transformações em curso.

Ao longo dos capítulos, convido o leitor a percorrer comigo esse caminho de investigação, partindo da evolução histórica da Radiologia até as aplicações contemporâneas da inteligência artificial, suas repercussões sobre o trabalho do radiologista, os desafios éticos e jurídicos envolvidos e as perspectivas para a formação dos futuros especialistas. Mais do que apresentar tecnologias, busco compreender como elas poderão ser incorporadas à prática médica sem que se percam os fundamentos humanos, científicos e éticos que sustentam a profissão.

Escrever este livro também representa, para mim, uma maneira de amadurecer uma escolha profissional. A pesquisa não eliminou todas as minhas dúvidas, mas ampliou minha compreensão sobre a especialidade e me permitiu perceber que as transformações tecnológicas, embora provoquem incertezas, também podem abrir caminhos para novas formas de exercer a Medicina. Nesse sentido, passei a compreender que o futuro da Radiologia não depende apenas daquilo que as máquinas serão capazes de realizar, mas também da capacidade dos médicos de aprender, adaptar-se e utilizar criticamente os recursos disponíveis.

Ao concluir esta apresentação, reconheço que a inquietação que deu origem ao livro permanece, mas já não se apresenta da mesma maneira. O receio inicial diante da possibilidade de substituição profissional deu lugar ao desejo de compreender como a inteligência artificial poderá contribuir para uma Radiologia mais precisa, eficiente e comprometida com o cuidado humano.

A Radiologia despertou em mim o desejo de seguir uma especialidade. A inteligência artificial trouxe dúvidas sobre o futuro dessa escolha. E foi na pesquisa científica que encontrei uma maneira de transformar essas dúvidas em conhecimento.

Mais do que compreender o futuro da Radiologia, esta obra representa o início da minha própria caminhada em direção a ele.

João Pedro Coelho Santos

RESUMO

A incorporação da inteligência artificial à medicina contemporânea tem provocado transformações significativas nos processos de diagnóstico e organização da assistência à saúde, especialmente na Radiologia e Diagnóstico por Imagem. A crescente capacidade dos sistemas computacionais de reconhecer padrões, processar dados e auxiliar na interpretação de exames suscita questionamentos acerca dos limites da automação, da autonomia profissional e do futuro da atuação do médico radiologista. Esta obra tem como objetivo analisar os caminhos, desafios e possibilidades da integração entre inteligência artificial e Radiologia, buscando compreender como essas tecnologias podem contribuir para o aprimoramento da prática médica sem desconsiderar o julgamento clínico, a responsabilidade profissional e o cuidado humanizado. Adota-se uma abordagem qualitativa, bibliográfica e exploratória, fundamentada na análise crítica de estudos sobre aprendizado de máquina, diagnóstico por imagem, segurança do paciente e ética médica. A discussão reconhece o potencial dos algoritmos para apoiar a detecção de alterações e a organização dos fluxos de trabalho, ao mesmo tempo em que examina limitações relacionadas à validação, à transparência, aos vieses e à proteção de dados. Sustenta-se como perspectiva de investigação que a integração responsável entre capacidades humanas e computacionais pode fortalecer a assistência radiológica, sem pressupor a substituição integral do médico. O futuro da especialidade dependerá tanto da evolução tecnológica quanto da capacidade de avaliar e incorporar essas ferramentas de modo crítico, seguro e centrado no paciente.

Palavras-chave: Radiologia; Inteligência artificial; Diagnóstico por imagem; Ética médica; Inovação tecnológica.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 16

CAPÍTULO I: DA DESCOBERTA DOS RAIOS X À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: A EVOLUÇÃO DA RADIOLOGIA E A REINVENÇÃO DO OLHAR MÉDICO 19

A medicina e a permanente transformação do conhecimento científico 19

1.2 A descoberta dos raios X: uma nova maneira de enxergar o corpo humano 21

1.3 Da radiografia à tomografia computadorizada e à ressonância magnética: a ampliação das possibilidades diagnósticas 23

1.4 A digitalização das imagens e o surgimento de uma Radiologia orientada por dados 25

1.5 Do diagnóstico auxiliado por computador ao aprendizado de máquina 27

1.6 O aprendizado profundo e a transformação da análise de imagens médicas 29

1.7 A radiômica e os caminhos para a medicina de precisão 31

1.8 A inteligência artificial e o debate sobre a substituição do radiologista 32

1.9 Considerações finais do capítulo 34

CAPÍTULO II: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA PRÁTICA RADIOLÓGICA: APLICAÇÕES CLÍNICAS, BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES 35

2.1 Da inovação tecnológica à sua incorporação na prática clínica 35

2.2 Inteligência artificial na radiografia convencional: reconhecimento de padrões e apoio à interpretação 37

2.3 Inteligência artificial na tomografia computadorizada: detecção, segmentação e análise quantitativa 39

2.4 Inteligência artificial na ressonância magnética: eficiência, reconstrução e preservação da informação diagnóstica 41

2.5 Inteligência artificial na mamografia e no rastreamento do câncer de mama 43

2.6 Radiômica, Oncologia e medicina de precisão: da imagem à informação quantitativa 44

2.7 Inteligência artificial na organização dos serviços radiológicos e na otimização dos fluxos de trabalho 46

2.8 Limitações científicas, validação e segurança dos sistemas inteligentes 48

2.9 Aplicações e desafios da inteligência artificial no contexto brasileiro 49

2.10 Considerações finais do capítulo 51

CAPÍTULO III: O RADIOLOGISTA E A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: ENTRE A INTELIGÊNCIA HUMANA E A ARTIFICIAL 53

3.1 Inteligência humana e artificial: diferentes capacidades na interpretação diagnóstica 53

3.2 O raciocínio clínico e a interpretação contextualizada das imagens 55

3.3 A complementaridade entre o médico radiologista e os sistemas inteligentes 57

3.4 Evidências científicas sobre a colaboração entre médicos e algoritmos 58

3.5 Os riscos da confiança excessiva e do viés de automação 60

3.6 Transparência, explicabilidade e avaliação crítica das recomendações 62

3.7 A comunicação médica e a dimensão humana do diagnóstico radiológico 63

3.8 Autonomia profissional e responsabilidade na utilização dos sistemas inteligentes 65

3.9 Inteligência artificial generativa e novas perspectivas de colaboração 67

3.10 Considerações finais do capítulo 68

CAPÍTULO IV: DESAFIOS ÉTICOS, JURÍDICOS E CIENTÍFICOS DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA RADIOLOGIA 70

4.1 A inovação tecnológica e os fundamentos da ética médica 70

4.2 A segurança do paciente e a confiabilidade dos sistemas inteligentes 72

4.3 Vieses algorítmicos, discriminação e desigualdades na assistência radiológica 74

4.4 Transparência, explicabilidade e confiança nos sistemas inteligentes 76

4.5 A proteção dos dados pessoais e a privacidade dos pacientes 78

4.6 Autonomia médica e responsabilidade civil, ética e profissional 80

4.7 Regulamentação sanitária da inteligência artificial na Medicina brasileira 81

4.8 Segurança da informação, integridade dos exames e infraestrutura digital 83

4.9 A inteligência artificial no Sistema Único de Saúde: inovação, equidade e responsabilidade social 85

4.10 Considerações finais do capítulo 87

CAPÍTULO V: A FORMAÇÃO DO RADIOLOGISTA E AS PERSPECTIVAS PARA O FUTURO DA ESPECIALIDADE 89

5.1 A formação médica diante das transformações tecnológicas 89

5.2 A residência médica em Radiologia e Diagnóstico por Imagem: fundamentos que permanecem indispensáveis 91

5.3 Alfabetização em inteligência artificial e desenvolvimento de competências digitais 92

5.4 A formação ética do radiologista na era dos algoritmos 94

5.5 Educação médica continuada e atualização científica permanente 96

5.6 A interdisciplinaridade como fundamento da Radiologia contemporânea 98

5.7 O futuro do trabalho radiológico: transformação das competências e identidade profissional 99

5.8 Perspectivas para a Radiologia do futuro: inovação, medicina de precisão e cuidado centrado no paciente.....101

5.9 Considerações finais do capítulo.....104

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....107

REFERÊNCIAS.....114

INTRODUÇÃO

A medicina, ao longo de sua trajetória histórica, tem sido continuamente transformada pela incorporação de conhecimentos científicos e inovações tecnológicas capazes de ampliar as possibilidades de prevenção, diagnóstico e tratamento das doenças. Entre os campos mais diretamente influenciados por essas transformações, a Radiologia ocupa posição de destaque, considerando sua relação intrínseca com o desenvolvimento de equipamentos, métodos de aquisição de imagens e sistemas de processamento de informações.

Desde a descoberta dos raios X, por Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, a visualização das estruturas internas do organismo humano passou por sucessivos avanços. A introdução da tomografia computadorizada, da ultrassonografia, da ressonância magnética e dos sistemas digitais de armazenamento e comunicação de imagens contribuiu para consolidar a Radiologia como especialidade fundamental à prática médica contemporânea.

Nas últimas décadas, uma transformação de particular relevância passou a integrar esse processo evolutivo: a aplicação da inteligência artificial aos serviços de diagnóstico por imagem. O aprendizado de máquina e o aprendizado profundo permitem desenvolver modelos capazes de executar tarefas de reconhecimento de padrões, classificação e processamento de imagens.

Litjens et al. (2017) examinaram aplicações do aprendizado profundo na análise de imagens médicas, identificando uma variedade de métodos destinados à detecção, segmentação e classificação. Hosny et al. (2018), por sua vez, discutiram aplicações da inteligência artificial na Radiologia, especialmente na análise de imagens em oncologia.

Esses avanços não significam, entretanto, que sistemas destinados a tarefas específicas possuam autonomia clínica equivalente à atuação integral de um médico especialista. A interpretação radiológica ultrapassa o reconhecimento isolado de alterações anatômicas: envolve antecedentes, hipóteses diagnósticas, características técnicas dos exames e implicações assistenciais.

A possibilidade de automatização de determinadas tarefas tem provocado debates acerca do futuro da especialidade e das competências necessárias à formação dos novos radiologistas. Essa problemática assume relevância para médicos em início de carreira, especialmente aqueles interessados na residência médica em Radiologia e Diagnóstico por Imagem.

A European Society of Radiology (2019) ressalta a importância de os radiologistas compreenderem fundamentos, aplicações e limitações da inteligência artificial. Topol (2019)

discute a convergência entre capacidades humanas e computacionais como uma possibilidade de aprimoramento da assistência médica.

A incorporação de algoritmos, contudo, não assegura automaticamente melhores resultados. A qualidade dos sistemas depende da representatividade dos dados, da validação em populações distintas, da capacidade de generalização e do monitoramento em condições reais. Kelly et al. (2019) destacam obstáculos científicos e operacionais para converter resultados experimentais promissores em benefícios clínicos efetivos.

A Organização Mundial da Saúde (2021) estabelece princípios éticos para o desenvolvimento e a utilização da inteligência artificial em saúde, entre eles a proteção da autonomia humana, a transparência, a segurança, a responsabilidade e a equidade. Na Radiologia, tais princípios são especialmente importantes porque os resultados dos exames frequentemente fundamentam decisões clínicas relevantes.

Diante dessas considerações, formula-se a questão orientadora: de que maneira a inteligência artificial pode ser integrada à Radiologia como instrumento de apoio e aprimoramento da prática médica, considerando seus benefícios, limitações e desafios científicos, éticos e profissionais?

O objetivo geral desta obra consiste em analisar os caminhos, desafios e possibilidades dessa integração. Especificamente, busca-se compreender a evolução histórica da Radiologia, apresentar aplicações dos sistemas inteligentes, discutir limites técnicos e científicos, examinar desafios éticos e profissionais e refletir sobre as competências necessárias à formação dos futuros especialistas.

A investigação é concebida como revisão bibliográfica de abordagem qualitativa e caráter exploratório. A seleção de publicações prioriza estudos científicos e documentos institucionais pertinentes, combinando trabalhos fundamentais e literatura recente. A análise privilegia a interpretação crítica das evidências disponíveis, sem pretensão de revisão sistemática ou de esgotamento da literatura científica.

A obra está organizada em cinco capítulos. O primeiro examina a evolução da Radiologia; o segundo apresenta aplicações e limitações da inteligência artificial; o terceiro discute a colaboração entre médico e sistemas inteligentes; o quarto aborda desafios éticos, jurídicos e científicos; e o quinto trata da formação médica e das perspectivas futuras da especialidade.

O debate não deve ser reduzido à oposição entre médicos e máquinas. O desafio consiste em identificar como as capacidades computacionais podem complementar o conhecimento clínico, ampliar a qualidade dos serviços e contribuir para uma medicina mais eficiente,

segura e humana. A tecnologia deve permanecer a serviço das pessoas e da responsabilidade profissional.

CAPÍTULO I

DA DESCOBERTA DOS RAIOS X À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: A EVOLUÇÃO DA RADIOLOGIA E A REINVENÇÃO DO OLHAR MÉDICO

1.1 A medicina e a permanente transformação do conhecimento científico

A história da Medicina pode ser compreendida como um processo contínuo de transformação das formas pelas quais o ser humano procura conhecer o próprio organismo, compreender as doenças e desenvolver intervenções capazes de preservar a saúde e a vida. Ao longo desse percurso, a observação clínica, inicialmente fundamentada sobretudo na identificação de manifestações externas e na descrição dos sintomas, passou a incorporar instrumentos que ampliaram progressivamente a capacidade de investigar estruturas e processos biológicos antes inacessíveis à percepção direta.

Essa transformação não ocorreu de maneira linear, tampouco resultou exclusivamente da substituição de conhecimentos antigos por descobertas recentes. Ao contrário, desenvolveu-se por meio da integração entre experiências acumuladas, investigações científicas e recursos tecnológicos que modificaram tanto os procedimentos diagnósticos quanto a própria compreensão do adoecimento.

Nesse movimento histórico, a relação entre Medicina e tecnologia adquiriu particular relevância, uma vez que os instrumentos científicos deixaram de desempenhar apenas uma função auxiliar para participar diretamente da produção do conhecimento médico. O microscópio, por exemplo, tornou possível investigar estruturas invisíveis a olho nu, enquanto o aperfeiçoamento dos métodos laboratoriais permitiu identificar alterações bioquímicas e celulares associadas a diferentes enfermidades.

De maneira semelhante, o desenvolvimento de equipamentos capazes de representar visualmente o interior do corpo humano inaugurou novas possibilidades de investigação clínica, contribuindo para que o diagnóstico se tornasse progressivamente mais preciso e fundamentado em evidências anatômicas e funcionais.

Foi nesse contexto de ampliação dos instrumentos de observação que a Radiologia surgiu e, posteriormente, consolidou-se como uma das especialidades mais diretamente relacionadas à inovação tecnológica. Diferentemente de áreas médicas cujo desenvolvimento esteve inicialmente associado à observação de manifestações clínicas ou à realização de procedimentos terapêuticos, a Radiologia nasceu de uma descoberta da Física que rapidamente encontrou aplicações na investigação das condições de saúde. Sua trajetória

evidencia, portanto, como conhecimentos produzidos em diferentes campos científicos podem convergir e transformar profundamente a prática médica.

Entretanto, compreender a importância dessa convergência exige reconhecer que a introdução de uma nova tecnologia não modifica apenas os instrumentos utilizados pelos profissionais. Ao ampliar as possibilidades de observação, cada inovação também produz novas perguntas, exige competências específicas e transforma os critérios pelos quais determinadas informações são consideradas clinicamente relevantes.

A descoberta de um método capaz de visualizar estruturas internas, por exemplo, não elimina a necessidade de compreender a anatomia e a fisiopatologia; ao contrário, torna esses conhecimentos ainda mais necessários para interpretar adequadamente aquilo que passou a ser observado.

Essa relação de interdependência entre tecnologia e conhecimento médico constitui um elemento fundamental para compreender a evolução da Radiologia. À medida que os equipamentos se tornaram mais sofisticados, aumentaram também a quantidade e a complexidade das informações disponibilizadas aos especialistas.

Consequentemente, o trabalho radiológico deixou de envolver apenas o reconhecimento de estruturas anatômicas e passou a exigir a integração de diferentes modalidades de imagem, informações clínicas e hipóteses diagnósticas. O avanço tecnológico, nesse sentido, não reduziu a importância do conhecimento especializado, mas transformou as condições em que ele passou a ser exercido.

É justamente essa perspectiva histórica que permite situar a inteligência artificial no desenvolvimento da especialidade. Embora os sistemas inteligentes apresentem características distintas das tecnologias tradicionais de aquisição de imagens, sua incorporação à Radiologia também decorre da busca por instrumentos capazes de ampliar as possibilidades de investigação e aperfeiçoar os processos diagnósticos.

A diferença fundamental reside no fato de que, enquanto muitas inovações anteriores estiveram relacionadas principalmente à obtenção e à representação das imagens, os algoritmos contemporâneos passaram a participar de tarefas associadas à identificação de padrões, à classificação de alterações e à organização de informações clínicas.

Essa particularidade torna a inteligência artificial especialmente relevante para o debate sobre o futuro da profissão. Pela primeira vez, ferramentas computacionais amplamente investigadas na especialidade não se limitam a melhorar a visualização das estruturas anatômicas, mas também procuram auxiliar atividades tradicionalmente vinculadas à interpretação médica.

Tal circunstância não autoriza concluir que a tecnologia possa reproduzir integralmente o raciocínio clínico, mas exige investigar de que maneira a automação de determinadas tarefas poderá modificar a atuação dos especialistas.

Para compreender a dimensão dessa transformação, entretanto, é necessário retornar ao momento em que a Medicina passou a dispor de um recurso capaz de revelar, sem intervenção cirúrgica, estruturas internas do organismo humano. A descoberta dos raios X, no final do século XIX, representa o ponto de partida dessa trajetória e permite identificar um princípio que permanece atual: a tecnologia amplia a capacidade de observar, mas o significado clínico daquilo que é observado depende de um processo de interpretação.

1.2 A descoberta dos raios X: uma nova maneira de enxergar o corpo humano

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen realizou uma descoberta que modificaria profundamente a investigação médica. Durante experimentos com tubos de raios catódicos, identificou uma radiação até então desconhecida, capaz de atravessar determinados materiais e produzir registros visuais de estruturas que não poderiam ser observadas diretamente. Denominada raios X em referência à sua natureza inicialmente desconhecida, essa radiação inaugurou possibilidades inéditas de representação do interior do corpo humano e estabeleceu as bases para o desenvolvimento da Radiologia.

A relevância da descoberta ultrapassou rapidamente o campo da Física. Até aquele momento, a avaliação de diversas alterações internas dependia predominantemente da associação entre sinais clínicos, sintomas e procedimentos invasivos, circunstância que impunha limitações à identificação de determinadas condições. Com a possibilidade de registrar imagens de estruturas ósseas e de outros componentes anatômicos, a Medicina passou a contar com uma nova fonte de informação, capaz de complementar a investigação clínica e ampliar a fundamentação das decisões diagnósticas.

Essa mudança representou mais do que a introdução de um equipamento. Ao permitir que estruturas internas fossem visualizadas sem a necessidade de exposição cirúrgica, os raios X modificaram a própria relação entre o médico e o objeto de sua investigação. O corpo humano, anteriormente examinado sobretudo por suas manifestações externas e por procedimentos diretos, passou a ser representado por imagens produzidas mediante a interação entre radiação, tecidos biológicos e materiais de registro. Surgia, assim, uma forma de observação mediada tecnologicamente, cuja interpretação exigiria conhecimentos específicos e progressivamente especializados.

Apesar de seu caráter revolucionário, os primeiros exames radiográficos apresentavam limitações importantes. Os equipamentos disponíveis exigiam condições de exposição que

posteriormente seriam aperfeiçoadas, enquanto a qualidade das imagens dependia de fatores técnicos ainda pouco padronizados. Além disso, os riscos associados à exposição à radiação ionizante não eram inicialmente compreendidos em toda a sua extensão, o que tornou necessário desenvolver, ao longo do tempo, conhecimentos e procedimentos destinados à proteção de pacientes e profissionais.

O aperfeiçoamento da radiografia ocorreu, portanto, paralelamente ao desenvolvimento de fundamentos técnicos e científicos que permitiram utilizar a descoberta de maneira progressivamente mais segura. A evolução dos equipamentos, a melhoria dos sistemas de registro e a consolidação dos princípios de proteção radiológica contribuíram para ampliar as indicações clínicas do método. Ao mesmo tempo, a interpretação das imagens passou a exigir conhecimentos anatômicos e patológicos cada vez mais aprofundados, favorecendo a formação de profissionais dedicados especificamente ao diagnóstico por imagem.

Esse processo de especialização revelou uma distinção essencial: produzir uma imagem não significa, necessariamente, compreender seu significado clínico. Uma radiografia pode demonstrar determinada alteração anatômica, mas a identificação de sua natureza, relevância e possível relação com a condição do paciente depende de conhecimentos que ultrapassam o funcionamento do equipamento. A mesma imagem pode adquirir significados distintos conforme a idade, os antecedentes, a hipótese diagnóstica e as manifestações clínicas apresentadas.

A partir dessa compreensão, a Radiologia desenvolveu-se não apenas como uma área de produção de imagens, mas como um campo de interpretação médica. O radiologista passou a desempenhar a função de transformar representações visuais em informações clinicamente úteis, estabelecendo relações entre características anatômicas, processos patológicos e necessidades assistenciais. Essa atividade interpretativa consolidou a especialidade e preparou o terreno para a incorporação de métodos capazes de representar o organismo com níveis crescentes de detalhamento.

Todavia, à medida que a radiografia se expandia, suas limitações também se tornavam mais evidentes. A sobreposição de estruturas anatômicas, característica das imagens bidimensionais, dificultava a avaliação de determinadas regiões e restringia a diferenciação de tecidos com propriedades semelhantes. A necessidade de superar esses obstáculos estimulou o desenvolvimento de novas técnicas, capazes de fornecer informações que a radiografia convencional não conseguia representar satisfatoriamente.

Foi dessa busca por maior detalhamento anatômico e melhor caracterização dos tecidos que surgiram avanços decisivos, entre os quais se destacam a tomografia computadorizada, a ultrassonografia e a ressonância magnética. Com eles, a Radiologia deixou de depender de uma única forma de representação e passou a reunir métodos complementares, cada qual fundamentado em princípios físicos próprios e destinado a responder a diferentes questões clínicas.

1.3 Da radiografia à tomografia computadorizada e à ressonância magnética: a ampliação das possibilidades diagnósticas

A consolidação da radiografia como instrumento de investigação médica representou uma transformação decisiva, mas não encerrou a busca por métodos capazes de revelar estruturas internas com maior precisão. Pelo contrário, a utilização crescente dos raios X evidenciou limitações que estimularam novas investigações científicas. Entre essas limitações, destacava-se a sobreposição de estruturas anatômicas em uma mesma imagem, fenômeno que dificultava a identificação de determinadas alterações e restringia a capacidade de distinguir tecidos com características semelhantes.

A necessidade de superar essas dificuldades impulsionou o desenvolvimento de técnicas capazes de representar o organismo em diferentes planos. Nesse contexto, a tomografia computadorizada constituiu um dos avanços mais significativos da segunda metade do século XX, ao combinar princípios da radiologia convencional com métodos matemáticos de reconstrução de imagens. Os trabalhos de Allan Cormack e Godfrey Hounsfield foram fundamentais para o desenvolvimento dessa tecnologia, que possibilitou a obtenção de imagens seccionais do corpo humano a partir de medidas de atenuação dos raios X.

A importância da tomografia computadorizada não se limitou à melhoria da visualização anatômica. Sua introdução estabeleceu uma relação mais profunda entre Medicina, Física, Matemática e Ciência da Computação, uma vez que a formação das imagens passou a depender diretamente do processamento de dados por sistemas computacionais. Diferentemente da radiografia convencional, na qual a representação resulta da projeção das estruturas atravessadas pela radiação, a tomografia utiliza informações obtidas em diferentes posições para reconstruir imagens que permitem examinar o organismo em cortes.

Essa transformação ampliou consideravelmente as possibilidades de investigação clínica, especialmente em situações nas quais a localização precisa de alterações anatômicas se mostrava fundamental. A avaliação de estruturas intracranianas, órgãos abdominais,

regiões torácicas e componentes musculoesqueléticos passou a contar com informações que anteriormente não poderiam ser obtidas com a mesma capacidade de diferenciação espacial. Consequentemente, a tomografia tornou-se instrumento relevante tanto para o diagnóstico quanto para o planejamento terapêutico e o acompanhamento da evolução de diferentes doenças.

Entretanto, a ampliação das possibilidades diagnósticas também introduziu novas exigências à interpretação médica. A análise de imagens seccionais pressupõe conhecimentos anatômicos específicos, capacidade de reconstrução espacial e compreensão das características técnicas de aquisição. Além disso, a utilização de protocolos distintos, inclusive com administração de meios de contraste quando indicados, passou a exigir decisões fundamentadas na finalidade clínica do exame e nas condições individuais do paciente.

Enquanto a tomografia computadorizada consolidava uma nova maneira de representar a anatomia, outras modalidades de diagnóstico por imagem também avançavam. A ultrassonografia, fundamentada na utilização de ondas sonoras de alta frequência, ampliou as possibilidades de avaliação dinâmica de órgãos e estruturas, oferecendo aplicações relevantes em diferentes especialidades médicas. Sua capacidade de produzir imagens em tempo real favoreceu, entre outras utilizações, o acompanhamento gestacional, a investigação abdominal, a avaliação vascular e a orientação de procedimentos.

A ressonância magnética, por sua vez, representou outro marco na evolução do diagnóstico por imagem. Fundamentada em fenômenos físicos relacionados ao comportamento de núcleos atômicos em campos magnéticos, essa modalidade passou a oferecer possibilidades diferenciadas de caracterização tecidual, especialmente em regiões nas quais a distinção entre estruturas de partes moles constitui elemento fundamental para a investigação clínica.

A diversidade de sequências e parâmetros utilizados na ressonância magnética tornou possível explorar propriedades dos tecidos que não se limitam à sua aparência anatômica convencional. Com isso, a especialidade passou a incorporar informações relacionadas à composição e ao comportamento de diferentes estruturas biológicas, ampliando as possibilidades de investigação neurológica, musculoesquelética, abdominal e cardiovascular, entre outras.

O desenvolvimento dessas modalidades demonstrou que a evolução tecnológica da Radiologia não ocorreu pela eliminação sucessiva dos métodos anteriores. A radiografia convencional permaneceu relevante, mesmo diante da expansão da tomografia, assim como a ultrassonografia e a ressonância magnética consolidaram indicações específicas. A escolha

entre os métodos passou a depender da questão clínica investigada, das características do paciente, da disponibilidade tecnológica e da relação entre benefícios, limitações e riscos envolvidos.

Essa coexistência evidencia um aspecto fundamental da prática radiológica: o progresso científico não corresponde necessariamente à utilização do equipamento mais sofisticado, mas à escolha do método mais adequado para responder a uma necessidade diagnóstica concreta. Uma radiografia pode ser suficiente para determinada investigação, enquanto outras situações exigem informações adicionais obtidas por tomografia ou ressonância magnética. O conhecimento médico permanece, portanto, indispensável não apenas para interpretar os resultados, mas também para orientar a utilização apropriada dos recursos disponíveis.

Ao mesmo tempo, a multiplicação das modalidades trouxe uma consequência que se tornaria particularmente importante nas décadas seguintes: o crescimento expressivo da quantidade de informações produzidas pelos exames. Estudos que anteriormente resultavam em um número limitado de imagens passaram a gerar séries extensas, reconstruções multiplanares e diferentes representações de uma mesma região anatômica. A interpretação radiológica tornou-se progressivamente mais abrangente, exigindo que o especialista relacionasse informações provenientes de diferentes técnicas e selecionasse aquelas com maior relevância clínica.

Foi nesse ambiente de crescente complexidade informacional que a digitalização adquiriu importância estratégica. Se a tomografia computadorizada já demonstrava o papel indispensável dos computadores na reconstrução das imagens, a expansão dos sistemas digitais permitiria modificar também a maneira como os exames eram armazenados, compartilhados, analisados e integrados aos serviços de saúde.

1.4 A digitalização das imagens e o surgimento de uma Radiologia orientada por dados

A evolução dos métodos de diagnóstico por imagem criou condições para uma transformação que ultrapassaria a qualidade dos equipamentos: a passagem progressiva dos sistemas analógicos para ambientes digitais de produção, armazenamento e circulação das informações médicas. Essa mudança representou uma etapa decisiva no desenvolvimento da Radiologia contemporânea, pois alterou não apenas a forma de registrar os exames, mas também as possibilidades de acesso, comparação, processamento e utilização das imagens.

Nos sistemas tradicionais baseados em filmes radiográficos, a visualização dos exames dependia de suportes físicos e de procedimentos específicos de revelação, conservação e arquivamento. Embora esses recursos tenham desempenhado papel fundamental durante

décadas, apresentavam limitações relacionadas ao armazenamento, à reprodução e ao compartilhamento das informações. A digitalização permitiu superar parte desses obstáculos, possibilitando que imagens fossem representadas por dados numéricos e manipuladas em ambientes computacionais.

A incorporação de sistemas de arquivamento e comunicação de imagens, conhecidos pela sigla PACS, contribuiu significativamente para essa transformação. Por meio dessas estruturas, tornou-se possível armazenar exames em formato digital, disponibilizá-los em diferentes estações de trabalho e facilitar o acesso às imagens por profissionais envolvidos no atendimento. Paralelamente, padrões de interoperabilidade, como o DICOM, favoreceram a organização e a comunicação das informações entre equipamentos e sistemas.

A importância dessas inovações deve ser compreendida a partir de suas repercussões sobre o próprio trabalho médico. A possibilidade de consultar exames anteriores, comparar imagens realizadas em momentos distintos e compartilhar informações entre profissionais ampliou as condições de acompanhamento clínico. Além disso, recursos digitais de ampliação, ajuste de contraste, reconstrução e mensuração passaram a integrar as ferramentas utilizadas na interpretação radiológica.

Entretanto, a digitalização também produziu consequências que inicialmente poderiam parecer secundárias. Ao transformar imagens em informações computacionalmente acessíveis, criou-se a possibilidade de desenvolver métodos destinados não apenas à sua visualização, mas também à identificação automatizada de determinadas características. As imagens passaram a constituir conjuntos de dados que poderiam ser analisados por procedimentos matemáticos, estatísticos e computacionais.

Essa mudança abriu espaço para novas perguntas científicas. Se uma imagem digital pode ser representada numericamente, seria possível desenvolver sistemas capazes de identificar padrões associados a determinadas alterações anatômicas? Poderiam programas computacionais auxiliar na localização de estruturas, na mensuração de lesões ou na identificação de características relevantes para o diagnóstico? E, caso essas tarefas fossem tecnicamente possíveis, em quais circunstâncias seus resultados poderiam contribuir efetivamente para a assistência médica?

Esses questionamentos estimularam o desenvolvimento de métodos de análise computacional de imagens, inicialmente fundamentados em procedimentos específicos de processamento digital e reconhecimento de padrões. A identificação de bordas, a segmentação de regiões e a extração de características quantitativas constituíram algumas das estratégias utilizadas para transformar informações visuais em dados passíveis de análise automatizada.

Nesse percurso, os sistemas de diagnóstico auxiliado por computador, frequentemente identificados pela sigla CAD, assumiram relevância histórica. Desenvolvidos para apoiar tarefas delimitadas, esses sistemas procuravam identificar ou destacar características potencialmente relevantes nas imagens, oferecendo informações complementares à avaliação profissional. Sua evolução demonstrou que a utilização de computadores na Radiologia não precisava permanecer restrita à aquisição, reconstrução ou organização dos exames, podendo alcançar também determinadas etapas da análise diagnóstica.

É importante observar, contudo, que a existência de informações digitalizadas não assegura automaticamente sua qualidade científica. Bases de imagens podem apresentar diferenças relacionadas aos equipamentos utilizados, aos protocolos de aquisição, às características das populações e à confiabilidade dos diagnósticos associados. Assim, o desenvolvimento de ferramentas computacionais depende não apenas da disponibilidade de grandes quantidades de dados, mas também de sua organização, representatividade e adequada validação.

Essa questão se tornaria ainda mais relevante com a expansão dos métodos de aprendizado de máquina. À medida que os sistemas passaram a utilizar conjuntos de exemplos para identificar regularidades e produzir classificações, a qualidade dos dados adquiriu influência direta sobre os resultados. Desse modo, a digitalização não deve ser compreendida apenas como uma modernização operacional, mas como uma condição fundamental para o surgimento de uma Radiologia progressivamente orientada pela análise computacional de informações.

1.5 Do diagnóstico auxiliado por computador ao aprendizado de máquina

A utilização de computadores para auxiliar a interpretação de imagens médicas antecede a expansão contemporânea da inteligência artificial. Durante décadas, pesquisadores investigaram maneiras de desenvolver sistemas capazes de reconhecer características anatômicas e identificar padrões associados a determinadas condições clínicas. Essas iniciativas constituíram uma etapa importante na aproximação entre a Radiologia e a Ciência da Computação, pois demonstraram que parte das informações presentes nas imagens poderia ser submetida a procedimentos automatizados de análise.

Os sistemas tradicionais de diagnóstico auxiliado por computador frequentemente utilizavam etapas previamente definidas de processamento. Inicialmente, a imagem era submetida a procedimentos destinados a destacar determinadas características, como diferenças de intensidade, contornos ou regiões de interesse. Em seguida, essas informações

poderiam ser analisadas por métodos estatísticos ou regras computacionais para identificar padrões considerados relevantes.

Embora tais abordagens tenham contribuído para o desenvolvimento da análise automatizada, apresentavam limitações relacionadas à diversidade das imagens médicas. Estruturas anatômicas podem variar entre indivíduos, enquanto alterações patológicas nem sempre apresentam características visuais uniformes. Além disso, diferenças de aquisição, qualidade da imagem e condições clínicas podem influenciar significativamente a aparência de um mesmo achado.

Essas dificuldades estimularam a investigação de métodos capazes de aprender relações a partir de exemplos, em vez de depender exclusivamente de regras previamente estabelecidas. Nesse contexto, o aprendizado de máquina, ou machine learning, passou a ocupar posição crescente nas pesquisas sobre análise de imagens médicas.

De maneira geral, o aprendizado de máquina compreende um conjunto de métodos computacionais destinados a identificar padrões em dados e utilizar essas relações para realizar tarefas específicas. Em aplicações supervisionadas, por exemplo, modelos podem ser treinados com imagens associadas a classificações previamente definidas, buscando aprender características que permitam distinguir determinadas categorias em novos exemplos.

Entretanto, a capacidade de identificar regularidades estatísticas não equivale à compreensão clínica das doenças. Um modelo pode aprender associações presentes em determinado conjunto de dados sem necessariamente distinguir relações clinicamente relevantes de características ocasionais. Por essa razão, a avaliação de seu desempenho exige atenção à composição das bases utilizadas, aos procedimentos de treinamento e às condições em que o sistema será aplicado.

A distinção entre treinamento e validação constitui, nesse sentido, um aspecto central. Durante o treinamento, o modelo ajusta seus parâmetros a partir dos exemplos disponíveis. A avaliação posterior procura verificar se as relações identificadas podem ser utilizadas em dados não empregados nesse processo. Contudo, mesmo resultados satisfatórios em conjuntos de teste não garantem desempenho equivalente em instituições, equipamentos ou populações diferentes.

Esse problema está relacionado à capacidade de generalização, considerada fundamental para a utilização clínica de sistemas inteligentes. Um algoritmo desenvolvido com imagens provenientes de determinado serviço pode apresentar dificuldades diante de exames produzidos em outras condições. A presença de diferenças técnicas, demográficas ou

epidemiológicas pode modificar o comportamento do modelo e comprometer a confiabilidade de suas recomendações.

Assim, o avanço do aprendizado de máquina ampliou as possibilidades de análise computacional, mas também tornou mais evidente a necessidade de avaliação científica rigorosa. A passagem de um sistema experimental para uma ferramenta de apoio à assistência depende da demonstração de que seu desempenho permanece adequado nas condições concretas de utilização.

Essa preocupação acompanha o desenvolvimento dos métodos mais recentes e torna-se particularmente importante diante do aprendizado profundo, abordagem que ampliou significativamente a capacidade de processamento de imagens e contribuiu para o crescimento das pesquisas em inteligência artificial aplicada à Radiologia.

1.6 O aprendizado profundo e a transformação da análise de imagens médicas

O desenvolvimento do aprendizado profundo, conhecido internacionalmente como deep learning, representou uma etapa importante na evolução da inteligência artificial aplicada à análise de imagens médicas. Integrado ao campo mais amplo do aprendizado de máquina, esse conjunto de técnicas utiliza redes neurais artificiais com múltiplas camadas de processamento, capazes de aprender representações progressivamente mais complexas a partir dos dados disponibilizados durante o treinamento.

Uma das diferenças relevantes em relação a diversas abordagens tradicionais está na possibilidade de aprender características diretamente das imagens, reduzindo a dependência de procedimentos exclusivamente manuais para definir quais elementos deverão ser considerados na análise. Em determinadas arquiteturas, especialmente nas redes neurais convolucionais, o processamento permite identificar padrões em diferentes níveis de complexidade, desde características visuais relativamente simples até combinações associadas a estruturas e alterações específicas.

Essa capacidade favoreceu o desenvolvimento de aplicações destinadas à classificação de imagens, à detecção de alterações e à segmentação de estruturas anatômicas. Na classificação, o sistema procura atribuir determinada categoria a uma imagem ou região analisada. Na detecção, busca identificar a presença e, frequentemente, a localização de elementos de interesse. A segmentação, por sua vez, procura delimitar estruturas ou regiões, permitindo análises quantitativas e espaciais mais detalhadas.

A diversidade dessas aplicações foi examinada por Litjens et al. (2017), em revisão científica que reuniu mais de trezentas contribuições relacionadas ao aprendizado profundo na análise de imagens médicas. O estudo demonstrou a expansão dessas técnicas em diferentes

áreas, incluindo aplicações neurológicas, pulmonares, cardíacas, mamárias e musculoesqueléticas, evidenciando a amplitude das possibilidades investigadas.

A relevância dessa expansão não decorre apenas da variedade de tarefas que passaram a ser investigadas. O aprendizado profundo também modificou a maneira como pesquisadores formulam problemas de análise de imagens, permitindo explorar relações complexas entre características visuais que poderiam ser difíceis de representar por regras convencionais. Entretanto, essa capacidade introduziu novos desafios, especialmente relacionados à interpretação do funcionamento dos modelos e à identificação dos fatores responsáveis por determinadas classificações.

Em sistemas complexos, nem sempre é possível compreender de maneira direta quais características da imagem foram decisivas para a produção de determinado resultado. Essa dificuldade não significa que todos os modelos sejam inteiramente inexplicáveis, mas evidencia a importância de desenvolver procedimentos de avaliação capazes de identificar limitações, reconhecer comportamentos inadequados e verificar se as informações utilizadas possuem relevância clínica.

Além disso, o desempenho de redes neurais depende das condições em que são desenvolvidas. Conjuntos de treinamento insuficientes, pouco representativos ou associados a classificações incorretas podem comprometer os resultados. Mesmo bases extensas não eliminam esses riscos, uma vez que a quantidade de imagens não substitui a necessidade de qualidade, diversidade e adequação à finalidade pretendida.

Outro aspecto importante diz respeito à diferença entre desempenho computacional e benefício assistencial. Um sistema pode apresentar resultados elevados em determinada tarefa experimental e, ainda assim, não produzir melhorias significativas quando incorporado à rotina clínica. Para que sua utilização seja justificada, é necessário investigar se contribui para decisões mais adequadas, reduz falhas relevantes ou melhora efetivamente o funcionamento dos serviços.

Desse modo, o aprendizado profundo deve ser compreendido como um avanço metodológico com possibilidades importantes, mas cuja contribuição depende da qualidade das evidências produzidas. A capacidade de reconhecer padrões não elimina a necessidade de interpretar seu significado clínico, assim como a automação de uma tarefa não demonstra, isoladamente, competência para realizar todas as atividades envolvidas na prática radiológica.

Essa distinção será fundamental para compreender uma das aplicações mais promissoras da análise computacional de imagens: a radiômica, campo que procura

transformar características quantitativas dos exames em informações potencialmente úteis à investigação das doenças.

1.7 A radiômica e os caminhos para a medicina de precisão

A evolução dos métodos de diagnóstico por imagem ampliou progressivamente a quantidade de informações disponíveis sobre estruturas e processos biológicos. Entretanto, nem todas as características presentes nas imagens podem ser facilmente identificadas ou quantificadas pela observação visual convencional. Essa constatação estimulou o desenvolvimento de abordagens destinadas a extrair medidas quantitativas dos exames, buscando investigar relações entre propriedades das imagens e características clínicas ou biológicas.

Nesse contexto, a radiômica constitui um campo de pesquisa voltado à extração e à análise de características quantitativas de imagens médicas. Por meio de procedimentos computacionais, podem ser investigadas informações relacionadas à intensidade, à forma, à textura e à distribuição espacial de determinadas estruturas ou lesões. O objetivo consiste em avaliar se essas características apresentam associações relevantes com processos patológicos, evolução clínica ou resposta a tratamentos.

A radiômica deve ser compreendida no contexto mais amplo da medicina de precisão, perspectiva que procura considerar diferenças individuais e características específicas das doenças para aperfeiçoar decisões diagnósticas e terapêuticas. Nesse cenário, as imagens médicas podem contribuir com informações complementares a dados clínicos, laboratoriais e, em determinadas investigações, moleculares.

Entretanto, a identificação de associações estatísticas entre características radiômicas e determinados desfechos não significa, necessariamente, que essas informações possuam utilidade clínica comprovada. Para que um marcador quantitativo possa contribuir para decisões assistenciais, é necessário demonstrar que suas medidas são suficientemente reprodutíveis, que suas associações permanecem consistentes em diferentes populações e que sua utilização oferece benefícios relevantes.

A padronização constitui um dos principais desafios desse campo. Diferenças relacionadas aos equipamentos, aos protocolos de aquisição, aos métodos de reconstrução e aos procedimentos de segmentação podem modificar características extraídas das imagens. Consequentemente, resultados obtidos em determinada instituição nem sempre podem ser transferidos diretamente para outros ambientes.

Além disso, a utilização de múltiplas características quantitativas exige atenção aos métodos estatísticos empregados. A investigação de numerosas variáveis pode produzir

associações aparentemente relevantes que não se confirmam em estudos independentes. Por essa razão, a seleção adequada de características, a validação externa e a avaliação da estabilidade dos resultados constituem etapas fundamentais.

A inteligência artificial pode contribuir para esse processo ao permitir analisar conjuntos complexos de informações e investigar relações entre variáveis. Contudo, seu emprego não elimina as exigências metodológicas próprias da pesquisa clínica. A utilização de modelos computacionais sofisticados deve estar acompanhada de perguntas científicas claramente formuladas e de procedimentos capazes de demonstrar a confiabilidade dos resultados.

A radiômica evidencia, portanto, uma transformação importante no papel das imagens médicas. Além de representar estruturas anatômicas e alterações morfológicas, os exames passaram a ser investigados como fontes de dados quantitativos potencialmente associados a características biológicas. Essa perspectiva amplia o campo de atuação da Radiologia, mas também reforça a necessidade de integração entre conhecimento médico, pesquisa científica e métodos computacionais.

Ao mesmo tempo, demonstra que o futuro da especialidade não depende exclusivamente da capacidade de produzir imagens cada vez mais detalhadas. A relevância das novas tecnologias estará relacionada à possibilidade de transformar informações em conhecimentos clinicamente válidos e, posteriormente, em decisões capazes de beneficiar os pacientes.

1.8 A inteligência artificial e o debate sobre a substituição do radiologista

A expansão das aplicações de inteligência artificial na análise de imagens médicas trouxe consigo questionamentos que ultrapassam o campo tecnológico. À medida que sistemas computacionais passaram a demonstrar capacidade de executar determinadas tarefas tradicionalmente realizadas por especialistas, intensificaram-se debates sobre o futuro da atuação profissional e sobre a possibilidade de substituição de atividades médicas por processos automatizados.

Parte dessas discussões decorre de estudos que comparam o desempenho de algoritmos e profissionais em tarefas específicas, como identificação de alterações ou classificação de imagens. Embora tais investigações possam oferecer informações relevantes sobre as capacidades dos sistemas, seus resultados precisam ser interpretados considerando as condições experimentais, as características das bases de dados e a finalidade das comparações realizadas.

A prática radiológica, entretanto, não se limita ao reconhecimento isolado de padrões visuais. A interpretação de um exame envolve compreender sua indicação, avaliar a adequação técnica, considerar hipóteses diagnósticas, identificar achados relevantes e comunicar conclusões que possam orientar a assistência. Além disso, o especialista participa de decisões relacionadas à escolha de métodos, à necessidade de investigações complementares e, em determinados campos da especialidade, à realização de procedimentos intervencionistas.

Consequentemente, a demonstração de que um algoritmo apresenta desempenho satisfatório em determinada tarefa não comprova que possua competência para reproduzir integralmente o conjunto de atividades exercidas pelo médico radiologista. Essa distinção, contudo, não deve ser utilizada para desconsiderar as transformações que a automação poderá produzir na organização do trabalho.

A incorporação de ferramentas inteligentes pode modificar a distribuição de tarefas, os processos de interpretação e as competências exigidas dos profissionais. Atividades repetitivas poderão ser parcialmente automatizadas, enquanto outras poderão demandar maior participação médica na supervisão, na integração de informações e na avaliação de resultados. O impacto efetivo dessas mudanças dependerá das características das tecnologias, das evidências disponíveis e das condições institucionais de implementação.

A European Society of Radiology (2019) reconhece a relevância dessas transformações e destaca a necessidade de que os radiologistas compreendam os fundamentos, as aplicações e as limitações da inteligência artificial. Essa orientação demonstra que a formação profissional precisa acompanhar o desenvolvimento tecnológico, permitindo que os especialistas participem criticamente das decisões relacionadas à incorporação de novos sistemas.

Nesse sentido, o debate sobre substituição profissional pode ser reformulado a partir de uma questão mais abrangente: de que maneira a inteligência artificial poderá transformar o exercício da Radiologia e quais competências serão necessárias para que os médicos continuem desempenhando suas funções com segurança, autonomia e responsabilidade?

Essa perspectiva permite superar tanto a expectativa de substituição integral quanto a ideia de que a especialidade permanecerá inalterada. O desenvolvimento tecnológico poderá modificar profundamente determinadas atividades, mas suas repercussões deverão ser analisadas com base em evidências, considerando a complexidade do cuidado e as responsabilidades envolvidas nas decisões diagnósticas.

A questão central deixa, portanto, de ser apenas a comparação entre capacidades humanas e computacionais. Passa a envolver a construção de modelos de colaboração nos quais as ferramentas tecnológicas possam contribuir para o aprimoramento da assistência, sem que a utilização de resultados automatizados comprometa o julgamento clínico ou a segurança dos pacientes.

1.9 Considerações finais do capítulo

A trajetória histórica da Radiologia demonstra que o desenvolvimento da especialidade esteve permanentemente associado à incorporação de conhecimentos científicos e recursos tecnológicos capazes de ampliar as possibilidades de investigação do organismo humano. Desde a descoberta dos raios X até a consolidação dos métodos digitais, cada transformação modificou as condições de produção e interpretação das imagens, exigindo novas competências e contribuindo para a ampliação do conhecimento médico.

Esse percurso evidencia que a evolução tecnológica não corresponde apenas ao aperfeiçoamento dos equipamentos. A introdução de novas modalidades de imagem, a expansão dos sistemas computacionais e o desenvolvimento de métodos quantitativos também transformaram as perguntas formuladas pelos profissionais e as possibilidades de produzir informações clinicamente relevantes.

A inteligência artificial representa uma etapa particularmente significativa dessa trajetória, uma vez que amplia a participação dos sistemas computacionais em tarefas relacionadas à análise e à interpretação de imagens. Entretanto, seu potencial deve ser examinado à luz das limitações científicas, das condições de utilização e das responsabilidades inerentes à prática médica.

Compreender essa evolução histórica permite reconhecer que a Radiologia sempre se transformou por meio do diálogo entre conhecimento humano e inovação tecnológica. O desafio contemporâneo consiste em investigar como essa relação poderá desenvolver-se diante de sistemas capazes de executar tarefas cada vez mais complexas, sem reduzir o diagnóstico à simples identificação automatizada de padrões.

Dessa forma, a discussão histórica apresentada neste capítulo estabelece os fundamentos para uma análise mais específica das aplicações clínicas da inteligência artificial. Se a evolução tecnológica explica como a Radiologia chegou ao atual estágio de desenvolvimento, torna-se necessário compreender, a partir desse ponto, o que os sistemas inteligentes efetivamente podem realizar na prática, quais benefícios já foram investigados e quais limitações ainda condicionam sua utilização.

CAPÍTULO II

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA PRÁTICA RADIOLÓGICA: APLICAÇÕES CLÍNICAS, BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES

2.1 Da inovação tecnológica à sua incorporação na prática clínica

A trajetória histórica da Radiologia, examinada no capítulo anterior, demonstra que o desenvolvimento de novos recursos tecnológicos sempre esteve relacionado à ampliação das possibilidades de investigação do organismo humano. Entretanto, a passagem de uma descoberta científica para sua utilização na assistência médica não ocorre de maneira automática. Entre a demonstração de que determinada tecnologia é capaz de executar uma tarefa e a comprovação de que sua utilização oferece benefícios concretos aos pacientes existe um percurso que envolve investigação científica, avaliação de riscos, aperfeiçoamento técnico e adaptação às condições reais dos serviços de saúde.

Essa distinção assume particular importância no contexto da inteligência artificial, cuja expansão recente tem sido acompanhada por resultados experimentais expressivos e expectativas de transformação dos processos diagnósticos. Sistemas computacionais desenvolvidos para reconhecer padrões, identificar alterações e realizar mensurações em imagens médicas passaram a ocupar espaço crescente na literatura científica, estimulando discussões sobre suas possibilidades de aplicação em diferentes modalidades radiológicas. Contudo, a capacidade de executar uma tarefa em condições controladas não significa, necessariamente, que o mesmo sistema apresentará desempenho equivalente diante da diversidade de situações encontradas na prática clínica.

Para compreender essa diferença, é necessário considerar que os algoritmos de inteligência artificial são desenvolvidos a partir de dados e procedimentos metodológicos específicos. Em aplicações supervisionadas, por exemplo, o treinamento utiliza conjuntos de imagens associados a informações de referência, permitindo que o modelo identifique regularidades estatísticas relacionadas à tarefa proposta. O desempenho posteriormente observado depende, entre outros fatores, da qualidade desses dados, da adequação das classificações utilizadas e da semelhança entre as condições de desenvolvimento e aquelas encontradas durante a utilização.

O problema surge quando resultados obtidos em determinado ambiente são interpretados como demonstração de capacidade clínica universal. Um sistema treinado com exames provenientes de uma instituição pode apresentar desempenho satisfatório naquele contexto e encontrar dificuldades ao analisar imagens produzidas por equipamentos

diferentes, com protocolos distintos ou em populações cujas características não estavam suficientemente representadas nos dados originais. Essa possibilidade evidencia que a inteligência artificial não deve ser compreendida como uma tecnologia cuja confiabilidade decorre exclusivamente da complexidade de seus modelos matemáticos.

Kelly et al. (2019), ao discutirem os desafios para alcançar impacto clínico por meio da inteligência artificial, destacam que a transição entre pesquisa experimental e assistência exige atenção à qualidade dos dados, à generalização dos resultados e à integração das ferramentas aos processos de trabalho. Essa perspectiva permite compreender que o desenvolvimento tecnológico constitui apenas uma das etapas necessárias à incorporação responsável de sistemas inteligentes. Para que uma aplicação seja clinicamente relevante, é preciso demonstrar que sua utilização responde a uma necessidade concreta e produz resultados compatíveis com os objetivos da assistência.

Na Radiologia, essa exigência torna-se particularmente evidente porque as imagens não representam informações isoladas. Cada exame integra um processo de investigação clínica iniciado, em regra, pela identificação de uma necessidade diagnóstica. A escolha da modalidade, a definição do protocolo, a aquisição das imagens e sua interpretação constituem etapas relacionadas entre si, cuja finalidade é produzir informações capazes de orientar decisões médicas. Assim, uma ferramenta destinada a identificar determinada alteração precisa ser avaliada considerando o momento em que será utilizada, a forma como seus resultados serão apresentados e as consequências de eventuais classificações incorretas.

A incorporação de inteligência artificial pode ocorrer em diferentes momentos desse processo. Algumas aplicações procuram aperfeiçoar a aquisição e a reconstrução das imagens, enquanto outras se destinam à identificação de estruturas anatômicas, à detecção de alterações ou à quantificação de características relevantes. Existem, ainda, sistemas desenvolvidos para auxiliar a organização dos serviços, como ferramentas de priorização de exames potencialmente urgentes e recursos de apoio à elaboração de relatórios.

Essa diversidade demonstra que a expressão inteligência artificial aplicada à Radiologia não corresponde a uma única tecnologia, tampouco a um conjunto homogêneo de capacidades. Cada ferramenta possui uma finalidade específica, depende de determinadas condições técnicas e apresenta limitações próprias. Consequentemente, sua avaliação exige compreender não apenas o funcionamento geral dos algoritmos, mas também as características da modalidade de imagem à qual se destina e o problema clínico que procura solucionar.

É a partir dessa compreensão que se torna possível examinar as aplicações contemporâneas da inteligência artificial nos diferentes métodos radiológicos. A radiografia convencional, por sua ampla utilização e importância na investigação inicial de numerosas condições clínicas, constitui um ponto de partida especialmente relevante para essa análise.

2.2 Inteligência artificial na radiografia convencional: reconhecimento de padrões e apoio à interpretação

A radiografia convencional permanece entre os métodos de diagnóstico por imagem mais utilizados na assistência médica, mesmo após a consolidação de tecnologias capazes de produzir representações anatômicas mais detalhadas. Sua relevância decorre de características como disponibilidade, rapidez de execução e aplicabilidade em diferentes situações clínicas, incluindo investigações torácicas, musculoesqueléticas e avaliações iniciais em serviços de urgência. Essa ampla utilização também faz com que os exames radiográficos representem uma fonte importante de dados para o desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial.

A digitalização da radiografia, associada à expansão de bancos de imagens e ao aperfeiçoamento dos métodos de aprendizado profundo, favoreceu pesquisas destinadas à identificação automatizada de alterações. Entre as aplicações investigadas, destacam-se sistemas capazes de reconhecer padrões associados a determinadas condições pulmonares, identificar possíveis fraturas e sinalizar exames que apresentem características consideradas relevantes para avaliação prioritária.

No campo da radiografia de tórax, o desenvolvimento dessas ferramentas recebeu atenção especial em razão da frequência com que o método é utilizado na investigação de doenças respiratórias e alterações cardiovasculares. Redes neurais artificiais passaram a ser treinadas para reconhecer características associadas a opacidades pulmonares, derrames pleurais, pneumotórax e outros achados radiográficos. O objetivo dessas aplicações não consiste necessariamente em produzir um diagnóstico clínico completo, mas em identificar padrões visuais que possam auxiliar determinadas etapas da interpretação.

Entre os trabalhos que contribuíram para ampliar a discussão científica sobre esse tema, destaca-se o estudo conhecido como CheXNet, apresentado por Rajpurkar et al. (2017), no qual foi investigada a utilização de uma rede neural profunda para identificação de pneumonia em radiografias de tórax. Embora seus resultados tenham despertado interesse, a interpretação de seu desempenho exige considerar as características da base de dados utilizada, a construção dos rótulos diagnósticos e as condições experimentais em que as comparações foram realizadas.

Essa ressalva é importante porque o reconhecimento de um padrão radiográfico associado a determinada doença não equivale à confirmação de sua presença em um paciente específico. Alterações semelhantes podem decorrer de diferentes processos patológicos, enquanto características técnicas da imagem podem interferir na aparência das estruturas avaliadas. Uma opacidade pulmonar, por exemplo, pode exigir correlação com sintomas, antecedentes, exames laboratoriais e outras informações clínicas para que seu significado seja adequadamente estabelecido.

O problema torna-se ainda mais complexo quando se considera que os modelos computacionais podem aprender relações presentes nos dados sem necessariamente identificar os mesmos elementos utilizados pelo raciocínio médico. Diferenças entre equipamentos, marcas presentes nas imagens e características específicas dos serviços de origem podem influenciar o treinamento. Caso essas informações estejam associadas de maneira inadequada às classificações utilizadas, o sistema poderá apresentar resultados aparentemente satisfatórios sem desenvolver capacidade de generalização compatível com sua finalidade clínica.

Por essa razão, a avaliação de ferramentas destinadas à radiografia convencional precisa ultrapassar a apresentação de indicadores isolados de desempenho. É necessário investigar a frequência de classificações incorretas, as circunstâncias em que ocorrem e suas possíveis consequências para o atendimento. Um resultado falso-positivo pode desencadear investigações adicionais desnecessárias, enquanto um falso-negativo pode contribuir para que determinada alteração deixe de receber a atenção indicada.

Esses riscos não significam que a utilização da inteligência artificial deva ser rejeitada, mas demonstram a necessidade de definir adequadamente sua função. Em determinados contextos, um sistema pode ser utilizado como ferramenta complementar de sinalização, permitindo que o profissional examine com atenção uma região identificada pelo algoritmo. Em outros, poderá contribuir para a organização de listas de trabalho, desde que existam procedimentos capazes de evitar que exames não sinalizados sejam indevidamente considerados isentos de alterações.

A contribuição potencial dessas ferramentas, portanto, depende da interação entre capacidade computacional e julgamento profissional. O algoritmo pode identificar uma característica visual, mas sua relevância precisa ser interpretada considerando a finalidade do exame e as condições clínicas do paciente. Essa distinção permite reconhecer que a inteligência artificial pode ampliar os recursos disponíveis ao radiologista sem transformar automaticamente suas classificações em decisões médicas.

Embora essas possibilidades sejam relevantes na radiografia convencional, a utilização da inteligência artificial assume características diferentes em modalidades que produzem volumes extensos de imagens e permitem análises anatômicas mais complexas. É o caso da tomografia computadorizada, na qual o processamento de grandes conjuntos de informações constitui uma das principais oportunidades para o desenvolvimento de aplicações automatizadas.

2.3 Inteligência artificial na tomografia computadorizada: detecção, segmentação e análise quantitativa

A tomografia computadorizada ocupa posição central na investigação de numerosas condições clínicas em razão de sua capacidade de produzir imagens seccionais detalhadas e reconstruções multiplanares. O aperfeiçoamento dos equipamentos ampliou a velocidade de aquisição, a resolução espacial e as possibilidades de análise anatômica, permitindo que exames realizados em intervalos relativamente curtos produzam grandes volumes de informações. Entretanto, essa evolução também aumentou a complexidade do trabalho interpretativo, exigindo que o radiologista examine múltiplas imagens, identifique alterações relevantes e estabeleça relações entre achados distribuídos em diferentes regiões.

É nesse cenário que a inteligência artificial apresenta possibilidades de aplicação particularmente importantes. A capacidade computacional de processar conjuntos extensos de dados favorece o desenvolvimento de ferramentas destinadas à detecção de alterações, à delimitação de estruturas anatômicas e à realização de mensurações. Essas aplicações podem contribuir para tarefas específicas da análise tomográfica, sobretudo quando envolvem procedimentos repetitivos ou quantitativos que demandam tempo e padronização.

Entre as possibilidades investigadas, destaca-se a detecção automatizada de alterações em órgãos e estruturas anatômicas. Sistemas computacionais podem ser desenvolvidos para identificar regiões com características compatíveis com determinadas lesões, permitindo que essas informações sejam apresentadas ao especialista como elementos complementares à interpretação. Entretanto, o significado clínico de uma alteração depende de fatores que ultrapassam sua identificação visual, incluindo localização, dimensões, características morfológicas e relação com o contexto do paciente.

A segmentação constitui outra aplicação relevante. Por meio dela, algoritmos procuram delimitar órgãos, lesões ou regiões específicas, possibilitando a obtenção de medidas relacionadas a volume, extensão e distribuição espacial. Essas informações podem contribuir para o acompanhamento de determinadas condições clínicas, especialmente quando

a comparação entre exames realizados em momentos distintos exige mensurações consistentes.

Na Oncologia, por exemplo, a análise quantitativa de lesões pode integrar investigações sobre evolução da doença e resposta terapêutica. Contudo, a utilidade dessas medidas depende de sua reprodutibilidade e da adequação dos métodos empregados. Diferenças nos protocolos de aquisição, na administração de contraste e nos parâmetros de reconstrução podem modificar a aparência das estruturas e influenciar os resultados produzidos pelos sistemas computacionais.

Hosny et al. (2018) discutem a utilização da inteligência artificial em imagens médicas, com atenção às possibilidades de análise quantitativa e às aplicações relacionadas à investigação oncológica. O trabalho contribui para compreender como o desenvolvimento de métodos computacionais ampliou o interesse científico pela extração de informações que ultrapassam a observação visual convencional.

Entretanto, a expansão dessas aplicações exige distinguir a capacidade de produzir medidas da demonstração de que tais medidas contribuem efetivamente para decisões clínicas. Uma ferramenta pode delimitar uma lesão com elevado grau de concordância em relação a determinado padrão de referência e, ainda assim, apresentar utilidade limitada caso suas informações não modifiquem a avaliação diagnóstica, o acompanhamento ou a conduta assistencial.

Além da detecção e da segmentação, a inteligência artificial também tem sido investigada em etapas relacionadas à reconstrução das imagens tomográficas. Métodos computacionais podem ser utilizados para reduzir ruídos e aperfeiçoar determinadas características visuais, inclusive em pesquisas destinadas à obtenção de imagens adequadas com protocolos de menor exposição à radiação.

Essa possibilidade apresenta relevância para a proteção radiológica, considerando que a utilização de radiação ionizante exige atenção permanente à justificativa e à otimização dos exames. Contudo, a melhoria da aparência visual não deve ser confundida com preservação integral das informações diagnósticas. Sistemas de reconstrução precisam ser avaliados para verificar se não introduzem artefatos, eliminam características relevantes ou modificam estruturas de maneira capaz de comprometer a interpretação.

A relação entre qualidade da imagem e confiabilidade diagnóstica evidencia um desafio que acompanha diferentes aplicações da inteligência artificial: resultados visualmente convincentes não são necessariamente clinicamente corretos. A avaliação deve considerar a

correspondência entre a imagem processada e as informações efetivamente adquiridas, especialmente quando pequenas alterações anatômicas podem influenciar decisões relevantes.

Dessa forma, a inteligência artificial na tomografia computadorizada apresenta possibilidades que abrangem desde o processamento inicial até a interpretação quantitativa das imagens. Entretanto, sua contribuição dependerá da capacidade de integrar essas funções aos objetivos clínicos e de demonstrar que os resultados permanecem confiáveis em diferentes condições de utilização.

Essa preocupação torna-se igualmente importante na ressonância magnética, modalidade em que a diversidade de sequências e a complexidade dos processos de aquisição e reconstrução oferecem oportunidades específicas para a aplicação de métodos inteligentes.

2.4 Inteligência artificial na ressonância magnética: eficiência, reconstrução e preservação da informação diagnóstica

A ressonância magnética constitui uma das modalidades mais complexas do diagnóstico por imagem, tanto pelos princípios físicos envolvidos quanto pela diversidade de parâmetros que influenciam a formação das imagens. Sua capacidade de oferecer diferentes contrastes teciduais e informações anatômicas e funcionais ampliou significativamente as possibilidades de investigação médica. Entretanto, a obtenção dessas informações depende de protocolos cuja duração e complexidade podem representar desafios operacionais para os serviços e para os próprios pacientes.

Nesse contexto, a inteligência artificial passou a ser investigada como instrumento potencial de aperfeiçoamento dos processos de aquisição e reconstrução. Uma das principais linhas de pesquisa envolve o desenvolvimento de métodos capazes de reconstruir imagens a partir de conjuntos reduzidos de dados, procurando diminuir o tempo necessário para determinados exames sem comprometer sua utilidade diagnóstica.

A relevância dessa possibilidade decorre das características da própria ressonância magnética. Diferentemente de modalidades cuja aquisição pode ocorrer em intervalos relativamente curtos, determinados protocolos de ressonância exigem sequências prolongadas, durante as quais o paciente precisa permanecer imóvel. Movimentos involuntários, desconforto e dificuldades de colaboração podem interferir na qualidade das imagens, tornando desejável o desenvolvimento de estratégias capazes de otimizar o tempo de aquisição.

Entretanto, a redução do tempo de exame não pode ser considerada um benefício isolado. O objetivo clínico da ressonância magnética consiste em produzir informações suficientemente confiáveis para responder à questão diagnóstica. Assim, métodos destinados a

acelerar a aquisição precisam demonstrar que preservam características relevantes, especialmente quando a investigação depende da identificação de alterações pequenas ou de diferenças sutis entre tecidos.

O projeto fastMRI, apresentado por Knoll et al. (2020), contribuiu para o desenvolvimento científico desse campo ao disponibilizar conjuntos de dados e favorecer pesquisas sobre reconstrução de imagens por métodos de aprendizado de máquina. A iniciativa evidencia a importância de bases compartilhadas e procedimentos de avaliação transparentes para comparar diferentes estratégias computacionais.

A reconstrução baseada em inteligência artificial, entretanto, introduz questões metodológicas relevantes. Ao utilizar relações aprendidas durante o treinamento, o sistema procura produzir imagens a partir das informações disponíveis. Dependendo do método empregado e das condições de aquisição, podem surgir diferenças entre a representação reconstruída e determinadas características presentes nos dados originais.

Essas diferenças exigem atenção porque a aparência de uma imagem pode influenciar diretamente a interpretação médica. Uma reconstrução que apresente menor ruído ou maior nitidez aparente não será necessariamente superior caso elimine detalhes relevantes ou introduza estruturas inexistentes. Por essa razão, a avaliação de métodos inteligentes deve considerar não apenas indicadores matemáticos de qualidade, mas também a capacidade de preservar informações necessárias à identificação de alterações clínicas.

Além das aplicações relacionadas à reconstrução, a inteligência artificial também tem sido investigada para segmentação de estruturas, quantificação de volumes e análise de características presentes em diferentes sequências. Essas possibilidades podem contribuir para pesquisas e atividades de acompanhamento, especialmente em situações que exigem comparação entre exames realizados em momentos distintos.

Contudo, a interpretação de resultados quantitativos depende da estabilidade dos procedimentos utilizados. Diferenças de equipamento, protocolo e processamento podem influenciar medidas, exigindo padronização e validação antes que determinadas aplicações sejam incorporadas à rotina assistencial.

A ressonância magnética demonstra, assim, que a inteligência artificial pode atuar em etapas anteriores à interpretação propriamente dita, contribuindo para a formação e o processamento das imagens. Essa característica amplia o alcance da tecnologia, mas também reforça a necessidade de avaliar seus efeitos sobre todo o processo diagnóstico.

Enquanto na ressonância magnética parte importante das pesquisas procura aperfeiçoar a aquisição e a reconstrução, outras modalidades apresentam desafios

relacionados à identificação de alterações em programas de rastreamento populacional. A mamografia constitui um exemplo particularmente relevante, pois envolve não apenas a análise de imagens, mas também decisões com repercussões clínicas e coletivas.

2.5 Inteligência artificial na mamografia e no rastreamento do câncer de mama

A mamografia desempenha papel fundamental nos programas de rastreamento do câncer de mama e na investigação de alterações mamárias, constituindo uma das áreas em que a inteligência artificial tem recebido atenção científica significativa. A relevância dessas pesquisas está relacionada à necessidade de identificar alterações potencialmente suspeitas, considerando que o desempenho dos métodos de interpretação pode influenciar a realização de investigações complementares e o encaminhamento das pacientes.

A análise mamográfica apresenta desafios específicos, decorrentes tanto das características anatômicas da mama quanto da diversidade de apresentações radiológicas das alterações investigadas. Lesões podem apresentar dimensões reduzidas, contrastes discretos ou características semelhantes às de estruturas benignas, exigindo interpretação cuidadosa. Além disso, a composição do tecido mamário pode influenciar a sensibilidade do exame e a identificação de determinados achados.

Essas particularidades favoreceram o desenvolvimento de sistemas computacionais destinados a reconhecer padrões suspeitos e auxiliar a leitura das imagens. A utilização de aprendizado profundo ampliou as possibilidades de análise automatizada, permitindo investigar modelos capazes de identificar características relacionadas à presença de alterações que demandem avaliação adicional.

McKinney et al. (2020) apresentaram estudo sobre a utilização de inteligência artificial no rastreamento do câncer de mama, contribuindo para o debate acerca do desempenho de sistemas computacionais em conjuntos de dados mamográficos. A investigação demonstrou o interesse científico em avaliar se essas ferramentas poderiam contribuir para determinadas etapas da interpretação, embora seus resultados devam ser considerados à luz das características das populações e dos protocolos estudados.

Posteriormente, o ensaio MASAI, relatado por Lång et al. (2023), investigou uma estratégia de rastreamento mamográfico apoiada por inteligência artificial. Os resultados iniciais indicaram a possibilidade de redução da carga de leitura no contexto analisado, ampliando a discussão sobre formas de integrar ferramentas computacionais aos programas de rastreamento.

Entretanto, a interpretação dessas evidências exige considerar que a avaliação de um programa de rastreamento não pode ser reduzida à capacidade de identificar imagens

suspeitas. A finalidade do rastreamento envolve benefícios e riscos que se manifestam ao longo de uma trajetória assistencial, incluindo investigações complementares, diagnósticos confirmatórios e possíveis intervenções.

Um resultado falso-positivo pode levar à realização de exames adicionais e produzir preocupação desnecessária, enquanto um falso-negativo pode contribuir para que uma alteração deixe de ser identificada no momento esperado. Consequentemente, a utilização de inteligência artificial precisa ser avaliada considerando as repercussões das classificações produzidas, e não apenas sua concordância com determinado conjunto de referência.

Outro aspecto importante envolve as diferenças entre populações e sistemas de saúde. Estratégias investigadas em programas organizados de rastreamento podem apresentar resultados distintos em ambientes com características demográficas, infraestrutura e organização assistencial diferentes. No contexto brasileiro, a heterogeneidade dos serviços e as desigualdades de acesso exigem atenção especial à possibilidade de transferência de resultados obtidos em outros países.

A incorporação de ferramentas inteligentes à mamografia também depende da definição de responsabilidades e procedimentos de supervisão. A utilização de algoritmos como apoio à leitura não elimina a necessidade de avaliação médica, tampouco dispensa mecanismos de controle de qualidade e acompanhamento dos resultados.

Assim, as pesquisas em mamografia demonstram que a inteligência artificial pode contribuir para a reorganização de determinadas estratégias de interpretação, mas sua adoção deve ser fundamentada em evidências compatíveis com as condições de utilização. A tecnologia precisa ser avaliada não apenas pela quantidade de exames processados, mas por sua capacidade de contribuir para a qualidade e a segurança do rastreamento.

Essa preocupação com resultados clinicamente relevantes também se aplica a outras áreas em que a inteligência artificial procura extrair informações quantitativas das imagens. Entre elas, destaca-se a Oncologia, na qual métodos computacionais têm sido investigados como instrumentos de apoio à caracterização de lesões e ao acompanhamento de doenças.

2.6 Radiômica, Oncologia e medicina de precisão: da imagem à informação quantitativa

A utilização de inteligência artificial na Oncologia representa uma das manifestações mais expressivas da transformação das imagens médicas em fontes de informações quantitativas. Tradicionalmente, a avaliação radiológica de lesões tumorais envolve características como localização, dimensões, morfologia, densidade, intensidade de sinal e relação com estruturas adjacentes. Embora esses elementos permaneçam fundamentais, o desenvolvimento de métodos computacionais ampliou as possibilidades de investigar

propriedades das imagens que não são necessariamente perceptíveis pela observação visual convencional.

A radiômica, apresentada no capítulo anterior como campo de extração e análise de características quantitativas, encontra nesse contexto uma área importante de aplicação. Por meio de procedimentos computacionais, podem ser investigadas medidas relacionadas à textura, à forma e à distribuição espacial de características presentes nas lesões, buscando identificar possíveis associações com aspectos biológicos e clínicos.

O interesse científico por essas abordagens está relacionado à heterogeneidade das doenças neoplásicas. Tumores classificados em uma mesma categoria podem apresentar comportamentos distintos, enquanto alterações em suas características ao longo do tempo podem refletir processos biológicos relevantes. A possibilidade de investigar relações entre padrões de imagem e informações clínicas ou moleculares estimulou pesquisas destinadas a avaliar o papel dos métodos quantitativos na medicina de precisão.

Entretanto, essa perspectiva não significa que características radiômicas possam ser interpretadas automaticamente como indicadores confiáveis de determinado comportamento tumoral. A identificação de associações exige estudos adequados, com definição clara dos desfechos investigados e procedimentos capazes de avaliar a estabilidade dos resultados.

Uma das dificuldades centrais decorre da influência dos métodos de aquisição e processamento. Diferenças de equipamento, protocolo, reconstrução e segmentação podem modificar as características extraídas, comprometendo a comparação entre exames ou instituições. Consequentemente, a utilização de informações quantitativas depende de procedimentos de padronização e validação compatíveis com a finalidade pretendida.

Além disso, o emprego de inteligência artificial para analisar conjuntos extensos de características pode produzir modelos estatisticamente complexos, mas de interpretação clínica limitada. A identificação de padrões em dados de treinamento não garante que as mesmas relações sejam observadas em populações independentes. Esse problema reforça a necessidade de estudos externos e de avaliação cuidadosa dos métodos utilizados.

A contribuição potencial da radiômica deve ser compreendida, portanto, como parte de um processo de integração de informações. Dados provenientes das imagens podem complementar características clínicas, laboratoriais e moleculares, desde que existam evidências de que essa combinação produz resultados confiáveis e relevantes.

Nesse cenário, o papel do radiologista ultrapassa a simples obtenção de medidas. O especialista participa da definição dos métodos de aquisição, da avaliação da qualidade das imagens, da interpretação das características identificadas e da discussão sobre sua pertinência

clínica. A incorporação de ferramentas quantitativas exige, assim, colaboração entre profissionais de diferentes áreas, incluindo Medicina, Estatística, Física Médica e Ciência da Computação.

Essa dimensão interdisciplinar demonstra que o avanço da inteligência artificial não depende exclusivamente do desenvolvimento de algoritmos mais sofisticados. Também exige a formulação de problemas clínicos relevantes e a produção de evidências capazes de demonstrar em quais circunstâncias determinadas informações podem contribuir para decisões assistenciais.

A mesma lógica se aplica à utilização de sistemas inteligentes na organização dos serviços radiológicos. Embora essas aplicações não estejam necessariamente relacionadas à identificação direta de doenças, podem influenciar o funcionamento das instituições e a maneira como os exames são disponibilizados para interpretação.

2.7 Inteligência artificial na organização dos serviços radiológicos e na otimização dos fluxos de trabalho

A discussão sobre inteligência artificial na Radiologia frequentemente concentra-se em aplicações destinadas à identificação de alterações nas imagens. Entretanto, parte importante das possibilidades de utilização dessas tecnologias está relacionada à organização dos serviços, à distribuição das atividades e ao processamento de informações administrativas e assistenciais.

Os serviços de diagnóstico por imagem envolvem uma sequência de procedimentos que começa antes da aquisição dos exames e se estende até a disponibilização dos resultados. Agendamento, definição de protocolos, realização dos estudos, processamento das imagens, interpretação e comunicação dos laudos constituem etapas interdependentes, cuja organização influencia tanto a eficiência institucional quanto a experiência dos pacientes.

Nesse ambiente, sistemas inteligentes podem ser investigados para auxiliar tarefas como organização de listas de trabalho, identificação de exames com determinadas características, padronização de mensurações e apoio à estruturação de informações. A finalidade dessas aplicações consiste em reduzir dificuldades operacionais e contribuir para que os recursos disponíveis sejam utilizados de maneira mais adequada.

Uma das possibilidades frequentemente discutidas envolve a priorização de exames potencialmente urgentes. Sistemas desenvolvidos para reconhecer determinados padrões radiológicos podem sinalizar estudos que mereçam avaliação antecipada, permitindo reorganizar listas de interpretação conforme critérios previamente estabelecidos.

Entretanto, essa estratégia apresenta limitações que precisam ser consideradas. A presença de uma alteração radiológica não determina, isoladamente, a gravidade de uma situação clínica. Da mesma forma, a ausência de sinalização automatizada não significa que determinado exame seja necessariamente menos importante. A definição de prioridades assistenciais depende de informações clínicas, circunstâncias do atendimento e critérios institucionais que não podem ser reduzidos exclusivamente à classificação de imagens.

Por essa razão, ferramentas destinadas à organização de fluxos precisam ser avaliadas considerando os efeitos sobre o conjunto do serviço. Um sistema que identifica corretamente determinadas alterações pode, ainda assim, produzir consequências indesejadas caso sua utilização modifique inadequadamente a ordem de interpretação ou gere confiança excessiva em resultados negativos.

Outro campo de investigação envolve a automação de tarefas repetitivas, como determinadas mensurações e procedimentos de organização de informações. Em princípio, a redução do tempo dedicado a essas atividades poderia permitir maior atenção a etapas que exigem interpretação complexa. Contudo, esse benefício não deve ser presumido, pois sistemas automatizados também podem introduzir novas demandas de conferência, supervisão e correção.

A avaliação da produtividade precisa considerar, portanto, o tempo efetivamente utilizado ao longo de todo o processo. A redução da duração de uma etapa isolada não representa necessariamente melhoria do fluxo assistencial caso outras atividades se tornem mais complexas ou exijam intervenções adicionais.

Além disso, a incorporação de novas tecnologias pode modificar a distribuição das responsabilidades entre profissionais e instituições. A definição de protocolos, o treinamento das equipes e o monitoramento dos resultados tornam-se elementos fundamentais para evitar que ferramentas inicialmente destinadas a facilitar o trabalho introduzam riscos não previstos.

A eficiência institucional deve ser compreendida como um meio para aprimorar a assistência, e não como finalidade independente. O aumento da quantidade de exames processados somente representa avanço quando acompanhado da preservação ou melhoria da qualidade diagnóstica, da segurança e da capacidade de atender adequadamente às necessidades dos pacientes.

Dessa forma, as aplicações organizacionais da inteligência artificial ampliam o debate sobre seu papel na Radiologia. A tecnologia pode influenciar não apenas a interpretação das imagens, mas também as condições em que o trabalho médico é realizado. Essa abrangência

torna indispensável examinar os critérios científicos necessários para avaliar sua confiabilidade.

2.8 Limitações científicas, validação e segurança dos sistemas inteligentes

A diversidade de aplicações apresentadas ao longo deste capítulo demonstra que a inteligência artificial possui potencial para participar de diferentes etapas da prática radiológica. Entretanto, a existência de possibilidades técnicas não elimina as limitações científicas que condicionam sua utilização. Pelo contrário, quanto maior a influência de um sistema sobre processos diagnósticos e assistenciais, mais importante se torna compreender as circunstâncias em que seus resultados podem ser considerados confiáveis.

Uma das principais dificuldades está relacionada à diferença entre o ambiente de desenvolvimento e as condições reais de utilização. Durante a pesquisa, modelos computacionais costumam ser avaliados em conjuntos de dados selecionados, com critérios previamente definidos e procedimentos destinados a mensurar seu desempenho. Na prática clínica, entretanto, os exames apresentam maior diversidade, incluindo variações técnicas, alterações incomuns e situações que podem não estar adequadamente representadas nos dados de treinamento.

Essa diferença torna a validação externa uma etapa fundamental. Ao avaliar o sistema em dados provenientes de outras instituições ou populações, procura-se investigar se os padrões identificados durante o treinamento permanecem úteis em condições distintas. Resultados satisfatórios nessa etapa fortalecem as evidências de generalização, embora não eliminem a necessidade de acompanhamento após a implementação.

A avaliação científica também depende da escolha adequada dos indicadores de desempenho. Medidas como sensibilidade e especificidade oferecem informações relevantes sobre a capacidade de identificar corretamente determinadas condições, mas não descrevem isoladamente todas as consequências clínicas de uma ferramenta. Valores preditivos, calibração e características da população também precisam ser considerados, especialmente quando a frequência da condição investigada influencia a interpretação dos resultados.

Além disso, a confiabilidade de um sistema não pode ser determinada apenas pela comparação de suas classificações com um conjunto de referência. É necessário examinar a qualidade desse padrão, considerando que diagnósticos utilizados como rótulos podem apresentar imprecisões ou diferenças de interpretação entre profissionais.

Outro desafio envolve a transparência dos métodos. Para avaliar adequadamente uma ferramenta, pesquisadores e profissionais precisam conhecer sua finalidade, as características dos dados utilizados, os procedimentos de validação e as limitações identificadas. A ausência

dessas informações dificulta a comparação entre estudos e compromete a capacidade de interpretar os resultados.

Nesse contexto, Mongan, Moy e Kahn Jr. (2020) apresentaram o checklist CLAIM, destinado a contribuir para a qualidade dos relatos científicos sobre inteligência artificial em imagens médicas. A iniciativa evidencia a importância de critérios metodológicos claros e de informações suficientes para permitir a avaliação crítica das pesquisas.

Entretanto, mesmo sistemas adequadamente avaliados antes da implementação podem apresentar mudanças de desempenho ao longo do tempo. Alterações nos equipamentos, nos protocolos, nas características das populações ou nas versões dos programas podem modificar as condições em que os modelos operam. Consequentemente, a segurança exige procedimentos de acompanhamento contínuo, com identificação de falhas e possibilidade de revisão das estratégias de utilização.

A supervisão profissional permanece importante nesse processo, mas não deve ser compreendida como solução automática para todas as limitações tecnológicas. A interação entre médicos e algoritmos também precisa ser investigada, pois recomendações automatizadas podem influenciar decisões e produzir situações de confiança excessiva ou interpretação inadequada.

Assim, a utilização responsável da inteligência artificial exige uma abordagem que integre avaliação técnica, evidências clínicas, organização institucional e acompanhamento permanente. A segurança não decorre exclusivamente da precisão de um algoritmo, mas das condições em que ele é desenvolvido, disponibilizado e utilizado.

Essa compreensão adquire especial relevância no Brasil, onde diferenças regionais e institucionais podem influenciar tanto o acesso às tecnologias quanto sua capacidade de produzir benefícios assistenciais.

2.9 Aplicações e desafios da inteligência artificial no contexto brasileiro

A incorporação da inteligência artificial à Radiologia brasileira deve ser examinada considerando as características do sistema de saúde e a diversidade das condições de atendimento existentes no país. Embora o desenvolvimento tecnológico apresente possibilidades relevantes, sua utilização ocorre em um cenário marcado por diferenças de infraestrutura, disponibilidade de equipamentos, recursos humanos e organização dos serviços.

Essas desigualdades influenciam diretamente as condições de implementação de sistemas inteligentes. Instituições com infraestrutura digital consolidada podem apresentar maior facilidade para integrar ferramentas computacionais aos sistemas de armazenamento e

comunicação de imagens. Em contrapartida, serviços com limitações tecnológicas podem enfrentar dificuldades relacionadas à conectividade, à interoperabilidade e à manutenção dos recursos necessários ao funcionamento adequado dessas aplicações.

A heterogeneidade também possui implicações científicas. Modelos desenvolvidos a partir de bases internacionais ou de instituições com características específicas podem não representar adequadamente a diversidade de populações e condições assistenciais encontradas no Brasil. Por essa razão, a validação em diferentes contextos nacionais constitui uma necessidade importante para avaliar a possibilidade de utilização clínica.

Além das diferenças de infraestrutura, é necessário considerar a organização do Sistema Único de Saúde e a participação dos serviços privados na oferta de diagnóstico por imagem. A incorporação de tecnologias deve ser analisada em relação às necessidades assistenciais, à disponibilidade de recursos e à capacidade de produzir benefícios proporcionais aos investimentos realizados.

Nesse cenário, a inteligência artificial pode apresentar oportunidades de apoio à organização de fluxos e à análise de imagens, mas seus benefícios não devem ser presumidos a partir de experiências realizadas em instituições com condições distintas. A avaliação precisa considerar se a tecnologia responde a problemas concretos e se existem recursos para garantir sua manutenção, supervisão e atualização.

A pesquisa científica brasileira desempenha papel relevante nesse processo, especialmente por permitir investigar aplicações adaptadas às características dos serviços e das populações nacionais. A participação de universidades, instituições de saúde e equipes interdisciplinares pode contribuir para o desenvolvimento de estudos de validação e para a identificação de necessidades que não são necessariamente contempladas por soluções produzidas em outros contextos.

Entretanto, a ampliação da pesquisa deve estar acompanhada de atenção à proteção dos dados de saúde, à segurança das informações e aos requisitos éticos aplicáveis. O desenvolvimento de sistemas inteligentes depende frequentemente da utilização de conjuntos de exames, cuja organização e compartilhamento exigem procedimentos compatíveis com a legislação e com a preservação dos direitos dos pacientes.

Outro aspecto importante envolve a formação profissional. A incorporação de inteligência artificial aos serviços radiológicos exige que médicos e demais profissionais compreendam suas finalidades e limitações. A ausência de preparação adequada pode comprometer a utilização crítica das ferramentas, mesmo quando estas apresentam resultados tecnicamente promissores.

Dessa forma, o desenvolvimento da inteligência artificial na Radiologia brasileira não deve ser avaliado apenas pela disponibilidade de sistemas computacionais. Seu impacto dependerá da capacidade de produzir evidências locais, superar dificuldades de infraestrutura e integrar a inovação às necessidades concretas da assistência.

A tecnologia poderá contribuir para o aprimoramento dos serviços, mas essa contribuição dependerá de escolhas científicas, institucionais e profissionais orientadas pela segurança e pela qualidade do cuidado.

2.10 Considerações finais do capítulo

A análise das aplicações clínicas da inteligência artificial demonstra que sua incorporação à Radiologia ocorre de maneira diversificada, abrangendo tarefas relacionadas à aquisição, ao processamento, à interpretação e à organização dos exames. Cada modalidade apresenta características próprias e oferece oportunidades específicas para o desenvolvimento de ferramentas computacionais, tornando inadequada qualquer compreensão que trate a inteligência artificial como uma solução única e universal.

Na radiografia convencional, as pesquisas concentram-se, entre outras possibilidades, no reconhecimento de padrões e na sinalização de alterações. Na tomografia computadorizada, destacam-se aplicações relacionadas à detecção, segmentação e análise quantitativa, enquanto a ressonância magnética apresenta oportunidades importantes no aperfeiçoamento dos processos de aquisição e reconstrução. A mamografia e a Oncologia, por sua vez, evidenciam o interesse científico em investigar sistemas capazes de contribuir para estratégias de rastreamento e caracterização de doenças.

Entretanto, a diversidade dessas aplicações também revela que a capacidade técnica de executar determinada tarefa não assegura sua utilidade clínica. A qualidade dos dados, a validação externa, a representatividade das populações e o acompanhamento dos resultados constituem condições essenciais para que sistemas inteligentes possam ser utilizados de maneira responsável.

Além disso, a incorporação de inteligência artificial modifica processos de trabalho e pode influenciar decisões profissionais. Suas repercussões, portanto, não se limitam ao desempenho dos algoritmos, mas envolvem a maneira como médicos, instituições e tecnologias interagem durante a assistência.

A análise desenvolvida neste capítulo permite reconhecer que o futuro da Radiologia não será determinado exclusivamente pela sofisticação dos sistemas computacionais. A relevância dessas ferramentas dependerá de sua capacidade de contribuir para decisões diagnósticas adequadas, respeitando as limitações científicas e as necessidades dos pacientes.

A partir dessa constatação, torna-se necessário aprofundar uma questão que acompanha toda a discussão: como o médico radiologista deverá atuar em um ambiente no qual sistemas inteligentes participam progressivamente de tarefas relacionadas à interpretação das imagens?

Responder a essa pergunta exige deslocar o foco das capacidades isoladas dos algoritmos para a relação entre inteligência humana e artificial. É essa interação, marcada por possibilidades de colaboração, limites da automação e responsabilidades profissionais, que constituirá o objeto central do próximo capítulo.

CAPÍTULO III

O RADIOLOGISTA E A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: ENTRE A INTELIGÊNCIA HUMANA E A ARTIFICIAL

3.1 Inteligência humana e artificial: diferentes capacidades na interpretação diagnóstica

A análise das aplicações clínicas da inteligência artificial, desenvolvida no capítulo anterior, demonstrou que os sistemas computacionais já participam de diferentes etapas do diagnóstico por imagem, desde o processamento e a reconstrução de exames até a identificação de padrões e a organização de informações. Entretanto, reconhecer essas possibilidades não significa compreender integralmente suas repercussões sobre a atuação médica. Para avançar nessa discussão, torna-se necessário examinar uma questão fundamental: em que medida as capacidades demonstradas pelos algoritmos se aproximam das competências exigidas do radiologista e em quais aspectos permanecem essencialmente distintas?

Essa pergunta assume relevância porque parte do debate contemporâneo sobre o futuro da Radiologia está fundamentada na comparação entre o desempenho humano e o computacional. Estudos que demonstram resultados expressivos de sistemas inteligentes em tarefas específicas frequentemente estimulam interpretações sobre a possibilidade de automatização do diagnóstico. Contudo, essas comparações exigem cautela, sobretudo quando resultados obtidos em condições experimentais são utilizados para formular conclusões abrangentes sobre atividades profissionais que envolvem múltiplas dimensões do conhecimento médico.

A inteligência artificial, particularmente por meio dos métodos de aprendizado profundo, permite desenvolver sistemas capazes de identificar regularidades estatísticas em grandes conjuntos de dados. Durante o treinamento, os algoritmos ajustam seus parâmetros para reconhecer relações entre características das imagens e determinadas classificações. Quando adequadamente desenvolvidos e validados, esses sistemas podem apresentar desempenho relevante em tarefas delimitadas, como detectar alterações, segmentar estruturas anatômicas ou estimar a probabilidade de uma condição previamente definida.

A inteligência humana, por sua vez, envolve processos cognitivos que não se restringem à identificação de regularidades visuais. Na prática médica, o raciocínio diagnóstico exige a integração de conhecimentos anatômicos, fisiológicos e fisiopatológicos, associados à interpretação das manifestações clínicas e à consideração de hipóteses alternativas. O médico precisa reconhecer não apenas aquilo que uma imagem demonstra,

mas também aquilo que suas características podem significar diante das circunstâncias individuais do paciente.

Essa distinção não implica afirmar que sistemas computacionais sejam incapazes de processar informações clínicas ou de combinar diferentes fontes de dados. O desenvolvimento de modelos multimodais demonstra justamente o interesse científico em integrar imagens, textos e outras informações. Entretanto, a capacidade de estabelecer relações computacionais entre diferentes dados não deve ser automaticamente equiparada ao exercício integral do julgamento clínico, que envolve avaliação de incertezas, consideração das consequências assistenciais e responsabilidade pelas decisões tomadas.

O radiologista atua em um ambiente no qual a interpretação raramente se resume a uma resposta binária. A identificação de uma alteração pode exigir a formulação de diagnósticos diferenciais, a comparação com exames anteriores e a avaliação da necessidade de investigação complementar. Em determinadas situações, a conclusão mais adequada não consiste em afirmar categoricamente a presença de uma doença, mas em reconhecer limites diagnósticos e indicar possibilidades que deverão ser consideradas pela equipe assistencial.

Essa capacidade de trabalhar com incertezas constitui elemento importante do conhecimento médico. Embora os sistemas inteligentes também possam produzir estimativas probabilísticas, o significado dessas informações depende da maneira como são interpretadas e incorporadas ao processo decisório. Uma classificação computacional não representa, necessariamente, a probabilidade clínica de uma doença, especialmente quando o modelo foi desenvolvido em populações ou condições diferentes daquelas encontradas no atendimento.

Topol (2019), ao discutir a convergência entre inteligência humana e artificial na Medicina, apresenta a possibilidade de utilização complementar dessas capacidades para aprimorar a assistência. Essa perspectiva contribui para deslocar o debate da oposição entre médicos e máquinas para a investigação das condições em que a interação pode produzir resultados superiores aos alcançados por cada participante isoladamente.

Entretanto, a complementaridade não deve ser tratada como consequência inevitável da presença de uma tecnologia. Um sistema pode apresentar elevado desempenho em determinada tarefa e, ainda assim, não contribuir para a decisão médica quando suas informações são inadequadas, pouco compreensíveis ou incompatíveis com o contexto clínico. Da mesma forma, recomendações automatizadas podem influenciar negativamente o julgamento profissional quando são aceitas sem avaliação crítica.

A relação entre inteligência humana e artificial precisa, portanto, ser compreendida como um problema científico e assistencial que exige investigação própria. Não basta

demonstrar que um algoritmo reconhece padrões com precisão. É necessário avaliar como suas informações são utilizadas, de que maneira modificam o comportamento dos profissionais e quais consequências produzem para os pacientes.

Essa compreensão permite identificar um ponto central para o futuro da especialidade: o desenvolvimento da inteligência artificial não elimina a necessidade de conhecimento médico, mas modifica as condições em que esse conhecimento poderá ser exercido. Para compreender a profundidade dessa transformação, torna-se necessário examinar mais detalhadamente o papel do raciocínio clínico na interpretação radiológica.

3.2 O raciocínio clínico e a interpretação contextualizada das imagens

A interpretação radiológica constitui um processo intelectual que ultrapassa a observação de estruturas anatômicas. Embora a identificação de alterações visuais represente uma etapa importante do diagnóstico, o significado clínico dos achados depende de sua relação com informações provenientes da história do paciente, das manifestações clínicas, dos exames anteriores e da finalidade da investigação solicitada.

Essa característica distingue a interpretação médica de uma tarefa exclusivamente classificatória. Um mesmo padrão radiológico pode estar associado a diferentes processos patológicos, enquanto determinadas doenças podem apresentar manifestações de imagem semelhantes. Consequentemente, a identificação de uma característica visual não encerra o raciocínio diagnóstico, mas frequentemente representa o início de uma análise mais abrangente.

Considere-se, por exemplo, a identificação de uma opacidade pulmonar em uma radiografia de tórax. A presença desse achado pode estar relacionada a diferentes condições, incluindo processos infecciosos, inflamatórios, alterações vasculares ou outras possibilidades diagnósticas. A interpretação adequada dependerá da localização, da distribuição e das características da opacidade, mas também de informações como idade, sintomas, antecedentes e evolução clínica.

Nesse cenário, a atuação do radiologista envolve estabelecer relações entre o que a imagem demonstra e aquilo que é conhecido sobre o paciente.

A interpretação não ocorre de maneira isolada, pois a relevância de determinado achado pode variar conforme a hipótese clínica investigada. Uma alteração discreta poderá assumir importância significativa em determinado contexto, enquanto características visualmente expressivas poderão representar condições já conhecidas ou sem repercussão imediata.

A análise de exames anteriores constitui outro elemento fundamental desse processo. A comparação temporal permite identificar modificações, avaliar estabilidade e reconhecer padrões de evolução que podem influenciar a interpretação. Uma estrutura que inicialmente parece suspeita pode adquirir significado diferente quando demonstrada sua permanência sem alterações relevantes ao longo de determinado período.

Além disso, o radiologista precisa avaliar a qualidade técnica do exame e reconhecer suas limitações. Posicionamento inadequado, artefatos, movimentos e diferenças nos protocolos de aquisição podem interferir na visualização das estruturas. A identificação dessas circunstâncias exige conhecimento dos princípios físicos dos métodos de imagem e capacidade de distinguir alterações reais de características produzidas pelas condições técnicas.

A inteligência artificial pode contribuir para determinadas etapas desse processo, especialmente por meio da identificação de padrões e da comparação quantitativa de informações. Entretanto, sua utilização deve considerar que o resultado computacional está condicionado à finalidade para a qual o sistema foi desenvolvido. Um algoritmo treinado para reconhecer determinada alteração não possui, necessariamente, competência validada para investigar todas as hipóteses diagnósticas relacionadas à região examinada.

Essa limitação torna-se especialmente importante diante de achados incidentais. Durante a interpretação de um exame solicitado para investigar determinada condição, o radiologista pode identificar alterações não diretamente relacionadas à hipótese inicial. A avaliação desses achados exige considerar sua relevância, suas possíveis consequências e a necessidade de comunicação ou investigação adicional.

A capacidade de reconhecer o inesperado representa uma dimensão relevante da prática radiológica. Embora sistemas inteligentes possam ser desenvolvidos para identificar múltiplas categorias de alterações, sua confiabilidade depende das condições de treinamento e validação. A ausência de sinalização automatizada não deve ser interpretada como demonstração de que todas as possibilidades patológicas foram adequadamente examinadas.

Por essa razão, a incorporação de inteligência artificial não deve enfraquecer a capacidade de interpretação independente do profissional. Ao contrário, a utilização responsável dessas ferramentas exige que o radiologista mantenha condições de reconhecer divergências, questionar classificações e identificar situações em que os resultados computacionais não correspondem às informações clínicas disponíveis.

O raciocínio clínico permanece, assim, como elemento central da atuação radiológica, não por representar uma competência imutável ou incompatível com o desenvolvimento

tecnológico, mas porque o diagnóstico envolve uma relação complexa entre informações, hipóteses e decisões. A inteligência artificial poderá modificar determinadas etapas desse processo, mas sua contribuição dependerá da maneira como suas capacidades forem integradas ao conhecimento médico.

Essa integração conduz à discussão sobre a complementaridade entre o radiologista e os sistemas inteligentes, especialmente no que se refere à distribuição de tarefas e à construção de modelos de colaboração.

3.3 A complementaridade entre o médico radiologista e os sistemas inteligentes

A possibilidade de colaboração entre médicos e sistemas de inteligência artificial constitui uma das perspectivas mais relevantes para o desenvolvimento contemporâneo da Radiologia. Entretanto, compreender essa colaboração exige superar a ideia de que a simples associação entre capacidades humanas e computacionais produzirá necessariamente resultados superiores. A complementaridade depende da identificação de tarefas adequadas, da qualidade das ferramentas utilizadas e da organização dos processos de trabalho.

Na prática radiológica, determinadas atividades apresentam características que favorecem o desenvolvimento de aplicações automatizadas. Mensurações repetitivas, segmentação de estruturas e identificação de padrões previamente definidos podem ser realizadas por sistemas computacionais desenvolvidos para essas finalidades. Quando adequadamente validados, esses recursos podem oferecer informações complementares à interpretação médica e contribuir para a padronização de procedimentos específicos.

Entretanto, o valor dessas informações depende de sua integração ao processo diagnóstico. Uma mensuração automatizada, por exemplo, poderá auxiliar o acompanhamento de determinada lesão, desde que o método utilizado seja confiável e as condições de aquisição permitam comparações adequadas. Caso existam diferenças relevantes entre os exames ou falhas de segmentação, o resultado poderá exigir revisão profissional antes de ser considerado clinicamente útil.

A complementaridade pressupõe, portanto, uma relação de avaliação recíproca entre os recursos disponíveis. O sistema computacional pode oferecer informações que auxiliem o médico, enquanto o conhecimento especializado permite verificar a coerência dessas informações e reconhecer circunstâncias em que sua utilização não é adequada.

Essa interação não deve ser compreendida como simples divisão entre uma máquina responsável por identificar alterações e um profissional encarregado de confirmar resultados. O trabalho radiológico envolve múltiplas etapas, e a contribuição da inteligência artificial poderá variar conforme a modalidade, a finalidade clínica e as características do serviço. Em

determinadas situações, a ferramenta poderá atuar antes da interpretação, auxiliando a reconstrução ou a organização das imagens. Em outras, poderá apresentar informações durante a análise ou apoiar procedimentos posteriores de quantificação e documentação.

A definição dessas funções exige considerar também os riscos relacionados à apresentação dos resultados. Uma recomendação automatizada pode chamar a atenção do radiologista para determinada região, mas também pode influenciar sua percepção de maneira inadequada. Quando a informação computacional é apresentada com aparência de elevada certeza, existe a possibilidade de que o profissional atribua ao sistema um grau de confiabilidade superior ao efetivamente demonstrado.

Por essa razão, a colaboração deve preservar condições para que o médico realize avaliação crítica e independente. O objetivo não consiste em transformar o radiologista em mero executor de recomendações algorítmicas, mas em disponibilizar recursos que possam ampliar sua capacidade de análise sem comprometer a autonomia profissional.

A European Society of Radiology (2019) destaca a importância de que os especialistas compreendam os fundamentos e as limitações da inteligência artificial, justamente para que possam participar de sua avaliação e implementação. Essa orientação demonstra que a colaboração exige competências que ultrapassam o conhecimento operacional das ferramentas.

Além disso, a integração entre médico e algoritmo deve ser avaliada considerando os resultados assistenciais. Uma ferramenta que reduz o tempo de determinada tarefa pode apresentar benefícios operacionais, mas sua contribuição clínica dependerá da preservação ou melhoria da qualidade diagnóstica. Da mesma forma, sistemas que aumentam a quantidade de informações disponíveis podem não representar avanço caso produzam sobrecarga interpretativa ou dificultem a identificação dos achados mais relevantes.

A complementaridade deve ser construída, portanto, a partir de necessidades clínicas concretas. A pergunta fundamental não é simplesmente quais atividades podem ser automatizadas, mas quais formas de automação contribuem efetivamente para a qualidade do diagnóstico e para a segurança dos pacientes.

Essa perspectiva conduz à necessidade de examinar as evidências científicas sobre a colaboração entre profissionais e sistemas inteligentes. Afinal, a hipótese de que a interação humano-algoritmo pode aprimorar decisões precisa ser demonstrada por pesquisas que avaliem o desempenho conjunto, e não apenas as capacidades isoladas de cada participante.

3.4 Evidências científicas sobre a colaboração entre médicos e algoritmos

O desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de executar tarefas diagnósticas específicas estimulou pesquisas destinadas a comparar seu desempenho com o de profissionais de saúde. Entretanto, a avaliação da colaboração entre médicos e algoritmos apresenta desafios metodológicos próprios, uma vez que o resultado da interação não corresponde necessariamente à soma das capacidades demonstradas individualmente.

Um sistema computacional pode apresentar elevado desempenho em determinada classificação, enquanto um médico pode alcançar resultados semelhantes por meio de estratégias interpretativas distintas. Contudo, quando ambos participam de um mesmo processo decisório, a recomendação automatizada pode modificar o comportamento profissional, influenciando a atenção, a confiança e a interpretação dos achados.

Essa influência pode produzir resultados favoráveis quando o sistema contribui para identificar alterações não percebidas inicialmente ou oferece informações quantitativas relevantes. Entretanto, também pode gerar consequências negativas quando recomendações incorretas são aceitas sem avaliação suficiente ou quando o profissional passa a atribuir menor importância a informações que não foram sinalizadas pelo algoritmo.

Tschandl et al. (2020), em estudo relacionado à classificação de lesões cutâneas, investigaram aspectos da colaboração entre profissionais e sistemas de inteligência artificial. Embora a pesquisa pertença ao campo da Dermatologia, seus resultados contribuem para demonstrar que a interação humano-computador constitui objeto de investigação próprio e que seus efeitos dependem das condições em que as recomendações são apresentadas e utilizadas.

A transferência dessas conclusões para a Radiologia exige cautela, considerando as diferenças entre modalidades diagnósticas, características das imagens e processos assistenciais. Ainda assim, o estudo oferece uma contribuição metodológica importante ao evidenciar que a avaliação de sistemas inteligentes não deve permanecer restrita ao desempenho computacional isolado.

Na Radiologia, pesquisas sobre colaboração precisam considerar diferentes indicadores. Além da precisão diagnóstica, podem ser avaliados o tempo de interpretação, a frequência de erros, a concordância entre profissionais e sistemas e as consequências das decisões tomadas. A análise também deve investigar se a utilização da ferramenta modifica a capacidade do radiologista de reconhecer achados inesperados ou de questionar recomendações inadequadas.

Outro aspecto relevante envolve a experiência profissional. Radiologistas em diferentes estágios de formação podem interagir de maneira distinta com recomendações

automatizadas. Profissionais menos experientes podem encontrar apoio em determinadas ferramentas, mas também podem apresentar maior dificuldade para reconhecer classificações incorretas. Especialistas experientes, por sua vez, podem utilizar os resultados como informações complementares, embora não estejam imunes à influência de recomendações apresentadas com elevada confiança.

Essas diferenças demonstram que o benefício da colaboração não deve ser presumido como uniforme. A avaliação precisa considerar as características dos usuários, o tipo de tarefa e a forma como as informações são disponibilizadas.

Além disso, a utilização de inteligência artificial pode modificar a distribuição da atenção durante a interpretação. Quando o sistema destaca determinadas regiões, o profissional pode concentrar sua análise nesses pontos, potencialmente reduzindo a observação de outras estruturas. Esse fenômeno reforça a necessidade de investigar não apenas os resultados finais, mas também os processos cognitivos envolvidos na interação.

A produção de evidências consistentes exige, portanto, desenhos de estudo que representem adequadamente as condições reais de utilização. Comparações experimentais podem demonstrar possibilidades iniciais, mas a implementação clínica demanda avaliação em ambientes assistenciais, com acompanhamento dos efeitos sobre profissionais e pacientes.

A colaboração humano-algoritmo deve ser compreendida como uma construção que depende de conhecimento científico, organização institucional e formação profissional. Seu potencial não reside simplesmente na presença de duas fontes de informação, mas na capacidade de integrá-las de maneira crítica e clinicamente relevante.

Essa necessidade de avaliação torna-se ainda mais evidente quando se examinam os riscos associados à confiança excessiva em sistemas automatizados.

3.5 Os riscos da confiança excessiva e do viés de automação

A incorporação de inteligência artificial aos processos diagnósticos introduz uma questão que ultrapassa a precisão dos algoritmos: a maneira como os profissionais interpretam e utilizam recomendações produzidas por sistemas computacionais. Mesmo quando uma ferramenta apresenta desempenho satisfatório, sua presença pode modificar o comportamento humano e influenciar decisões de formas que nem sempre correspondem aos objetivos inicialmente pretendidos.

Entre os fenômenos associados a essa interação, destaca-se o viés de automação, caracterizado pela tendência de atribuir confiança excessiva a informações ou recomendações automatizadas, especialmente quando apresentadas como resultados de sistemas considerados tecnicamente avançados. Esse comportamento pode levar à aceitação de classificações

incorretas ou à redução da atenção dedicada a elementos que não foram destacados pela ferramenta.

Na Radiologia, esse risco assume relevância porque a interpretação exige observação sistemática e integração de múltiplas informações. Um sistema destinado a identificar determinada alteração pode apresentar resultado negativo, embora existam características relevantes que não foram reconhecidas. Caso o profissional interprete essa ausência de sinalização como confirmação de normalidade, poderá reduzir indevidamente sua avaliação.

O problema não decorre necessariamente de desconhecimento técnico. A confiança excessiva pode surgir mesmo entre profissionais experientes, especialmente quando sistemas apresentam resultados consistentes durante períodos prolongados. A repetição de recomendações aparentemente corretas pode favorecer a percepção de que a ferramenta possui confiabilidade superior à efetivamente demonstrada.

Além disso, a maneira como os resultados são apresentados influencia sua interpretação. Informações expressas em percentuais, classificações ou representações visuais podem transmitir uma aparência de precisão que não corresponde necessariamente à incerteza envolvida. Uma probabilidade produzida por um modelo, por exemplo, depende das condições de treinamento e da calibração do sistema, não podendo ser automaticamente interpretada como medida direta da probabilidade clínica de doença.

A prevenção desses riscos exige estratégias que envolvam formação, organização dos processos de trabalho e desenvolvimento adequado das interfaces. O profissional precisa compreender a finalidade da ferramenta, suas limitações conhecidas e as circunstâncias em que seus resultados podem ser menos confiáveis.

Entretanto, a responsabilidade pela prevenção do viés de automação não deve ser atribuída exclusivamente ao usuário. Instituições e desenvolvedores também participam da definição das condições de utilização, incluindo a maneira como as informações são apresentadas, os procedimentos de treinamento e os mecanismos de monitoramento.

A avaliação de sistemas inteligentes deve considerar, portanto, a possibilidade de que uma ferramenta tecnicamente adequada produza efeitos indesejados quando integrada de maneira inadequada ao processo assistencial. O desempenho computacional representa apenas uma dimensão da segurança, enquanto a interação humana constitui elemento igualmente importante.

Essa constatação reforça a necessidade de preservar a capacidade de julgamento independente do radiologista. A inteligência artificial pode oferecer informações relevantes, mas sua

utilização não deve substituir a análise crítica das imagens nem impedir que o profissional reconheça situações incompatíveis com as recomendações automatizadas.

A prevenção da confiança excessiva também depende da transparência sobre o funcionamento e as limitações dos sistemas. Quanto maior a capacidade do médico de compreender as condições em que determinada recomendação foi produzida, melhores poderão ser suas possibilidades de avaliar criticamente sua pertinência.

É nesse ponto que os debates sobre transparência e explicabilidade adquirem importância para a prática radiológica.

3.6 Transparência, explicabilidade e avaliação crítica das recomendações

A confiança constitui elemento necessário à utilização de qualquer tecnologia médica, mas não deve ser confundida com aceitação irrestrita de seus resultados. Na Radiologia, a incorporação de sistemas inteligentes exige que profissionais e instituições disponham de informações suficientes para compreender suas finalidades, condições de utilização e limitações. Essa necessidade torna especialmente relevantes os conceitos de transparência e explicabilidade.

A transparência refere-se à disponibilidade de informações sobre o desenvolvimento, a avaliação e o funcionamento dos sistemas. Envolve aspectos como a finalidade declarada da ferramenta, as características dos dados utilizados, os procedimentos de validação e as condições em que seu desempenho foi investigado. Essas informações permitem avaliar se os resultados apresentados são compatíveis com o contexto clínico em que se pretende utilizar a tecnologia.

A explicabilidade, por sua vez, está relacionada às possibilidades de compreender os fatores associados às classificações ou recomendações produzidas pelos modelos. Em determinadas aplicações de análise de imagens, recursos visuais podem destacar regiões que contribuíram para o resultado computacional, oferecendo elementos adicionais para a avaliação profissional.

Entretanto, a existência de representações visuais não demonstra, por si só, que o sistema utilizou critérios clinicamente adequados. Mapas de atenção e outros recursos interpretativos podem oferecer informações úteis, mas também apresentam limitações metodológicas. Sua utilização exige cuidado para evitar que representações aparentemente intuitivas sejam confundidas com explicações completas do funcionamento dos modelos.

Essa distinção é importante porque o radiologista não precisa necessariamente compreender todos os procedimentos matemáticos empregados por determinado algoritmo

para utilizá-lo de maneira crítica. Entretanto, deve conhecer sua finalidade, reconhecer as condições em que foi validado e compreender os limites das informações apresentadas.

A avaliação crítica também depende da qualidade da documentação científica. Estudos que descrevem de maneira insuficiente seus dados, métodos ou procedimentos de validação dificultam a interpretação dos resultados e a comparação entre diferentes ferramentas. Por essa razão, iniciativas destinadas à padronização dos relatos científicos possuem relevância para o desenvolvimento responsável da inteligência artificial.

Mongan, Moy e Kahn Jr. (2020), ao apresentarem o checklist CLAIM, contribuíram para essa discussão ao estabelecer orientações voltadas à qualidade dos relatos de estudos sobre inteligência artificial em imagens médicas. A proposta reforça a importância de informações metodológicas claras para que pesquisadores e profissionais possam avaliar adequadamente as evidências disponíveis.

Entretanto, transparência e explicabilidade não eliminam automaticamente os riscos associados à utilização dos sistemas. Uma ferramenta pode apresentar documentação adequada e ainda assim produzir resultados incorretos em determinadas circunstâncias. Da mesma forma, a identificação de fatores relacionados a uma classificação não substitui a necessidade de verificar sua correspondência com o contexto clínico.

A confiança deve ser construída, portanto, a partir de evidências, experiência supervisionada e acompanhamento contínuo. O objetivo não consiste em exigir certeza absoluta sobre todos os resultados, mas em estabelecer condições para reconhecer limitações e tomar decisões proporcionais às informações disponíveis.

Essa compreensão aproxima a discussão tecnológica de uma dimensão fundamental da Medicina: a responsabilidade de comunicar informações de maneira adequada e considerar as consequências das decisões para as pessoas envolvidas.

Na Radiologia, essa responsabilidade se manifesta especialmente na elaboração dos laudos, na comunicação de achados relevantes e na integração com os demais profissionais da assistência.

3.7 A comunicação médica e a dimensão humana do diagnóstico radiológico

A Radiologia é frequentemente associada à utilização de equipamentos sofisticados e à interpretação de imagens, circunstância que pode produzir a impressão de que sua prática se desenvolve predominantemente em um ambiente tecnológico, distante das relações humanas presentes em outras especialidades. Entretanto, essa percepção não corresponde integralmente à complexidade do trabalho radiológico, cuja finalidade permanece diretamente vinculada ao cuidado de pessoas.

Cada exame realizado integra uma trajetória assistencial. A solicitação de uma investigação por imagem geralmente decorre de sintomas, suspeitas diagnósticas, acompanhamento de doenças ou necessidade de avaliação terapêutica. Consequentemente, as informações produzidas pelo radiologista podem influenciar decisões que ultrapassam o ambiente do serviço de diagnóstico, alcançando a definição de tratamentos, a realização de procedimentos e o acompanhamento clínico.

Nesse contexto, o laudo radiológico constitui um instrumento fundamental de comunicação médica. Sua elaboração exige transformar informações visuais em uma descrição tecnicamente adequada, organizada e compreensível para os profissionais responsáveis pelo atendimento. A qualidade dessa comunicação depende não apenas da identificação correta dos achados, mas também da capacidade de selecionar informações relevantes e apresentar conclusões compatíveis com a questão clínica investigada.

A inteligência artificial pode contribuir para determinadas etapas desse processo, especialmente por meio da organização de informações, da padronização de estruturas textuais e do apoio à elaboração de documentos. Entretanto, a utilização dessas ferramentas exige atenção à correspondência entre o conteúdo produzido e os achados efetivamente presentes no exame.

Essa preocupação torna-se particularmente importante diante dos sistemas de inteligência artificial generativa, capazes de produzir textos linguisticamente coerentes a partir de comandos e informações disponibilizadas. A fluidez de uma descrição, contudo, não assegura sua precisão clínica. Um texto pode apresentar estrutura adequada e linguagem convincente, mesmo quando contém informações incorretas, incompletas ou não sustentadas pelas imagens.

Por essa razão, a utilização de recursos generativos na elaboração de laudos deve preservar procedimentos de conferência e responsabilidade profissional. A tecnologia pode auxiliar na organização do texto, mas não deve transformar informações não verificadas em conclusões diagnósticas.

Além da elaboração dos laudos, a comunicação radiológica envolve situações que exigem interação direta entre profissionais. A identificação de achados críticos pode demandar comunicação oportuna à equipe assistencial, especialmente quando o resultado possui potencial de modificar decisões imediatas. Nessas circunstâncias, a qualidade da assistência depende não apenas da precisão da interpretação, mas também da efetividade da transmissão das informações.

A dimensão humana da Radiologia também se manifesta na realização de procedimentos e no contato com pacientes durante determinados exames. Orientações, esclarecimentos e atenção às condições individuais constituem elementos importantes para a segurança e a qualidade do atendimento. A incorporação de sistemas inteligentes não elimina essas necessidades, tampouco substitui o compromisso profissional com o respeito à dignidade e à autonomia das pessoas.

A humanização da assistência não deve ser compreendida como característica oposta ao desenvolvimento tecnológico. Recursos adequadamente utilizados podem contribuir para melhorar processos e ampliar a disponibilidade de informações. Entretanto, a tecnologia somente estará efetivamente a serviço do cuidado quando suas aplicações forem orientadas pelas necessidades dos pacientes e pelas responsabilidades dos profissionais.

Essa perspectiva reforça que a atuação do radiologista não pode ser definida exclusivamente pela capacidade de reconhecer alterações em imagens. Sua função integra uma rede de relações clínicas, decisões e responsabilidades que atribuem significado às informações produzidas.

A preservação dessa dimensão humana exige, por sua vez, examinar como a autonomia profissional e a responsabilidade médica deverão ser compreendidas diante da utilização crescente de recomendações automatizadas.

3.8 Autonomia profissional e responsabilidade na utilização dos sistemas inteligentes

A incorporação de inteligência artificial à prática radiológica modifica as condições em que determinadas informações são produzidas e utilizadas, mas não elimina a necessidade de definir responsabilidades pelas decisões assistenciais. Ao contrário, a participação de sistemas computacionais introduz novas questões relacionadas à atuação dos profissionais, às obrigações das instituições e ao papel dos desenvolvedores das tecnologias.

A autonomia profissional constitui elemento importante desse debate, pois envolve a capacidade de exercer julgamento fundamentado em conhecimentos científicos, critérios técnicos e princípios éticos. Na Radiologia, essa autonomia se manifesta na interpretação dos exames, na avaliação de limitações e na formulação de conclusões compatíveis com as informações disponíveis.

A utilização de recomendações automatizadas pode ampliar os recursos disponíveis ao médico, mas também introduzir situações de divergência entre a avaliação profissional e o resultado computacional. Nesses casos, torna-se necessário compreender que a presença de uma classificação produzida por algoritmo não representa, por si só, fundamento suficiente para afastar a análise crítica do especialista.

Entretanto, a preservação da autonomia não significa que toda responsabilidade relacionada ao funcionamento de sistemas inteligentes deva ser atribuída exclusivamente ao médico. As condições de desenvolvimento, validação, disponibilização e manutenção das ferramentas também influenciam sua segurança e confiabilidade.

Uma falha associada à utilização de inteligência artificial pode decorrer de diferentes circunstâncias, incluindo limitações do modelo, inadequação dos dados, problemas de integração ou utilização incompatível com a finalidade prevista. A identificação de responsabilidades exige, portanto, examinar as características concretas do caso e as obrigações atribuídas aos diferentes participantes.

A Organização Mundial da Saúde (2021), ao apresentar orientações sobre ética e governança da inteligência artificial em saúde, destaca princípios relacionados à autonomia humana, à transparência, à responsabilidade e à segurança. Esses fundamentos contribuem para compreender que a incorporação tecnológica deve ocorrer em condições capazes de preservar o controle humano significativo e permitir a identificação de responsabilidades.

No ambiente institucional, essa orientação exige a definição de procedimentos claros para utilização dos sistemas. Protocolos de supervisão, documentação de limitações, treinamento das equipes e mecanismos de comunicação de falhas constituem elementos importantes para reduzir riscos e favorecer a utilização responsável das ferramentas.

A responsabilidade também envolve o acompanhamento das mudanças tecnológicas. Sistemas computacionais podem receber atualizações ou passar a operar em condições diferentes daquelas originalmente avaliadas. Essas alterações podem influenciar seu desempenho e exigir novas verificações, especialmente quando afetam funções relacionadas ao diagnóstico.

A autonomia médica deve ser compreendida, assim, como capacidade de participar criticamente da utilização das tecnologias, e não como rejeição à inovação. O radiologista precisa dispor de conhecimentos e condições institucionais que permitam avaliar recomendações, reconhecer limitações e exercer suas funções com responsabilidade.

Essa compreensão torna evidente que a inteligência artificial não representa apenas um novo recurso técnico. Sua incorporação modifica relações entre profissionais, instituições e sistemas computacionais, exigindo formas de governança compatíveis com a complexidade da assistência.

Ao mesmo tempo, o desenvolvimento de modelos generativos e multimodais amplia o alcance dessas discussões, uma vez que novas ferramentas passam a participar não apenas da análise de imagens, mas também da organização e da produção de informações textuais.

3.9 Inteligência artificial generativa e novas perspectivas de colaboração

O desenvolvimento recente da inteligência artificial generativa ampliou o debate sobre as possibilidades de utilização de sistemas computacionais na Medicina. Diferentemente de aplicações destinadas exclusivamente à classificação ou à identificação de padrões previamente definidos, modelos generativos podem produzir conteúdos textuais e outras representações a partir de informações fornecidas durante sua utilização.

Na Radiologia, essas capacidades despertaram interesse por aplicações relacionadas à organização de laudos, à elaboração de documentos, ao apoio educacional e à integração de informações provenientes de diferentes fontes. Entretanto, sua utilização apresenta características próprias, que exigem avaliação distinta daquela aplicada a sistemas tradicionais de detecção e classificação de imagens.

Uma das principais particularidades dos modelos generativos está na capacidade de produzir textos linguisticamente coerentes mesmo quando determinadas informações não correspondem adequadamente aos dados disponíveis. Esse fenômeno evidencia que a qualidade formal da linguagem não constitui garantia de precisão científica ou clínica.

No contexto radiológico, essa limitação assume relevância porque os laudos representam documentos médicos com possíveis repercussões sobre decisões assistenciais. A inclusão de informações incorretas, a omissão de achados ou a formulação de conclusões não sustentadas pelas imagens podem comprometer a qualidade da comunicação e influenciar condutas.

Por essa razão, aplicações generativas destinadas à elaboração ou ao aperfeiçoamento de textos radiológicos precisam ser avaliadas considerando sua fidelidade às informações de origem. A utilização dessas ferramentas deve preservar mecanismos de revisão capazes de identificar inconsistências e garantir que o conteúdo final corresponda aos achados efetivamente observados.

Além da produção textual, o desenvolvimento de sistemas multimodais apresenta perspectivas relevantes para a integração entre imagens e informações clínicas. Esses modelos procuram processar diferentes tipos de dados, permitindo investigar relações entre representações visuais, descrições textuais e outros registros.

A possibilidade de integrar informações provenientes de múltiplas fontes aproxima determinadas aplicações computacionais de etapas mais abrangentes do processo diagnóstico. Entretanto, essa ampliação não significa que os sistemas tenham alcançado capacidade de raciocínio clínico equivalente à atuação integral de um especialista.

A avaliação de modelos multimodais precisa considerar a qualidade de cada fonte de informação, as condições de treinamento e os riscos associados à produção de resultados

inadequados. A combinação de dados não elimina automaticamente limitações existentes em seus componentes, podendo inclusive introduzir novas dificuldades de interpretação.

Outro campo relevante envolve a educação médica. Ferramentas generativas podem ser investigadas como recursos de apoio à organização de conteúdos, à elaboração de materiais didáticos e à discussão de conceitos. Contudo, sua utilização deve ser acompanhada de verificação científica, especialmente quando informações produzidas automaticamente são utilizadas em processos formativos.

A incorporação dessas tecnologias à formação e à prática profissional exige, portanto, uma postura crítica. O interesse pelas novas possibilidades não deve conduzir à aceitação indiscriminada de resultados, assim como a existência de limitações não justifica desconsiderar suas aplicações potenciais.

O desenvolvimento da inteligência artificial generativa demonstra que as transformações tecnológicas da Radiologia continuam em expansão. À medida que novas ferramentas passam a integrar diferentes tipos de informação, tornam-se mais complexas as questões relacionadas à interpretação, à supervisão e à responsabilidade profissional.

Essa evolução reforça a necessidade de compreender o radiologista como participante ativo do desenvolvimento tecnológico. Sua atuação poderá envolver não apenas a utilização de sistemas inteligentes, mas também a avaliação de suas finalidades, a identificação de problemas clínicos relevantes e a participação em pesquisas destinadas a verificar sua segurança e utilidade.

A colaboração entre inteligência humana e artificial deverá ser construída, portanto, a partir de evidências e de uma compreensão abrangente das necessidades assistenciais. O objetivo não consiste em reproduzir automaticamente todas as atividades médicas, mas em investigar de que maneira capacidades computacionais podem contribuir para uma prática radiológica mais segura, eficiente e cientificamente fundamentada.

3.10 Considerações finais do capítulo

A análise da relação entre o radiologista e a inteligência artificial demonstra que o debate sobre o futuro da especialidade não pode ser reduzido à comparação entre desempenho humano e computacional. Embora sistemas inteligentes apresentem capacidades relevantes em tarefas específicas, a prática radiológica envolve processos interpretativos, decisões clínicas e responsabilidades que ultrapassam o reconhecimento isolado de padrões nas imagens.

A inteligência artificial pode contribuir para a detecção de alterações, a realização de mensurações e a organização de informações, mas sua utilização exige compreender as

condições em que os resultados são produzidos e os limites de sua aplicação. A presença de recomendações automatizadas não elimina a necessidade de avaliação crítica, especialmente diante de situações complexas ou informações divergentes.

Ao mesmo tempo, a preservação do julgamento clínico não significa que a atuação profissional permanecerá inalterada. A incorporação de sistemas inteligentes poderá modificar processos de trabalho, ampliar a disponibilidade de informações e exigir novas competências relacionadas à avaliação tecnológica e à interpretação de evidências.

A complementaridade entre inteligência humana e artificial deve ser compreendida como possibilidade a ser construída e demonstrada, e não como resultado automático do desenvolvimento tecnológico. Seu êxito dependerá da qualidade dos sistemas, da formação dos profissionais e da existência de condições institucionais adequadas.

Nesse cenário, a autonomia e a responsabilidade médica permanecem fundamentais, mas passam a ser exercidas em um ambiente no qual diferentes participantes contribuem para a produção e a utilização de informações diagnósticas. A definição de responsabilidades exige reconhecer as atribuições de profissionais, instituições e desenvolvedores, evitando tanto a transferência indiscriminada de obrigações quanto a ausência de mecanismos de supervisão.

A dimensão humana da Radiologia também permanece central. A finalidade do diagnóstico por imagem não consiste apenas em produzir representações anatômicas ou classificações computacionais, mas em oferecer informações capazes de contribuir para o cuidado de pessoas. A qualidade da assistência depende, portanto, da integração entre precisão técnica, julgamento clínico, comunicação adequada e respeito às necessidades dos pacientes.

A partir dessas considerações, torna-se possível reconhecer que a incorporação da inteligência artificial não representa apenas um desafio científico ou profissional. Sua utilização também envolve questões relacionadas à proteção de dados, à transparência, à equidade e à responsabilidade pelas consequências das decisões assistenciais.

Se a colaboração entre médicos e sistemas inteligentes constitui uma possibilidade para o futuro da Radiologia, sua legitimidade dependerá das condições éticas, jurídicas e científicas em que essa colaboração será desenvolvida.

É justamente essa dimensão que orientará o capítulo seguinte, dedicado aos desafios éticos, jurídicos e científicos da inteligência artificial na prática radiológica.

CAPÍTULO IV

DESAFIOS ÉTICOS, JURÍDICOS E CIENTÍFICOS DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA RADIOLOGIA

4.1 A inovação tecnológica e os fundamentos da ética médica

A análise da relação entre o radiologista e a inteligência artificial, desenvolvida no capítulo anterior, demonstrou que a incorporação de sistemas inteligentes à prática médica ultrapassa a simples introdução de novos instrumentos de diagnóstico. Ao participar de atividades relacionadas à interpretação de imagens, à identificação de alterações e à organização de informações clínicas, essas tecnologias passam a influenciar processos decisórios cujas consequências podem repercutir diretamente sobre a saúde e a vida dos pacientes. Nesse cenário, a discussão sobre as possibilidades de colaboração entre inteligência humana e artificial conduz inevitavelmente a uma questão mais abrangente: quais princípios devem orientar o desenvolvimento e a utilização dessas ferramentas para que o avanço tecnológico permaneça compatível com as finalidades éticas da Medicina?

A formulação dessa pergunta exige reconhecer que a inovação científica, embora constitua elemento fundamental do progresso médico, não representa um valor absoluto ou independente de suas consequências. Ao longo da história, diferentes descobertas ampliaram a capacidade de diagnosticar e tratar doenças, mas também produziram novos riscos, responsabilidades e desafios relacionados à proteção das pessoas. A própria evolução da Radiologia oferece um exemplo dessa relação, uma vez que a descoberta dos raios X, inicialmente celebrada por suas possibilidades diagnósticas, tornou necessário desenvolver conhecimentos e normas de proteção radiológica diante dos efeitos associados à exposição à radiação ionizante.

Essa experiência histórica demonstra que o aperfeiçoamento tecnológico precisa ser acompanhado por uma reflexão permanente sobre as condições de sua utilização. No caso da inteligência artificial, essa exigência assume características particulares porque os sistemas não se limitam a produzir imagens ou realizar procedimentos técnicos. Em determinadas aplicações, passam a fornecer classificações, estimativas e recomendações capazes de influenciar a interpretação médica. Consequentemente, sua utilização exige considerar não apenas a precisão dos resultados, mas também a maneira como esses resultados são produzidos, apresentados e incorporados às decisões assistenciais.

A ética médica oferece fundamentos importantes para essa avaliação. Princípios relacionados à beneficência, à não maleficência, à autonomia e à justiça permitem examinar

se determinada tecnologia contribui efetivamente para o cuidado, se seus riscos são proporcionais aos benefícios esperados e se sua utilização respeita os direitos e as necessidades dos pacientes. Esses princípios não devem ser compreendidos como obstáculos ao desenvolvimento científico, mas como referências para orientar a inovação em direção a finalidades socialmente legítimas.

A beneficência, nesse contexto, exige que a incorporação de sistemas inteligentes esteja vinculada à possibilidade de produzir resultados favoráveis à assistência. Não basta demonstrar que determinado algoritmo executa uma tarefa com rapidez ou apresenta desempenho estatístico elevado. É necessário investigar se sua utilização contribui para melhorar a qualidade do diagnóstico, reduzir falhas relevantes ou aperfeiçoar o atendimento. A não maleficência, por sua vez, impõe atenção aos riscos decorrentes de classificações incorretas, recomendações inadequadas e dificuldades de supervisão.

A autonomia também adquire importância particular, pois a utilização de inteligência artificial pode envolver o tratamento de informações sensíveis e influenciar decisões relacionadas ao cuidado. O respeito à autonomia não significa necessariamente que cada operação tecnológica dependa de autorização individual específica, mas exige que os direitos dos pacientes sejam considerados conforme a natureza do procedimento, as normas aplicáveis e as condições concretas de utilização dos dados.

A justiça, por fim, amplia a discussão para além do atendimento individual, permitindo examinar como os benefícios e riscos da inovação são distribuídos entre diferentes grupos sociais. Uma tecnologia que apresenta resultados satisfatórios em instituições com infraestrutura avançada pode não oferecer o mesmo desempenho em serviços com características distintas. Da mesma forma, sistemas desenvolvidos a partir de populações pouco representativas podem reproduzir ou ampliar desigualdades existentes.

A Organização Mundial da Saúde (2021), ao apresentar orientações sobre ética e governança da inteligência artificial em saúde, destaca princípios relacionados à proteção da autonomia humana, à promoção do bem-estar, à transparência, à responsabilidade, à inclusão e à sustentabilidade. Essas orientações demonstram que a avaliação ética precisa acompanhar todo o ciclo de desenvolvimento e utilização dos sistemas, desde a seleção dos dados até o monitoramento de seus efeitos na assistência.

No Brasil, os fundamentos do Código de Ética Médica também oferecem referências relevantes para essa discussão, especialmente no que diz respeito à responsabilidade profissional, ao respeito à dignidade humana e à utilização de conhecimentos científicos em benefício dos pacientes. Embora a inteligência artificial apresente desafios específicos, sua

incorporação não afasta os compromissos éticos que tradicionalmente orientam o exercício da Medicina.

Dessa forma, a avaliação ética de sistemas inteligentes não pode ocorrer apenas após sua implementação, como resposta a eventuais problemas. Precisa integrar as decisões relacionadas ao desenvolvimento, à validação, à aquisição e à utilização dessas tecnologias. Essa perspectiva permite compreender que a qualidade de uma inovação médica depende tanto de suas capacidades técnicas quanto das condições em que seus resultados são utilizados.

Entre essas condições, a segurança do paciente ocupa posição central. Afinal, quando um sistema computacional participa de atividades relacionadas ao diagnóstico, eventuais falhas deixam de representar apenas problemas tecnológicos e podem produzir consequências concretas sobre a assistência.

4.2 A segurança do paciente e a confiabilidade dos sistemas inteligentes

A segurança do paciente constitui uma das principais referências para avaliar a incorporação de inteligência artificial à prática radiológica. Embora sistemas computacionais possam contribuir para determinadas tarefas diagnósticas, sua utilização também introduz riscos relacionados à produção de resultados incorretos, à interpretação inadequada de recomendações e à possibilidade de desempenho insatisfatório em condições diferentes daquelas utilizadas durante o desenvolvimento.

Esses riscos precisam ser compreendidos considerando a natureza das decisões envolvidas no diagnóstico por imagem. Um exame radiológico frequentemente integra uma investigação clínica mais ampla, podendo orientar a realização de procedimentos, a definição de tratamentos ou o acompanhamento de doenças. Consequentemente, a confiabilidade das informações produzidas possui relevância que ultrapassa a avaliação técnica do sistema.

Entre as falhas possíveis, destacam-se os resultados falso-positivos e falso-negativos. Um falso-positivo ocorre quando o sistema identifica determinada condição que não está presente segundo o padrão de referência adotado, enquanto um falso-negativo corresponde à ausência de identificação de uma condição efetivamente existente. Embora esses conceitos sejam comuns à avaliação de métodos diagnósticos, suas consequências dependem da finalidade da ferramenta e do contexto clínico.

Na Radiologia, um resultado falso-positivo pode contribuir para investigações adicionais desnecessárias, enquanto um falso-negativo pode dificultar o reconhecimento oportuno de uma alteração relevante. Entretanto, a gravidade dessas situações não depende exclusivamente da classificação produzida. Também envolve a maneira como o resultado é

apresentado, a existência de supervisão profissional e as decisões tomadas a partir da informação.

Por essa razão, a avaliação da segurança não pode ser reduzida a um único indicador estatístico. Sensibilidade, especificidade, valores preditivos e calibração oferecem informações complementares sobre o desempenho de um sistema, mas precisam ser interpretados considerando a frequência da condição investigada, as características da população e as consequências dos erros.

A utilização de modelos computacionais também apresenta riscos relacionados à mudança das condições de funcionamento. Um algoritmo desenvolvido a partir de exames produzidos por determinados equipamentos pode apresentar desempenho diferente quando utilizado em aparelhos de outros fabricantes ou com protocolos distintos. Da mesma forma, alterações nas características dos pacientes atendidos podem influenciar os resultados, especialmente quando essas diferenças não estavam adequadamente representadas nos dados de treinamento.

Essa possibilidade demonstra que a segurança não constitui uma característica definitivamente estabelecida no momento da validação inicial. Ao contrário, precisa ser acompanhada durante todo o período de utilização da tecnologia. Mudanças nos equipamentos, atualizações dos programas e modificações nos processos de trabalho podem exigir novas avaliações para verificar se o desempenho permanece compatível com a finalidade pretendida.

Kelly et al. (2019) destacam dificuldades relacionadas à transição entre resultados experimentais e impacto clínico efetivo, reforçando a importância da validação e da integração adequada aos serviços. Essa contribuição permite compreender que a demonstração de desempenho em laboratório constitui uma etapa importante, mas insuficiente para assegurar benefícios assistenciais.

No ambiente institucional, a segurança exige a definição de procedimentos capazes de identificar falhas, registrar incidentes e estabelecer medidas corretivas. A utilização de inteligência artificial deve integrar os mecanismos gerais de gestão de riscos dos serviços de saúde, considerando tanto as características técnicas da ferramenta quanto as condições de trabalho dos profissionais.

No Brasil, a Resolução da Diretoria Colegiada nº 36/2013 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária estabelece ações voltadas à segurança do paciente em serviços de saúde. Embora não tenha sido elaborada especificamente para regulamentar inteligência artificial,

oferece referências institucionais relevantes para compreender a importância da gestão de riscos e da prevenção de incidentes assistenciais.

A segurança também depende da capacidade de reconhecer limitações dos sistemas e evitar confiança excessiva em suas recomendações. Conforme discutido no capítulo anterior, a apresentação de resultados automatizados pode influenciar o comportamento profissional, tornando necessário preservar procedimentos de avaliação crítica.

Entretanto, a confiabilidade de uma ferramenta não depende apenas de seu funcionamento técnico. Também está relacionada às características dos dados utilizados em seu desenvolvimento. Quando determinadas populações, equipamentos ou condições clínicas são insuficientemente representados, podem surgir diferenças de desempenho capazes de comprometer a qualidade da assistência.

Essa constatação conduz a outro desafio ético fundamental: a possibilidade de que sistemas inteligentes reproduzam desigualdades existentes ou produzam novas formas de discriminação.

4.3 Vieses algorítmicos, discriminação e desigualdades na assistência radiológica

A inteligência artificial é frequentemente apresentada como instrumento capaz de ampliar a objetividade das análises médicas, especialmente por utilizar procedimentos matemáticos e estatísticos para identificar padrões em grandes conjuntos de dados. Entretanto, essa característica não significa que seus resultados sejam necessariamente neutros ou livres de influências relacionadas às condições em que os modelos foram desenvolvidos.

Os sistemas de aprendizado de máquina identificam relações presentes nos dados utilizados durante o treinamento. Consequentemente, a qualidade e a representatividade dessas informações influenciam diretamente as características do modelo resultante. Quando determinados grupos populacionais, condições clínicas ou contextos assistenciais estão insuficientemente representados, o desempenho pode variar de maneira significativa entre diferentes situações.

Essas diferenças constituem uma das manifestações dos vieses algorítmicos, expressão utilizada para descrever distorções sistemáticas que podem surgir em diferentes etapas do desenvolvimento e da utilização de sistemas computacionais. Tais distorções podem decorrer da seleção dos dados, dos procedimentos de classificação, das escolhas metodológicas e das condições de implementação.

Na Radiologia, os vieses podem manifestar-se de diferentes maneiras. Bases de imagens provenientes de instituições específicas podem apresentar características relacionadas aos equipamentos, aos protocolos de aquisição e ao perfil dos pacientes

atendidos. Caso essas informações não representem adequadamente a diversidade dos serviços, o sistema poderá apresentar resultados distintos quando utilizado em ambientes diferentes.

O problema torna-se particularmente relevante quando diferenças de desempenho afetam grupos que já enfrentam dificuldades de acesso à assistência. Uma ferramenta desenvolvida predominantemente a partir de dados de instituições com infraestrutura avançada pode não apresentar confiabilidade equivalente em serviços com equipamentos mais antigos ou condições técnicas distintas. Nessas circunstâncias, a incorporação tecnológica, em vez de reduzir desigualdades, poderá contribuir para ampliá-las.

A avaliação dos vieses exige, portanto, atenção à composição das bases de dados e aos procedimentos de validação. Não basta demonstrar desempenho satisfatório em uma amostra global. Sempre que cientificamente pertinente e viável, torna-se necessário investigar possíveis diferenças entre subgrupos, instituições e condições de aquisição.

Entretanto, a identificação dessas diferenças não significa que todas possam ser eliminadas exclusivamente por ajustes matemáticos. Algumas decorrem de desigualdades estruturais relacionadas ao acesso aos serviços, à disponibilidade de exames e à qualidade das informações registradas. Por essa razão, a avaliação ética precisa considerar tanto os aspectos computacionais quanto as condições sociais em que a tecnologia será utilizada.

No Brasil, essa discussão adquire importância particular diante das diferenças regionais na distribuição de recursos e na organização da assistência. A diversidade de serviços públicos e privados, associada às desigualdades de infraestrutura, torna indispensável avaliar a adequação das ferramentas às condições concretas de utilização.

A perspectiva da equidade exige que o desenvolvimento tecnológico seja orientado pela possibilidade de beneficiar diferentes populações, evitando que suas vantagens permaneçam restritas a instituições com maior capacidade financeira e tecnológica. Isso não significa exigir desempenho absolutamente idêntico em todas as circunstâncias, mas reconhecer a necessidade de investigar diferenças relevantes e adotar medidas proporcionais aos riscos identificados.

Garrafa e Porto (2003), ao discutirem fundamentos da bioética de intervenção, oferecem contribuições para compreender a importância das desigualdades sociais na avaliação das práticas em saúde. Essa perspectiva amplia o debate sobre inteligência artificial ao demonstrar que a legitimidade de uma inovação também depende de suas repercussões sobre grupos em condições distintas de vulnerabilidade.

Assim, a avaliação de sistemas inteligentes deve considerar não apenas a precisão de suas classificações, mas também a distribuição de seus benefícios e riscos. A tecnologia poderá contribuir para ampliar capacidades assistenciais, desde que sua incorporação esteja acompanhada de medidas destinadas a reconhecer limitações e evitar consequências discriminatórias.

Entretanto, a identificação de vieses depende da possibilidade de examinar informações sobre o desenvolvimento e o funcionamento dos modelos. Quando essas informações são insuficientes, torna-se mais difícil reconhecer limitações e avaliar a confiabilidade das recomendações.

É nesse contexto que a transparência e a explicabilidade passam a constituir elementos fundamentais da governança da inteligência artificial.

4.4 Transparência, explicabilidade e confiança nos sistemas inteligentes

A confiança em tecnologias médicas deve ser construída a partir de evidências científicas, informações verificáveis e condições adequadas de utilização. No caso da inteligência artificial, essa exigência assume particular importância porque determinados sistemas apresentam elevada complexidade computacional, dificultando a compreensão direta dos processos responsáveis pela produção de suas classificações.

A transparência constitui um dos fundamentos necessários para enfrentar essa dificuldade. Em termos gerais, envolve a disponibilização de informações suficientes sobre a finalidade do sistema, os dados utilizados em seu desenvolvimento, os procedimentos de avaliação e as limitações conhecidas. Essas informações permitem que profissionais, instituições e pesquisadores examinem a adequação da ferramenta ao contexto em que se pretende utilizá-la.

A explicabilidade, por sua vez, está relacionada às possibilidades de compreender fatores associados aos resultados produzidos pelos modelos. Em aplicações radiológicas, determinados recursos podem destacar regiões das imagens consideradas relevantes para uma classificação, oferecendo elementos adicionais para a interpretação.

Entretanto, a existência de representações visuais não assegura que o funcionamento do sistema tenha sido integralmente compreendido. Mapas de atenção e outras técnicas de interpretação podem contribuir para investigar o comportamento dos modelos, mas também apresentam limitações. Uma região destacada pelo algoritmo não demonstra, necessariamente, que a classificação foi produzida a partir de fundamentos clinicamente adequados.

Essa distinção é importante porque a aparência de explicação pode produzir confiança indevida. Quando um sistema apresenta resultados acompanhados de representações

visualmente convincentes, existe o risco de que o profissional atribua maior confiabilidade à recomendação, mesmo sem evidências suficientes de sua adequação.

Por essa razão, a transparência deve ser compreendida como condição de avaliação crítica, e não como garantia automática de segurança. Conhecer as características de um sistema permite identificar limitações e formular perguntas relevantes, mas não substitui a necessidade de validação científica.

A documentação dos métodos utilizados nas pesquisas também desempenha papel fundamental. Estudos que não descrevem adequadamente seus conjuntos de dados, procedimentos de treinamento e estratégias de avaliação dificultam a reprodução dos resultados e a comparação entre diferentes ferramentas.

Nesse contexto, Mongan, Moy e Kahn Jr. (2020) apresentaram o checklist CLAIM, destinado a contribuir para a qualidade dos relatos científicos sobre inteligência artificial em imagens médicas. A iniciativa reforça a importância da padronização metodológica e da apresentação clara de informações relevantes para a interpretação das evidências.

A transparência também possui dimensão institucional. Serviços que incorporam ferramentas inteligentes precisam conhecer suas finalidades autorizadas, limitações operacionais e requisitos de manutenção. Essas informações são necessárias para definir protocolos de utilização, orientar profissionais e estabelecer procedimentos diante de falhas.

Entretanto, a disponibilização de informações técnicas não significa que todos os usuários devam dominar integralmente os fundamentos matemáticos dos algoritmos. O conhecimento necessário varia conforme as responsabilidades exercidas. Radiologistas precisam compreender aspectos suficientes para avaliar criticamente os resultados, enquanto equipes responsáveis pela implementação e manutenção podem necessitar de conhecimentos técnicos mais aprofundados.

A confiança clínica deve resultar, portanto, da combinação entre evidências, transparência e experiência supervisionada. Sistemas inteligentes não devem ser considerados confiáveis apenas porque utilizam métodos computacionais sofisticados, assim como sua complexidade não constitui motivo suficiente para rejeitar todas as possibilidades de aplicação.

Essa compreensão permite reconhecer que a governança da inteligência artificial exige mecanismos de avaliação que acompanhem todo o ciclo de utilização. Entretanto, a transparência sobre o funcionamento dos sistemas não esgota as exigências éticas e jurídicas relacionadas aos dados utilizados em seu desenvolvimento.

Na Radiologia, essas informações frequentemente incluem imagens e registros associados à saúde de pessoas identificadas ou identificáveis, circunstância que torna a proteção da privacidade uma dimensão indispensável da inovação tecnológica.

4.5 A proteção dos dados pessoais e a privacidade dos pacientes

A expansão da inteligência artificial na Radiologia está diretamente relacionada à disponibilidade de grandes conjuntos de imagens e informações clínicas. O desenvolvimento de modelos computacionais frequentemente depende da utilização de exames previamente realizados, associados a classificações, descrições e outros registros que permitem investigar relações entre características visuais e condições de saúde.

Entretanto, essas informações não constituem apenas recursos técnicos destinados ao treinamento de algoritmos. Representam dados relacionados à vida e à saúde de pessoas, cuja utilização exige respeito à privacidade, à confidencialidade e às normas jurídicas aplicáveis.

No Brasil, a Lei nº 13.709/2018, conhecida como Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais, estabelece regras para o tratamento de dados pessoais e reconhece as informações referentes à saúde como dados pessoais sensíveis. Essa classificação evidencia a necessidade de cuidados específicos, considerando os riscos associados ao acesso, à utilização e ao compartilhamento inadequado dessas informações.

A aplicação da legislação ao desenvolvimento de inteligência artificial exige compreender que o tratamento de dados pode ocorrer em diferentes etapas. A coleta, a organização, o armazenamento, a utilização para treinamento, a validação e o compartilhamento de informações constituem operações que precisam observar as exigências legais pertinentes.

Entre os princípios estabelecidos pela legislação, destacam-se a finalidade, a adequação, a necessidade e a segurança. A finalidade exige que o tratamento esteja vinculado a objetivos legítimos, específicos e informados conforme as exigências aplicáveis. A adequação pressupõe compatibilidade entre a utilização dos dados e as finalidades estabelecidas, enquanto a necessidade orienta a limitação do tratamento ao mínimo pertinente para alcançar esses objetivos.

A segurança, por sua vez, exige a adoção de medidas técnicas e administrativas destinadas a proteger as informações contra acessos não autorizados e situações que possam comprometer sua integridade ou confidencialidade.

No contexto radiológico, esses princípios apresentam repercussões importantes. Imagens médicas podem conter identificadores diretos, metadados e características que, isoladamente ou em combinação com outras informações, permitam identificar pacientes.

Consequentemente, a simples retirada do nome ou de determinados dados cadastrais não assegura, necessariamente, anonimização suficiente.

A avaliação do risco de reidentificação depende das características do conjunto de dados, dos procedimentos utilizados e das possibilidades razoáveis de associação com outras informações. Essa questão torna-se particularmente relevante quando imagens são compartilhadas entre instituições ou utilizadas em projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

A anonimização e a pseudonimização constituem estratégias distintas. Enquanto a anonimização busca impedir a identificação do titular por meios técnicos razoáveis e disponíveis no contexto considerado, a pseudonimização envolve a substituição de identificadores por outros elementos, mantendo a possibilidade de associação mediante informações adicionais protegidas. A escolha dos procedimentos deve considerar a finalidade do tratamento e as exigências legais aplicáveis.

Outro aspecto importante diz respeito às bases jurídicas que autorizam o tratamento de dados pessoais sensíveis. O consentimento constitui uma das hipóteses previstas na legislação, mas não representa a única possibilidade. Dependendo da finalidade e das circunstâncias, outras hipóteses legais podem ser aplicáveis, exigindo análise específica.

A utilização de dados para pesquisa científica também demanda atenção às normas éticas pertinentes, especialmente quando envolve informações de pacientes e procedimentos sujeitos à avaliação por instâncias competentes. A proteção dos dados não deve ser compreendida como formalidade burocrática, mas como condição para preservar direitos e fortalecer a confiança social na pesquisa.

Além disso, o desenvolvimento de sistemas inteligentes pode envolver diferentes participantes, como instituições de saúde, universidades e empresas de tecnologia. Essa multiplicidade exige definir responsabilidades relacionadas ao acesso, ao armazenamento e ao compartilhamento das informações, evitando que a complexidade das relações institucionais comprometa a proteção dos titulares.

A privacidade constitui, portanto, uma dimensão fundamental da legitimidade da inteligência artificial aplicada à Radiologia. O potencial científico dos dados não elimina sua vinculação às pessoas que lhes deram origem, tampouco autoriza sua utilização indiscriminada.

Entretanto, a proteção das informações representa apenas uma das questões jurídicas relacionadas à incorporação de sistemas inteligentes. Quando uma recomendação automatizada influencia determinada decisão diagnóstica, surge também a necessidade de

examinar as responsabilidades pelos resultados e pelas consequências da utilização tecnológica.

4.6 Autonomia médica e responsabilidade civil, ética e profissional

A incorporação de inteligência artificial à prática radiológica introduz novas questões sobre a distribuição de responsabilidades entre profissionais, instituições e desenvolvedores. Embora os sistemas computacionais possam participar de etapas relevantes da análise diagnóstica, sua utilização ocorre em um ambiente assistencial no qual diferentes agentes desempenham funções específicas e possuem obrigações próprias.

A discussão sobre responsabilidade exige reconhecer que a presença de uma recomendação automatizada não elimina os deveres inerentes ao exercício da Medicina. O radiologista continua responsável por atuar conforme as normas profissionais aplicáveis, utilizando conhecimentos científicos e critérios técnicos adequados às circunstâncias concretas do atendimento.

Entretanto, essa constatação não autoriza atribuir automaticamente ao médico toda consequência relacionada ao funcionamento de um sistema inteligente. Determinadas falhas podem decorrer de problemas de desenvolvimento, informações inadequadas sobre limitações, condições institucionais de implementação ou utilização incompatível com a finalidade prevista.

Consequentemente, a análise jurídica precisa considerar a origem do problema, as atribuições dos participantes e a relação entre eventuais condutas e os resultados produzidos. A responsabilidade não deve ser definida apenas pela identificação do profissional que utilizou a ferramenta, mas pelo exame das circunstâncias relevantes e das normas aplicáveis.

A distinção entre responsabilidade ética, civil, administrativa e penal também é fundamental. Cada uma dessas dimensões possui pressupostos e consequências próprios, não sendo adequado tratá-las como categorias equivalentes. Uma situação que envolve possível descumprimento de dever profissional, por exemplo, não conduz automaticamente às mesmas conclusões jurídicas aplicáveis à reparação de danos ou à responsabilização penal.

No Brasil, a Lei nº 12.842/2013, conhecida como Lei do Ato Médico, estabelece disposições relacionadas ao exercício da Medicina e oferece referências para compreender determinadas atividades profissionais. Entretanto, essa legislação não constitui regulamentação específica da inteligência artificial, razão pela qual sua aplicação a situações envolvendo sistemas inteligentes exige interpretação contextualizada.

O Código de Ética Médica também apresenta fundamentos relevantes, especialmente quanto à responsabilidade profissional e à necessidade de atuação orientada pelo

conhecimento científico e pelo respeito aos pacientes. A incorporação de novas tecnologias não afasta esses compromissos, mas pode exigir sua aplicação diante de circunstâncias ainda pouco exploradas pela prática tradicional.

A responsabilidade institucional merece atenção igualmente importante. Serviços de saúde que disponibilizam sistemas inteligentes participam das decisões relacionadas à aquisição, à implementação, ao treinamento dos usuários e ao acompanhamento do desempenho. A ausência de procedimentos adequados pode comprometer a segurança e dificultar a identificação de falhas.

Os desenvolvedores, por sua vez, possuem responsabilidades relacionadas às características dos produtos, às informações fornecidas e às obrigações legais e regulatórias aplicáveis. A extensão dessas responsabilidades dependerá da finalidade da ferramenta, das condições de disponibilização e do regime jurídico pertinente.

Essa multiplicidade de participantes demonstra que a utilização de inteligência artificial exige mecanismos de governança capazes de definir atribuições e procedimentos. Documentação, protocolos de supervisão, registros de incidentes e acompanhamento das atualizações constituem elementos importantes para favorecer a segurança e permitir a investigação de eventuais problemas.

A autonomia médica, nesse contexto, não deve ser confundida com isolamento profissional ou ausência de responsabilidade institucional. O radiologista precisa dispor de condições para exercer julgamento crítico, mas também depende de informações adequadas sobre as ferramentas utilizadas e de estruturas organizacionais que permitam sua utilização segura.

A construção de uma relação responsável entre médicos e sistemas inteligentes exige, portanto, reconhecer que a tecnologia integra um processo assistencial mais amplo. Sua utilização envolve decisões técnicas, profissionais e institucionais que precisam ser examinadas conjuntamente.

Essa compreensão conduz à necessidade de discutir os mecanismos regulatórios destinados a avaliar a segurança e a adequação dos sistemas antes e durante sua utilização nos serviços de saúde.

4.7 Regulamentação sanitária da inteligência artificial na Medicina brasileira

A incorporação de sistemas inteligentes à assistência médica exige considerar não apenas sua validade científica, mas também os requisitos regulatórios aplicáveis às tecnologias destinadas a finalidades clínicas. A regulamentação sanitária desempenha papel

importante nesse processo, pois estabelece condições para a disponibilização de determinados produtos e contribui para a proteção da saúde coletiva.

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária possui atribuições relacionadas à regulação de dispositivos médicos, incluindo determinadas categorias de programas computacionais. Entretanto, nem toda ferramenta que utiliza inteligência artificial constitui automaticamente um dispositivo médico. O enquadramento depende de suas funcionalidades, de sua finalidade pretendida e das regras aplicáveis.

Essa distinção é importante porque sistemas destinados exclusivamente a atividades administrativas podem apresentar características regulatórias diferentes daquelas encontradas em programas desenvolvidos para apoiar detecção, diagnóstico ou outras funções clínicas. A presença de métodos de aprendizado de máquina não representa, isoladamente, critério suficiente para definir o enquadramento sanitário.

A Resolução da Diretoria Colegiada nº 657/2022 da Anvisa dispõe sobre a regularização de softwares como dispositivos médicos, estabelecendo requisitos relacionados a essa categoria de produtos. Sua aplicação depende das características e da finalidade do programa, exigindo avaliação específica das condições de enquadramento.

No campo da Radiologia, essa discussão possui relevância porque determinadas ferramentas podem influenciar diretamente a análise de exames. Sistemas destinados à detecção de alterações, à classificação de achados ou ao apoio a decisões clínicas podem estar sujeitos a exigências diferentes daquelas aplicáveis a programas utilizados apenas para armazenamento ou organização administrativa.

Entretanto, a regularização sanitária não deve ser confundida com demonstração definitiva de benefício clínico em todas as circunstâncias. A autorização ou regularização de um produto ocorre conforme requisitos específicos, mas sua utilização precisa permanecer compatível com a finalidade declarada e com as condições em que foi avaliado.

Além disso, sistemas computacionais apresentam particularidades relacionadas à possibilidade de atualizações. Modificações no programa, nos parâmetros ou nas condições de funcionamento podem influenciar seu desempenho, exigindo atenção às obrigações regulatórias e aos procedimentos de acompanhamento.

Essa característica evidencia a importância da avaliação ao longo do ciclo de vida da tecnologia. Diferentemente de uma compreensão limitada à aprovação inicial, a governança de sistemas inteligentes precisa considerar sua manutenção, as alterações realizadas e a identificação de problemas que possam surgir durante a utilização.

A regulamentação também se relaciona à necessidade de documentação adequada. Informações sobre finalidade, limitações, requisitos técnicos e condições de utilização permitem que instituições e profissionais compreendam as características dos sistemas disponibilizados.

Entretanto, a existência de regras sanitárias não elimina a necessidade de avaliação ética e científica. A regulação constitui uma dimensão da proteção à saúde, mas deve ser articulada com procedimentos de validação clínica, supervisão profissional e gestão de riscos.

Dessa forma, a incorporação responsável de inteligência artificial exige reconhecer a complementaridade entre diferentes mecanismos de controle. A avaliação científica investiga o desempenho e a utilidade das ferramentas, a regulamentação estabelece exigências aplicáveis à sua disponibilização e a governança institucional procura assegurar condições adequadas de utilização.

Essa articulação torna-se ainda mais importante quando se considera que os sistemas inteligentes dependem de infraestrutura digital e de procedimentos de segurança da informação, cuja inadequação pode comprometer tanto a proteção dos dados quanto a integridade dos exames.

4.8 Segurança da informação, integridade dos exames e infraestrutura digital

A utilização de inteligência artificial na Radiologia depende de uma infraestrutura tecnológica capaz de armazenar, transmitir e processar informações médicas de maneira confiável. Sistemas de arquivamento e comunicação de imagens, prontuários eletrônicos, equipamentos de aquisição e plataformas computacionais constituem componentes de um ambiente digital no qual diferentes informações precisam circular de forma organizada e segura.

Essa integração oferece possibilidades relevantes para a assistência, mas também introduz riscos relacionados à segurança da informação. O acesso não autorizado, a perda de dados, a indisponibilidade dos sistemas e a alteração indevida de registros podem comprometer o funcionamento dos serviços e produzir consequências sobre a qualidade do atendimento.

A proteção da confidencialidade constitui uma dimensão importante, especialmente porque os exames podem conter dados pessoais sensíveis. Entretanto, a segurança da informação não se limita à preservação do sigilo. Também envolve a integridade e a disponibilidade dos registros, condições necessárias para que as informações utilizadas durante a assistência permaneçam corretas e acessíveis quando necessárias.

A integridade possui relevância particular no diagnóstico por imagem. Alterações indevidas em arquivos, metadados ou resultados de processamento podem modificar as informações disponibilizadas ao radiologista. Consequentemente, a utilização de sistemas inteligentes exige procedimentos capazes de assegurar que os exames analisados correspondam adequadamente aos dados produzidos e que os resultados computacionais sejam associados aos estudos corretos.

A disponibilidade também representa elemento essencial. Serviços que passam a depender de determinadas ferramentas precisam considerar as consequências de interrupções no funcionamento dos sistemas. Falhas de conectividade, indisponibilidade de servidores ou problemas de integração podem comprometer fluxos de trabalho, especialmente quando a organização institucional pressupõe utilização contínua de recursos digitais.

Por essa razão, a implementação de inteligência artificial deve ser acompanhada de planejamento técnico e procedimentos de contingência. A definição de alternativas para situações de indisponibilidade permite reduzir a dependência operacional e preservar a continuidade da assistência.

Outro desafio envolve a interoperabilidade. A integração entre equipamentos e sistemas de diferentes fabricantes depende da compatibilidade entre padrões de comunicação, formatos de dados e procedimentos de armazenamento. Quando essa integração é inadequada, podem surgir dificuldades de acesso, inconsistências e limitações à utilização das ferramentas.

A segurança também exige atenção aos mecanismos de autenticação e controle de acesso. Profissionais e sistemas devem dispor de permissões compatíveis com suas funções, evitando que informações sensíveis sejam disponibilizadas indiscriminadamente. Registros de acesso e procedimentos de auditoria podem contribuir para identificar situações inadequadas e fortalecer a governança institucional.

Além disso, o desenvolvimento de modelos computacionais depende da confiabilidade das bases utilizadas. Alterações indevidas, inconsistências ou problemas de organização podem comprometer o treinamento e a validação, produzindo resultados que não correspondem às características esperadas.

A infraestrutura digital constitui, portanto, uma condição fundamental para a utilização segura da inteligência artificial. A qualidade de um algoritmo não compensa automaticamente deficiências relacionadas ao armazenamento, à comunicação ou à integridade das informações.

Essa compreensão demonstra que a incorporação tecnológica exige investimentos que ultrapassam a aquisição de programas. Envolve manutenção, capacitação, atualização de equipamentos e organização de procedimentos institucionais.

No contexto brasileiro, essas exigências precisam ser consideradas diante das diferenças de infraestrutura existentes entre os serviços. A utilização de inteligência artificial no Sistema Único de Saúde, em particular, exige avaliar como a inovação poderá ser integrada às necessidades assistenciais sem ampliar desigualdades de acesso e qualidade.

4.9 A inteligência artificial no Sistema Único de Saúde: inovação, equidade e responsabilidade social

A discussão sobre inteligência artificial na Radiologia adquire dimensão social particularmente relevante quando situada no contexto do Sistema Único de Saúde. Organizado a partir de princípios constitucionais e legais que reconhecem a saúde como direito de todos e dever do Estado, o SUS estabelece uma perspectiva de assistência orientada pela universalidade, integralidade e equidade, entre outros fundamentos.

A incorporação de tecnologias aos serviços públicos precisa ser examinada à luz desses princípios, considerando que a inovação somente representa avanço social quando contribui para responder às necessidades da população e para aprimorar as condições de acesso e qualidade da assistência.

Na Radiologia, a inteligência artificial apresenta possibilidades relacionadas à organização de fluxos, ao processamento de imagens e ao apoio a determinadas tarefas diagnósticas. Entretanto, a relevância dessas aplicações para o SUS dependerá de sua adequação às características dos serviços e da demonstração de benefícios compatíveis com os recursos disponíveis.

Essa avaliação exige considerar a diversidade de condições existentes no território nacional. Serviços localizados em grandes centros urbanos podem apresentar infraestrutura tecnológica distinta daquela disponível em municípios menores ou regiões com dificuldades de acesso a especialistas. Consequentemente, soluções desenvolvidas para ambientes com elevada capacidade computacional podem exigir adaptações antes de serem utilizadas em outras realidades.

A equidade constitui elemento central dessa discussão. A incorporação de inteligência artificial não deve contribuir para concentrar benefícios apenas em instituições com maior disponibilidade de recursos, especialmente quando populações em condições de maior vulnerabilidade já enfrentam dificuldades para obter atendimento especializado.

Entretanto, a busca por equidade não significa simplesmente distribuir sistemas computacionais de maneira uniforme. A utilização responsável exige identificar necessidades concretas, avaliar condições de funcionamento e assegurar que os recursos sejam acompanhados de infraestrutura e formação profissional adequadas.

A implementação de uma ferramenta sem condições suficientes de manutenção, supervisão ou validação poderá produzir resultados limitados ou introduzir riscos adicionais. Por essa razão, a avaliação das tecnologias deve considerar não apenas seu custo inicial, mas também as despesas relacionadas à integração, ao treinamento, à atualização e ao acompanhamento.

Outro aspecto importante envolve a produção de evidências nacionais. A utilização de sistemas desenvolvidos a partir de dados internacionais pode representar oportunidade de acesso a tecnologias avançadas, mas exige verificar sua adequação às características dos pacientes e dos serviços brasileiros. Estudos locais de validação podem contribuir para identificar limitações e orientar decisões de incorporação.

A participação de instituições públicas de ensino e pesquisa possui relevância nesse processo. Universidades, hospitais de ensino e centros de investigação podem colaborar no desenvolvimento e na avaliação de ferramentas destinadas a problemas assistenciais específicos, favorecendo a produção de conhecimento adaptado às necessidades nacionais.

Entretanto, a pesquisa científica precisa permanecer vinculada à proteção dos direitos dos pacientes e ao respeito às normas éticas aplicáveis. A utilização de dados provenientes dos serviços públicos deve observar finalidades legítimas, medidas adequadas de segurança e procedimentos compatíveis com a legislação.

A incorporação tecnológica também deve considerar a participação dos profissionais envolvidos na assistência. Radiologistas, técnicos, equipes de tecnologia da informação e gestores possuem conhecimentos complementares sobre as condições de funcionamento dos serviços. Sua participação pode contribuir para identificar necessidades, reconhecer dificuldades e avaliar a adequação das soluções propostas.

Essa perspectiva interdisciplinar permite compreender que a inovação não deve ser tratada exclusivamente como aquisição de produtos, mas como processo de transformação institucional. A utilização de inteligência artificial poderá modificar fluxos, responsabilidades e formas de organização do trabalho, exigindo planejamento e acompanhamento.

A responsabilidade social da inovação consiste, portanto, em orientar o desenvolvimento tecnológico para a melhoria efetiva da assistência, considerando tanto as necessidades individuais dos pacientes quanto as condições coletivas de acesso aos serviços.

No contexto do SUS, essa responsabilidade adquire significado especial porque a incorporação de tecnologias envolve decisões sobre utilização de recursos públicos e distribuição de benefícios. A avaliação precisa considerar evidências de eficácia, segurança, efetividade e pertinência assistencial, evitando que expectativas tecnológicas substituam análises fundamentadas.

Dessa forma, a inteligência artificial poderá contribuir para o aprimoramento da Radiologia brasileira, mas sua legitimidade dependerá da capacidade de integrar inovação científica, proteção de direitos e compromisso com a equidade.

A discussão desenvolvida ao longo deste capítulo demonstra, assim, que os desafios éticos e jurídicos não constituem questões periféricas ao avanço tecnológico. Representam condições fundamentais para que a inteligência artificial possa ser incorporada à Medicina de maneira responsável.

4.10 Considerações finais do capítulo

A incorporação da inteligência artificial à Radiologia apresenta desafios que ultrapassam o desempenho computacional e exigem reflexão sobre os fundamentos éticos, jurídicos e científicos da prática médica. Embora os sistemas inteligentes possam contribuir para diferentes etapas do diagnóstico por imagem, sua utilização envolve riscos e responsabilidades que precisam ser considerados desde o desenvolvimento até o acompanhamento das aplicações clínicas.

A segurança do paciente constitui referência central nesse processo, exigindo que os resultados produzidos pelos algoritmos sejam avaliados considerando suas limitações, as características das populações e as consequências de eventuais erros. A validação científica, embora indispensável, não elimina a necessidade de supervisão e monitoramento contínuo, especialmente diante de mudanças nas condições de utilização.

A discussão sobre vieses algorítmicos demonstra que a qualidade de uma tecnologia também depende da representatividade dos dados e da distribuição de seus benefícios. Sistemas desenvolvidos em contextos específicos podem apresentar resultados diferentes quando utilizados em outras instituições, tornando necessária atenção à equidade e à prevenção de consequências discriminatórias.

A transparência e a explicabilidade, por sua vez, contribuem para a avaliação crítica das ferramentas, permitindo que profissionais e instituições compreendam suas finalidades e limitações. Entretanto, essas características não substituem a produção de evidências científicas consistentes, tampouco asseguram automaticamente a confiabilidade dos resultados.

A proteção dos dados pessoais representa outra dimensão fundamental, considerando que o desenvolvimento de inteligência artificial frequentemente envolve informações sensíveis relacionadas à saúde. O respeito à privacidade e às normas jurídicas aplicáveis constitui condição para preservar direitos e fortalecer a confiança social na inovação.

Da mesma forma, a definição de responsabilidades exige reconhecer que a utilização de sistemas inteligentes envolve diferentes participantes. Médicos, instituições e desenvolvedores possuem atribuições próprias, cuja análise deve considerar as circunstâncias concretas e os regimes jurídicos pertinentes.

A regulamentação sanitária e a segurança da informação complementam essas exigências, demonstrando que a incorporação tecnológica depende de estruturas institucionais capazes de assegurar condições adequadas de funcionamento. No contexto brasileiro, essas questões tornam-se especialmente relevantes diante das desigualdades de infraestrutura e das necessidades assistenciais do Sistema Único de Saúde.

O desenvolvimento tecnológico, portanto, não pode ser considerado independente das finalidades humanas da Medicina. Sua legitimidade depende da capacidade de contribuir para o cuidado, preservar direitos e produzir benefícios compatíveis com as necessidades dos pacientes e da sociedade.

Entretanto, a construção de uma prática radiológica tecnologicamente avançada e eticamente responsável não depende apenas de normas, instituições e procedimentos de controle. Também exige profissionais preparados para compreender as tecnologias, avaliar suas limitações e participar criticamente de sua utilização.

Se os desafios éticos e científicos estabelecem as condições para a incorporação responsável da inteligência artificial, a formação médica representa o caminho pelo qual essas exigências poderão ser efetivamente integradas à prática profissional.

É a partir dessa compreensão que se desenvolve o capítulo seguinte, dedicado à formação do radiologista e às perspectivas para o futuro da especialidade. Nele, a discussão retorna ao profissional que ocupa o centro desta investigação, examinando como a residência médica, a atualização científica e o desenvolvimento de novas competências poderão preparar os futuros especialistas para uma Medicina em permanente transformação.

CAPÍTULO V

A FORMAÇÃO DO RADIOLOGISTA E AS PERSPECTIVAS PARA O FUTURO DA ESPECIALIDADE

5.1 A formação médica diante das transformações tecnológicas

Os desafios éticos, jurídicos e científicos examinados no capítulo anterior demonstram que a incorporação da inteligência artificial à Radiologia não depende exclusivamente do desenvolvimento de sistemas computacionais capazes de executar tarefas diagnósticas. Para que essas tecnologias sejam utilizadas de maneira segura e clinicamente relevante, é necessário que os profissionais compreendam seus fundamentos, reconheçam suas limitações e participem criticamente das decisões relacionadas à sua implementação. Essa constatação conduz a uma dimensão decisiva para o futuro da especialidade: a formação do médico radiologista em um cenário de transformação tecnológica contínua.

Ao longo da história, a formação médica acompanhou mudanças nos conhecimentos científicos e nos instrumentos utilizados para investigar o organismo humano. O desenvolvimento da anatomia, da fisiologia, da microbiologia e dos métodos de diagnóstico modificou progressivamente as competências exigidas dos profissionais. Entretanto, essas transformações não ocorreram mediante a simples substituição de conhecimentos anteriores. A incorporação de novas técnicas tornou necessário ampliar a compreensão dos processos biológicos e desenvolver habilidades compatíveis com as possibilidades oferecidas pela ciência.

Na Radiologia, essa relação entre formação e inovação apresenta características especialmente evidentes. A especialidade surgiu a partir de uma descoberta física e consolidou-se mediante a integração de conhecimentos anatômicos, princípios de formação das imagens e interpretação clínica. Posteriormente, a introdução da tomografia computadorizada, da ultrassonografia e da ressonância magnética ampliou a complexidade dos exames, exigindo que os especialistas dominassem diferentes modalidades, reconhecessem suas indicações e compreendessem as limitações de cada método.

A inteligência artificial representa uma nova etapa desse processo, mas apresenta uma particularidade importante: sua incorporação não modifica apenas os instrumentos utilizados para produzir imagens, podendo influenciar também os procedimentos empregados para analisá-las. Sistemas capazes de identificar padrões, realizar mensurações e fornecer classificações introduzem informações adicionais no processo diagnóstico, exigindo que o

radiologista desenvolva competências para interpretar criticamente resultados produzidos por modelos computacionais.

A European Society of Radiology (2019) reconhece que a inteligência artificial possui implicações que ultrapassam a detecção e a caracterização de lesões, alcançando a organização dos fluxos de trabalho, a análise quantitativa e a integração de informações. Essa perspectiva demonstra que a preparação profissional não pode permanecer restrita ao aprendizado operacional de ferramentas específicas, pois a transformação tecnológica envolve diferentes dimensões da prática radiológica.

Nesse sentido, a formação do radiologista contemporâneo precisa preservar os fundamentos científicos da especialidade e, simultaneamente, incorporar conhecimentos que permitam compreender a lógica e os limites das novas tecnologias. O objetivo não consiste em transformar todos os médicos em especialistas em programação ou desenvolvimento de algoritmos, mas em assegurar condições para que possam avaliar a pertinência clínica das ferramentas e reconhecer situações em que seus resultados exigem cautela.

Essa exigência aproxima a formação radiológica de um debate mais amplo sobre o futuro da Medicina. Topol (2019) discute a convergência entre inteligência humana e artificial como uma possibilidade de aperfeiçoamento da assistência, ressaltando a importância de integrar capacidades computacionais às competências humanas. A contribuição dessa abordagem reside em reconhecer que a inovação tecnológica pode modificar determinadas atividades médicas sem eliminar a necessidade de interpretação clínica, comunicação e responsabilidade profissional.

Entretanto, a construção dessa complementaridade depende da maneira como os futuros especialistas serão preparados. Uma formação concentrada exclusivamente na interpretação convencional das imagens poderá apresentar limitações diante de ambientes que utilizam sistemas inteligentes. Por outro lado, uma formação excessivamente orientada para recursos computacionais, sem aprofundamento clínico, poderá comprometer a capacidade de reconhecer inconsistências e avaliar adequadamente as informações produzidas.

A questão fundamental, portanto, não está em escolher entre conhecimentos tradicionais e competências tecnológicas, mas em compreender como essas dimensões poderão ser integradas. A inteligência artificial deve ser incorporada à formação como objeto de estudo, ferramenta potencial de apoio e tema de investigação crítica, preservando-se o raciocínio médico como fundamento da prática profissional.

Essa compreensão conduz diretamente à residência médica, etapa em que os conhecimentos adquiridos durante a graduação são aprofundados e transformados em competências específicas para o exercício da Radiologia e Diagnóstico por Imagem.

5.2 A residência médica em Radiologia e Diagnóstico por Imagem: fundamentos que permanecem indispensáveis

A residência médica constitui uma etapa fundamental na formação do especialista, pois proporciona a integração entre conhecimentos teóricos, experiência supervisionada e participação progressiva nas atividades assistenciais. Na Radiologia, esse processo envolve o desenvolvimento de competências relacionadas à aquisição, à análise e à interpretação de exames, bem como à comunicação dos resultados e à compreensão das indicações clínicas dos diferentes métodos de imagem.

A introdução da inteligência artificial não reduz a importância desses fundamentos. Ao contrário, a utilização de sistemas inteligentes torna ainda mais necessária uma formação sólida, capaz de permitir ao profissional reconhecer quando determinada recomendação automatizada corresponde às características do exame e quando existem elementos que justificam sua revisão.

O domínio da anatomia permanece central nesse processo. A identificação de estruturas normais, variantes anatômicas e alterações patológicas constitui requisito para a interpretação de diferentes modalidades. Mesmo quando um algoritmo realiza segmentações ou destaca regiões consideradas suspeitas, o radiologista precisa compreender a organização anatômica e reconhecer possíveis inconsistências nos resultados.

Da mesma forma, os conhecimentos de fisiologia e fisiopatologia continuam indispensáveis. A interpretação de imagens exige relacionar características morfológicas e funcionais aos processos biológicos que podem explicá-las. Uma alteração radiológica não possui significado clínico independente de seu contexto, razão pela qual o especialista precisa desenvolver capacidade de formular hipóteses e estabelecer diagnósticos diferenciais.

O conhecimento dos princípios físicos dos métodos de imagem também assume importância particular diante da inteligência artificial. Sistemas de reconstrução e processamento podem modificar a aparência das imagens, exigindo que o profissional compreenda os efeitos dos parâmetros técnicos sobre a qualidade e a confiabilidade das informações.

Essa necessidade pode ser observada nas aplicações de aprendizado de máquina destinadas ao processamento de imagens médicas. Willemink et al. (2020) demonstram que a preparação dos dados constitui etapa relevante para o desenvolvimento desses sistemas,

envolvendo aspectos relacionados à seleção, à organização e à qualidade das informações. Embora o estudo tenha como foco a preparação de bases para aprendizado de máquina, suas implicações reforçam a importância de compreender como as características técnicas dos exames podem influenciar os resultados computacionais.

A residência médica também deve favorecer o desenvolvimento do raciocínio diagnóstico independente. O contato supervisionado com diferentes condições clínicas permite que o futuro especialista aprenda a reconhecer padrões, identificar exceções e avaliar situações de incerteza. Essas competências são construídas por meio da análise sistemática dos exames, da discussão de casos e da correlação entre achados radiológicos e informações clínicas.

A disponibilidade de ferramentas automatizadas não deve interromper esse processo. Quando sistemas inteligentes são utilizados durante a formação, é importante que o residente compreenda suas finalidades e limitações, evitando que a dependência precoce de recomendações computacionais comprometa o desenvolvimento da capacidade interpretativa.

Isso não significa que a inteligência artificial deva ser excluída dos ambientes de ensino. Sua utilização pode oferecer oportunidades de aprendizagem, especialmente quando permite comparar resultados, investigar divergências e discutir situações em que os algoritmos apresentam dificuldades. Entretanto, essas atividades precisam ocorrer sob supervisão adequada e com objetivos educacionais claramente definidos.

A formação também envolve competências comunicacionais. A elaboração de laudos, a discussão de achados relevantes e a interação com outros profissionais constituem dimensões essenciais da prática radiológica. A introdução de ferramentas destinadas à organização de textos ou à produção de relatórios não elimina a necessidade de que o especialista saiba formular conclusões claras, fundamentadas e compatíveis com as informações disponíveis.

Dessa forma, a residência médica permanece responsável pela construção das competências clínicas que sustentam o exercício da especialidade. A inteligência artificial poderá integrar esse percurso, mas sua contribuição educacional dependerá da capacidade de fortalecer, e não substituir, o aprendizado médico.

A partir dessa base, torna-se possível examinar quais conhecimentos adicionais deverão ser incorporados à formação para que os futuros radiologistas possam utilizar criticamente sistemas inteligentes.

5.3 Alfabetização em inteligência artificial e desenvolvimento de competências digitais

A ampliação das aplicações de inteligência artificial na Radiologia torna necessário discutir a incorporação de competências digitais à formação dos especialistas. Entretanto, essa preparação não deve ser confundida com a exigência de domínio avançado de programação ou de desenvolvimento de modelos computacionais. Para a maioria dos radiologistas, a necessidade central consiste em compreender os princípios fundamentais das tecnologias, avaliar suas evidências científicas e reconhecer as condições em que podem ser utilizadas com segurança.

A alfabetização em inteligência artificial pode ser compreendida, nesse contexto, como o desenvolvimento de conhecimentos e habilidades que permitam interpretar criticamente o funcionamento e os resultados de sistemas inteligentes. Essa competência envolve compreender conceitos como aprendizado de máquina, aprendizado profundo, dados de treinamento, validação, generalização e desempenho diagnóstico.

O conhecimento desses conceitos é relevante porque os resultados computacionais não podem ser adequadamente interpretados sem considerar as condições em que foram produzidos. Um sistema desenvolvido a partir de determinada base de imagens pode apresentar desempenho satisfatório naquele ambiente, mas encontrar dificuldades quando utilizado em populações ou equipamentos diferentes.

Willemink et al. (2020) demonstram a importância da preparação adequada dos dados de imagens médicas para o desenvolvimento de aplicações de aprendizado de máquina. A discussão apresentada pelos autores permite compreender que a qualidade de um modelo depende não apenas da arquitetura computacional empregada, mas também das características das informações utilizadas durante seu desenvolvimento.

Essa constatação possui implicações diretas para a formação médica. O radiologista precisa reconhecer que indicadores elevados de desempenho não representam garantia de confiabilidade universal. A interpretação de resultados científicos exige compreender a composição das amostras, os critérios de seleção e as estratégias utilizadas para avaliar os modelos.

A formação em competências digitais também deve incluir conhecimentos básicos de avaliação estatística. Sensibilidade, especificidade, valores preditivos e calibração constituem conceitos relevantes para compreender o desempenho de ferramentas destinadas à detecção e à classificação de alterações. Entretanto, esses indicadores precisam ser interpretados considerando a prevalência das condições investigadas e as consequências clínicas dos resultados.

A capacidade de avaliar estudos científicos assume, portanto, importância equivalente ao conhecimento operacional das ferramentas. O radiologista deve ser capaz de distinguir resultados experimentais promissores de evidências suficientes para justificar determinada utilização clínica.

Além disso, a alfabetização em inteligência artificial precisa contemplar os riscos relacionados à confiança excessiva em recomendações automatizadas. Conforme discutido no capítulo anterior, a presença de sistemas inteligentes pode influenciar o julgamento profissional, tornando necessário reconhecer situações em que a classificação computacional não corresponde ao contexto clínico.

A European Society of Radiology (2019) destaca a necessidade de familiaridade dos radiologistas com os fundamentos da inteligência artificial e suas implicações profissionais. Essa orientação reforça que a preparação tecnológica deve integrar o desenvolvimento da especialidade, permitindo que os médicos participem das decisões relacionadas à utilização das ferramentas.

Entretanto, a aquisição dessas competências não deve ocorrer apenas por meio de disciplinas isoladas. A aprendizagem poderá ser mais significativa quando os conceitos forem associados a situações clínicas concretas, permitindo que os residentes compreendam como limitações técnicas e metodológicas podem influenciar decisões diagnósticas.

Nesse sentido, a discussão de casos com resultados automatizados, a análise de estudos de validação e a comparação entre diferentes métodos podem contribuir para o desenvolvimento de uma postura crítica diante da tecnologia. O objetivo não consiste em estimular desconfiança indiscriminada, mas em formar profissionais capazes de reconhecer tanto as possibilidades quanto as limitações das ferramentas disponíveis.

A alfabetização em inteligência artificial representa, assim, uma extensão das competências científicas tradicionalmente exigidas do médico. Assim como o radiologista precisa compreender os princípios físicos das modalidades de imagem, também deverá desenvolver conhecimentos suficientes para interpretar criticamente os recursos computacionais que passam a integrar sua prática.

Essa preparação, entretanto, não se esgota no domínio de conceitos técnicos. A utilização de sistemas inteligentes envolve escolhas que podem afetar direitos, responsabilidades e condições de atendimento, exigindo que a formação também incorpore uma reflexão ética permanente.

5.4 A formação ética do radiologista na era dos algoritmos

A incorporação da inteligência artificial à Radiologia amplia as situações em que decisões tecnológicas e responsabilidades médicas se encontram. Sistemas computacionais podem participar da identificação de alterações, da organização de exames e da produção de informações utilizadas na assistência, tornando necessário que os profissionais compreendam não apenas suas capacidades, mas também as implicações éticas de sua utilização.

A formação ética do radiologista não constitui uma exigência introduzida pela inteligência artificial. Desde sua consolidação como especialidade, a Radiologia envolve responsabilidades relacionadas à segurança dos exames, à proteção das informações dos pacientes e à comunicação adequada dos resultados. Entretanto, os sistemas inteligentes acrescentam novas circunstâncias a esses compromissos, especialmente quando recomendações automatizadas passam a influenciar decisões clínicas.

A Organização Mundial da Saúde (2021) estabelece princípios para orientar o desenvolvimento e a utilização da inteligência artificial em saúde, incluindo a proteção da autonomia humana, a promoção da segurança, a transparência, a responsabilidade e a equidade. Essas orientações demonstram que a preparação dos profissionais precisa contemplar a capacidade de reconhecer riscos éticos e participar de processos de governança tecnológica.

No ambiente formativo, essa discussão pode ser desenvolvida a partir de situações relacionadas à interpretação de exames. Quando uma recomendação automatizada diverge da avaliação do radiologista, por exemplo, torna-se necessário discutir os fundamentos científicos de cada conclusão, os limites do sistema e as consequências de uma decisão inadequada.

A análise dessas situações permite compreender que a responsabilidade profissional não se resume à aceitação ou rejeição de resultados computacionais. Envolve a capacidade de justificar decisões, reconhecer incertezas e atuar conforme as condições concretas do atendimento.

Outro aspecto importante diz respeito à proteção dos dados utilizados no desenvolvimento e na avaliação das ferramentas. Imagens médicas frequentemente contêm informações relacionadas à saúde de pessoas identificadas ou identificáveis, exigindo procedimentos compatíveis com a legislação e com os princípios de confidencialidade.

A formação do radiologista precisa, portanto, incluir conhecimentos sobre privacidade e utilização responsável das informações clínicas. Esses conhecimentos tornam-se especialmente relevantes quando profissionais participam de projetos de pesquisa, desenvolvimento de bancos de imagens ou avaliação de sistemas inteligentes.

A equidade também constitui elemento fundamental da preparação ética. Modelos computacionais podem apresentar diferenças de desempenho entre populações ou instituições, especialmente quando os dados utilizados em seu desenvolvimento não representam adequadamente a diversidade dos contextos assistenciais.

A Organização Mundial da Saúde (2021) alerta para os riscos de sistemas desenvolvidos predominantemente com dados de países de alta renda apresentarem desempenho inadequado em outros ambientes. Essa preocupação demonstra que a formação médica deve incorporar a capacidade de reconhecer desigualdades e avaliar a pertinência das tecnologias diante das condições sociais e institucionais de utilização.

No contexto brasileiro, essa perspectiva assume importância particular diante da diversidade dos serviços de saúde. A formação ética precisa preparar profissionais para compreender que a qualidade da assistência não depende apenas da disponibilidade de recursos tecnológicos, mas também das condições de acesso e da adequação desses recursos às necessidades da população.

A inteligência artificial não deve ser compreendida, portanto, como instrumento neutro cuja utilização independe de escolhas humanas. Seu desenvolvimento e sua implementação envolvem decisões relacionadas a prioridades, critérios de avaliação e distribuição de benefícios.

A formação ética do radiologista precisa favorecer uma postura capaz de reconhecer essas dimensões, permitindo que o profissional participe criticamente da incorporação tecnológica e preserve os compromissos fundamentais da Medicina.

Entretanto, a preparação para os desafios contemporâneos não se limita à formação inicial. A velocidade das transformações científicas exige que os especialistas mantenham uma relação permanente com o conhecimento, tornando a educação continuada uma dimensão indispensável do exercício profissional.

5.5 Educação médica continuada e atualização científica permanente

A evolução da Radiologia demonstra que a formação do especialista não se encerra com a conclusão da residência médica. O desenvolvimento de novos equipamentos, métodos de aquisição e estratégias de interpretação exige atualização permanente, uma vez que os conhecimentos e procedimentos utilizados na prática clínica estão sujeitos a aperfeiçoamentos científicos.

A inteligência artificial intensifica essa necessidade ao introduzir tecnologias cujas características podem modificar-se por meio de atualizações, novos métodos de treinamento e diferentes formas de integração aos serviços. Consequentemente, o radiologista precisa

acompanhar não apenas o surgimento de ferramentas, mas também a produção de evidências sobre sua confiabilidade e utilidade.

Essa atualização deve ser orientada por critérios científicos. A divulgação de resultados expressivos ou a apresentação de novas funcionalidades não representa, isoladamente, demonstração suficiente de benefício clínico. O profissional precisa avaliar a qualidade das pesquisas, identificar limitações metodológicas e compreender em quais circunstâncias os resultados podem ser aplicados.

Topol (2019) discute as possibilidades de convergência entre inteligência humana e artificial, destacando o potencial dessas tecnologias para transformar diferentes atividades médicas. Entretanto, a concretização de seus benefícios depende da integração adequada às práticas assistenciais, o que reforça a importância de profissionais preparados para avaliar continuamente novas aplicações.

A educação médica continuada pode contribuir para essa preparação por meio de atividades que integrem conhecimentos clínicos e tecnológicos. Discussões científicas, cursos, congressos e experiências de avaliação supervisionada permitem acompanhar o desenvolvimento da área e identificar mudanças relevantes para a prática.

Entretanto, a atualização não deve limitar-se ao aprendizado de ferramentas específicas. Sistemas computacionais podem tornar-se obsoletos ou ser substituídos por novas tecnologias, enquanto competências relacionadas à interpretação crítica das evidências permanecem necessárias. Por essa razão, a formação continuada deve privilegiar conhecimentos que permitam compreender diferentes aplicações e avaliar sua pertinência.

A participação em atividades de pesquisa também pode contribuir para esse processo. Ao examinar problemas científicos, formular hipóteses e interpretar resultados, o radiologista desenvolve competências que favorecem a avaliação crítica das inovações.

Além disso, a educação continuada precisa considerar as diferenças entre os ambientes de trabalho. Profissionais que atuam em instituições com ampla infraestrutura tecnológica podem apresentar necessidades distintas daquelas encontradas em serviços com recursos limitados. A formação deve, portanto, contemplar condições concretas de utilização e evitar que o conhecimento sobre inteligência artificial permaneça restrito a determinados centros.

A atualização científica representa, assim, uma responsabilidade profissional vinculada à qualidade da assistência. Entretanto, sua efetividade depende da existência de oportunidades educacionais e de condições institucionais que favoreçam a aprendizagem.

Essa compreensão conduz à importância da interdisciplinaridade, uma vez que o desenvolvimento e a avaliação de sistemas inteligentes exigem conhecimentos que ultrapassam os limites de uma única área profissional.

5.6 A interdisciplinaridade como fundamento da Radiologia contemporânea

A inteligência artificial aplicada à Radiologia resulta da integração entre diferentes campos do conhecimento. Seu desenvolvimento envolve princípios matemáticos, métodos estatísticos, programação computacional, processamento de imagens e conhecimentos médicos especializados. Consequentemente, a avaliação de suas aplicações exige colaboração entre profissionais capazes de contribuir com perspectivas complementares.

A interdisciplinaridade não constitui característica inteiramente nova da Radiologia. Desde sua origem, a especialidade depende da articulação entre Medicina e Física, relação que permanece fundamental para compreender a formação das imagens, os parâmetros de aquisição e os procedimentos de proteção radiológica.

Entretanto, a expansão da inteligência artificial amplia essa interação ao incorporar conhecimentos relacionados à ciência de dados e ao desenvolvimento de modelos computacionais. O radiologista passa a atuar em um ambiente no qual determinadas ferramentas são produzidas por equipes com formações diversas, exigindo comunicação capaz de aproximar problemas clínicos e soluções tecnológicas.

Essa colaboração apresenta relevância desde a definição da finalidade dos sistemas. O desenvolvimento de um algoritmo não deve começar exclusivamente pela disponibilidade de grandes conjuntos de imagens, mas pela identificação de uma necessidade clínica que possa ser investigada por métodos computacionais.

O conhecimento do radiologista é fundamental nessa etapa, pois permite definir quais informações são relevantes, quais alterações devem ser investigadas e quais consequências podem decorrer de classificações incorretas.

Da mesma forma, profissionais de ciência de dados contribuem para selecionar métodos adequados, organizar procedimentos de treinamento e desenvolver estratégias de avaliação. A participação de especialistas em estatística pode fortalecer a análise dos resultados, enquanto conhecimentos de física médica e tecnologia da informação são relevantes para compreender as características dos exames e as condições de integração aos serviços.

Willemink et al. (2020) demonstram que a preparação de dados para aprendizado de máquina envolve procedimentos que exigem atenção à qualidade e à organização das imagens. Essa complexidade reforça a necessidade de colaboração entre profissionais com

conhecimentos complementares, especialmente quando os resultados computacionais dependem de características técnicas e clínicas dos exames.

Entretanto, a interdisciplinaridade não deve ser compreendida apenas como reunião de especialistas em um mesmo projeto. Sua efetividade depende da construção de uma linguagem comum, capaz de permitir que diferentes profissionais compreendam os objetivos, as limitações e as consequências das decisões tomadas.

Na formação do radiologista, essa competência pode ser desenvolvida por meio de atividades que envolvam discussão de pesquisas, análise de ferramentas e participação em projetos interdisciplinares. O objetivo não consiste em exigir domínio integral de todas as áreas, mas em favorecer a capacidade de dialogar com diferentes especialistas e participar criticamente de decisões tecnológicas.

Essa perspectiva também amplia as possibilidades de atuação profissional. Radiologistas com interesse em pesquisa e inovação poderão contribuir para o desenvolvimento e a avaliação de sistemas inteligentes, aproximando necessidades assistenciais e conhecimentos computacionais.

Entretanto, a expansão dessas possibilidades não significa que todos os especialistas devam seguir trajetórias acadêmicas ou tecnológicas. A formação precisa preservar diferentes perfis de atuação, reconhecendo que a prática clínica, o ensino e a pesquisa desempenham funções complementares no desenvolvimento da especialidade.

A interdisciplinaridade representa, portanto, uma competência estratégica para o futuro da Radiologia, pois permite que o conhecimento médico participe ativamente das transformações tecnológicas.

Essa participação torna-se especialmente importante diante das mudanças que a inteligência artificial poderá produzir na organização do trabalho e na identidade profissional do radiologista.

5.7 O futuro do trabalho radiológico: transformação das competências e identidade profissional

O avanço da inteligência artificial tem provocado discussões sobre o futuro das profissões, especialmente daquelas que envolvem análise de informações e reconhecimento de padrões. Na Medicina, esse debate assume características particulares porque as atividades profissionais estão relacionadas a decisões que podem produzir consequências significativas para os pacientes. Na Radiologia, a possibilidade de automatização de determinadas tarefas estimulou questionamentos sobre a permanência e a transformação do papel do especialista.

Entretanto, a análise dessa questão exige distinguir a automatização de atividades específicas da substituição integral de uma profissão. A prática radiológica envolve diferentes competências, incluindo a definição de protocolos, a interpretação de imagens, a correlação clínica, a elaboração de laudos e a comunicação com outros profissionais. Embora algumas dessas atividades possam receber apoio computacional, não existe fundamento suficiente para concluir que todas serão substituídas de maneira uniforme.

A European Society of Radiology (2019) reconhece que a inteligência artificial poderá influenciar diferentes dimensões da atividade radiológica, incluindo funções relacionadas à análise de imagens e à organização dos serviços. Essa perspectiva permite compreender que a transformação profissional poderá ocorrer mediante a reorganização de tarefas e a incorporação de novas competências, em vez de necessariamente resultar no desaparecimento da especialidade.

A distinção entre tarefas e profissões é fundamental porque a automatização de determinados procedimentos pode modificar a distribuição do trabalho sem eliminar a necessidade de conhecimento especializado. Sistemas capazes de realizar mensurações ou identificar padrões específicos podem reduzir a participação humana em determinadas atividades repetitivas, mas também podem criar novas demandas relacionadas à avaliação de resultados, à supervisão e à investigação de inconsistências.

Nesse cenário, o radiologista poderá assumir participação crescente na seleção, na avaliação e no acompanhamento de ferramentas inteligentes. Entretanto, essa possibilidade dependerá das características dos serviços, da formação dos profissionais e da evolução das evidências científicas.

A transformação da identidade profissional também merece atenção. Historicamente, o radiologista consolidou sua atuação mediante o domínio dos métodos de imagem e a capacidade de interpretar suas informações. A incorporação da inteligência artificial não elimina esses fundamentos, mas amplia o conjunto de conhecimentos necessários para compreender como as informações diagnósticas são produzidas.

A identidade do especialista poderá, portanto, incorporar competências relacionadas à avaliação de sistemas computacionais e à integração de informações quantitativas. Contudo, essa ampliação não deve reduzir a importância do raciocínio clínico, pois a finalidade da Radiologia permanece vinculada à produção de informações relevantes para o cuidado.

Voltando à Topol (2019), ele propõe uma reflexão sobre a convergência entre capacidades humanas e artificiais, destacando possibilidades de transformação da assistência médica. Aplicada à Radiologia, essa perspectiva sugere que o desenvolvimento tecnológico

poderá modificar o modo como determinadas atividades são realizadas, sem tornar dispensáveis as competências humanas relacionadas ao julgamento clínico e à responsabilidade profissional.

Contudo, a reorganização do trabalho também poderá produzir dificuldades. A introdução de sistemas inteligentes exige adaptação, atualização e acompanhamento de resultados. Em determinados contextos, a tecnologia poderá reduzir o tempo dedicado a tarefas específicas, mas também criar novas responsabilidades de conferência e supervisão.

Por essa razão, não é adequado presumir que a incorporação de inteligência artificial produzirá necessariamente redução da carga de trabalho. Seus efeitos dependerão da maneira como as ferramentas forem integradas aos processos assistenciais e das condições institucionais de utilização.

A avaliação do futuro profissional precisa considerar, ainda, a diversidade de áreas de atuação da Radiologia. Diferentes modalidades, subespecialidades e ambientes assistenciais apresentam necessidades próprias, razão pela qual a influência da inteligência artificial poderá ocorrer de maneira desigual.

Essa heterogeneidade reforça a importância de uma formação ampla, capaz de preparar o especialista para diferentes cenários. O objetivo não deve ser antecipar com certeza quais tarefas serão automatizadas, mas desenvolver competências que permitam compreender e acompanhar transformações ainda em desenvolvimento.

Dessa forma, a inteligência artificial representa um fator de mudança na identidade profissional do radiologista, mas não determina antecipadamente seu destino. O futuro da especialidade dependerá das escolhas científicas, educacionais e institucionais que orientarão a incorporação tecnológica.

Essa constatação conduz à necessidade de examinar as perspectivas de desenvolvimento da Radiologia, considerando tanto as possibilidades oferecidas pelas novas ferramentas quanto as condições necessárias para sua utilização responsável.

5.8 Perspectivas para a Radiologia do futuro: inovação, medicina de precisão e cuidado centrado no paciente

As transformações examinadas ao longo deste livro demonstram que a Radiologia ocupa posição relevante no desenvolvimento da Medicina contemporânea. Desde a descoberta dos raios X, a especialidade ampliou progressivamente sua capacidade de investigar estruturas e processos biológicos, incorporando métodos que modificaram as possibilidades de diagnóstico e acompanhamento de doenças.

A inteligência artificial integra essa trajetória ao oferecer novos instrumentos para processamento, organização e análise de informações. Entretanto, seu potencial não deve ser compreendido apenas como possibilidade de acelerar procedimentos existentes. Parte de sua relevância está relacionada à investigação de formas de extrair e integrar informações que possam contribuir para uma compreensão mais abrangente das condições clínicas.

Nesse contexto, a medicina de precisão constitui uma das perspectivas frequentemente associadas ao desenvolvimento de métodos computacionais. A possibilidade de relacionar características quantitativas das imagens a informações clínicas, laboratoriais e moleculares estimula pesquisas destinadas a investigar diferenças entre pacientes e doenças.

A radiômica, discutida nos capítulos anteriores, representa uma das manifestações desse interesse. Por meio da extração de características quantitativas, procura-se investigar informações que possam complementar a interpretação convencional das imagens. Entretanto, sua utilização clínica depende de estudos capazes de demonstrar reprodutibilidade, generalização e relevância para decisões assistenciais.

A inteligência artificial também poderá contribuir para a integração de diferentes modalidades de imagem e fontes de informação. Sistemas multimodais representam uma linha de investigação voltada ao processamento de dados de naturezas distintas, permitindo explorar relações entre imagens, textos e registros clínicos.

Contudo, a combinação de informações não assegura automaticamente resultados superiores. A confiabilidade depende da qualidade das fontes utilizadas, dos métodos empregados e das condições de validação. Consequentemente, o desenvolvimento de sistemas mais complexos precisa ser acompanhado de procedimentos científicos igualmente rigorosos.

A European Society of Radiology (2019) identifica possibilidades relacionadas à radiômica, à integração de dados e ao aperfeiçoamento dos fluxos radiológicos, demonstrando que as aplicações de inteligência artificial podem ultrapassar a identificação isolada de lesões. Essa perspectiva amplia o campo de investigação, mas também reforça a necessidade de participação dos especialistas na definição das finalidades clínicas das ferramentas.

Outro aspecto importante envolve a personalização dos procedimentos diagnósticos. Métodos computacionais podem ser investigados para auxiliar a definição de protocolos e o processamento das imagens, considerando características técnicas e necessidades específicas. Entretanto, essas aplicações precisam permanecer vinculadas a critérios de segurança e adequação clínica.

A incorporação tecnológica também poderá influenciar a organização dos serviços, especialmente por meio de sistemas destinados à priorização de exames e à automação de

determinadas atividades. Todavia, a melhoria dos fluxos deve ser avaliada considerando seus efeitos sobre o conjunto da assistência, evitando que ganhos operacionais isolados sejam confundidos com benefícios clínicos comprovados.

Nesse cenário, o cuidado centrado no paciente precisa permanecer como referência fundamental. A finalidade do desenvolvimento tecnológico não consiste apenas em produzir maior quantidade de informações, mas em contribuir para decisões capazes de responder às necessidades das pessoas atendidas.

A Organização Mundial da Saúde (2021) destaca que o desenvolvimento da inteligência artificial em saúde deve preservar a autonomia humana, promover a segurança e favorecer a equidade. Esses princípios demonstram que o futuro da inovação médica precisa ser construído considerando seus efeitos sobre pacientes, profissionais e sistemas de saúde.

Essa perspectiva assume relevância particular diante do risco de que a sofisticação tecnológica produza uma compreensão excessivamente instrumental da assistência. O aumento da capacidade de processamento não elimina a necessidade de comunicação, escuta e interpretação contextualizada das informações.

A Radiologia, embora frequentemente associada à tecnologia, participa diretamente do cuidado ao fornecer elementos que orientam decisões clínicas. A qualidade dessa contribuição depende da precisão dos exames, mas também da capacidade de produzir informações compreensíveis e relevantes para os profissionais e pacientes envolvidos.

Por essa razão, a incorporação de inteligência artificial não deve afastar o radiologista da dimensão humana da Medicina. Ao contrário, o desenvolvimento tecnológico poderá representar oportunidade de reorganizar determinadas atividades, desde que essa reorganização seja orientada pela qualidade da assistência e não apenas por objetivos de produtividade.

O futuro da Radiologia deverá ser construído, portanto, mediante a articulação entre inovação científica, formação profissional e compromisso ético. Sistemas inteligentes poderão ampliar capacidades técnicas, mas sua contribuição dependerá da maneira como forem incorporados ao trabalho médico.

Essa compreensão permite reconhecer que a principal transformação da especialidade talvez não esteja na substituição de uma forma de inteligência por outra, mas no desenvolvimento de novas relações entre conhecimentos, tecnologias e responsabilidades.

É justamente nessa relação que se situa o desafio das próximas gerações de radiologistas: utilizar os recursos disponíveis sem perder a capacidade de questioná-los, interpretar seus resultados e reconhecer os limites de sua aplicação.

5.9 Considerações finais do capítulo

A análise da formação do radiologista e das perspectivas para o futuro da especialidade demonstra que a inteligência artificial introduz desafios que ultrapassam o aprendizado de novas ferramentas. Sua incorporação modifica as condições em que determinadas informações são produzidas e utilizadas, exigindo competências relacionadas à avaliação científica, à interpretação crítica e à compreensão das implicações éticas da tecnologia.

A residência médica permanece como etapa fundamental para o desenvolvimento dessas competências, especialmente por proporcionar a integração entre conhecimentos anatômicos, fisiopatológicos e técnicos. A utilização de sistemas inteligentes não reduz a importância dessa formação, mas torna ainda mais necessário preservar a capacidade de raciocínio diagnóstico independente.

Ao mesmo tempo, a alfabetização em inteligência artificial representa uma dimensão progressivamente relevante da preparação profissional. Compreender os fundamentos dos modelos computacionais, reconhecer limitações dos dados e interpretar indicadores de desempenho são habilidades que poderão contribuir para uma utilização mais segura das ferramentas.

A formação ética também assume importância central, considerando que a incorporação tecnológica envolve questões relacionadas à autonomia, à proteção de dados, à equidade e à responsabilidade profissional. O radiologista precisa estar preparado para reconhecer essas dimensões e participar criticamente das decisões relacionadas à utilização de sistemas inteligentes.

A educação médica continuada, por sua vez, constitui condição indispensável para acompanhar o desenvolvimento científico. A velocidade das transformações tecnológicas exige atualização permanente, mas essa atualização deve permanecer fundamentada em evidências, evitando que expectativas de inovação sejam confundidas com demonstrações de benefício clínico.

A interdisciplinaridade amplia as possibilidades de participação do radiologista nesse processo. A colaboração com profissionais de ciência de dados, estatística, física médica e tecnologia da informação pode contribuir para aproximar necessidades clínicas e soluções computacionais, favorecendo o desenvolvimento de ferramentas adequadas às condições reais de utilização.

Entretanto, a transformação das competências não significa que a identidade profissional deva ser definida exclusivamente pela capacidade de operar novas tecnologias. A

atuação radiológica permanece vinculada à interpretação clínica, à comunicação e à responsabilidade pelas informações produzidas.

Nesse sentido, o futuro da especialidade não deve ser compreendido como uma disputa entre inteligência humana e artificial. A questão fundamental consiste em identificar de que maneira diferentes capacidades poderão ser integradas para produzir uma assistência mais segura, cientificamente fundamentada e comprometida com as necessidades dos pacientes.

A inteligência artificial poderá modificar procedimentos, ampliar possibilidades diagnósticas e introduzir novas formas de organização do trabalho. Contudo, sua contribuição dependerá da formação de profissionais capazes de compreender tanto suas potencialidades quanto seus limites.

A Radiologia do futuro não será definida apenas pela sofisticação de seus equipamentos ou pela complexidade de seus algoritmos, mas pela capacidade de transformar avanços científicos em conhecimento clinicamente relevante e cuidado responsável.

Essa constatação permite retomar a questão que orientou a presente obra. Desde a descoberta dos raios X até o desenvolvimento de sistemas inteligentes, a história da Radiologia tem sido marcada pela ampliação das possibilidades de observar, compreender e investigar o organismo humano. Entretanto, cada avanço tecnológico também demonstrou que a produção de imagens e informações não substitui a necessidade de interpretação.

A inteligência artificial representa uma nova etapa dessa trajetória, oferecendo recursos que poderão ampliar determinadas capacidades profissionais. Sua incorporação, contudo, exige preservar o conhecimento médico, a responsabilidade ética e a centralidade do paciente.

Dessa forma, a formação do radiologista constitui um dos elementos decisivos para que a transformação tecnológica se converta em avanço assistencial. Preparar os futuros especialistas significa oferecer condições para que possam utilizar ferramentas inteligentes, avaliar criticamente seus resultados e participar da construção de uma Medicina que integre inovação e humanidade.

Mais do que preparar médicos para trabalhar com inteligência artificial, o desafio consiste em formar radiologistas capazes de exercer plenamente a Medicina em um mundo no qual a inteligência artificial estará cada vez mais presente.

Essa perspectiva encerra o percurso desenvolvido neste capítulo e prepara a reflexão final da obra: compreender que o futuro da Radiologia não depende exclusivamente daquilo

que as máquinas serão capazes de realizar, mas também das escolhas humanas que orientarão seu desenvolvimento e sua utilização.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A trajetória da Radiologia, desde a descoberta dos raios X até o desenvolvimento contemporâneo da inteligência artificial, evidencia que a evolução da Medicina está profundamente relacionada à capacidade humana de transformar o conhecimento científico em instrumentos de investigação, diagnóstico e cuidado. Ao longo desse percurso, cada inovação tecnológica ampliou as possibilidades de compreender o organismo humano, modificando não apenas os métodos utilizados pelos profissionais, mas também as competências necessárias ao exercício da prática médica.

Entretanto, essa evolução demonstra que o aperfeiçoamento dos instrumentos diagnósticos não elimina a importância do conhecimento clínico, da interpretação crítica e da responsabilidade profissional. Ao contrário, quanto mais sofisticadas se tornam as tecnologias, maior é a necessidade de compreender suas possibilidades, seus limites e suas repercussões sobre a assistência.

Foi a partir dessa compreensão que a presente obra se propôs a analisar as transformações introduzidas pela inteligência artificial na Radiologia, considerando suas aplicações clínicas, os desafios científicos e éticos associados à sua utilização e as perspectivas para a formação e a atuação dos futuros especialistas. A questão central não consistiu apenas em investigar aquilo que os sistemas computacionais são capazes de realizar, mas em compreender de que maneira essas capacidades poderão ser incorporadas à prática radiológica sem comprometer os fundamentos que orientam a Medicina.

Nesse sentido, a discussão desenvolvida ao longo dos capítulos permitiu reconhecer que a inteligência artificial representa uma transformação significativa, embora seus efeitos não possam ser compreendidos exclusivamente a partir do desempenho dos algoritmos.

A análise histórica demonstrou, inicialmente, que a Radiologia sempre se desenvolveu mediante a aproximação entre diferentes áreas do conhecimento. A descoberta dos raios X, a consolidação da radiografia, o surgimento da tomografia computadorizada, a expansão da ultrassonografia e o aperfeiçoamento da ressonância magnética resultaram de processos científicos que integraram conhecimentos médicos, físicos e tecnológicos. A digitalização das imagens e o desenvolvimento de sistemas de armazenamento e comunicação, posteriormente, criaram condições para a ampliação das análises computacionais, permitindo que grandes volumes de informações passassem a ser utilizados em pesquisas sobre reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina.

Essa trajetória permite compreender que a inteligência artificial não surgiu como fenômeno inteiramente desvinculado da história da especialidade. Sua expansão representa a continuidade de um processo de transformação tecnológica que, progressivamente, ampliou a capacidade de produzir e interpretar informações sobre o corpo humano.

Necessário se faz, todavia reforçar que ela apresenta uma particularidade relevante: enquanto muitas inovações anteriores estiveram predominantemente relacionadas à aquisição e à qualidade das imagens, os sistemas inteligentes passaram a participar também de atividades associadas à sua análise e interpretação. Essa mudança explica parte das expectativas e das preocupações que acompanham o desenvolvimento contemporâneo da Radiologia.

Ao examinar as aplicações clínicas da inteligência artificial, verificou-se que suas possibilidades abrangem diferentes modalidades e etapas do processo diagnóstico. Na radiografia convencional, sistemas computacionais têm sido investigados para identificar padrões e sinalizar alterações específicas. Na tomografia computadorizada, destacam-se aplicações relacionadas à detecção de lesões, à segmentação anatômica e à análise quantitativa. Na ressonância magnética, métodos inteligentes oferecem possibilidades de aperfeiçoamento da aquisição e da reconstrução das imagens, enquanto a mamografia e a Oncologia apresentam campos relevantes de investigação sobre rastreamento, caracterização de lesões e acompanhamento de doenças.

Essas aplicações demonstram que a inteligência artificial possui potencial para contribuir com determinadas atividades radiológicas, especialmente quando envolve tarefas bem delimitadas e passíveis de avaliação objetiva. Contudo, a análise também evidenciou que resultados experimentais promissores não constituem, isoladamente, demonstração de benefício clínico.

A qualidade dos dados, a representatividade das populações, a validação externa e a integração aos processos assistenciais permanecem condições indispensáveis para que as ferramentas possam ser utilizadas de maneira confiável. Conforme discutem Kelly et al. (2019), a passagem entre o desenvolvimento de modelos computacionais e a obtenção de impacto clínico efetivo envolve dificuldades que ultrapassam o desempenho observado em ambientes controlados.

Essa constatação conduz a uma das conclusões centrais da obra: a capacidade de reconhecer padrões em imagens médicas não equivale, por si só, ao exercício integral do diagnóstico clínico. A interpretação radiológica envolve a integração de informações anatômicas, fisiopatológicas e clínicas, além da avaliação de hipóteses alternativas e do

reconhecimento das limitações dos exames. O significado de um achado não depende exclusivamente de sua aparência visual, mas também das circunstâncias em que foi identificado, dos antecedentes do paciente e das consequências que sua interpretação poderá produzir.

A inteligência artificial pode oferecer informações relevantes nesse processo, mas sua contribuição precisa ser compreendida a partir de suas finalidades específicas. Um sistema desenvolvido para identificar determinada alteração não possui, necessariamente, capacidade validada para reconhecer todas as condições que podem estar presentes em um exame. Da mesma forma, uma classificação computacional não representa automaticamente uma conclusão diagnóstica definitiva. Essa distinção reforça a importância do raciocínio médico e demonstra que a utilização responsável da tecnologia depende da capacidade profissional de interpretar criticamente seus resultados.

É nesse contexto que a relação entre o radiologista e a inteligência artificial assume posição central. A discussão sobre uma possível substituição dos especialistas, frequentemente associada ao desenvolvimento de sistemas computacionais, mostra-se insuficiente para explicar a complexidade das transformações em curso. A automatização de tarefas específicas não significa necessariamente a substituição de uma profissão constituída por múltiplas competências, responsabilidades e formas de atuação. A prática radiológica compreende atividades que ultrapassam a identificação de alterações, incluindo a definição de protocolos, a avaliação da qualidade técnica dos exames, a elaboração de diagnósticos diferenciais e a comunicação de informações relevantes à equipe assistencial.

Nesse sentido, a perspectiva de complementaridade entre inteligência humana e artificial apresenta maior consistência para compreender as possibilidades contemporâneas da especialidade. Topol (2019), ao discutir a convergência entre essas capacidades na Medicina, contribui para uma reflexão sobre formas de integração tecnológica orientadas ao aperfeiçoamento da assistência. Entretanto, a complementaridade não deve ser considerada consequência automática da utilização de algoritmos. Sua efetividade depende de evidências científicas, supervisão adequada e organização dos processos de trabalho, especialmente porque recomendações automatizadas também podem influenciar negativamente o julgamento profissional quando aceitas sem avaliação crítica.

A colaboração entre médico e sistema inteligente precisa, portanto, preservar a autonomia profissional e a capacidade de reconhecer inconsistências. A tecnologia poderá auxiliar a interpretação, mas não deverá transformar o radiologista em mero receptor de classificações computacionais. O exercício da Medicina exige julgamento fundamentado,

reconhecimento de incertezas e responsabilidade pelas decisões tomadas. Essas competências permanecem relevantes mesmo em ambientes nos quais sistemas automatizados participam de diferentes etapas da assistência.

A análise desenvolvida também demonstrou que a incorporação da inteligência artificial não pode ser dissociada de seus desafios éticos e jurídicos. A utilização de informações sensíveis, a possibilidade de vieses algorítmicos, as diferenças de desempenho entre populações e as dificuldades relacionadas à transparência dos modelos introduzem questões que precisam acompanhar todo o processo de desenvolvimento e implementação tecnológica. A inovação médica não pode ser avaliada apenas pela sofisticação de seus métodos, mas também por sua capacidade de produzir benefícios sem comprometer direitos fundamentais.

Nesse cenário, os princípios apresentados pela Organização Mundial da Saúde (2021), especialmente aqueles relacionados à autonomia humana, à segurança, à transparência, à responsabilidade e à equidade, oferecem fundamentos importantes para orientar a utilização de sistemas inteligentes em saúde. Sua relevância decorre do reconhecimento de que a tecnologia participa de relações assistenciais que envolvem pessoas, instituições e decisões potencialmente sensíveis. Assim, a proteção dos pacientes deve permanecer como referência para a avaliação dos benefícios e riscos associados à inovação.

No contexto brasileiro, essa preocupação adquire importância adicional diante das desigualdades de infraestrutura e acesso aos serviços de saúde. A incorporação de inteligência artificial à Radiologia não deverá ser compreendida apenas como oportunidade de modernização tecnológica, mas como processo que precisa considerar as necessidades concretas da população e as condições de funcionamento das instituições. Ferramentas desenvolvidas em ambientes com características específicas podem apresentar limitações quando utilizadas em serviços distintos, tornando indispensável a produção de evidências compatíveis com a realidade nacional.

A proteção dos dados pessoais também integra essa discussão, especialmente porque o desenvolvimento de sistemas inteligentes frequentemente depende da utilização de grandes conjuntos de imagens e informações clínicas. No Brasil, a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais estabelece fundamentos relevantes para o tratamento dessas informações, exigindo atenção às finalidades de utilização, à necessidade dos dados e à adoção de medidas adequadas de segurança. A possibilidade de produzir conhecimento científico a partir de registros médicos não elimina a obrigação de preservar os direitos das pessoas às quais essas informações se referem.

Da mesma forma, a responsabilidade pela utilização dos sistemas inteligentes precisa ser compreendida considerando a participação de diferentes agentes. Médicos, instituições de saúde e desenvolvedores possuem atribuições específicas, cuja análise depende das circunstâncias concretas e das normas aplicáveis. A existência de uma recomendação automatizada não elimina os deveres profissionais, mas também não autoriza atribuir indiscriminadamente ao radiologista todas as consequências relacionadas ao funcionamento de uma tecnologia. A governança adequada exige procedimentos de supervisão, documentação e acompanhamento capazes de identificar falhas e orientar medidas corretivas.

Esses desafios demonstram que o futuro da Radiologia dependerá não apenas da evolução dos algoritmos, mas também da preparação dos profissionais responsáveis por utilizá-los. A formação médica assume, nesse contexto, papel decisivo, pois será necessário integrar competências tecnológicas aos fundamentos clínicos e científicos tradicionalmente exigidos da especialidade. O domínio da anatomia, da fisiopatologia, dos princípios físicos dos métodos de imagem e do raciocínio diagnóstico permanece indispensável, inclusive para que o médico possa reconhecer limitações e inconsistências dos sistemas computacionais.

A residência médica constitui espaço fundamental para o desenvolvimento dessas competências. Entretanto, a incorporação da inteligência artificial exige ampliar o debate formativo, incluindo conhecimentos sobre aprendizado de máquina, avaliação de desempenho, qualidade dos dados e interpretação crítica de pesquisas. A European Society of Radiology (2019) destaca a importância de que os radiologistas compreendam os fundamentos dessas tecnologias, permitindo sua participação nas decisões relacionadas à utilização e ao desenvolvimento de sistemas inteligentes.

Essa preparação não significa transformar todos os especialistas em programadores ou pesquisadores de inteligência artificial. O objetivo consiste em assegurar que os médicos possuam conhecimentos suficientes para avaliar a pertinência das ferramentas, reconhecer seus limites e utilizá-las de maneira compatível com as necessidades assistenciais. A formação deverá, portanto, articular conhecimentos tradicionais e novas competências, evitando tanto a rejeição indiscriminada da inovação quanto a dependência acrítica de seus resultados.

A educação médica continuada também se apresenta como condição indispensável para acompanhar as transformações da especialidade. A velocidade do desenvolvimento tecnológico exige atualização permanente, mas essa atualização precisa permanecer orientada por evidências científicas e não apenas pela divulgação de novas funcionalidades. O radiologista deverá ser capaz de distinguir possibilidades experimentais de aplicações

clinicamente validadas, compreendendo que o aperfeiçoamento tecnológico não elimina a necessidade de investigação rigorosa.

A interdisciplinaridade, por sua vez, amplia as oportunidades de participação dos especialistas na construção das tecnologias. A colaboração entre Medicina, Ciência da Computação, Estatística, Física Médica e outras áreas poderá contribuir para o desenvolvimento de sistemas orientados por necessidades clínicas concretas. Essa aproximação permitirá que o conhecimento médico participe não apenas da utilização das ferramentas, mas também da definição dos problemas que se pretende solucionar e dos critérios empregados para avaliar seus resultados.

Ao reunir essas reflexões, torna-se possível responder à questão que orientou a presente investigação. A inteligência artificial não deve ser compreendida como substituta inevitável do médico radiologista, mas como um conjunto de tecnologias com potencial para apoiar e transformar determinadas atividades da especialidade, desde que sua utilização esteja fundamentada em evidências científicas, supervisão profissional e compromisso ético. Essa conclusão não representa uma previsão absoluta sobre o futuro, pois o desenvolvimento tecnológico permanece em curso e suas repercussões dependerão de fatores científicos, institucionais e sociais. Trata-se, antes, de reconhecer que as capacidades atualmente demonstradas pelos sistemas inteligentes não autorizam equiparar a execução de tarefas específicas ao conjunto de competências envolvidas no exercício da Medicina.

A resposta também exige reconhecer que a permanência da relevância profissional não decorrerá simplesmente da preservação das práticas existentes. O radiologista precisará acompanhar as transformações científicas, desenvolver novas competências e participar ativamente das decisões relacionadas à incorporação tecnológica. Sua atuação poderá ser modificada, assim como ocorreu em outros momentos da história da especialidade, mas essa transformação poderá ampliar suas possibilidades de contribuição para a assistência.

A inteligência artificial representa, portanto, uma oportunidade de aperfeiçoamento que precisa ser acompanhada de responsabilidade. Seus benefícios potenciais não devem obscurecer suas limitações, assim como seus riscos não devem impedir a investigação científica de aplicações capazes de contribuir para o diagnóstico e o cuidado. O desafio consiste em construir uma relação equilibrada entre inovação e prudência, reconhecendo que o desenvolvimento tecnológico somente adquire significado médico quando orientado à melhoria da assistência.

Essa compreensão permite retomar o percurso histórico que fundamentou a obra. Em 1895, a descoberta dos raios X tornou possível observar estruturas internas do organismo

humano de uma maneira até então desconhecida. Mais de um século depois, a inteligência artificial amplia as possibilidades de processamento e análise dessas imagens, introduzindo novas formas de investigar informações diagnósticas. Embora os instrumentos tenham se transformado profundamente, permanece uma questão essencial: a necessidade de atribuir significado clínico ao conhecimento produzido.

A imagem, por mais detalhada que seja, não constitui um fim em si mesma. O algoritmo, por mais sofisticado que se torne, também não representa a finalidade última da assistência. Ambos são instrumentos inseridos em uma prática cujo objetivo permanece relacionado à compreensão das condições de saúde e à tomada de decisões capazes de beneficiar pessoas.

É nessa perspectiva que a dimensão humana da Radiologia adquire significado particular. A precisão técnica, a capacidade de processamento e a rapidez dos sistemas constituem atributos relevantes, mas não substituem os compromissos relacionados à responsabilidade, à comunicação e ao respeito à dignidade dos pacientes. A Medicina não se resume à produção de informações corretas; envolve também a interpretação dessas informações diante de necessidades humanas concretas.

Por essa razão, o futuro da especialidade não deverá ser definido exclusivamente pela capacidade das máquinas de identificar alterações ou produzir classificações. Sua construção dependerá da maneira como os profissionais, as instituições e a sociedade decidirão utilizar essas capacidades. A inteligência artificial poderá modificar instrumentos e procedimentos, mas a finalidade do conhecimento médico continuará vinculada ao cuidado.

Conclui-se, assim, que a evolução da Radiologia exige uma compreensão que ultrapasse a oposição entre o médico e a máquina. O desenvolvimento de sistemas inteligentes inaugura possibilidades de colaboração que deverão ser avaliadas criticamente, aperfeiçoadas cientificamente e orientadas por princípios éticos. A formação dos futuros especialistas, a produção de evidências consistentes e a preservação da autonomia profissional serão elementos fundamentais para que essa transformação se converta em benefício assistencial.

O futuro da Radiologia não está simplesmente nas mãos da inteligência artificial, nem exclusivamente nas mãos daqueles que dominam as tecnologias. Ele será construído pela capacidade humana de compreender, orientar e utilizar a inovação com conhecimento, responsabilidade e sensibilidade diante da vida.

Afinal, desde a primeira radiografia até os sistemas computacionais mais avançados, a essência da Radiologia permanece relacionada a um mesmo propósito: transformar aquilo que a ciência permite enxergar em conhecimento capaz de cuidar.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO-MARQUES, Paulo Mazzoncini de. Diagnóstico auxiliado por computador na radiologia. Radiologia Brasileira, v. 34, n. 5, p. 285–293, 2001. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-39842001000500008.

BRANDES, Gabriela Irene Garcia et al. Impacto da inteligência artificial na escolha de radiologia como especialidade médica por estudantes de medicina da cidade de São Paulo. Radiologia Brasileira, v. 53, n. 3, p. 167–170, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2019.0101.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 36, de 25 de julho de 2013. Institui ações para a segurança do paciente em serviços de saúde. Brasília, DF: Anvisa, 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 657, de 24 de março de 2022. Dispõe sobre a regularização de software como dispositivo médico (SaMD). Brasília, DF: Anvisa, 2022.

BRASIL. Conselho Federal de Medicina. Resolução CFM nº 2.217, de 27 de setembro de 2018. Aprova o Código de Ética Médica. Brasília, DF: CFM, 2018.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 1988.

BRASIL. Lei nº 12.842, de 10 de julho de 2013. Dispõe sobre o exercício da Medicina. Brasília, DF: Presidência da República, 2013.

BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018.

BRASIL. Lei nº 8.080, de 19 de setembro de 1990. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes. Brasília, DF: Presidência da República, 1990.

EUROPEAN SOCIETY OF RADIOLOGY (ESR). What the radiologist should know about artificial intelligence – an ESR white paper. Insights into Imaging, v. 10, artigo 44, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s13244-019-0738-2.

GARRAFA, Volnei; PORTO, Dora. Intervention bioethics: a proposal for peripheral countries in a context of power and injustice. Bioethics, v. 17, n. 5–6, p. 399–416, 2003. DOI: https://doi.org/10.1111/1467-8519.00356.

HOSNY, Ahmed et al. Artificial intelligence in radiology. Nature Reviews Cancer, v. 18, p. 500–510, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41568-018-0016-5.

KELLY, Christopher J. et al. Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence. BMC Medicine, v. 17, artigo 195, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s12916-019-1426-2.

KNOLL, Florian et al. fastMRI: a publicly available raw k-space and DICOM dataset of knee images for accelerated MR image reconstruction using machine learning. Radiology: Artificial Intelligence, v. 2, n. 1, e190007, 2020. DOI: https://doi.org/10.1148/ryai.2020190007.

KOENIGKAM SANTOS, Marcel et al. Inteligência artificial, aprendizado de máquina, diagnóstico auxiliado por computador e radiômica: avanços da imagem rumo à medicina de precisão. Radiologia Brasileira, v. 52, n. 6, p. 387–396, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2019.0049.

LÅNG, Kristina et al. Artificial intelligence-supported screen reading versus standard double reading in the Mammography Screening with Artificial Intelligence trial (MASAI): a clinical safety analysis of a randomised, controlled, non-inferiority, single-blinded, screening accuracy study. The Lancet Oncology, v. 24, n. 8, p. 936–944, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00298-X.

LEITE, Claudia da Costa. Inteligência artificial, radiologia, medicina de precisão e medicina personalizada. Radiologia Brasileira, v. 52, n. 6, p. VII–VIII, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2019.52.6e2.

LEITÃO, Cleverson Alex et al. Desempenho do ChatGPT nas questões da avaliação anual de residentes do Colégio Brasileiro de Radiologia. Radiologia Brasileira, v. 57, e20230083, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2023.0083.

LITJENS, Geert et al. A survey on deep learning in medical image analysis. Medical Image Analysis, v. 42, p. 60–88, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005.

MCKINNEY, Scott Mayer et al. International evaluation of an AI system for breast cancer screening. Nature, v. 577, p. 89–94, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-019-1799-6.

MONGAN, John; MOY, Linda; KAHN JR., Charles E. Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): a guide for authors and reviewers. Radiology: Artificial Intelligence, v. 2, n. 2, e200029, 2020. DOI: https://doi.org/10.1148/ryai.2020200029.

PAIVA, Omir Antunes; PREVEDELLO, Luciano M. The potential impact of artificial intelligence in radiology. Radiologia Brasileira, v. 50, n. 5, p. V–VI, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2017.50.5e1.

RAJPURKAR, Pranav et al. CheXNet: radiologist-level pneumonia detection on chest X-rays with deep learning. arXiv, 2017. Pré-publicação. Disponível em: https://arxiv.org/abs/1711.05225.

TEJANI, Ali S. et al. Artificial intelligence and radiology education. Radiology: Artificial Intelligence, v. 5, n. 1, e220084, 2023. DOI: https://doi.org/10.1148/ryai.220084.

TOPOL, Eric J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nature Medicine, v. 25, p. 44–56, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7.

TSCHANDL, Philipp et al. Human–computer collaboration for skin cancer recognition. Nature Medicine, v. 26, p. 1229–1234, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41591-020-0942-0.

WILLEMINK, Martin J. et al. Preparing medical imaging data for machine learning. Radiology, v. 295, n. 1, p. 4–15, 2020. DOI: https://doi.org/10.1148/radiol.2020192224.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guid BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 36, de 25 de julho de 2013. Institui ações para a segurança do paciente em serviços de saúde e dá outras providências. Brasília, DF: Anvisa, 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 657, de 24 de março de 2022. Dispõe sobre a regularização de software como dispositivo médico (Software as a Medical Device – SaMD). Brasília, DF: Anvisa, 2022. Disponível em: https://anvisalegis.datalegis.net/. Acesso em: 21 out. 2026.

BRASIL. Lei nº 8.080, de 19 de setembro de 1990. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1990. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8080.htm. Acesso em: 21 out. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.842, de 10 de julho de 2013. Dispõe sobre o exercício da Medicina. Brasília, DF: Presidência da República, 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12842.htm. Acesso em: 21 out. 2026.

BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13709.htm. Acesso em: 21 out. 2026.

CONSELHO FEDERAL DE MEDICINA (Brasil). Resolução CFM nº 2.217, de 27 de setembro de 2018. Aprova o Código de Ética Médica. Brasília, DF: CFM, 2018.

EUROPEAN SOCIETY OF RADIOLOGY (ESR). What the radiologist should know about artificial intelligence – an ESR white paper. Insights into Imaging, v. 10, art. 44, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s13244-019-0738-2.

GARRAFA, Volnei; PORTO, Dora. Intervention bioethics: a proposal for peripheral countries in a context of power and injustice. Bioethics, v. 17, n. 5-6, p. 399–416, 2003. DOI: https://doi.org/10.1111/1467-8519.00356.

HOSNY, Ahmed et al. Artificial intelligence in radiology. Nature Reviews Cancer, v. 18, n. 8, p. 500–510, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41568-018-0016-5.

KELLY, Christopher J. et al. Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence. BMC Medicine, v. 17, art. 195, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s12916-019-1426-2.

KNOLL, Florian et al. fastMRI: a publicly available raw k-space and DICOM dataset of knee images for accelerated MR image reconstruction using machine learning. Radiology: Artificial Intelligence, v. 2, n. 1, e190007, 2020. DOI: https://doi.org/10.1148/ryai.2020190007.

KOENIGKAM SANTOS, Marcel et al. Inteligência artificial, aprendizado de máquina, diagnóstico auxiliado por computador e radiômica: avanços da imagem rumo à medicina de precisão. Radiologia Brasileira, v. 52, n. 6, p. 387–396, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2019.0049.

LÅNG, Kristina et al. Artificial intelligence-supported screen reading versus standard double reading in the Mammography Screening with Artificial Intelligence trial (MASAI): a clinical safety analysis of a randomised, controlled, non-inferiority, single-blinded, screening accuracy study. The Lancet Oncology, v. 24, n. 8, p. 936–944, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00298-X.

LEITÃO, Cleverson Alex et al. Desempenho do ChatGPT nas questões da avaliação anual de residentes do Colégio Brasileiro de Radiologia. Radiologia Brasileira, v. 57, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2023.0083.

LEITE, Claudia da Costa. Inteligência artificial, radiologia, medicina de precisão e medicina personalizada. Radiologia Brasileira, v. 52, n. 6, p. VII–VIII, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2019.52.6e2.

LITJENS, Geert et al. A survey on deep learning in medical image analysis. Medical Image Analysis, v. 42, p. 60–88, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005.

MACEDO, Tulio Augusto Alves; ROCHA, Manoel de Souza. A radiologia na era da inteligência artificial: desafios e oportunidades. Radiologia Brasileira, v. 57, e1, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2024.57.e1.

MCKINNEY, Scott Mayer et al. International evaluation of an AI system for breast cancer screening. Nature, v. 577, p. 89–94, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-019-1799-6.

MONGAN, John; MOY, Linda; KAHN JR., Charles E. Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): a guide for authors and reviewers. Radiology: Artificial Intelligence, v. 2, n. 2, e200029, 2020. DOI: https://doi.org/10.1148/ryai.2020200029.

PAIVA, Omir Antunes; PREVEDELLO, Luciano M. The potential impact of artificial intelligence in radiology. Radiologia Brasileira, v. 50, n. 5, p. V–VI, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-3984.2017.50.5e1.

RAJPURKAR, Pranav et al. CheXNet: radiologist-level pneumonia detection on chest X-rays with deep learning. arXiv, 2017. Pré-publicação. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.05225.

TOPOL, Eric J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nature Medicine, v. 25, p. 44–56, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7.

TSCHANDL, Philipp et al. Human–computer collaboration for skin cancer recognition. Nature Medicine, v. 26, p. 1229–1234, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41591-020-0942-0.

WILLEMINK, Martin J. et al. Preparing medical imaging data for machine learning. Radiology, v. 295, n. 1, p. 4–15, 2020. DOI: https://doi.org/10.1148/radiol.2020192224.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200. Acesso em: 21 out. 2026.

ance. Geneva: WHO, 2021.

REALIZAÇÃO:

SEVEN
EDITORA

ACESSE NOSSO CATÁLOGO!

WWW.SEVENPUBLI.COM

CONECTANDO O **PESQUISADOR** E A **CIÊNCIA** EM UM SÓ CLIQUE.