

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA

RAFAELA DIMITRA DA SILVA PEREIRA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE IMAGENS VIA RESSONÂNCIA
MAGNÉTICA NO DIAGNÓSTICO DE CÂNCER UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

UBERLÂNDIA
2025

Rafaela Dimitra da Silva Pereira

**Aplicação da técnica de Imagens via Ressonância Magnética no Diagnóstico de
Câncer: Uma Revisão Bibliográfica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Física da Universidade Federal de
Uberlândia, para a obtenção do título de Bacharel
em Física Médica sob a orientação do Prof. Dr.
José Roberto Tozoni

**Uberlândia
2025**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso teria sido possível e nem mesmo haveria começado.

A minha perseverança que me manteve firme mesmo quando tudo que eu queria era desistir.

Aos meus pais Suzana e Márcio, que mesmo sem estudo, sempre lutaram para que eu pudesse realizar os meus sonhos. Vocês são a minha base e meu maior orgulho, sem todo esse amor eu jamais teria saído de lugar algum.

Aos meus irmãos Nicole e Arthur, que foram as primeiras pessoas a me ensinar sobre colaboração e trabalho em equipe.

Ao meu marido Mateus, pois sempre nos dias mais difíceis, me trouxe acolhimento e me deu forças para continuar.

Um agradecimento especial a minha avó Vanilde, que esteve ao meu lado desde o começo enquanto eu fazia a digitalização de todos os documentos da matrícula.

À minha tia Mirian que me acolheu na sua casa no começo da minha jornada na graduação em uma cidade longe de casa.

À Ágatha, obrigada por ter feito os dias na faculdade mais leves e ter me acolhido quando eu mais precisei, você sempre será minha dupla de faculdade.

À minha amiga Ludmilla, que sempre incentivou meu sonho de fazer faculdade e vibrou comigo a cada conquista.

Aos meus amigos, Carlos, Lara, Rodrigo, Gabriel e Natália, obrigada por terem sonhado comigo desde a nossa adolescência como seria a vida depois que estivéssemos em uma Federal.

À minha amiga Aline, você sempre foi mais do que importante para o meu equilíbrio emocional, obrigada por todas as vezes em que você me ouviu e me apoiou.

Toda a minha gratidão aos Quinzenais, seria impossível ter sobrevivido ao EAD se não fosse pela Ane, Beatriz, Hemilly, Caio e Júlia. Aliás, Ane obrigada por ser a Spencer da minha Hanna!

Eu sempre serei grata por todo o tempo que passamos juntas, Thamires eu espero que você saiba o quanto você foi importante para a minha jornada.

Ao meu orientador José Roberto Tozoni, por toda paciência e dedicação ao longo da orientação.

À minha amiga Steffane que mesmo de longe foi o alívio cômico durante esses anos e mais do que tudo me ajudou a exercitar minha criatividade.

A todas as pessoas que passaram pela minha jornada e fizeram com que a caminhada fosse mais leve e agradável.

“We make our own future”

- Dean Winchester

RESUMO

O uso da ressonância magnética (RM) tem crescido significativamente, principalmente devido à eficácia no diagnóstico de diversas patologias, decorrente de sua alta sensibilidade para detecção de alterações morfológicas e funcionais nos tecidos. Diferentemente de outras modalidades, como a tomografia computadorizada e a radiografia, a RM não utiliza radiação ionizante, o que a torna uma opção segura e eficaz, especialmente em exames repetitivos ou de seguimento. A RM é especialmente útil na avaliação de tumores em tecidos moles, como cérebro, fígado, mama e próstata, possibilitando a detecção precoce e o estadiamento preciso da doença. Além disso, novas técnicas, como a RM funcional, espectroscopia e imagem por difusão, têm ampliado seu papel na oncologia. O exame baseia-se na utilização de um campo magnético extremamente intenso, associado à aplicação de pulsos de radiofrequência, para possibilitar a geração de imagens com elevada resolução e riqueza de detalhes. Durante o processo, o organismo do paciente interage com esse campo e com as ondas de rádio, produzindo sinais específicos que são captados por bobinas altamente sensíveis. Esses sinais, por sua vez, são conduzidos a um sistema computadorizado especializado, onde passam por um processo de conversão: primeiro transformam-se em sinais elétricos, depois são digitalizados e, por fim, processados por softwares avançados. O resultado desse procedimento complexo é a formação de imagens claras e precisas, que são exibidas no monitor do equipamento e podem ser analisadas pelo profissional de saúde, auxiliando de maneira significativa no diagnóstico médico. A partir da análise de estudos científicos, este trabalho evidencia a relevância da RM na prática clínica oncológica, demonstrando que sua utilização contribui significativamente para o planejamento terapêutico e o monitoramento da resposta ao tratamento. Dessa maneira, a RM é uma ferramenta essencial no diagnóstico e acompanhamento do câncer, com potencial crescente à medida que novas tecnologias e aplicações são desenvolvidas.

Palavras-chave: Ressonância Magnética; Câncer; Diagnóstico por Imagem; Oncologia.

ABSTRACT

The use of magnetic resonance imaging (MRI) has grown significantly, mainly due to its effectiveness in diagnosing various pathologies, resulting from its high sensitivity in detecting morphological and functional alterations in tissues. Unlike other modalities, such as computed tomography and radiography, MRI does not use ionizing radiation, making it a safe and effective option, especially for repetitive or follow-up examinations. MRI is particularly useful in the evaluation of tumors in soft tissues, such as the brain, liver, breast, and prostate, enabling early detection and accurate disease staging. Furthermore, new techniques, such as functional MRI, spectroscopy, and diffusion imaging, have expanded its role in oncology. The examination is based on the use of an extremely strong magnetic field combined with the application of radiofrequency pulses to generate images with high resolution and detail. During the process, the patient's body interacts with this field and the radio waves, producing specific signals that are captured by highly sensitive coils. These signals are then transmitted to a specialized computerized system, where they undergo a conversion process: first, they are transformed into electrical signals, then digitized, and finally processed by advanced software. The result of this complex procedure is the formation of clear and precise images, which are displayed on the equipment monitor and can be analyzed by healthcare professionals, significantly assisting in medical diagnosis. Based on the analysis of scientific studies, this work highlights the relevance of MRI in clinical oncology practice, demonstrating that its use contributes significantly to therapeutic planning and monitoring of treatment response. Therefore, MRI is an essential tool in the diagnosis and follow-up of cancer, with growing potential as new technologies and applications are developed.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging; Cancer; Diagnostic Imaging; Oncology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Prótons de hidrogênio expostos a um campo magnético externo, se dividem em dois níveis de energia.....	12
Figura 2. Fundamentos físicos da ressonância magnética	13
Figura 3. Movimento de precessão	14
Figura 4. Gradiente de campo magnético	20
Figura 5. Planos anatômicos	20
Figura 6. Anatomia da mama com tumor.....	22
Figura 7. Exame de PET/RM.....	28
Figura 8. Câncer de mama em diferentes métodos de aquisição de imagem	31
Figura 9. Câncer de próstata localizado na zona periférica em imagens ponderadas em T2.....	33

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

RM – Ressonância Magnética

ACs – Agentes de Contraste

RF – Radiofrequência

SIL- Sinal de indução livre

GBCas – Agentes de contraste á base de gadolínio

PD - Densidade de prótons

RSR - Razão-Sinal-Ruído

RCR- Razão Contraste-Ruído

TR – Tempo de repetição

TE – Tempo de eco

RMmp- Ressonância Magnética multiparamétrica

FT - Transformada de *Fourier*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
	1.1 Objetivos... ..	11
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1	Princípios da ressonância magnética.....	12
2.1.1	Precessão.....	13
2.1.2	Equação de Larmor	15
2.1.3	O sinal de RM	15
2.1.4	Relaxação	16
2.1.5	T1... ..	17
2.1.6	T2... ..	17
2.2	APLICAÇÕES DA RM NO DIAGNÓSTICO DE CANCÊR	21
2.3	AVANÇOS TECNOLÓGICOS DA RM.....	25
2.3.1	PET/RM.....	27
2.4	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA RM	28
3	METODOLOGIA	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o câncer tornou-se um dos maiores desafios à saúde pública, configurando-se como uma das principais causas de mortalidade em âmbito global. O aumento significativo na incidência de casos elevou a importância do diagnóstico precoce e do tratamento das neoplasias, posicionando-os como temas centrais nas discussões sobre políticas de saúde. Nesse contexto, o investimento em tecnologias avançadas para detecção e monitoramento da doença é essencial, ampliando o acesso a exames e terapias eficazes.

Dentre essas tecnologias, a Ressonância Magnética (RM) destaca-se como uma ferramenta fundamental no diagnóstico oncológico, principalmente por gerar imagens detalhadas de tecidos moles sem o uso de radiação ionizante. A RM consolidou-se como técnica amplamente utilizada na prática clínica, beneficiando-se de constantes aprimoramentos e avanços tecnológicos (MAZZOLA, 2009).

A RM é uma modalidade de imagem médica avançada, não invasiva, que permite a obtenção de imagens de alta resolução, possibilitando avaliar com precisão a composição tecidual, detectar lesões precoces, mensurar estruturas anatômicas e diferenciar tecidos normais de patológicos (WESTBROOK *et al.*, 2013). Essas características tornam a RM especialmente eficaz no rastreamento, estadiamento e monitoramento de diversos tipos de câncer, como os de mama, próstata e cérebro. O exame baseia-se nos princípios da ressonância magnética nuclear, explorando o comportamento dos prótons de hidrogênio sob campos magnéticos intensos e pulsos de radiofrequência, o que proporciona elevado contraste entre diferentes tecidos moles e imagens multiplanares detalhadas.

Na oncologia, a RM tem desempenhado papel cada vez mais relevante. Em tumores cerebrais, é considerada o exame padrão-ouro para detecção e caracterização das lesões, permitindo avaliar localização, extensão, relação com estruturas adjacentes e presença de infiltrações ou metástases. Nos tumores de mama e próstata, a RM consolida-se como ferramenta de rastreamento e estadiamento, podendo identificar lesões não detectadas por outros métodos de imagem. Em neoplasias abdominais e pélvicas, a técnica auxilia na diferenciação entre tecidos normais e patológicos, contribuindo para diagnósticos mais precisos (WESTBROOK *et al.*, 2013).

Além da simples detecção de massas tumorais, a RM contribui para o estadiamento da doença, monitoramento da eficácia terapêutica e acompanhamento de pacientes em

remissão, prevenindo recidivas e identificando precocemente possíveis complicações. Diante da crescente relevância da oncologia e do avanço das tecnologias em imagem médica, torna-se essencial compreender tanto as potencialidades quanto as limitações da RM. Os princípios físicos da RM estão relacionados ao movimento giratório dos núcleos dos tecidos biológicos, originado pelos spins dos prótons e nêutrons. Esses spins giram em sentidos opostos, mas com a mesma velocidade, e o contraste das imagens surge da variação da intensidade do sinal, permitindo diferenciar regiões com maior ou menor concentração de determinados tecidos, como gordura, líquido cefalorraquidiano (LCR) e músculos (WESTBROOK *et al.*, 2013).

Durante o exame, pulsos de radiofrequência excitam o vetor de magnetização longitudinal, transferindo-o para o plano transversal. O sinal gerado é captado por antenas receptoras e depende da densidade de hidrogênio do tecido e dos tempos de relaxação longitudinal (T1) e transversal (T2) (MAZZOLA, 2009). O contraste das imagens é influenciado por fatores intrínsecos, próprios dos tecidos, e extrínsecos, controláveis durante o exame (LANDINI *et al.*, 2005). Para aprimorar esse contraste, utilizam-se agentes de contraste, como o gadolínio, que apresenta baixa taxa de reações adversas e melhora a visualização de estruturas anatômicas.

A tecnologia da RM combina ondas de rádio, campos magnéticos e sistemas computacionais para gerar imagens detalhadas em diferentes planos, sendo elas: axial, coronal e oblíquo. Em alguns casos, tecidos e vasos sanguíneos apresentam sinais semelhantes, dificultando a detecção de alterações (HAGE *et al.*, 2009).

Avanços recentes tornaram os equipamentos de RM mais rápidos, precisos e confortáveis, ampliando seu uso em diversas áreas médicas. Sua alta sensibilidade permite detectar alterações que poderiam passar despercebidas em outros exames, contribuindo para diagnósticos mais confiáveis e eficazes. Apesar de suas vantagens, a RM ainda enfrenta desafios, como o alto custo, disponibilidade limitada de aparelhos e dificuldades específicas, como a visualização em mamas densas. Entretanto, seu papel na detecção e acompanhamento do câncer continua a crescer (CHESTER F., 2024).

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como finalidade analisar as principais aplicações da ressonância magnética no diagnóstico por imagem do câncer, enfatizando sua relevância na detecção precoce, no estadiamento e no monitoramento da doença. Para isso, são considerados os

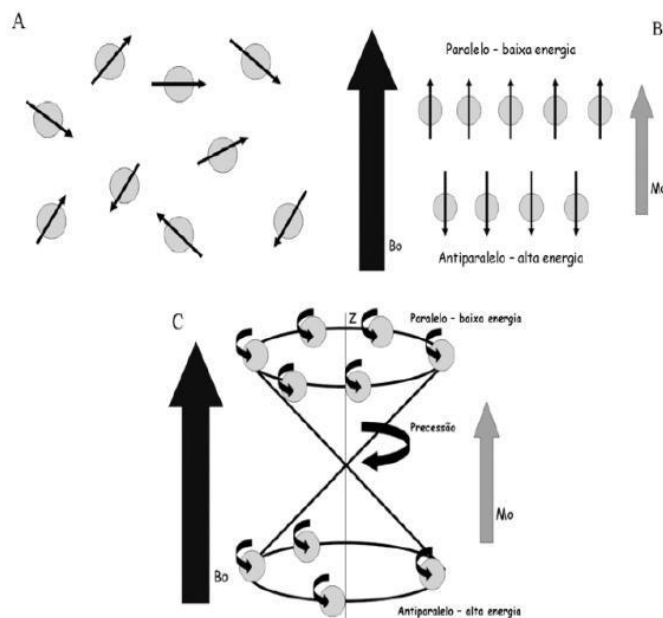
princípios físicos que fundamentam a técnica e a contribuição dos diferentes protocolos de imagem na caracterização tumoral, bem como as vantagens da ressonância magnética em relação a outras modalidades diagnósticas. Dessa forma, busca-se destacar sua capacidade de proporcionar maior precisão na avaliação clínica e de subsidiar a definição de estratégias terapêuticas mais eficazes.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Princípios da Ressonância Magnética

A ressonância magnética (RM) é uma técnica de imagem médica que emprega campos magnéticos intensos e pulsos de radiofrequência para produzir imagens detalhadas do corpo humano (MAZZOLA, 2009). Os sinais gerados pelos núcleos são captados por bobinas e processados por computadores especializados, resultando em imagens de alta resolução. A maior parte dos núcleos se alinha paralelamente ao campo magnético, enquanto uma fração menor se posiciona na direção oposta, ou seja, antiparalela (LANDINI et al., 2005).

Figura 1. Prótons de hidrogênio expostos a um campo magnético externo, se dividem em dois níveis de energia.

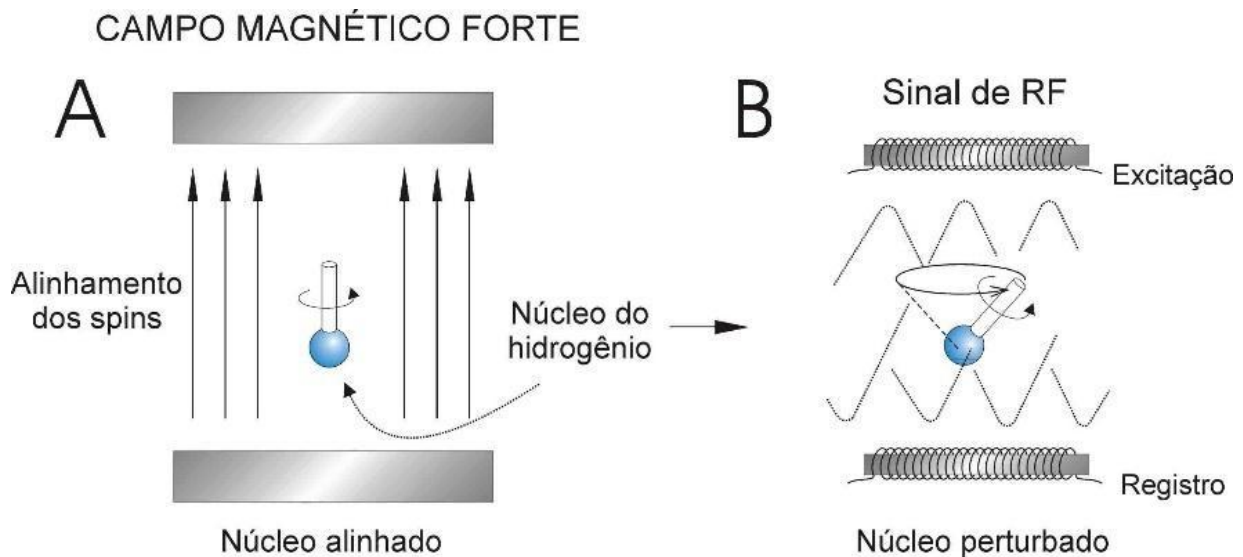


Fonte: Figura retirada integralmente de Iwasaki (HAGE; IWASAKI, 2009, p.3).

A obtenção das imagens ocorre por meio do alinhamento dos núcleos, provocado pela excitação dos prótons através de radiofrequência, combinado com a codificação espacial e os processos de reconstrução das imagens.

Quando um campo magnético externo é aplicado, ele interage com o "ímã" natural presente nos átomos, produzindo dois efeitos principais. O primeiro é o alinhamento dos átomos na direção do campo aplicado. Em condições normais, antes da aplicação desse campo, a orientação atômica é aleatória, uma vez que o campo magnético terrestre é insuficiente para organizá-los. No entanto, com a presença do campo externo B_0 uma força é exercida sobre os átomos, promovendo seu alinhamento ao campo magnético (WESTBROOK, 2013). Além disso, devido ao seu spin, o próton de hidrogênio apresenta um momento magnético, fazendo com que se comporte como um pequeno ímã.

Figura 2 - Fundamentos físicos da Ressonância Magnética



Fonte: Figura retirada integralmente de Gattass (GATTASS,2009. p.2).

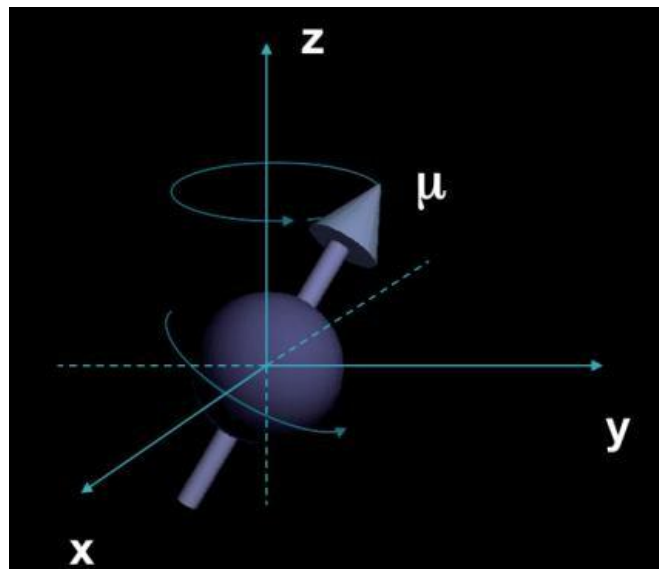
Após a inserir um paciente no campo magnético do equipamento, os núcleos se alinham e produzem um campo magnético resultante. Portanto, podemos interagir com esse campo resultante e medir o efeito da troca de energia com ele.

2.1.1 Precessão

Quando expostos ao campo magnético, os núcleos não se alinham completamente paralelos, mas sim com uma certa inclinação. Logo, isso resulta em um segundo movimento circular do eixo do núcleo em relação ao campo magnético principal, o qual é denominado de precessão (HAGE e IWASAKI, 2009).

É possível visualizar o próton como uma esfera pequena carregada positivamente, girando em torno de seu próprio eixo (spin) (MAZZOLA, 2009).

Figura 3 - Movimento de precessão



Fonte: Figura retirada integralmente de Mazzola (MAZZOLA, 2009, p.3).

O movimento dos núcleos em torno do campo magnético principal B_0 é denominado trajetória precessional, e a velocidade com que esse movimento ocorre recebe o nome de frequência de precessão (WESTBROOK, 2013). Esse fenômeno é fundamental para a compreensão da Ressonância Magnética, pois a precessão dos núcleos de hidrogênio é a base do sinal detectado durante o exame.

O hidrogênio, em particular, apresenta características únicas que o tornam o elemento mais adequado para a RM. Entre elas, destaca-se o fato de possuir um elevado momento magnético, conferindo-lhe grande sensibilidade à ação dos campos magnéticos externos. Além disso, trata-se do elemento mais abundante no corpo humano, já que os átomos de hidrogênio estão presentes nas moléculas de água, responsáveis por cerca de 70% a 75% da massa corporal (HAGE *et al.*, 2009). Essa abundância, aliada ao seu alto valor da constante giromagnética, explica por que o hidrogênio é o núcleo preferencialmente utilizado nos exames de RM.

Para compreender adequadamente a formação da imagem, é necessário considerar não apenas o alinhamento dos prótons ao campo magnético aplicado, mas também o movimento de precessão que esses núcleos apresentam quando submetidos a campos magnéticos intensos.

Esse movimento decorre do *spin* nuclear, que pode ser entendido como o resultado da soma vetorial dos spins de prótons e nêutrons que compõem o núcleo atômico.

Na RM, os núcleos de maior interesse são aqueles que apresentam números diferentes de prótons e nêutrons, pois essa desigualdade gera um spin total efetivo ou momento angular resultante. Tais núcleos são denominados núcleos ativos, justamente por possuírem propriedades magnéticas que os tornam detectáveis na RMN (MAZZOLA, 2009).

Como esses núcleos ativos possuem carga positiva e estão em movimento, devido ao *spin*, eles produzem um pequeno campo magnético por indução, em conformidade com a Lei de Faraday da Indução Eletromagnética. (WESTBROOK, 2013). Assim, cada núcleo ativo adquire um momento magnético próprio, que é essencial para sua interação com o campo magnético externo e, conseqüentemente, para a geração do sinal que será captado e processado na formação das imagens de ressonância magnética.

2.1.2 Equação de Larmor

A precessão nuclear ocorre em uma frequência específica denominada frequência de Larmor, a qual é determinada pela constante giromagnética do núcleo analisado e pela intensidade do campo magnético externo aplicado (WESTBROOK, 2013).

Essa relação é expressa matematicamente pela equação de Larmor, onde ω_0 é a frequência de precessão, γ é a constante giromagnética própria do núcleo e B_0 a potência do campo magnético.

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (\text{equação 1})$$

Dessa forma, observa-se que a frequência de precessão é diretamente proporcional ao campo magnético aplicado. Como consequência, diferentes núcleos ativos apresentam frequências precessionais distintas, já que cada um possui um valor próprio de γ . O hidrogênio, por exemplo, apresenta frequência precessional de aproximadamente 63,86 megahertz (MHz) em um campo magnético de 1,5 teslas (T) e de 42,57 MHz em um campo de 1,0 T. Núcleos como flúor e carbono, também detectáveis na RM, precessionam em frequências diferentes em virtude de suas constantes giromagnéticas específicas.

Portanto, como a frequência de Larmor é proporcional à razão giromagnética, qualquer aumento nessa constante resulta em um acréscimo da frequência, enquanto uma diminuição implica redução proporcional (WESTBROOK *et al.*, 2011).

2.1.3 Sinal

Na RM, não é apenas um próton isolado que participa do processo, mas sim uma grande quantidade deles. Cada próton contribui com seu dipolo magnético, originando um vetor resultante denominado M , que representa o comportamento coletivo dos prótons em determinada região. Esse vetor é essencial para a formação da imagem, pois, ao absorver a energia emitida pela bobina de RF, gera o sinal que será processado para compor a imagem.

Quando núcleos como o do hidrogênio são submetidos a um campo magnético estático, uniforme e intenso, passam a se comportar como pequenos ímãs, alinhando-se na direção desse campo. A aplicação de um pulso de radiofrequência (RF) desvia momentaneamente esse alinhamento, fornecendo energia aos núcleos e induzindo um movimento denominado precessão. Após a interrupção do pulso, os prótons retornam ao estado de equilíbrio e, nesse processo, liberam energia em forma de ondas de rádio (GATTASS, 2009). Cada núcleo apresenta uma frequência característica de emissão, que varia conforme o tipo de átomo e seu ambiente químico, permitindo identificar diferentes tecidos (MAZZOLA, 2020).

Esse fenômeno é denominado ressonância magnética nuclear, e a taxa com que os prótons retornam ao equilíbrio é conhecida como relaxação, descrita pelas constantes de tempo T_1 e T_2 .

2.1.4 Relaxação

O processo de relaxação é responsável pela geração do Sinal de Indução Livre (SIL). Quando o pulso de RF é desligado, os prótons perdem gradualmente a energia adquirida e retornam ao estado de menor energia. Nesse período, o sinal de ressonância emitido decai progressivamente (MAZZOLA, 2009).

Dois mecanismos principais descrevem esse retorno:

- T_1 (relaxação *spin-lattice* ou longitudinal): tempo necessário para que a magnetização volte ao eixo longitudinal, influenciado pela interação dos spins com o ambiente. Esse valor varia entre tecidos, contribuindo para a diferenciação e contraste nas imagens.
- T_2 (relaxação *spin-spin* ou transversal): corresponde à perda de coerência dos spins no plano transversal devido às interações entre eles, resultando em redução do sinal de RM.

A variação desses tempos entre diferentes tecidos é a base da formação de contraste nas imagens de ressonância magnética (HAGE *et al.*, 2009).

2.1.5 T1

A densidade de prótons é um fator determinante no brilho da imagem, sendo que tecidos ricos em prótons tendem a gerar sinais mais intensos e aparecer mais claros, enquanto regiões pobres em prótons aparecem mais escuras (WESTBROOK *et al.*, 2013).

O tempo T1 é definido como o período necessário para que a magnetização longitudinal recupere cerca de 63% do seu valor inicial após um pulso de 90° (MAZZOLA, 2009). Esse tempo varia conforme o tecido e pode ser explorado para realçar diferentes estruturas:

- Tecidos gordurosos → sinal elevado.
- Substâncias paramagnéticas (ex.: gadolínio) → sinal elevado.
- Regiões ricas em água (edemas, tumores, hemorragias) → sinal reduzido.

O controle do tempo de repetição (TR) é fundamental para ajustar o contraste:

- TR curto: destaca diferenças de T1, gerando imagens com forte contraste T1.
- TR longo: minimiza o efeito de T1, permitindo explorar outros parâmetros, como T2.

2.1.6 T2

O tempo T2 corresponde ao período em que cerca de 63% dos prótons perdem a sincronia no plano transversal após a interrupção do pulso de RF. Diferente do T1, ele descreve a interação entre os próprios spins (MAZZOLA, 2009).

Durante o decaimento transversal, a magnetização diminui de forma exponencial, sendo diretamente influenciada pelo tempo de eco (TE):

- TE curto: registra o sinal antes de uma relaxação significativa, resultando em sinal mais intenso.
- TE longo: permite maior relaxação, reduzindo a intensidade do sinal.

As imagens ponderadas em T2 apresentam características clínicas opostas às de T1:

- Tecidos ricos em água (edemas, inflamações, tumores, infartos) → sinal elevado.
- Tecidos gordurosos → sinal reduzido.
- Substâncias paramagnéticas (contraste) → sinal reduzido.

Os tempos de relaxamento $T1$ e $T2$ variam de acordo com as propriedades dos tecidos e a intensidade do campo magnético utilizado na ressonância magnética. Quando o meio consiste em um líquido puro, como a água, a transferência de energia torna-se mais difícil devido à alta velocidade de movimento das pequenas moléculas de água. Nesse cenário, os prótons necessitam de um período maior para transferir sua energia ao ambiente e retornar ao estado de equilíbrio. Como resultado, a magnetização longitudinal leva mais tempo para se recuperar ao valor inicial, indicando que líquidos puros e a água apresentam tempos de relaxação longitudinal $T1$ prolongados. (MAZZOLA, 2020). O tempo de relaxação $T1$ será mais curto em tecidos corporais compostos por líquidos contendo moléculas de diferentes tamanhos.

Nesses ambientes, a transferência de energia térmica ocorre de forma mais eficiente, pois as moléculas se movem com frequências magnéticas próximas à dos prótons excitados. Essa proximidade de frequências cria uma condição ressonante essencial para facilitar a transferência de energia. Em líquidos compostos por grandes moléculas, ocorre uma variação significativa na intensidade dos campos magnéticos locais (WESTBROOK, 2013). Devido à movimentação mais lenta dessas moléculas, seus campos magnéticos não se cancelam de maneira tão eficiente. Isso resulta em uma maior variação nos campos magnéticos locais, o que, por sua vez, causa diferenças mais acentuadas nas frequências de precessão. Consequentemente, mais prótons perdem a coerência de fase, reduzindo o tempo de relaxação transversal ($T2$) (MAZZOLA, 2020). A frequência de Larmor do hidrogênio na água é maior do que na gordura. O hidrogênio na gordura recupera-se mais rapidamente ao longo do eixo longitudinal em comparação com o da água e também perde a magnetização transversal de forma mais acelerada. Essas diferenças geram contrastes distintos entre água e gordura nas imagens de ressonância magnética. A gordura e a água representam os dois extremos de contraste nessa técnica. Um pulso de radiofrequência é emitido com uma frequência exata correspondente à precessão dos prótons de hidrogênio presentes nos tecidos. Isso resulta na excitação de todos os prótons de hidrogênio no volume em questão. Os prótons de hidrogênio absorvem energia do pulso de radiofrequência e emitem um sinal de volta para a bobina receptora. Esse sinal contém informações de todo o tecido, mas não permite distinguir de qual parte do corpo ele vem. (CAMPOS et al., 2017).

Para a formação de uma imagem bidimensional em ressonância magnética, seleciona-se

inicialmente um plano de corte no corpo. Dentro desse plano, estabelece-se uma matriz composta por linhas e colunas, em que cada elemento (pixel) corresponde a um ponto onde a intensidade do sinal é medida. Esses valores de intensidade são então processados para compor a imagem final, que pode ser exibida em tons de cinza ou em cores, conforme a escala adotada. (WESTBROOK et al., 2013)

A aplicação dos gradientes de campo magnético introduz uma variação linear da intensidade do campo em uma direção específica. Essa variação possibilita a codificação das informações espaciais, permitindo distinguir com maior precisão as diferentes regiões anatômicas representadas na imagem. (IYAD et al., 2023)

A localização espacial do sinal em ressonância magnética (RM) é obtida pela aplicação de gradientes de campo magnético superpostos ao campo magnético principal, que permanece constante. Esses gradientes fazem com que os sinais adquiram frequências distintas ao longo de sua direção, possibilitando sua reconstrução por meio da transformada de *Fourier* (FT).

Os gradientes são gerados pela passagem de corrente em bobinas específicas (bobinas de gradiente), modificando a intensidade do campo magnético de maneira previsível e linear. No isocentro, o campo mantém-se inalterado, enquanto, à medida que se afasta desse ponto, sua intensidade pode aumentar ou diminuir. A intensidade máxima do gradiente depende da corrente aplicada, definindo a resolução espacial alcançável. Já a polaridade é determinada pela direção da corrente, enquanto a taxa de variação do gradiente — tempo de subida e desligamento — influencia diretamente a velocidade de aquisição das imagens (Drew Z *et al.*, 2018).

A introdução dos gradientes modifica tanto a frequência de precessão quanto a fase dos momentos magnéticos de forma linear. Assim, *spins* que precessionam mais rapidamente adquirem fases adicionais em relação aos mais lentos.

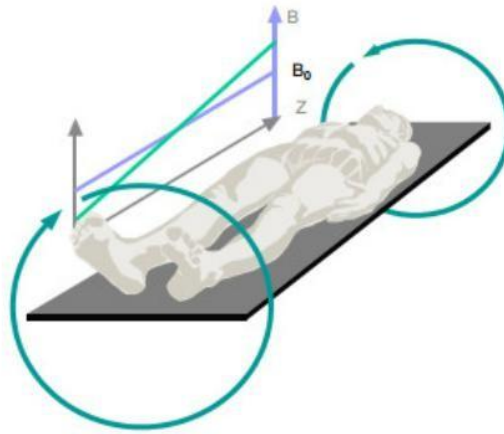
Essa propriedade é explorada para a codificação espacial do sinal em três dimensões, utilizando três conjuntos ortogonais de gradientes dispostos nos eixos **x**, **y** e **z**, com o isocentro como referência. Para isso, cada gradiente desempenha uma função específica:

- Seleção de fatia: define o plano de aquisição da imagem;
- Codificação de frequência: localiza o sinal ao longo do eixo maior da imagem;
- Codificação de fase: discrimina o sinal ao longo do eixo menor da imagem.

O gradiente aplicado ao longo do eixo **z** promove variações na intensidade do campo magnético na direção longitudinal do magneto. De forma análoga, os gradientes aplicados

nos eixos **y** e **x** modulam a intensidade do campo nas direções vertical e horizontal, respectivamente, permitindo um controle preciso do campo magnético em cada plano espacial.

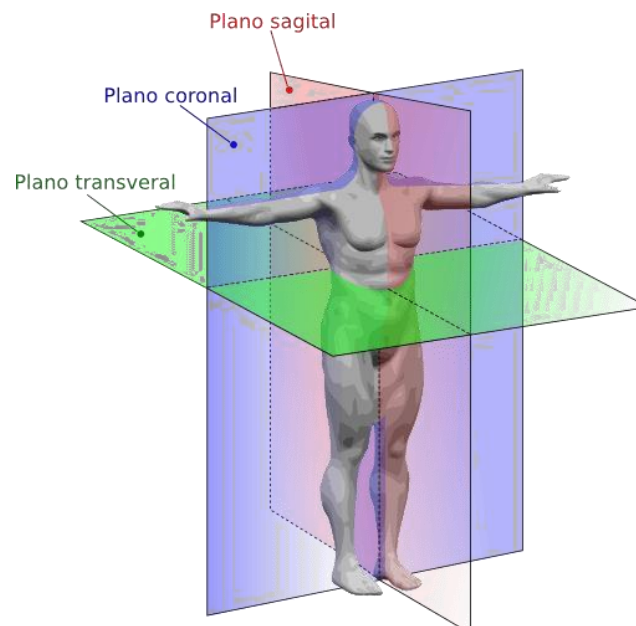
Figura 4 - Gradiente de campo magnético



Fonte: Figura retirada integralmente de Campos (CAMPOS, p.3 2017)

Cada uma dessas etapas é realizada por meio da aplicação de gradientes em eixos específicos. Durante a seleção de corte, aplica-se um gradiente no eixo z , de modo que diferentes posições ao longo do corpo apresentem frequências de precessão distintas. Com o gradiente ativo, emite-se um pulso de radiofrequência sintonizado com a frequência da região de interesse, permitindo a excitação seletiva de um corte específico, como, por exemplo, planos axiais.

Figura 5 – Planos anatômicos



Fonte: CEEN. *Plano Transverso I*. 2023.

Posteriormente, os gradientes utilizados para codificação de fase e de frequência são aplicados nos eixos remanescentes, possibilitando a determinação precisa da localização espacial do sinal dentro do plano selecionado. A integração dessas três etapas assegura a adequada organização das informações adquiridas, resultando em imagens de elevada resolução e precisão diagnóstica (CAMPOS, 2017).

2.2 APLICAÇÕES DA RM NO DIAGNÓSTICO DE CâNCER

A utilização da ressonância magnética (RM) no diagnóstico oncológico tem se expandido de forma significativa nas últimas décadas, especialmente devido à sua capacidade de fornecer imagens detalhadas, com alto contraste entre tecidos e sem o uso de radiação ionizante. Essa característica a torna uma ferramenta segura e eficaz na detecção, caracterização e acompanhamento de diferentes tipos de tumores.

O câncer se desenvolve quando as células de um tecido ou órgão passam a crescer de forma anormal. Em vez de serem destruídas, essas células continuam se multiplicando de maneira descontrolada, originando novas células defeituosas que podem invadir tecidos vizinhos (BRENNAN, 2014). Grande parte dos danos no DNA responsáveis por esse processo está relacionada a erros na divisão celular ou à exposição a fatores externos prejudiciais, como tabagismo, alimentação inadequada ou excesso de radiação solar. Além disso, as características individuais de cada pessoa, como predisposição genética e condições gerais de saúde, também influenciam na instalação e progressão da doença. Essas células anormais, ao se proliferarem, formam tumores malignos, cuja identificação precoce é essencial para aumentar as chances de tratamento eficaz e de cura.

O combate ao câncer é mais efetivo quando se utilizam métodos de detecção seguros e precisos, entre os quais se destacam os exames de imagem. Entretanto, eles compõem apenas uma etapa do processo diagnóstico, que inclui também a análise do histórico de saúde pessoal e familiar do paciente, exames laboratoriais, avaliações físicas e outros procedimentos complementares.

Os exames de imagem, em especial a ressonância magnética (RM), apresentam papel fundamental não apenas no diagnóstico inicial, mas também no acompanhamento do tratamento e no monitoramento de possíveis recorrências da doença. A RM fornece imagens detalhadas dos órgãos internos, permitindo a visualização em diferentes ângulos e a análise de estruturas de partes moles, que dificilmente seriam avaliadas com outros

métodos. Além disso, esse exame pode auxiliar na diferenciação entre tumores benignos e malignos, bem como na detecção de metástases, contribuindo significativamente para o planejamento terapêutico.

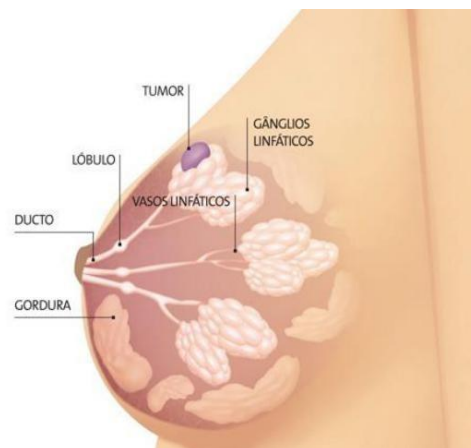
- Câncer de Mama

A RM tem grande relevância no diagnóstico do câncer de mama, principalmente em pacientes de alto risco genético ou em casos de mamas densas, nos quais a mamografia pode apresentar limitações. A técnica possibilita a detecção de lesões não visualizadas em outros exames e é especialmente útil no rastreamento precoce, na avaliação da extensão tumoral e no planejamento cirúrgico. Além disso, a RM contribui para o monitoramento da resposta à quimioterapia neoadjuvante, auxiliando na avaliação da eficácia do tratamento (DE DEUS LEOPOLDINO, 2005).

Nas últimas décadas, a ressonância magnética (RM) das mamas passou por avanços significativos, como o uso sistemático de meios de contraste e o desenvolvimento de bobinas de superfície mais eficientes. Apesar desses progressos, a técnica ainda está em evolução, com protocolos, critérios de interpretação e indicações clínicas em constante aprimoramento (DE DEUS LEOPOLDINO et al., 2005).

Anatomicamente, as mamas adultas geralmente são pares e simétricas, localizadas sobre os músculos peitorais e serrátil anterior, entre a terceira e a sétima costela. Cada mama possui de 15 a 20 lóbulos mamários, separados por tecido fibroso, e formados por ácinos responsáveis pela produção do leite. O preenchimento é feito por tecido adiposo, cuja proporção varia conforme idade, estado nutricional e características físicas (ALVARES, 2003).

Figura 6 – Anatomia da mama com tumor



Fonte: retirada integralmente de ROCHA LIMA, 2019.

A carcinogênese mamária ocorre quando células anormais passam a se multiplicar de forma acelerada, podendo invadir tecidos e órgãos adjacentes e formar tumores (ALVARES, 2003). O diagnóstico definitivo é obtido por biópsia da área suspeita, analisada por um patologista. Esse procedimento, porém, só é realizado diante de achados clínicos ou de imagem sugestivos, identificados em exames como mamografia, ultrassonografia ou RM (FIALHO, 2008).

A RM é indicada quando métodos convencionais não são conclusivos ou quando há suspeita de lesões invasivas. Ressalta-se, contudo, que ela não substitui a mamografia ou a ultrassonografia em avaliações iniciais de rotina, devendo ser utilizada como exame complementar (YAU et al., 2011).

Características da RM de Mama

A RM fornece informações morfológicas e funcionais, o que pode influenciar no planejamento terapêutico. Porém, qualquer conduta clínica deve ser baseada na combinação dos resultados da RM com biópsia e outros exames complementares (CONSTANCE et al., 2013). A RM é mais sensível que a avaliação clínica, a mamografia e a ultrassonografia na detecção do tamanho tumoral, multifocalidade e multicentricidade (Boetes *et al.*, 1995; Shah *et al.*, 2005). Sua sensibilidade pode chegar a 99%, com boa correlação entre o tamanho tumoral medido por RM e o encontrado em exame anatomopatológico (Julius *et al.*, 2005). No entanto, sua especificidade é mais baixa (37–83%), o que pode gerar achados falso-positivos, exigindo exames adicionais.

Além da oncologia, a RM é considerada o método de escolha para avaliar a integridade de próteses mamárias, sendo capaz de identificar tanto rupturas intracapsulares quanto extracapsulares. (BARRA, 2012; SCARANELO *et al.*, 2014). Com aparelhos de 1,5 T ou 3,0 T e protocolos específicos, como sequências T2 axiais e sagitais com supressão de água, é possível diferenciar rupturas precoces de dobras normais do implante (SEILER *et al.*, 2017).

Por fim, embora a RM seja padrão-ouro para integridade de implantes e tenha alta sensibilidade para o câncer de mama, apresenta limitações, como custo elevado, baixa padronização dos protocolos, risco de superestimativa tumoral e a necessidade de exames complementares. Ainda assim, trata-se de um dos métodos mais avançados e promissores para diagnóstico e acompanhamento do câncer de mama (BRENNAN, 2014).

A ressonância magnética (RM) desempenha papel fundamental no manejo do câncer de

mama, especialmente na fase pré-operatória. Nessa etapa, o exame permite avaliar de forma detalhada o tamanho tumoral e sua relação com as estruturas anatômicas vizinhas, fornecendo informações relevantes para que o mastologista realize a ressecção com margens microscopicamente negativas. Além disso, quando a preservação parcial da mama é considerada, a RM auxilia no planejamento cirúrgico ao delimitar a real extensão da lesão e identificar a presença de focos adicionais, sejam eles multifocais ou multicêntricos. (DE DEUS LEOPOLDINO, 2005).

Nos casos de carcinoma oculto primário da mama, a técnica apresenta elevada sensibilidade, possibilitando a detecção do tumor e favorecendo a realização de cirurgias conservadoras em detrimento da mastectomia. Evidências científicas ainda reforçam que a RM é o método de imagem mais sensível para rastrear precocemente o câncer de mama em mulheres com alto risco, sobretudo quando a mamografia apresenta limitações devido à elevada densidade mamária.

Apesar de suas vantagens, a interpretação dos achados deve ser feita com cautela, uma vez que diagnósticos falso-positivos podem ocorrer pela impregnação do contraste em tecidos mamários benignos. Isso pode impactar diretamente a conduta terapêutica, levando a alterações desnecessárias na estratégia cirúrgica. (CONSTANCE *et al.*, 2013). Da mesma forma, resultados falso-negativos são possíveis em casos específicos, como no carcinoma *ductal in situ* ou em carcinomas lobular, tubular e mucinoso.

A RM também é indicada no acompanhamento pós-operatório imediato e após biópsias excisionais, auxiliando na avaliação da presença, localização e extensão de tumor residual. Contudo, alterações cicatriciais no parênquima e a impregnação do contraste em tecidos de granulação ou em áreas de mama normal podem gerar achados falso-positivos ou mascarar lesões, representando limitações diagnósticas importantes.

- Câncer de Próstata

A RM multiparamétrica (RMmp) tornou-se o principal método de imagem na avaliação da próstata, permitindo a diferenciação entre tumores clínicos significativos e insignificantes, reduzindo a necessidade de biópsias desnecessárias. Essa modalidade combina imagens anatômicas de alta resolução com técnicas funcionais, como difusão, perfusão e espectroscopia, proporcionando uma análise abrangente da agressividade tumoral e auxiliando no estadiamento e no planejamento terapêutico (GUERRA, 2017).

- Câncer do Sistema Nervoso Central (SNC)

Na avaliação de tumores cerebrais, a RM é considerada o método de escolha, uma vez

que oferece imagens com alto nível de detalhamento anatômico e funcional. Além de identificar a localização e extensão das lesões, a RM possibilita a análise de parâmetros fisiológicos, como fluxo sanguíneo e metabolismo celular, através de técnicas como a RM funcional (fMRI) e a espectroscopia por RM. Essas informações são fundamentais para a diferenciação entre tumores malignos e benignos, bem como para o planejamento cirúrgico e acompanhamento pós-terapêutico (MAZZOLA, 2009).

- Câncer de Fígado e Reto

A RM também é amplamente aplicada no diagnóstico e estadiamento de tumores hepáticos e retais. No fígado, destaca-se pela elevada sensibilidade na detecção de metástases, sendo frequentemente empregada em conjunto com agentes de contraste específicos. No câncer de reto, a RM é considerada padrão ouro no estadiamento locorregional, fornecendo informações precisas sobre a profundidade de invasão tumoral e a relação com estruturas adjacentes, o que orienta a escolha do tratamento cirúrgico e/ou quimioterápico (ELSTER, 2018).

2.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS DA RM NO DIAGNÓSTICO DO CÂNCER

Nas últimas décadas, a RM evoluiu de uma técnica essencialmente anatômica para uma ferramenta multiparamétrica e funcional, capaz de fornecer informações não apenas estruturais, mas também fisiológicas e metabólicas dos tecidos. Essa evolução tecnológica ampliou consideravelmente seu papel no diagnóstico do câncer, tornando-a um dos métodos mais completos e versáteis na prática clínica. (BRENNAN, 2014).

- Ressonância Magnética Funcional (fMRI)

A RM funcional mede alterações no fluxo sanguíneo cerebral relacionadas à atividade neuronal. Embora mais conhecida em estudos neurocientíficos, essa técnica também tem aplicações clínicas em oncologia, especialmente em tumores cerebrais, permitindo identificar áreas eloquentes do córtex cerebral antes de procedimentos cirúrgicos. Isso auxilia no planejamento cirúrgico, minimizando riscos de sequelas neurológicas. (GUERRA, 2017)

- Difusão por RM (*DWI – Diffusion-Weighted Imaging*)

A técnica de difusão é fundamental na caracterização tumoral, pois avalia o movimento das moléculas de água nos tecidos. Regiões com alta celularidade, como em muitos tumores malignos, apresentam restrição de difusão, o que possibilita a detecção precoce de lesões e a diferenciação entre tecido tumoral e áreas de necrose. Além disso, a DWI é amplamente utilizada no monitoramento da resposta terapêutica, uma vez que alterações no coeficiente de difusão aparente (ADC) podem indicar morte celular antes mesmo de mudanças morfológicas. (BRENNAN, 2014).

- Perfunção por RM (*PWI – Perfusion-Weighted Imaging*)

A perfusão por RM avalia parâmetros hemodinâmicos, como volume sanguíneo tumoral e permeabilidade vascular. Essa informação é relevante na oncologia porque tumores malignos geralmente apresentam angiogênese aumentada, o que se reflete em padrões de perfusão característicos. A técnica é especialmente útil em tumores cerebrais e hepáticos, auxiliando no estadiamento e na avaliação da agressividade tumoral. (BRENNAN, 2014).

- Espectroscopia por RM (*MRS – Magnetic Resonance Spectroscopy*)

A espectroscopia permite analisar o perfil metabólico dos tecidos, identificando a presença e concentração de metabólitos específicos, como colina, creatina e N-acetilaspártato. Essa informação é valiosa na diferenciação entre tumores benignos e malignos, bem como na distinção entre recidiva tumoral e alterações pós-tratamento (como radionecrose). (CONSTANCE et al., 2013).

- Integração com Inteligência Artificial (IA) e Radiômica

Recentemente, a combinação da RM com ferramentas de inteligência artificial tem ampliado as perspectivas diagnósticas. A radiômica, por exemplo, consiste na extração de muitas características quantitativas das imagens, que podem ser correlacionadas com dados clínicos e genômicos. Essa abordagem permite criar modelos preditivos para diagnóstico precoce, prognóstico e até mesmo para a personalização do tratamento oncológico.

Esse cenário tem se transformado com o surgimento de novas tecnologias que ampliam a confiabilidade diagnóstica. Entre elas, destaca-se a Radiômica (*Radiomics*), uma técnica baseada em Inteligência Artificial que permite a extração e análise de características quantitativas e qualitativas de imagens médicas, como tomografia computadorizada,

ressonância magnética e *PET-CT*. Por meio dessa abordagem, é possível obter dados de alta dimensão que favorecem diagnósticos mais precisos, melhor estadiamento da doença e distinção entre alterações pós-cirúrgicas e possíveis recidivas tumorais.

Nesse contexto, a radiologia e os métodos de imagem assumem papel central no seguimento oncológico, integrando-se a uma abordagem multidisciplinar. O acompanhamento regular dos pacientes submetidos a tratamento contra o câncer possibilita a detecção precoce de sinais de recorrência ou metástases, o que aumenta significativamente as chances de sucesso terapêutico.

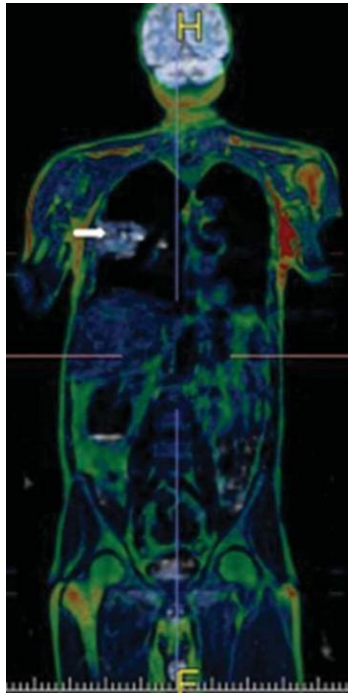
2.3.1 PET/RM

O uso consolidado do *PET/CT* na oncologia, aliado ao desenvolvimento de técnicas avançadas de Ressonância Magnética por Imagem, impulsionou, nas últimas duas décadas, a criação tanto de sistemas híbridos de *PET/RM* quanto de softwares de fusão das imagens obtidas por essas modalidades. (BRENNAN, 2014).

Inicialmente, alguns obstáculos dificultavam a integração dessas duas tecnologias em um único equipamento. Entre eles estavam a incompatibilidade dos fotomultiplicadores do PET em ambientes com campo magnético intenso e a presença de materiais metálicos nas bobinas de superfície da RM, que geravam interferências nos raios gama e atenuações indesejadas, comprometendo a qualidade do exame. Com os avanços tecnológicos, essas limitações foram gradualmente superadas, permitindo que, a partir de 2012, os primeiros equipamentos clínicos de PET/RM fossem disponibilizados. (IONESCU, et al., 2017)

Atualmente, as aplicações clínicas do PET/RM permanecem em constante evolução, com pesquisas apontando resultados promissores no acompanhamento de pacientes oncológicos. Evidências recentes indicam que essa modalidade pode oferecer vantagens adicionais, já que o PET/CT apresenta maior precisão na detecção de metástases ósseas e linfonodais, enquanto a RM demonstra maior sensibilidade para metástases cerebrais e hepáticas. Dessa forma, a possibilidade de avaliar todo o corpo em um único exame, de forma abrangente e detalhada, confere ao PET/RM um grande potencial na prática clínica.

Figura 7 - Exame de PET/RM



Fonte: retirada integralmente de (IONESCU, *et al.*, 2017)

2.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA RM

A ressonância magnética (RM) consolidou-se como um dos principais métodos de diagnóstico por imagem na oncologia. Seu uso é amplamente difundido devido à alta qualidade das imagens geradas e à capacidade de fornecer informações tanto anatômicas quanto funcionais. Entretanto, como qualquer técnica, apresenta também algumas restrições que devem ser consideradas no contexto clínico.

Vantagens da RM no Diagnóstico Oncológico

Alta resolução espacial e de contraste

- A RM permite a diferenciação precisa entre tecidos normais e patológicos, mesmo em estruturas anatômicas complexas. Isso é fundamental na detecção precoce e no estadiamento do câncer.

Multiplanaridade

- Diferente de outras técnicas, a RM possibilita a aquisição de imagens em qualquer plano (axial, sagital, coronal ou oblíquo) sem necessidade de reposicionar o paciente, o que facilita a avaliação detalhada de lesões.

Ausência de radiação ionizante

- Ao contrário da tomografia computadorizada (TC) e dos exames de medicina nuclear, a RM não utiliza radiação ionizante, reduzindo riscos

de exposição cumulativa, especialmente em pacientes que necessitam de exames seriados.

Avaliação funcional e metabólica

- Técnicas avançadas, como difusão, perfusão e espectroscopia, oferecem informações fisiológicas e metabólicas além da morfologia, contribuindo para diagnósticos mais precisos e personalizados.

Aplicação em diversos tipos de câncer

- A RM é amplamente utilizada no rastreamento e acompanhamento de tumores em órgãos como mama, próstata, fígado e sistema nervoso central, sendo muitas vezes considerada exame de escolha.

Limitações da RM no Diagnóstico Oncológico

Alto custo e menor disponibilidade

- Equipamentos de RM são caros e exigem manutenção constante, o que restringe o acesso em muitos centros de saúde, principalmente em regiões menos desenvolvidas.

Tempo de exame prolongado

- A aquisição das imagens pode ser demorada, o que aumenta a possibilidade de artefatos relacionados ao movimento do paciente, especialmente em crianças, idosos ou pacientes em estado crítico.

Contraindicações absolutas e relativas

- Pacientes com dispositivos eletrônicos implantáveis (como marca-passos antigos) ou com fragmentos metálicos no corpo podem não ser elegíveis para o exame, limitando sua aplicabilidade.

Uso de agentes de contraste

- Embora não envolva radiação, a utilização de gadolínio pode causar reações adversas em alguns pacientes e, em casos de disfunção renal, há risco de fibrose sistêmica nefrogênica.

Sensibilidade variável conforme o tipo tumoral

- Em alguns casos, especialmente em tumores muito pequenos ou de baixa celularidade, a RM pode apresentar limitações diagnósticas, exigindo associação com outros métodos de imagem, como a PET/CT.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica de caráter narrativo, com o intuito de reunir e interpretar as principais evidências científicas sobre a utilização da ressonância magnética no diagnóstico por imagem do câncer.

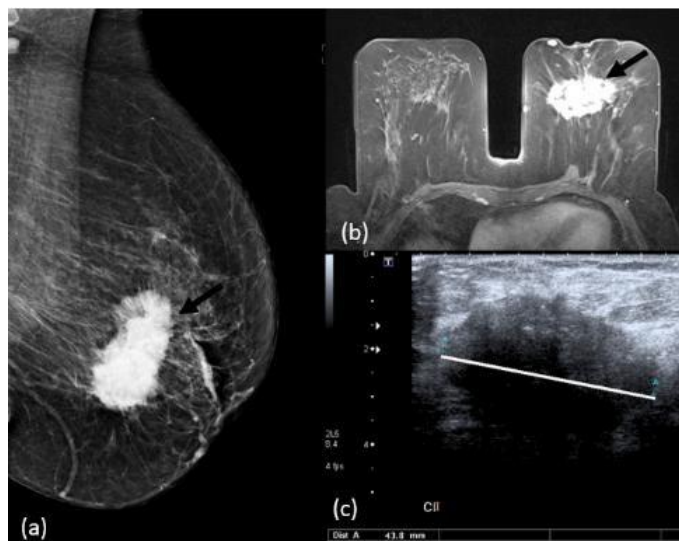
A busca de referências ocorreu em bases de dados amplamente conhecidas, como *PubMed*, *SciELO*, *LILACS*, *Web of Science*, *Scopus* e Google Acadêmico. Além disso, a obra "*The Essential Physics of Medical Imaging*" (4th Edition) juntamente com "Manual de técnicas de ressonância magnética", Westbrook, C. Fornecendo embasamento teórico sólido para os conceitos explorado. Foram considerados para análise artigos, dissertações e livros publicados entre 2000 e 2024, priorizando produções que abordassem de forma direta a aplicação da ressonância magnética no rastreamento, estadiamento, detecção precoce e acompanhamento da evolução tumoral. Como critérios de inclusão, selecionaram-se publicações em português ou inglês, disponíveis na íntegra e que apresentassem aplicações práticas ou avanços tecnológicos no contexto oncológico. Após a etapa de seleção, o material foi organizado e submetido a uma análise crítica, com o objetivo de destacar os principais benefícios, limitações e perspectivas futuras do emprego da ressonância magnética no diagnóstico do câncer.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

As estruturas anatômicas possuem a mesma composição independente da técnica, porém, cada tecido pode ser demonstrado de maneira diferente dependendo do método escolhido. Numa análise qualitativa das imagens de mamografia e ressonância magnética, o carcinoma mamário apresenta uma região mais densa devido ao crescimento anormal do tecido, resultando numa maior atenuação da radiação no tecido.

Nas imagens por RM de mamas, numa sequência T1 dinâmica, o câncer também aparece hiperintenso por causa da sua alta vascularização e, conseqüentemente, com impregnação de contraste no tumor.

Figura 8- Câncer de mama sendo visto em diferentes métodos de aquisição de imagem nas imagens (a) e (b), mamografia e RM, respectivamente, a seta representa o carcinoma. Já na imagem (c), referente à ecografia, a reta branca indica o diâmetro da lesão.



Fonte: retirada integralmente de (MAULAZ, et al., 2018)

O câncer de mama é o tipo de câncer que mais afeta as mulheres em todo o mundo (MAULAZ, *et al.*, 2018). Estimativas apontam números elevados de incidência global, o que reforça a importância do rastreamento como principal estratégia para reduzir a mortalidade associada à doença. Esse rastreamento envolve tanto exames preventivos, principalmente a mamografia, quanto campanhas de conscientização que favorecem a detecção precoce (FERREIRA *et al.*, 2020; COSTA *et al.*, 2019). No entanto, estudos demonstram que fatores sociais, demográficos e comportamentais ainda influenciam significativamente o acesso ao rastreamento, destacando-se desigualdades relacionadas à cor da pele, escolaridade, condição conjugal e cobertura por planos de saúde, o que impacta negativamente a realização do exame preventivo e contribui para diagnósticos tardios (COSTA *et al.*, 2019).

Nesse cenário, a RM das mamas tem se consolidado como método complementar de rastreamento e diagnóstico. Diretrizes internacionais recomendam seu uso anual associado à mamografia em mulheres de alto risco, uma vez que a RM apresenta sensibilidade próxima de 90%, enquanto a mamografia varia entre 25% e 59% (MAULAZ, *et al.*, 2018). Além disso, a RM é especialmente útil em casos de metástases axilares sem lesão primária evidente nos exames convencionais, possibilitando a detecção inicial de tumores ocultos (Ferreira *et al.*, 2021). Estudos prospectivos confirmam sua capacidade de identificar adenocarcinomas clinicamente relevantes, reduzindo o risco de sobrediagnóstico e possibilitando a detecção precoce de neoplasias com maior potencial metastático (VITOR *et al.*, 2017).

As principais indicações da RM da mama incluem estadiamento pré-operatório, avaliação de resposta terapêutica, seguimento pós-cirúrgico, rastreamento de pacientes de alto risco e esclarecimento de resultados inconclusivos em mamografia e ultrassonografia (IYAD, 2018). Evidências apontam que o uso da RM pode contribuir para maiores taxas de ressecção completa e melhor planejamento cirúrgico, ainda que estudos prospectivos sejam necessários para consolidar esses achados (MARQUES et al., 2021).

O futuro do diagnóstico do câncer de mama tende a se orientar para programas de rastreamento personalizados, considerando aspectos clínicos e genéticos individuais, além de desafios éticos e legais relacionados ao uso de dados pessoais e testes genéticos. (IYAD, 2018). Outras tecnologias emergentes, como a mamografia com contraste (CEM), têm sido propostas como alternativa em casos de contraindicação ou indisponibilidade da RM, permitindo avaliação detalhada da neoangiogênese tumoral (Luczynska et al., 2022). Paralelamente, a aplicação da inteligência artificial (IA) em sistemas de diagnóstico tem demonstrado desempenho superior ao dos sistemas tradicionais de auxílio por computador (CAD), reduzindo falsos positivos e aumentando a acurácia na detecção de lesões malignas (Díaz et al., 2021).

Do ponto de vista técnico, a RM da mama baseia-se em três etapas fundamentais: alinhamento dos prótons ao campo magnético, excitação por radiofrequência e detecção do sinal emitido no retorno ao estado de equilíbrio. As imagens são obtidas principalmente em sequências T1 e T2, frequentemente associadas ao uso de gadolínio como agente de contraste, o que aumenta a acurácia na diferenciação entre lesões benignas e malignas. Apesar da alta sensibilidade, limitações como custo elevado, baixa disponibilidade, possibilidade de falsos positivos e risco de superestimação da extensão tumoral ainda restringem sua aplicação em larga escala.

Mesmo com tais limitações, a RM da mama permanece como uma das ferramentas mais eficazes no diagnóstico, estadiamento e acompanhamento do câncer de mama, sobretudo em pacientes com alto risco ou com resultados inconclusivos em outros exames. Sua alta precisão na avaliação da extensão tumoral, na identificação de lesões multifocais e multicêntricas e na diferenciação entre tecidos malignos e benignos permite intervenções terapêuticas mais assertivas e menos invasivas, representando um avanço significativo no manejo clínico da doença (IYAD, 2018).

O câncer de próstata é o segundo tumor mais comum entre as neoplasias malignas masculinas em incidência e mortalidade, sendo superado apenas pelo câncer de pele não

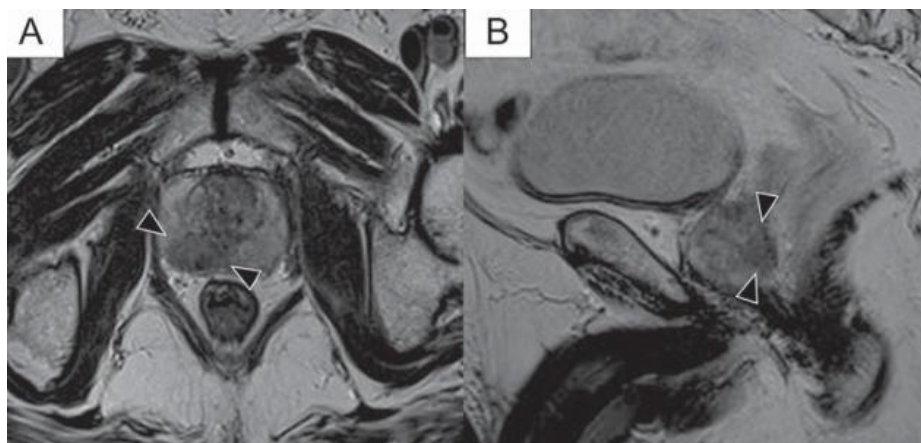
melanoma em incidência (BARROS et al., 2018). O diagnóstico precoce é fundamental para aumentar as chances de cura. Há mais de três décadas, a combinação entre o exame digital retal e a dosagem sanguínea do antígeno prostático específico (PSA) constitui a principal ferramenta no rastreamento do câncer de próstata, enquanto a biópsia guiada por ultrassonografia transretal consolidou-se como o método padrão para a confirmação histológica do carcinoma. Com o avanço tecnológico, o fornecimento de imagens em alta resolução, aliado a técnicas funcionais capazes de otimizar a detecção, localização e estadiamento do tumor, bem como aprimorar o direcionamento do tratamento, fez da RM uma revolução nos métodos de diagnóstico por imagem aplicados ao rastreamento e à avaliação do câncer de próstata.

A ressonância magnética multiparamétrica (mpMRI) da próstata combina a análise morfológica e anatômica obtida pelas sequências T2 de alta resolução com, pelo menos, duas outras técnicas funcionais, como a difusão que avalia a mobilidade das moléculas de água nos tecidos, a perfusão dinâmica com contraste que analisa o comportamento vascular do tumor e a espectroscopia, que permite estudar o metabolismo prostático.

Apesar de suas vantagens, a RM apresenta algumas limitações, como a menor sensibilidade para tumores pequenos, com volume inferior a 0,5 cm³, e de baixo grau histológico, porém ainda assim, é considerada o método de imagem ideal para a detecção e o estadiamento do câncer de próstata, pois permite uma avaliação detalhada tanto da morfologia quanto da função prostática.

A RM multiparamétrica consolidou-se como uma ferramenta essencial na prática clínica, reunindo dados anatômicos e funcionais que ampliam o espectro elucidativo e oferecem suporte preciso na definição do manejo terapêutico

Figura 9- Câncer de próstata localizado na zona periférica, evidenciado em imagens ponderadas em T2. Observa-se uma lesão nodular hipointensa à direita, indicada por cabeças de seta, visível nos planos axial (A) e sagital (B).



Fonte: retirada integralmente de (Barros, et al., 2018)

Dessa forma, a ressonância magnética multiparamétrica representa um marco na avaliação do câncer de próstata, unindo informações anatômicas e funcionais que aprimoram a precisão diagnóstica, o estadiamento e o planejamento terapêutico. Sua incorporação crescente à prática clínica tem contribuído para uma abordagem mais individualizada, eficaz e menos invasiva, consolidando-se como uma ferramenta determinante na realidade diagnóstica e no manejo dos pacientes com câncer de próstata.

5. CONCLUSÃO

A ressonância magnética (RM) consolidou-se como uma das ferramentas mais poderosas no diagnóstico por imagem do câncer, devido à sua capacidade de fornecer imagens detalhadas, não invasivas e livres de radiação ionizante. A análise apresentada evidencia que a RM vai muito além da simples avaliação morfológica, oferecendo informações funcionais e metabólicas que contribuem significativamente para o manejo oncológico. A técnica apresenta vantagens claras em relação a outros métodos de imagem, como a tomografia computadorizada (TC) e o PET/CT, especialmente na avaliação de tecidos moles, no rastreamento precoce de lesões e na determinação do estadiamento tumoral. Além disso, o uso de técnicas avançadas, como difusão, perfusão, espectroscopia e RM funcional, permite identificar alterações fisiológicas e metabólicas que frequentemente precedem as alterações anatômicas detectáveis por métodos convencionais. Isso possibilita intervenções mais precoces e planejadas, aumentando as chances de sucesso terapêutico.

Por outro lado, algumas limitações persistem, como o elevado custo do exame, o tempo prolongado de aquisição de imagens e a disponibilidade restrita de equipamentos de última geração em certos centros de saúde. Além disso, pacientes com dispositivos metálicos implantados ou condições que impedem a permanência prolongada em ambientes fechados podem ter acesso limitado à RM. Apesar desses desafios, a evolução tecnológica, incluindo o uso de inteligência artificial e radiômica, tem ampliado o potencial da RM, promovendo diagnósticos mais precisos, personalizados e integrados ao contexto clínico de cada paciente.

A análise das aplicações específicas da RM em tumores de mama, próstata, cérebro, fígado e reto evidencia que, em todos os casos, a técnica não apenas complementa os métodos convencionais de imagem, mas muitas vezes se torna exame de escolha para diagnóstico, estadiamento e monitoramento terapêutico. Em tumores cerebrais, por exemplo, a RM funcional e perfusional permite o planejamento cirúrgico seguro e

preciso; no câncer de mama, possibilita a detecção precoce de lesões em mamas densas; e na próstata, orienta biópsias direcionadas, aumentando a acurácia diagnóstica.

Portanto, a ressonância magnética se apresenta como uma tecnologia indispensável no contexto oncológico, com impacto direto na detecção precoce, na personalização do tratamento e na melhoria do prognóstico dos pacientes. Pesquisas futuras devem continuar explorando o potencial da RM funcional, molecular e integrada à inteligência artificial, visando ampliar a sensibilidade e especificidade do exame, reduzir custos e tornar a técnica mais acessível. Assim, a RM continuará desempenhando papel central na evolução da medicina diagnóstica e no enfrentamento do câncer em nível global.

Atualmente, vivenciamos a era do tratamento individualizado, em que fatores genéticos e intrínsecos tumorais acabam sendo decisivos na evolução da doença e conduta terapêutica. A avaliação de parâmetros funcionais pela RM vem ganhando cada vez mais espaço na avaliação dos pacientes oncológicos por permitir melhor compreensão da complexidade tumoral e do acompanhamento terapêutico, impactando positivamente no manejo deste grupo de pacientes.

REFERÊNCIAS

BRENAN, B. S. Breast Magnetic Resonance Imaging for the Interventionalist: Magnetic Resonance Imaging–Guided Vacuum-Assisted Breast Biopsy. *Techniques in Vascular and Interventional Radiology*, v. 17, n. 1, p. 40-48, 2014.

BARROS, Julia Vargas de; LEITE, Tatiana Laender Gomide; CANGUSSÚ, Kelly Moraes; FREIRE, Paulo César Bastos. A importância da ressonância magnética multiparamétrica no rastreamento do câncer de próstata. *Revista Científica da FMC*, v. 13, n. 2, p. 29-35, 2018.

BUSHBERG, J. T. et al. The essential physics of medical imaging. *Medical Physics*, v. 30, n. 7, p. 1936, 2003.

CAMPOS, P. R.; BEZERRA, A.; SOARES, A. Angiografia por RM: aspectos técnicos de um método de estudo vascular não invasivo. *Radiologia Brasileira*, n. 1, p. 41–50, 2017.

CARLOS SILVESTRE, I.; LUIZETTO DE LUCCA, J.; ZAGO, A. O papel da ressonância magnética nuclear no estadiamento do câncer de mama. *Revista Saúde Inesul*, 2010. Disponível em: https://www.inesul.edu.br/revista_saude/arquivos/arqidvol_14_1344255011.pdf. Acesso em: 6 ago. 2025.

CASTRIOTA, C. M. Comparação da razão sinal-ruído e da uniformidade da imagem entre aquisições com bobina de quadratura e com bobina de corpo. Botucatu: Instituto de Biociências, 2011.

CHESTER F. Carlson Center for Imaging Science. Inside MRI. 2024. Disponível em: <https://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/inside.htm>. Acesso em: 28 mar. 2025.

COLOMBO, G.; RUVOLO, V.; STIFANESE, R. et al. Prosthetic Breast Implant Rupture: Imaging—Pictorial Essay. *Aesthetic Plastic Surgery*, v. 35, n. 5, p. 891-900, 2011.

CONSTANCE, D.; LEHMAN, M. D. et al. ACR practice parameter for the performance of contrast-enhanced magnetic resonance imaging (MRI) of the breast. *Practice Parameter*, p. 1-9, 2013.

DE DEUS LEOPOLDINO, D. et al. Aspectos técnicos da ressonância magnética de mama com meio de contraste: revisão da literatura. *Radiologia Brasileira*, v. 38, n. 4, p. 1-8, 2005.

DUARTE GUIMARÃES, M. et al. Ressonância magnética funcional na oncologia: estado da arte. *Radiologia Brasileira*, v. 47, n. 2, p. 1-9, 2014.

ELLIS, J. H. American College of Radiology Committee on Drugs and Contrast Media. *Manual on contrast media*. Reston: American College of Radiology, [s.d.].

FIALHO, R. F. et al. Rastreamento de câncer de mama por imagem. *Femina*, 2008.

GATTASS, R.; MOLL, J.; ANDREIUOLO, P. A.; FARIAS, M. F.; FEITOSA, P. H. Fundamentos da ressonância magnética funcional. Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho/UFRJ; LABS Exames Complementares em Medicina.

GARCIA-BOURNISSEN, F.; SHRIM, A.; KOREN, G. Segurança do gadolínio durante a gravidez. *Canadian Family Physician / Médecin de famille canadien*, v. 52, p. 309–310, 2006.

GERALDES, C. F. G. C.; LAURENT, S. Classification and basic properties of contrast agents for magnetic resonance imaging. *Contrast Media & Molecular Imaging*, v. 4, n. 1, p. 1–23, 2009.

HAGE, M. C. F. N. S.; IWASAKI, M. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. *Ciência Rural*, v. 39, n. 4, p. 1275–1283, 2009.

HAACKE, E. Ressonância magnética: princípios físicos e desenho de sequência. Nova York: J. Wiley, 1999.

HOQUE, K. E.; COLLETTI, P. M. Magnetic resonance imaging of cardiovascular diseases in pregnancy. In: *MRI of Fetal and Maternal Diseases in Pregnancy*. Cham: Springer, 2016. p. 341–361.

HUANG, J. et al. Data and physics driven deep learning models for fast MRI reconstruction: Fundamentals and methodologies. 2024. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2401.16564>.

IYAD, N. et al. Gadolinium contrast agents – challenges and opportunities of a multidisciplinary approach: Literature review. *European Journal of Radiology Open*, v. 11, n. 100503, 2023.

JÚNIOR, A.; YAMASHITA, H. Aspectos básicos de tomografia computadorizada e ressonância magnética. *Brazilian Journal of Psychiatry*, v. 23, p. 2–3, 2001.

KANAL, E. et al. ACR Blue Ribbon Panel on MR Safety. ACR guidance document for safe MR practices. *American Journal of Roentgenology*, v. 188, p. 1447–1474, 2007.

LAM, T. et al. Superparamagnetic iron oxide based nanoprobe for imaging and theranostics. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 199–200, p. 95–113, 2013.

LI, A. et al. Acute adverse reactions to magnetic resonance contrast media – gadolinium chelates. *Brazilian Journal of Radiology*, v. 79, p. 368–371, 2006.

MAZZOLA, A. A. Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional. *Revista Brasileira de Física Médica*, n. 3, p. 117–129, 2009.

MAZZOLA, A. A. et al. Segurança em Imagem por Ressonância Magnética. *Revista Brasileira de Física Médica*, v. 13, n. 1, p. 76, 2019.

MENDONÇA, R. et al. Fundamentos da ressonância magnética. Apostila, 1996.

NACIF, M.; SOUTO, F. G. M. *Manual de técnicas em ressonância magnética*. Rio de Janeiro: Rubio, 2011.

OGALT, A. A. et al. Chemical items used for preparing tissue-mimicking material of wall-less flow phantom for Doppler ultrasound imaging. *Journal of Medical Ultrasound*, v. 26, n. 3, p. 123–127, 2018.

PERAZELLA, M. A.; RODBY, R. A. Gadolinium use in patients with kidney disease. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, v. 3, n. 1, p. 67–75, 2008.

ROBERTS, D. R.; HOLDEN, K. R. Progressive increase of T1 signal intensity in the dentate nucleus and globus pallidus on unenhanced T1-weighted MR images in the pediatric brain exposed to multiple doses of gadolinium contrast. *Brain & Development*, v. 38, n. 3, p. 331–336, 2016.

SHELLOCK, F. G. Magnetic resonance: Safety, bioeffects, and patient monitoring. In: *Open Field Magnetic Resonance Imaging*. Berlin: Springer, 2000. p. 127–145.

SPRAWLS, P. *Magnetic resonance imaging: Principles, Methods, and Techniques*. Madison: Medical Physics Publishing, 2000.

THOMSON, C. E. Magnetic resonance imaging – a general overview of principles and examples in veterinary neurodiagnosis. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, v. 34, 1993.

WESTBROOK, C. *Manual de técnicas de ressonância magnética*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.

WIEGERS, C. B. et al. Evaluation of two new gadolinium chelates as contrast agents for MRI. *Magnetic Resonance Imaging*, v. 10, n. 6, p. 903–911, 1992.

WINTER, P. M. et al. Improved paramagnetic chelate for molecular imaging with MRI. *Academic Radiology*, v. 12, n. 5, p. S40–S41, 2005.

SERKOVA, N. J.; GARG, K.; BRADSHAW-PIERCE, E. L. Oncologic imaging endpoints for the assessment of therapy response. *Recent Patents on Anticancer Drug Discovery*, v. 4, p. 36–53, 2009.

BRAGG, D. G. State-of-the-art assessment. Diagnostic oncologic imaging. *Cancer*, v. 64, p. 261–265, 1989.

CHOJNIAK, R. Imagem em oncologia no CBR. *Radiologia Brasileira*, v. 44, n. 3, 2011.

ATRI, M. New technologies and directed agents for applications of cancer imaging. *Journal of Clinical Oncology*, v. 24, p. 3299–3308, 2006.

CLARKE, L. P. et al. Quantitative imaging for evaluation of response to cancer therapy. *Translational Oncology*, v. 2, p. 195–197, 2009.

GONZÁLEZ HERNANDO, C. et al. The role of magnetic resonance imaging in oncology. *Clinical Translational Oncology*, v. 12, p. 606–613, 2010.

HIGGINS, L. J.; POMPER, M. G. The evolution of imaging in cancer: current state and future challenges. *Seminars in Oncology*, v. 38, p. 3–15, 2011.

HISTED, S. N. et al. Review of functional/anatomical imaging in oncology. *Nuclear Medicine Communications*, v. 33, p. 349–361, 2012.

PADHANI, A. R. Diffusion magnetic resonance imaging in cancer patient management. *Seminars in Radiation Oncology*, v. 21, p. 119–140, 2011.

KOH, D. M. et al. Practical aspects of assessing tumors using clinical diffusion-weighted imaging in the body. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, v. 6, p. 211–224, 2007.

PADHANI, A. R.; KOH, D. M. Diffusion MR imaging for monitoring of treatment response. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, v. 19, p. 181–209, 2011.

TESTA, M. L. et al. Ressonância magnética com difusão: biomarcador de resposta terapêutica em oncologia. *Radiologia Brasileira*, v. 46, p. 178–180, 2013.

ZWEIFEL, M.; PADHANI, A. R. Perfusion MRI in the early clinical development of antivascular drugs: decorations or decision making tools? *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, v. 37, supl. 1, p. S164–S182, 2010.

COSTA, F. M. et al. Espectroscopia de prótons e perfusão por ressonância magnética na avaliação dos tumores do sistema musculoesquelético. *Radiologia Brasileira*, v. 42, p. 215–223, 2009.

GONÇALVES, F. G.; MALDJIAN, J. A. Novidades em radiologia – Arterial spin labeling, a perfusão por RM sem contraste. *Radiologia Brasileira*, v. 44, n. 1, p. ix–xi, 2011.

HARRY, V. N. et al. Use of new imaging techniques to predict tumour response to therapy. *Lancet Oncology*, v. 11, p. 92–102, 2010.

KWEE, T. C. et al. Cancer imaging: novel concepts in clinical magnetic resonance imaging. *Journal of Internal Medicine*, v. 268, p. 120–132, 2010.

PORTO, L. et al. MR spectroscopy differentiation between high and low grade astrocytomas: a comparison between paediatric and adult tumours. *European Journal of Paediatric Neurology*, v. 15, p. 214–221, 2011.

KAUPPINEN, R. A.; PEET, A. C. Using magnetic resonance imaging and spectroscopy in cancer diagnostics and monitoring: preclinical and clinical approaches. *Cancer Biology & Therapy*, v. 12, p. 665–679, 2011.

BALTZER, P. A.; DIETZEL, M. Breast lesions: diagnosis by using proton MR spectroscopy at 1.5 and 3.0 T – systematic review and meta-analysis. *Radiology*, v. 267, p. 735–746, 2013.

BARONI, R. H. et al. Ressonância magnética da próstata: uma visão geral para o radiologista. *Radiologia Brasileira*, v. 42, p. 185–192, 2009.

BOONSIRIKAMCHAI, P. et al. MR imaging of prostate cancer in radiation oncology: what radiologists need to know. *Radiographics*, v. 33, p. 741–761, 2013.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva – INCA. *Diretrizes para detecção precoce do câncer de mama no Brasil*. Rio de Janeiro, 2015.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. *Quality Assurance Programme for Digital Mammography*. Vienna: IAEA, 2011. (Human Health Series, No. 17).

VITOR, Taise; MARTINS, Karine Minaif; IONESCU, Tudor Mihai; et al. PET/RM: um novo método de imagem híbrida. Principais indicações clínicas e experiência preliminar no Brasil. *Einstein (São Paulo)*, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 115-118, jan. 2017.

MAULAZ, Carolina Moreira; VALENTINI, Bruna Bressan; SILVA, Ana Maria Marques da; PAPALEO, Ricardo Meurer. Estudo comparativo do desempenho de imagens por ressonância magnética, mamografia e ecografia na avaliação de lesões mamárias benignas e malignas. *Revista Brasileira de Física Médica*, v. 12, n. 2, p. 23-29, 2018.

Associação Brasileira de Física Médica.