

Segurança em Imagem por Ressonância Magnética

Magnetic Resonance Imaging Safety

Alessandro A. Mazzola¹ , Karine I. Stieven¹ ,
Guilherme Hohgraefe Neto^{1,2} , Georgina de Melo Cardoso^{1,3} 

¹MRIONLINE Protocols & Education, Porto Alegre, Brasil

²Hospital Moinhos de Vento, Porto Alegre, Brasil

³Unidade Radiológica Criciúma, Criciúma, Brasil

Resumo

Apesar de o processo de obtenção de imagens por ressonância magnética (RM) não utilizar radiação ionizante e o método ser considerado seguro, existem muitos riscos associados à realização dos exames e ao ambiente de RM que já ocasionaram acidentes graves associados à morte de pacientes, indivíduos em geral e trabalhadores. Cabe destacar que o Brasil não tem legislação ou mesmo recomendação sobre aspectos de segurança em RM e é, portanto, dever das instituições e dos que trabalham garantir a segurança dos pacientes, acompanhantes, colaboradores e prestadores de serviço na sua relação com o ambiente de RM. Dessa forma, buscamos fornecer um conjunto de orientações práticas para a rotina de serviços clínicos ou de pesquisa em imagem por RM, de forma que se torne parte das políticas de segurança das instituições.

Palavras-chave: segurança; acidentes, imagem por ressonância magnética.

Abstract

Although the magnetic resonance imaging (MRI) process does not use ionizing radiation and the method is considered safe, there are many risks associated to conducting examinations and to the MR environment that has already led to serious accidents associated with the death of patients, public individuals and workers. It should be noted that Brazil does not have legislation or even recommendations on aspects of MRI safety, and it is, therefore, the duty of the institutions and those who work to ensure the safety of patients, companions, employees and service providers in their relationship with the MR environment. Thus, our aim is to provide a set of practical guidelines for the routine clinical or research services in MRI, so that it becomes part of the institution's security policies.

Keywords: safety; accidents; magnetic resonance imaging.

1. Introdução

A imagem por ressonância magnética (IRM ou RM) é, hoje, um método de diagnóstico por imagem estabelecido na prática clínica e em crescente desenvolvimento. Dada a alta capacidade de diferenciar tecidos, o espectro de aplicações se estende a todas as partes do corpo humano e explora aspectos anatômicos e funcionais¹.

A IRM é, resumidamente, o resultado da interação do forte campo magnético produzido pelo equipamento com os prótons de hidrogênio do tecido humano, criando uma condição para que possamos enviar um pulso de radiofrequência e, após, coletar a radiofrequência modificada, por meio de uma bobina ou antena receptora. Esse sinal coletado é processado e convertido em uma imagem ou informação¹.

Apesar de o processo de obtenção de imagens por RM não utilizar radiação ionizante e o método ser considerado seguro, existem muitos riscos associados à realização dos exames e ao ambiente de RM que já conduziram a acidentes graves e, até mesmo, à morte de pacientes e trabalhadores.

A maior parte dos acidentes relatados está relacionada ao campo magnético estático do equipamento, porém outras fontes de risco, como os gradientes de campo magnético, a radiofrequência (RF), os meios de contraste a base de gadolínio e os criogênicos (hélio líquido), também oferecem perigo e devem ser considerados em uma análise de segurança no setor.

Cabe destacar que o Brasil não tem legislação ou mesmo recomendação específica sobre aspectos de segurança em RM. Desse modo, é dever das instituições e dos que nela trabalham garantir a segurança dos pacientes,

acompanhantes, colaboradores e prestadores de serviço na sua relação com o ambiente de RM.

Entretanto, existem muitas recomendações internacionais²⁻⁸ elaboradas por especialistas e que devem servir de base conceitual para todos os tópicos que abordaremos a seguir.

O Programa de Acreditação em Diagnóstico por Imagem (PADI), do Colégio Brasileiro de Radiologia (CBR), representa um avanço significativo para a busca, não só de melhor qualidade nos serviços de imagem, mas também na segurança. A norma PADI apresenta diversos critérios que têm de ser observados e que têm direta relação com a segurança em RM⁹.

Dessa forma, buscamos, nesta revisão, fornecer um conjunto de orientações práticas para a rotina de serviços clínicos ou de pesquisa em IRM, de forma que se torne parte das políticas e dos programas de segurança das instituições.

Se deixarmos de lado os cuidados com a segurança e a educação de todos que trabalham, circulam ou utilizam o serviço de RM, estaremos mais propensos a acidentes que poderiam ser evitados.

2. Breve Histórico de Acidentes em Ressonância Magnética

Muitos acidentes estão relatados na literatura e vão desde ferimentos causados por pequenos objetos ferromagnéticos levados inadvertidamente para dentro da sala do magneto, passando por queimaduras causadas por equipamentos não apropriados para RM e até mortes em pacientes portadores de cliques de aneurisma e marcapassos.

Em um período de 10 anos, a base de dados da FDA (do inglês, Food and Drugs Administration) catalogou um total de 389 incidentes em instalações de RM nos EUA, porém sabe-se que os dados são subestimados, pois em um levantamento de 01 de janeiro de 2009 até 31 de dezembro de 2017 realizado pelo Pennsylvania Patient Safety Authority um total de 1.108 eventos foi computado. Esses eventos vão desde erros no preenchimento de formulários de metais até acidentes que causaram algum dano¹⁰.

No Brasil, não temos registros oficiais de eventos ou acidentes, porém é fácil perceber que a mesma ocorrência existe em nosso país, pois não há um serviço de RM que não relate pelo menos um incidente ocorrido desde a instalação de seus equipamentos.

3. Alguns Relatos de Acidentes Divulgados

O relato de alguns acidentes ilustra um pouco dos riscos que abordaremos na sequência do texto e serve de alerta e estudo de caso para treinamentos e orientações.

3.1. Queimadura por eletrodos não compatíveis com a ressonância magnética (1991)

Em 1991, na revista *Anesthesiology*, Bashein e Syrov, do Departamento de Anestesiologia da Universidade de

Washington, relataram duas queimaduras provocadas por sensores de oximetria posicionados nos dedos de pacientes que foram submetidos a exames de RM. Os sensores de oximetria não eram próprios para o ambiente de RM. No final do artigo, os autores citam que é essencial que os anestesiologistas se familiarizem com os riscos e perigos relacionados à RM¹¹.

4. Michael Colombini: a Morte de um Menino que fez a Comunidade de Ressonância Magnética Revisar seus Procedimentos de Segurança – 2001

Um acidente grave e relativamente recente fez com que a parte de segurança em RM fosse revisada mundialmente e novas medidas fossem sugeridas. Em julho de 2001, um menino de seis anos de idade chamado Michael Colombini foi atingido por um cilindro ferromagnético de oxigênio (não seguro para RM) enquanto era preparado na mesa do equipamento de RM para realizar um exame com anestesia, dentro da sala do Westchester Medical Center in Valhalla, Nova York¹².

Esse cilindro foi levado para dentro da sala de exames, de forma inadvertida, por uma enfermeira que não pertencia ao setor de RM e que tentava auxiliar um anestesiologista que percebeu uma queda na saturação de oxigênio da criança. Momentos antes de a enfermeira que passava pelo setor entrar na sala, o anestesiologista gritou por ajuda quando percebeu que o sistema de oxigênio do quadro de gases da sala de exames não estava funcionando. Na tentativa de ajudar, a enfermeira entrou na sala do magneto com o material inapropriado. O anestesiologista tentou evitar que ela se aproximasse, porém tão logo chegou perto do magneto o cilindro foi fortemente atraído (efeito míssil) e atingiu a cabeça do menino, o que causou sua morte. A grande tragédia neste caso é que o menino realizava o exame após uma cirurgia para retirada de um tumor benigno no cérebro. Em 2010, o hospital foi condenado a pagar uma indenização para a família do menino no valor de 2,9 milhões de dólares. Após a morte de Michael Colombini, o Colégio Americano de Radiologia (ACR) reuniu vários especialistas que produziram um documento, em 2002, sob a forma de um *white paper* (relatório de consenso) sobre segurança em RM².

Esse documento evoluiu para outro, em 2004³, com revisões e atualizações, e, em 2007⁵, foi alterado para que se tornasse uma recomendação de práticas seguras. Sua atualização, em 2013⁶, publicada no prestigiado *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, representa ainda hoje o melhor documento para estabelecer práticas seguras no ambiente de RM.

Um documento recente (2018), também sob a forma de um *white paper*, publicado pela American Society for Radiologic Technologists (ASRT; <https://www.asrt.org/>) chamado de *Radiologic Technologist Best Practices for MR Safety*, ou Práticas Seguras dos Tecnólogos em Radiologia para Segurança em RM, revisa as práticas seguras que devem ser adotadas pelos tecnólogos em radiologia¹³.

4.1. Queimadura por Eletrodos

Compatíveis com a Ressonância Magnética: 2003

Em 2003, Kugel et al.¹⁴ relataram a formação de um arco elétrico (faísca) e fogo na camisa de um paciente, na região dos eletrodos, quando eram adquiridas imagens sagitais ponderadas em T1, resultando em queimaduras de segundo e terceiro grau em um paciente adulto sedado que realizava RM de coluna lombar. Os eletrodos e o monitor multiparamétrico eram todos compatíveis com o ambiente de RM.

4.2. Queimadura e Amputação de Membro: 2007

Uma menina de 5 semanas de vida com histórico de múltiplas anomalias congênitas, incluindo malformação cardíaca, foi submetida, sob anestesia, a um equipamento de RM de 3T para avaliar espinha bífida. Após o exame foi constatada queimadura e presença de tecido necrótico no punho e parte do braço direito onde havia sido fixado um oxímetro de pulso não compatível com a RM. Apesar de todo tratamento dado após o ocorrido, os tecidos envolvidos não se mostraram viáveis e o membro teve de ser amputado (Figura 1)¹⁵.

4.3. Nova Zelândia: Trauma no Olho e Fratura na Órbita – 2014

Após iniciar um exame de RM de crânio, um canivete que permanecia no bolso do paciente foi atraído pelo magneto e

acabou se chocando fortemente com seu olho e causando uma fratura na órbita. A instituição não realizava a troca completa de roupa dos pacientes como rotina¹⁶.

4.4. Nova Deli, Índia: homem fica prensado no magneto por cilindro de oxigênio durante mais de 4 horas – 2014

O técnico de RM de um hospital em Nova Deli, Índia, solicitou a um porteiro que buscasse uma máscara de oxigênio, mas ele pensou que estava sendo solicitado um tanque inteiro de oxigênio e o levou para dentro da sala de exames.

Ambos ficaram feridos. O porteiro teve o ombro fraturado e o técnico ficou ferido no abdome.

Mas esse caso expôs um segundo grande risco. Eles tentaram “apagar” o campo magnético, pressionando o botão de emergência (também chamado de botão de “*quench*”). Porém, o módulo eletrônico responsável por esse procedimento que faz com que o magneto perca o alto campo magnético estava desligado.

Somente com a chegada de um engenheiro da empresa fornecedora do equipamento foi possível baixar o campo magnético por meio de um procedimento manual, liberando o cilindro de oxigênio que prensava o homem contra o magneto.

Após esse acidente e a falha do sistema de *quench*, o fabricante fez um *recall* mundial para distribuir uma peça e



Fonte: Haik et al.¹⁵.

Figura 1. Queimadura de quarto grau provocada por sensor de oximetria não compatível com ressonância magnética e que resultou na amputação de membro.

um procedimento para que, no caso de falha do módulo de *quench*, pudesse ser executado o procedimento sem a necessidade de um engenheiro treinado¹⁷ (Figura 2).

4.5. Armas de Policiais

Militares Atraídas pelo Magneto: 2015

Na madrugada do dia 21 de agosto de 2015, houve a suspeita de arrombamento e invasão de uma clínica na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Eles entraram no local para fazer a vistoria com as armas em punho e adentraram na sala de exames. A arma do primeiro PM foi atraída e ficou presa na parte frontal. Ao chamar o seu colega e o outro entrar na sala e tentar contornar o equipamento, a segunda arma ficou presa na parte posterior¹⁸.

O fabricante teve de ser chamado para reduzir o campo magnético de forma controlada e permitir a retirada segura do armamento (Figura 3).



Fonte: MailOnline¹⁷

Figura 2. Cilindro de oxigênio prensando o porteiro contra o magneto. O botão de apagamento do campo magnético (*quench*) não funcionou.



Fonte: G1¹⁸

Figura 3. Arma de fogo de um policial atraída pelo campo magnético estático do equipamento de ressonância magnética após o indivíduo ter entrado de forma inadvertida dentro da sala de exames.

4.6. Morte na Índia Causada por mais um Cilindro de Oxigênio levado para Dentro da Sala de Exames: 2018

No dia 29 de janeiro de 2018, Rajesh Maru, 32 anos, que acompanhava um parente que estava prestes a realizar seu exame de RM foi solicitado por um membro da equipe do Nair Hospital, em Mumbai, a levar um cilindro de oxigênio para dentro da sala. Esse funcionário do hospital disse que o equipamento estava desligado. O cilindro foi fortemente atraído e colidiu com o magneto, liberando uma grande quantidade de oxigênio líquido na direção do rosto de Rajesh, o que teria causado um pneumotórax e levado o jovem à morte¹⁹.

5. Pessoas e Ações de Segurança

As instituições que têm qualquer tipo de equipamento de RM devem manter políticas e rotinas de segurança em RM. Estas têm de prever a responsabilidade do diretor médico (responsável médico legal) na execução, manutenção e revisão das ações de segurança, bem como estabelecer o papel dos diferentes profissionais no ambiente de RM.

Deve-se garantir que incidentes e eventos adversos sejam relatados, analisados e documentados.

Também deve ser estabelecido que exista uma separação entre os colaboradores do setor de RM (colaboradores da RM) e os colaboradores de fora do setor (colaboradores não RM), com treinamentos, responsabilidades, atividades e permissões de acesso diferenciadas.

Dessa forma, é fundamental que se estabeleçam áreas ou zonas de menor e maior risco, conforme veremos a seguir.

6. Zoneamento em Ressonância Magnética

O zoneamento em RM consiste de uma divisão em quatro partes ou zonas do setor para fins de segurança, como mostra a Figura 4.

Alguns lugares terão de avaliar se terão realmente as quatro zonas bem definidas. Na construção ou reforma de um setor para receber um novo equipamento de RM é importante discutir com arquitetos e engenheiros essa divisão e cuidados de segurança.

Mas qual é o objetivo de criar zonas e demarcá-las? De forma bem simples, essa pergunta pode ser respondida da seguinte forma: se houvesse essa política de segurança implementada em 2001 no Westchester Medical Center de Nova York, o menino Michael Colombini muito provavelmente não teria morrido. Porém, as pessoas precisam entender o que significa cada zona, a sinalização tem de ser bem-feita, as regras têm de ser cumpridas por todos, treinamentos tem de ser repassados de forma periódica e a alta direção tem de ser envolvida.

A lógica na divisão das zonas é invertida à numeração. Ou seja, iniciamos pela zona mais perigosa e complexa que é a Zona IV, a sala do magneto. A partir dela surge a Zona III, ou seja, toda a região que pode ter acesso direto

à porta da sala de exames e acessar à Zona IV. A partir daí vem a Zona II e a Zona I ou Zona Livre.

Vamos detalhar para cada uma das zonas as recomendações de segurança e sinalização sugeridas. É importante destacar que a classificação em zonas é bastante dependente da planta baixa, acessos e procedimentos de circulação adotados em cada local.

7. Zona I ou Zona Livre: Recepção e Áreas Externas no Entorno do Setor de Ressonância Magnética

Consideramos esta como sendo a zona ou local de acesso ao setor de RM propriamente dito. Se a recepção for interna ao setor, ou seja, no mesmo ambiente dos vestiários, a recepção será considerada Zona II. A sinalização desta zona é opcional.

8. Zona II: Corredor de Acesso à Porta do Setor de Ressonância Magnética

Podemos definir esta zona como aquela que é a interface entre a área livre e a Zona III. Nesta zona, o paciente tem de estar sempre acompanhado de um colaborador da RM

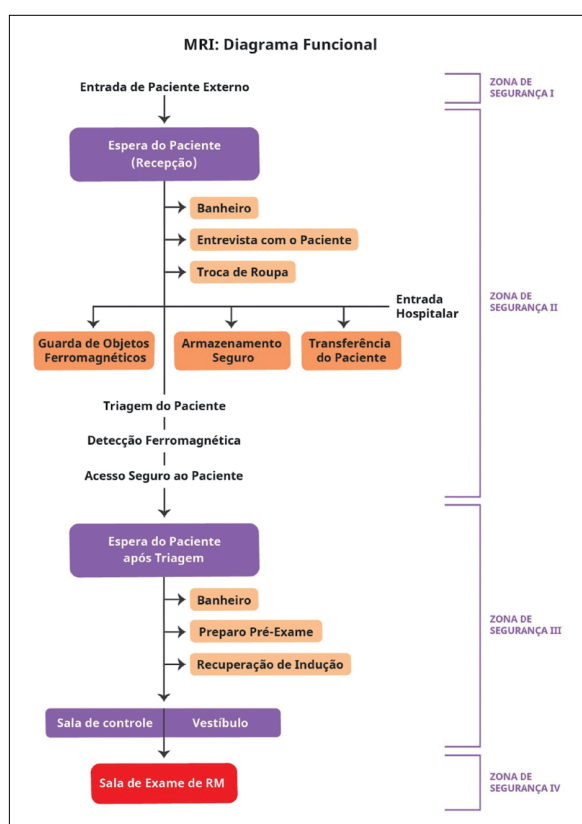


Figura 4. Diagrama do Zoneamento proposto pelo Expert Panel on MRI Safety do American College of Radiology (ACR)⁶ e traduzido e adaptado pelos autores.

e deverá ser investigado quanto à segurança e às questões médicas em RM para poder ingressar na Zona III. É nesta zona que pacientes e acompanhantes têm de preencher a famosa “pesquisa de metais”, a qual preferimos nos referir como “Consentimento Informado e Questionário de Segurança em RM”.

8.1. Observações da Zona II

- Pacientes não podem estar livres nesta zona. Devem ser supervisionados por pessoal da RM (colaboradores RM);
- Sinalização deve ser usada para indicar que está próximo à área de maior campo magnético;
- Portas de acesso à zona III têm de ter restrição de acesso, permitindo somente entrada de pessoas treinadas e autorizadas, ou pacientes e acompanhantes já investigados.

9. Zona III: Corredor Interno da Ressonância Magnética e Demais Áreas Internas do Setor que Possam Acessar a Zona IV sem Barreira Física

O acesso tem de ser restrito aos colaboradores da RM e a pessoas treinadas e autorizadas pela direção da instituição. Somente estes podem abrir a porta de acesso (cra-chá, digital etc.).

As pessoas que não são do setor de RM devem ser conduzidas dentro dessa zona sob supervisão direta dos colaboradores RM e nunca devem ser deixadas desacompanhadas.

Pessoas externas ao setor devem permanecer nesta zona somente o tempo estritamente necessário e o mais afastadas da porta da sala de exames possível.

Qualquer colaborador que não faça parte do setor, mas que precise entrar na Zona III e na Zona IV, especialmente fora do horário de exames (horário normal de expediente), só pode ser autorizado se receber treinamento e educação adequados para tal, com registro formal deste feito e mantido pela instituição. Pelo menos uma vez ao ano tem de ser renovado.

A sinalização é obrigatória, especialmente nas portas com acesso restrito.

Materiais que podem ser movidos, transportados ou deslocados para a zona IV, como macas, suportes de soro, carrinhos de anestesia, vassouras, carros de limpeza, extintores de incêndio, torpedos de oxigênio etc., devem ser devidamente sinalizados com etiquetas ou cartazes de Seguro em RM, Não seguro em RM ou Condicional.

Materiais no setor de RM, especialmente os localizados na Zona III, que possam ser deslocados para a Zona IV, devem ser identificados e marcados com a nomenclatura proposta pela FDA e pela American Society for Testing and Materials (ASTM), que os classifica em Seguros, Não seguros ou Condicionais²⁰.

- Seguro para RM: um item que não apresenta riscos conhecidos resultantes da exposição a qualquer ambiente de RM. Itens considerados como Seguros para RM são

compostos de materiais não condutores eletricamente, não metálicos e não magnéticos;

- Não seguro para RM: um item que apresenta riscos inaceitáveis para o paciente, equipe médica ou outras pessoas dentro do ambiente MR;
- Condicional: um item com segurança comprovada no ambiente de RM dentro de condições definidas. No mínimo, aborde as condições do campo magnético estático, o campo magnético de gradiente comutado e os campos de radiofrequência. Condições adicionais, incluindo configurações específicas do item, podem ser necessárias.

Um ímã de mão potente pode ser usado por um colaborador qualificado para investigar esses materiais e classificá-los. Atenção especial deve ser dada a extintores de incêndio, cilindros de oxigênio e materiais móveis.

Materiais trazidos de fora do setor para a Zona II e a Zona III devem ser verificados pelos colaboradores RM e devidamente classificados.

Se em algum ponto da Zona III a linha de 5 gauss (5 G ou 0,5 mT) exceder os limites da sala de exames, a região deve ser demarcada e devidamente sinalizada. Abordaremos a linha de 5 G mais adiante no texto.

10. A Linha de 5 Gauss (5G) ou 0,5 Militesla (0,5 mT)

Esta linha especifica o perímetro em torno do equipamento de RM em que o campo magnético é mais alto que 5 gauss (5 G). 5 gauss ou menos é considerado nível seguro para exposição ao campo magnético estático para o público em geral. Esse limite leva em consideração o risco de alteração no funcionamento de um marcapasso convencional quando da exposição a partir do limite.

No projeto dos serviços de RM, os fabricantes procuram colocar essa linha dentro ou nos limites das paredes da sala do magneto, como mostra a Figura 5.

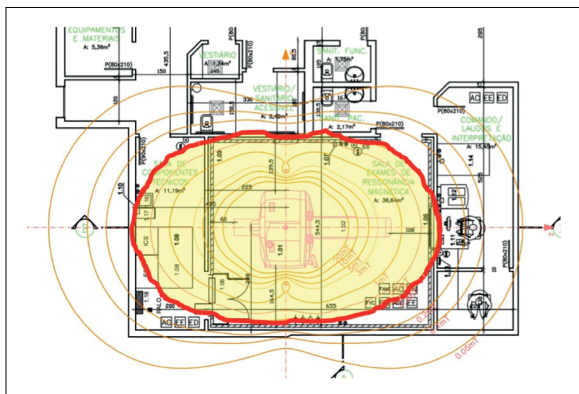


Figura 5. Linha de isocampo de 5 gauss destacada em vermelho, mostrando que a maior parte da mesma está contida dentro da sala de exames, porém avançando na parte posterior para a sala de equipamentos.

11. Zona IV: a Sala de Exames

Esta zona é sinônimo de sala do magneto, mas pode avançar para outras áreas, dependendo muito como foi executado o chamado *site planning* (planejamento do local pelo fabricante) e das restrições de espaço físico de cada local.

A sinalização deve indicar todos os riscos do acesso a esta zona, incluindo o alto campo magnético, a radiofrequência, os gradientes de campo magnético, os criogênicos (hélio) e o ruído sonoro.

É recomendado que exista uma lâmpada vermelha na porta de entrada indicando Campo Magnético Ativo (*Magnet On*), com circuito para prevenir que se apague em caso de perda de energia elétrica. Esse ponto é bastante discutível, devido ao risco de a lâmpada se apagar e, dessa forma, indicar que o magneto está falsamente desligado.

Nos casos de emergência ou eventual necessidade de atendimento médico dentro da sala de exames, o paciente sempre tem de ser removido e levado para um local seguro quanto aos riscos do alto campo magnético (Zona III, Zona II ou outro local fora do setor).

12. Fontes de Riscos da Ressonância Magnética

Os riscos relacionados ao ambiente de RM são demonstrados resumidamente no Quadro 1 e abordaremos cada um deles no texto, de forma resumida e voltada para a rotina clínica do setor de RM.

13. Campo Magnético Estático (B_0)

Os equipamentos de RM disponíveis no mercado têm intensidade de campo magnético que varia de 0,2T a 3,0T para

Quadro 1. Fontes de risco em ressonância magnética e possível efeito ou interação com o corpo humano e materiais.

Fonte de Risco	Efeito no Corpo Humano
Campo Magnético Estático	Atração de objetos ferromagnéticos
	Torção de objetos ferromagnéticos
	Alteração no funcionamento de equipamentos
Gradientes de Campo Magnético	Vertigem e Náusea
	Estímulo de Nervos Periféricos
	Magnetofosfenos
Radiofrequência	Choque elétrico
	Ruído Acústico
	Aumento da temperatura corporal
Criogênicos	Aquecimento de Materiais
	Queimaduras
	Sufocamento
Meios de Contraste	Reações Alérgicas
	Deposição em Tecidos
	Fibrose Nefrogênica Sistêmica

uso clínico, porém, na área de pesquisa, podem mesmo ser iguais ou superiores a 7,0T. As regras de segurança sofrem alteração quando o campo é superior a 3,0T, especialmente quanto à movimentação das pessoas em relação ao campo. Abordaremos as orientações básicas para equipamentos usados clinicamente e que se restringem ao valor de 3,0T.

O campo magnético estático (B_0) oferece dois tipos básicos de risco: atração de objetos ferromagnéticos e alteração no funcionamento de equipamentos.

Objetos compostos de ferro, níquel e cobalto, por exemplo, apresentam comportamento ferromagnético e serão atraídos pelo campo magnético do equipamento. O risco pode ser de atração (como no caso de um cilindro de oxigênio, uma tesoura ou uma enceradeira) ou de torção (torque) em um objeto implantado no corpo, como um clipe de aneurisma cerebral não seguro para RM, por exemplo.

Quanto maior for a massa ferromagnética, maior será a força de atração do campo para com o objeto. Dessa força de atração pode ainda resultar o chamado efeito míssil, em que o objeto é acelerado em direção ao magneto, podendo acarretar choque violento com o paciente ou membro da equipe.

Todos os objetos que necessitem ser levados para dentro da sala devem ser cuidadosamente verificados por pessoal especializado (físicos, engenheiros ou responsáveis da instituição ou fabricante), de forma a garantir que não haverá risco de atração com o campo magnético.

Pacientes, acompanhantes, membros da equipe técnica e médica ou qualquer pessoa que necessite entrar na sala de exames (sala do magneto) devem ser cuidadosamente questionados e revisados para que não portem materiais ferromagnéticos ou que não tenham implantes ou equipamentos sensíveis ao campo magnético.

Pacientes portadores de implantes eletricamente ativos (como, por exemplo, marcapassos cardíacos, desfibriladores cardíacos, neuroestimuladores, implantes cocleares etc.) devem ser questionados mesmo antes de entrar na Zona III do setor de RM, pois a presença desses equipamentos além da linha de 5 G ou 0,5 mT (1 T = 10.000 G) é proibida, a não ser que tenham implantes condicionais para RM.

Um efeito importante a ser considerado na movimentação de um paciente com algum implante ou algum objeto com partes metálicas que não sejam ferromagnéticas é a criação de forças de Lenz. Segundo a lei de Faraday, um campo magnético variando ou se movendo induzirá uma tensão em um condutor elétrico. A lei de Lenz complementar dizendo que dessa tensão induzida no condutor surgirá um segundo campo magnético cuja orientação e magnitude irão se opor ao campo magnético variável que está induzindo.

O resultado prático disso é que correntes elétricas (e campos magnéticos) podem ser induzidas em materiais metálicos levados para dentro da sala, causando momentaneamente (enquanto em movimento) a sensação de atração ou repulsão com o campo magnético estático, gerando confusão sobre este ser um material ferromagnético.

Alguns pacientes e trabalhadores já relataram sensação de atração de aparelhos dentários ou próteses dentárias

metálicas quando eram posicionados sobre a mesa de exames. Dessa forma, recomendamos que toda movimentação de equipamentos seguros para RM que entrem na sala ou a movimentação de pacientes com implantes metálicos seguros para RM ou mesmo condicionais sejam feitas da forma mais lenta possível.

13.1. Cuidados com Campo Magnético Estático (B_0)

- Demarcar a linha de 5 gauss utilizando cartazes, marcação no piso e obstáculos, se necessário;
- Criar mecanismo físico de restrição de acesso ao setor de RM (leitoras de crachá, portas com senha etc.);
- Proibir o acesso livre de qualquer pessoa portadora de marcapassos e neuroestimuladores no ambiente de RM;
- Utilizar documentos para investigação de metais em que o paciente assinale a sua presença no corpo e possa ser investigado antes da entrada na zona III e na sala de exames (Zona IV);
- Nunca levar para dentro da sala de exames materiais desconhecidos ou não revisados quanto a presença de partes ferromagnéticas;
- Não permitir a entrada do paciente em sala portando qualquer objeto metálico como anéis, brincos, relógio, carteira, *piercing* e próteses dentárias removíveis;
- Somente utilizar na sala de exames equipamentos próprios (seguros ou condicionais) para o ambiente da RM e certificados por empresas de reconhecida competência (por exemplo, injetoras de meio de contraste, oxímetros, carros de anestesia, eletrodos etc.);
- Colaboradores externos ao setor, como pessoal de manutenção e higienização, só devem ser autorizados a entrar na sala após repasse formal de instruções de segurança no ambiente de RM;
- Conhecer a localização e a forma de acionamento dos botões de parada elétrica e de desligamento do campo magnético.

14. Gradientes de Campo Magnético

Os gradientes de campo magnético são variações rápidas do campo magnético que ocorrem durante o processo de obtenção das imagens.

As variações de campo magnético podem induzir correntes elétricas no corpo do paciente que podem resultar em estímulo de músculos periféricos e, até mesmo, choques elétricos. A probabilidade de ocorrência é maior quando do uso de seqüências de pulso rápidas (gradiente eco e imagem ecoplanar) e nas extremidades dos magnetos, especialmente nos magnetos supercondutores de formato cilíndrico.

Normas regulamentadoras limitam o valor máximo do gradiente para prevenir que nenhuma estimulação cardíaca ocorra.

O ruído acústico produzido pelos gradientes pode ser superior a 80 dB, por isso é obrigatório o uso de proteção auricular para pacientes e qualquer pessoa que permaneça dentro da sala do magneto durante a aquisição de imagens.

14.1. Cuidados com o gradiente de campo magnético

- Fornecer protetor auricular para pacientes, acompanhantes ou qualquer pessoa que permaneça dentro da sala do magneto durante a aquisição de imagens;
- Evitar que a pele do paciente fique em contato direto com a carcaça interna do magneto ou com partes da bobina. Utilizar espumas isoladoras e a roupa apropriada para o exame para este fim;
- Criar registros de ocorrência em pacientes de estímulo de nervos periféricos, sensações de choque ou surtos de flashes luminosos (os chamados magnetofosfenos) durante a realização de exames, para que sejam relatados ao fabricante e responsáveis pela manutenção dos equipamentos;

15. Radiofrequência

O principal risco associado à radiofrequência é a deposição de sua energia sob a forma de calor. Os equipamentos possuem sistemas de monitoramento (*hardware e/ou software*) que limitam a potência de RF levando em consideração o peso do paciente e outras informações para calcular e monitorar em relação aos limites estabelecidos internacionalmente para a taxa de absorção específica da radiofrequência (SAR).

A taxa de absorção específica da RF, conhecida pela sigla SAR (do inglês, *specific absorption rate*), é uma medida da quantidade de energia da RF depositada por unidade de massa do corpo do paciente (W/kg).

O aquecimento do paciente durante um exame de RM depende da quantidade de RF depositada por unidade de massa (SAR), da temperatura ambiente, da umidade relativa do ar, da taxa de fluxo de ar dentro do magneto, da taxa de trocas de calor do paciente e suor e do isolamento do paciente.

Os limites do SAR levam em consideração que a temperatura do tecido não ultrapasse 1,0°C e os limites existem para corpo inteiro e regiões específicas.

A International Electrotechnical Commission (IEC)²¹ estabelece que os equipamentos de RM devem seguir três níveis de SAR com limites para corpo inteiro, partes do corpo e crânio:

1. Normal Operating Mode (ou Modo de Operação Normal): modo normal para a rotina de exames de RM;
2. First Level Controlled Operating Mode (ou Primeiro Nível do Modo de Operação Controlado): o operador do equipamento de RM é avisado que o nível normal excedeu e que pode ir para este novo nível usando um botão de "Aceitar", porém exige que o operador monitore de forma mais atenta o paciente;
3. Second Level Controlled Operating Mode (ou Segundo Nível do Modo de Operação Controlado): modo liberado somente em situações de pesquisa e com autorização do fabricante do equipamento de RM.

O Quadro 2 resume os limites em cada nível de SAR recomendados pela IEC:

Dessa forma, o operador do equipamento de RM é avisado sempre quando da troca de um nível para o outro e assume a responsabilidade para tal mudança. É também tarefa do operador de RM saber manipular os parâmetros das sequências de pulso de forma a reduzir o SAR e manter a qualidade da imagem em situações específicas.

A quantidade de energia da RF absorvida pelo corpo aumenta aproximadamente com o quadrado do aumento do campo. Isso quer dizer que, de 1,5T para 3,0T, uma mesma quantidade de RF transmitida ao corpo resultará em quatro vezes mais energia absorvida (SAR quatro vezes maior).

Em 2017, a FDA, em parceria com a Society for Magnetic Resonance Technologists (SRMT), produziu um cartaz sobre prevenção de queimaduras em RM. A versão em inglês pode ser obtida em <https://www.ismrm.org/mr-safety-links/mri-burn-prevention-poster/>, e a versão autorizada para o português pode ser obtida em <http://www.mrispins.com.br> (Figura 6).

15.1. Cuidados com a Radiofrequência

- Fornecer ao paciente avental ou roupa apropriada e confeccionada com tecido natural para que substitua todas as suas roupas para realização do exame;
- Informar ao equipamento no início do exame o valor de massa corporal (kg) e idade (e outros dados solicitados pelo fabricante), permitindo o correto cálculo e funcionamento das limitações de SAR;
- Não cobrir o paciente excessivamente;
- Manter a temperatura e a umidade da sala de exames dentro da faixa recomendada pelos fabricantes, e manter a ventilação do interior do magneto acionada e, de preferência, na velocidade mais alta durante todo o exame;
- Não utilizar plásticos ou outros materiais que causem abafamento e aumento da transpiração. Não cobrir a superfície de bobinas ou almofadas com películas plásticas ou outros tecidos que não tenham sido autorizados e revisados pelo fabricante do equipamento de RM;
- Não iniciar o exame em paciente com suor acumulado, urina ou fezes. O corpo do paciente deve estar seco. Isso inclui os cabelos;
- Não permitir que mãos e pés fiquem cruzados ou em contato direto de pele com pele, evitando, assim, um efeito de antena que pode resultar em queimaduras e choques nesses pontos de contato;

Quadro 2. Limites em cada nível de absorção específica de radiofrequência (SAR) recomendados pela International Electrotechnical Commission (IEC) e adaptado de Allison e Yanasak²².

Modo de Operação	SAR para Corpo Inteiro (W/kg)	SAR para Crânio (W/kg)	Máximo Aumento de Temperatura (°C)
Modo de Operação Normal	2,0	3,2	0,5
Primeiro Nível do Modo de Operação Controlado	4,0	3,2	1,0

- Verificar cabos e conectores das bobinas quanto a integridade física, evitando, assim, risco de choques e faiscamento;
- Manter contato visual e sonoro permanente com o paciente, orientando-o a acionar a campainha ligada ao alarme sonoro caso sinta alguma sensação de aquecimento ou desconforto durante o exame.

Por todos os motivos relatados, a troca completa de roupa do paciente por uma roupa de material não sintético, sem pinturas ou qualquer parte metálica (preferência por puro algodão) fornecida pelo setor de RM é uma medida bastante eficaz para garantir a segurança do paciente durante o exame.

16. Líquidos Criogênicos

Os líquidos criogênicos, como o nitrogênio e o hélio, são gases liquefeitos a baixas temperaturas e são usados nos magnetos supercondutores para que a corrente circule pela bobina produtora do campo magnético principal sem apresentar resistência elétrica (supercondutividade).



Figura 6. Cartaz sobre prevenção de queimaduras em RM produzido pela *Society for Magnetic Resonance Technologists* (SMRT) em conjunto com o Food and Drug Administration (FDA) e traduzido de forma autorizada pelos autores deste artigo.

O hélio líquido é o criogênico mais utilizado e possui temperatura de -269°C . Os magnetos supercondutores estão abastecidos com cerca de 1.400 a 2.000 L de hélio líquido.

Durante abastecimentos e manutenções, cuidados especiais são tomados pelas equipes técnicas para evitar queimaduras devido à baixa temperatura no eventual contato com o líquido ou com o gás, e há a possibilidade de substituição do ar ambiente pelo gás hélio, levando ao sufocamento.

Na rotina de um serviço de RM, o controle e o registro diário da pressão do magneto e do nível de hélio são necessários para evitar perdas excessivas com a evaporação e os pontos críticos de trabalho com o magneto, como nos casos em que o nível de hélio fica inferior a 50% da capacidade de abastecimento.

17. Extinção do Campo Magnético

Se for necessário realizar a extinção do campo magnético (procedimento conhecido como *quenching*) por meio do acionamento do botão específico para esse fim, é importante assegurar que a porta da sala de exames esteja aberta e que as pessoas serão evacuadas do setor, uma vez que o hélio líquido se expande na taxa de aproximadamente 700 L de hélio gasoso para cada litro de hélio líquido, ocupando rapidamente o espaço do ar ambiente. Importante ressaltar que não é incomum a ocorrência de *quenching* espontâneo pelo magneto.

Os magnetos têm um duto, chamado de tubo de *quench*, que conduz o hélio sob a forma de gás para fora da sala (área externa), porém há a possibilidade de o duto estar obstruído ou danificado e, dessa forma, jogar o hélio para dentro da sala de exames e do setor de RM.

18. Cuidados com Líquidos Criogênicos

- Para magnetos supercondutores, a porta da sala de exames deve abrir preferencialmente para fora ou a sala deve ter válvula de compensação de pressão bidirecional com dimensão apropriada;
- Rotinas de reabastecimento de hélio líquido devem ser cercadas de todas as medidas de segurança necessárias, principalmente proibindo a entrada de pessoas desnecessárias ao procedimento ou desavisadas no setor;
- Não respirar e ou se aproximar de gases/vapores criogênicos;
- Não tocar superfícies congeladas no magneto ou da torre do magneto;
- Manter a saída externa do tubo de *quench* desobstruída e direcionada para local que não possibilite circulação de pessoas;
- Em caso de apagamento do campo magnético, remover o paciente imediatamente e avisar o serviço técnico do fabricante do equipamento;
- Manter o ar-condicionado da sala de exames em boas condições e com renovação parcial do volume de ar.

19. Sinalização

O acesso ao setor e, especialmente, à porta da sala de exames deve estar sinalizado com cartazes e avisos, como mostram as Figuras 7 e 8. Esses cartazes possibilitam a correta identificação dos riscos e limitam a entrada de pessoas portadoras de marcapassos e outros dispositivos e implantes proibidos no ambiente de RM ou, mais especificamente, na sala de exames.



Figura 7. Modelo de cartaz criado para servir como padrão para porta da sala de exames.



Figura 8. Sugestão de quadros para sinalizar as diferentes zonas na ressonância magnética.

Os materiais podem ser marcados, conforme mencionado anteriormente, com etiquetas de Seguro, Não seguro e Condicional, conforme mostradas na Figura 9.

O cartaz, os quadros e as etiquetas podem ser encontrados para *download* em <http://www.mrispins.com.br>.

20. Restrição de Acesso e Anamnese

Talvez a melhor restrição de acesso de pacientes ao ambiente da RM deveria ser realizada pelo médico solicitante quando prescreve um exame de RM para seu paciente. Porém sabemos que infelizmente muitos pacientes portadores de marcapasso acabam recebendo solicitações para exames de RM. Sendo assim, outras medidas de restrição devem ser tomadas.

O questionamento e a investigação sobre as características do paciente deve ser realizada em mais de uma etapa para que sejam criadas barreiras que evitem o acesso ao ambiente de RM.

Um exemplo de boas práticas se dá quando o paciente ou seu responsável direto são questionados já no agendamento do exame com algumas perguntas. Havendo resposta positiva para algum item de segurança em RM, o caso deve imediatamente ser repassado para a equipe técnica e médica da RM que investigará se o paciente poderá fazer ou não o exame.

No dia do exame e ainda na Zona II, o paciente tem de ler, responder ao Consentimento Informado e Questionário de Segurança em RM e assiná-lo. Esse mesmo documento pode estar disponível nas unidades de internação para preenchimento prévio, antes mesmo de um paciente internado ser conduzido para o setor de RM.

A anamnese e conferência dos documentos acima deve ser feita tanto pelo pessoal de enfermagem da RM como



Figura 9. Etiquetas criadas segundo padrão American Society for Testing and Materials para marcação de materiais e equipamentos no setor de ressonância magnética.

pelo operador da RM (técnico, tecnólogo ou biomédico) antes do paciente ser colocado na Zona IV (sala de exames).

21. Consentimento Informado e Questionário de Segurança em Ressonância Magnética

Conforme já dito, todas as pessoas que entrarem na Zona III devem ser investigadas quanto à presença de dispositivos, implantes ou materiais que possam oferecer risco à sua segurança e à dos demais no ambiente de RM.

Acompanhantes de pacientes ou qualquer pessoa que entrar na Zona III ou na Zona IV e pacientes que serão submetidos ao exame de RM devem, obrigatoriamente, ser investigados por meio de um questionário próprio de segurança, preenchido a próprio punho e assinado.

É recomendável que o profissional de saúde que aplicou o questionário e o operador dos equipamentos de RM também assinem.

Um modelo internacionalmente aceito é o do Institute for Magnetic Resonance Safety Education and Research (IMRSEER) desenvolvido em conjunto com Frank G. Shellock²³.

Caso exista relato ou indicação na investigação de que o paciente tenha algum material ou dispositivo implantado no corpo, deve-se realizar pesquisa sobre a classificação de tal objeto. Sendo classificado como não seguro, o paciente ou indivíduo não deve entrar na Zona III. Sendo seguro, poderá ir até a Zona IV e permanecer lá. A classificação de "condicional" deve ser avaliada quanto às recomendações do fabricante para a realização segura do exame.

22. Pesquisa sobre Dispositivos, Materiais e Implantes: A Lista

Mantida por Frank G Shellock no *website* www.mrisafety.com²⁴, *A lista* é uma fonte de consulta sobre informações de segurança de milhares de materiais, dispositivos e implantes que foram testados e classificados.

Os fabricantes também podem ser consultados quanto às informações de segurança em RM de seus produtos, seja para que liberem acesso ou para que forneçam tais dados.

Sendo assim, é fundamental que não somente se saiba se o paciente tem no corpo determinado material, mas que se saibam marca, modelo e fabricante.

23. Conduta em Casos Duvidosos

A conduta recomendada em casos de dúvida quanto a presença de algum dispositivo, implante ou condição do paciente para realizar o exame é a de não realizar até que se saibam todas as informações. O médico radiologista é o responsável técnico pelo paciente e deve ser informado e consultado sempre que necessário para autorizar a entrada de uma paciente em sala e a realização do exame.

24. Marcapassos, Cardioversores e Outros Dispositivos Eletrônicos Presentes no Corpo

Até bem pouco tempo atrás, pacientes portadores de marcapassos e desfibriladores não podiam sequer entrar no setor de RM devido ao risco de interação desses implantes com o campo magnético.

Atualmente, marcapassos e desfibriladores cardíacos próprios para o ambiente da RM estão disponíveis e recebem a classificação de condicional, uma vez que a sua segurança depende da observação e realização do exame sob determinadas regras que dependerão de cada fabricante e cada modelo de dispositivo.

Recentemente, o CBR publicou um artigo *on-line* com orientações para realização de exames de RM em portadores de dispositivos eletrônicos cardíacos que deve ser consultado para uma visão mais ampla do assunto²⁵.

Marca-passos, desfibriladores, estimuladores e outros aparelhos eletricamente ativos e implantados no corpo precisam ser verificados e revisados quanto a sua classificação.

Até que isso ocorra, qualquer portador não pode entrar na sala de exames. O recomendado, por precaução, é que ele não acesse o setor.

A autorização para realização de exames nesses pacientes é de responsabilidade do radiologista (responsável técnico) em conjunto com o cardiologista do paciente responsável pelo dispositivo.

Dispositivos eletricamente ativos implantados no corpo, como marcapasso ou neuroestimuladores, ainda são motivo de grande preocupação e restrição no ambiente de RM. A conduta de liberação de um paciente portador desse tipo de dispositivo deve ser avaliada caso a caso e somente com uma pesquisa criteriosa será possível determinar se o implante é condicional, ou seja, pode realizar o exame (ou entrar na sala de exames), desde que sejam respeitadas as devidas recomendações estabelecidas pelo fabricante, ou se ele não é seguro.

Havendo dúvida, não se deve fazer o exame ou mesmo deixar que um paciente, acompanhante ou colaborador entre na sala de exames.

O procedimento pré-exame que se inicia no agendamento é fundamental para que a segurança dos pacientes seja avaliada e as ações no dia do exame sejam corretamente tomadas.

25. Meios de Contraste à Base de Gadolínio

O gadolínio é um metal do grupo das terras raras com número atômico de 64 e apresenta sete elétrons não pareados na eletrosfera, o que confere ao elemento a capacidade de tornar-se magnetizado enquanto submetido a um campo magnético, fenômeno conhecido como paramagnetismo.

De maneira bastante simplificada, cada molécula contendo gadolínio administrada a um paciente que se encontra no interior de um campo magnético, como em um equipamento de ressonância magnética, funciona como um

pequeno magneto, interagindo com moléculas de água (de milhares a milhões de vezes por segundo) e acelerando o relaxamento T1 e T2. Do ponto de vista prático, a aceleração do relaxamento pode ser traduzida como aumento de sinal, como evidenciado, por exemplo, nas sequências de imagem ponderadas em T1, em que tecidos com maior concentração de gadolínio apresentam maior intensidade de sinal.

Quanto maior for a capacidade de uma molécula contendo gadolínio induzir relaxamento T1 e T2, maior será a relaxatividade dessa molécula. Fatores como concentração, tamanho molecular, capacidade de ligação com a molécula de água e com proteínas humanas, temperatura e intensidade de campo magnético influenciam a relaxatividade das moléculas que contêm gadolínio.

26. Quelantes e Estabilidade dos Meios de Contraste à Base de Gadolínio

Em seres vivos, o gadolínio iônico (Gd^{3+}) é um forte competidor do cálcio iônico (Ca^{2+}), ocupando sítios de ligação desse último íon e exercendo efeitos tóxicos por meio de diversos mecanismos, destacando-se inibição da atividade enzimática, bloqueio de canais transportadores da membrana celular e ativação de células do sistema imunológico. A estabilização e neutralização dos efeitos deletérios dos íons de gadolínio é obtida pela ligação com moléculas denominadas quelantes. Do ponto de vista estrutural, existem dois tipos de quelantes: macrocíclicos (moléculas que envolvem completamente o íon de gadolínio) e lineares (moléculas que envolvem parcialmente o íon de gadolínio).

Uma molécula de gadolínio (quelante ligado ao gadolínio iônico) administrada a um ser vivo está sujeita à interação com diversos elementos, inclusive com aqueles que têm potencial de ocupar o sítio de ligação entre o gadolínio e o quelante, liberando o gadolínio iônico ao meio. O fenômeno da substituição do gadolínio iônico por outro elemento, com consequente liberação do gadolínio, é conhecido como transmetalção e encontra-se no centro da gênese dos efeitos adversos tardios aos meios de contraste à base de gadolínio (MCBG).

A superioridade dos quelantes macrocíclicos diante dos lineares na retenção do íon de gadolínio foi amplamente apresentada na literatura e atualmente é consenso que os quelantes macrocíclicos apresentam maior estabilidade e baixo risco de sofrer transmetalção^{26,27}.

27. Eventos Adversos Agudos aos Meios de Contraste à Base de Gadolínio

Eventos adversos agudos aos MCBG são raros, acontecendo em cerca de 0,07 a 2,4% das administrações em humanos. A maioria das reações adversas é leve e de natureza fisiológica (sensação de frio, calor ou dor no sítio de injeção, náuseas e/ou vômitos, cefaleia etc.). Reações de natureza alérgica podem ocorrer com frequência menor,

estimada entre 0,004 e 0,7%, enquanto reações alérgicas graves são ainda mais raras, estimadas em 0,001 a 0,01%²⁸.

A história de um evento adverso no passado é considerada como o principal preditor de uma nova reação adversa. Nesse cenário, estratégias como pré-medicação com corticosteroides e utilização um fármaco diferente do utilizado na primeira reação são estratégias que visam minimizar o risco de um novo evento adverso. Histórico de asma, múltiplas alergias e alergia aos meios de contraste iodados não aumentam de forma significativa o risco de uma reação adversa ao gadolínio e não determinam modificação da conduta na maioria das instituições^{28,29}.

A dispneia transitória relacionada ao meio de contraste gadoxetato dissódico é entendida como uma reação fisiológica, com duração de poucos minutos e que ocorre imediatamente após a administração endovenosa dessa substância. Alertar os pacientes sobre a possibilidade dessa reação fisiológica antes da administração do contraste é uma estratégia que pode minimizar artefatos de imagem na fase arterial do estudo²⁸.

Extravasamento do meio de contraste à base de gadolínio para o subcutâneo costuma ser um evento com mínima morbidade devido ao baixo volume administrado. Evitar cateteres venosos em veias muito periféricas continua sendo boa prática médica.

Os meios de contraste à base de gadolínio são drogas consideradas classe C pela FDA, agência reguladora norte-americana, para administração em pacientes grávidas e não devem ser utilizados rotineiramente. A administração é liberada para pacientes lactantes, não sendo necessária ou recomendável a suspensão da amamentação por qualquer período de tempo após a utilização do contraste³⁰.

28. Eventos Adversos Tardios aos Meios de Contraste à Base de Gadolínio

28.1. Fibrose nefrogênica sistêmica (FNS)

O primeiro relato da doença data do ano 2000³¹, entretanto a relação com a exposição ao gadolínio foi reconhecida somente em 2006³². Trata-se de uma condição que se estabelece em pacientes portadores de insuficiência renal (crônica ou aguda), desde dias até anos após a administração endovenosa do gadolínio. Agudamente, a doença manifesta-se com dor, prurido, edema e eritema da pele, inicialmente comprometendo os membros inferiores. Evolui com espessamento e fibrose cutânea, fibrose de órgãos internos (pulmão, coração, fígado, meninges, músculos etc.), resultando em contraturas de membros, insuficiência de diversos sistemas e finalmente morte³³.

Fatores de risco relacionados com o desenvolvimento de FNS são:

- insuficiência renal crônica com taxa de filtração glomerular (TFG) menor que 30 mL/min/1,73 m² de superfície corporal;
- insuficiência renal aguda;
- diálise^{28,29}.

Atualmente, a literatura divide os MCBG de acordo com o risco do desenvolvimento de FNS (Quadro 3)²⁸. As recomendações de uso baseiam-se no perfil do paciente e no tipo de contraste (Quadro 4)^{28,29}.

As recomendações para avaliação da função renal previamente à infusão dos MCBG diferem entre o ACR e a ESUR (Quadro 5)^{28,29}. Na opinião dos autores deste texto, as recomendações do ACR são mais facilmente inseridas na prática clínica, podem ser aplicadas durante o agendamento do exame e facilitam o atendimento do paciente.

Quadro 3. Classificação dos meios de contraste a base de gadolínio de acordo com o risco de fibrose nefrogênica sistêmica (FNS).

Risco de FNS	Substância	Comentários
Alto	Gadodiamida, gadopentetato dimeglumina, gadoversetamida	Quelantes lineares. Relacionados com a maioria dos casos de fibrose nefrogênica sistêmica.
Intermediário	Gadobenato de dimeglumina, gadoxetato dissódico	Quelantes lineares. Não estão associados de maneira clara com casos de FNS.
Baixo	Gadobutrol, gadoterato de meglumina, gadoteridol	Quelantes macrocíclicos. Não estão associados de maneira clara com casos de FNS.

Quadro 4. Recomendação de uso dos meios de contraste a base de gadolínio de acordo com o grupo de risco para fibrose nefrogênica sistêmica (FNS).

Risco de FNS	Recomendação de uso
Alto	Contraindicados em pacientes com insuficiência renal aguda e crônica (taxa de filtração glomerular — TFG < 30 mL/min) e em pacientes em diálise.
Intermediário	O Colégio Americano de Radiologia (ACR) não recomenda o uso em pacientes com insuficiência renal aguda ou crônica (TFG < 30 mL/min) e em pacientes em diálise. A Sociedade Europeia de Radiologia Urogenital (ESUR) recomenda uso com cautela nesse grupo de pacientes, com intervalo de pelo menos 7 dias entre doses. Trata-se de um grupo de contrastes que entraram no mercado após a instituição de medidas profiláticas para a FNS, cuja experiência é limitada quanto ao real risco de FNS.
Baixo	Tanto o ACR quanto a ESUR recomendam precaução no uso desses agentes de contraste em pacientes com insuficiência renal aguda ou crônica (TFG < 30 mL/min) e em pacientes em diálise. O uso deve ser avaliado pelo radiologista e justificado pela necessidade e ausência de método diagnóstico alternativo.

A utilização da equação da Chronic Kidney Disease Epidemiology Collaboration (CKD-EPI) para estimativa do cálculo da taxa de filtração glomerular deve ser preferida em relação às demais equações existentes. Para pacientes pediátricos, a equação de Schwartz “à beira do leito” deve ser utilizada²⁸. Diversos *websites* dispõem das calculadoras para acesso *on-line* gratuito³⁴.

O questionário de triagem proposto pelo ACR encontra-se no Quadro 6²⁸. Uma resposta positiva a qualquer um dos itens indica mensuração de creatinina sérica para cálculo da TFG até dois dias antes do exame de imagem com uso de gadolínio.

Hemodiálise não exerce fator protetor para o desenvolvimento de FNS em pacientes com insuficiência renal, apesar de ser capaz de eliminar da circulação os MCBG. Na eventualidade do uso de gadolínio em um paciente em hemodiálise, recomenda-se que a injeção ocorra o mais próximo possível da próxima sessão de hemodiálise. Não existe recomendação para múltiplas sessões de hemodiálise após a infusão de gadolínio²⁸.

28.2. Depósito/Retenção de Gadolínio

Após o trabalho publicado por Tomonori Kanda, em 2014³⁵, relacionando hiperintensidade de sinal nos núcleos da base do cérebro com a presença de gadolínio, foi iniciada uma ampla discussão na literatura sobre a segurança desses medicamentos. Em 2017, a Agência Europeia de Medicamentos (EMA) orientou a retirada de todos os MCBG com quelantes lineares do mercado (gadodiamida, gadopentetato dimeglumina e gadoversetamida), com exceção dos utilizados para estudos hepáticos (gadobenato de dimeglumina e gadoxetato dissódico)³⁶. Na mesma ocasião, a FDA manifestou-se favoravelmente à manutenção da comercialização dos MCBG lineares,

Quadro 5. Recomendações sobre triagem de função renal de acordo com o risco de fibrose nefrogênica sistêmica (FNS) conforme manuais do Colégio Americano de Radiologia (ACR) e da Sociedade Europeia de Radiologia Urogenital (ESUR).

Risco de FNS	ACR	ESUR
Alto	Aplicação de questionário de triagem.	Mensuração da creatinina e cálculo da TFG obrigatória.
Intermediário	Aplicação de questionário de triagem.	Aplicação de questionário de triagem.
Baixo	Avaliação da função renal é dispensável pelo baixo risco de FNS.	Aplicação de questionário de triagem.

ACR: Colégio Americano de Radiologia; ESUR: Sociedade Europeia de Radiologia Urogenital; TFG: taxa de filtração glomerular.

Quadro 6. Questionário para triagem de função renal de acordo com o Colégio Americano de Radiologia (ACR).

O paciente possui algum dos fatores de risco?
➔ História de doença renal, incluindo: diálise no passado, transplante renal, rim único, cirurgia renal, câncer renal.
➔ Hipertensão tratada com medicamentos.
➔ Diabetes <i>mellitus</i> .

pela ausência de dados que demonstrem dano aos pacientes nos quais são identificados sinais de depósito/retenção de gadolínio³⁷. Ao final do ano de 2017, a FDA atualizou seu posicionamento, alertando sobre a possibilidade de retenção dos MCBG, solicitando estudos adicionais de segurança e recomendando maiores esclarecimentos aos pacientes candidatos ao uso de gadolínio³⁸. No mercado norte-americano, assim como no brasileiro, a venda dos MCBG com quelantes lineares e macrocíclicos encontra-se liberada. Não há, até o presente momento, estudos que demonstrem prejuízo aos pacientes nos quais são identificadas hiperintensidades cerebrais relacionadas ao depósito/retenção de gadolínio²⁸.

A teoria mais aceita para o depósito/retenção cerebral de gadolínio relaciona-se com o sistema linfático³⁹. De maneira bastante simplificada, os MCBG cruzam os capilares fenestrados dos plexos coroides, ganhando acesso ao sistema liquorico. Desse ponto, acessam os espaços perivasculares (de Virchow-Robin) e, por meio deles, a profundidade do cérebro. Em regiões de maior metabolismo, os MCBG de menor estabilidade podem sofrer transmetalção, liberando moléculas de gadolínio ao meio, as quais podem se depositar em compostos insolúveis ou conectar-se a macromoléculas, formas não passíveis de eliminação. O aumento da intensidade de sinal possivelmente está relacionado com a ligação do gadolínio iônico a macromoléculas cerebrais^{40,41}.

A presença de MCBG macrocíclicos também é documentada nos núcleos cerebrais. Observa-se, entretanto, redução gradual da concentração dessa substância ao longo do tempo, sugerindo a presença da forma solúvel (ligada ao quelante), passível de eliminação⁴¹.

Reiteramos a ausência de evidência na literatura que demonstre alterações histológicas que sugiram neurotoxicidade dos depósitos de gadolínio e estudos que demonstrem prejuízo cognitivo aos pacientes nos quais são identificadas hipertensididades²⁸. Esse assunto encontra-se em discussão, sendo recomendável ao leitor atenção às frequentes atualizações da literatura corrente⁴².

29. Gravidez e Ressonância Magnética

Uma pergunta frequente em RM é se pacientes gestantes ou com suspeita de gestação podem realizar exames. Ou, ainda, se trabalhadoras grávidas podem trabalhar no setor de RM ou, mais especificamente, dentro da sala de exames.

Não existe nenhuma evidência na literatura científica que sustente efeitos biológicos adversos que possam vir a ser causados à mãe ou ao feto no ambiente de RM ou durante o exame, e isso vale para qualquer estágio da gravidez.

A recomendação atual^{26,43} é que todo exame de RM em paciente gestante seja discutido e avaliado pelo médico radiologista e pelo médico solicitante de forma a encontrar alternativas que também não envolvam riscos, como a radiação ionizante, para a busca do diagnóstico. O exame de RM em gestantes deve ser autorizado pelo médico radiologista e este pode utilizar esta série de perguntas propostas por Patrick M. Colletti⁴³ para sua tomada de decisão final:

- O exame é realmente necessário?;
- A paciente está grávida?;
- A ultrassonografia já seria satisfatória para o diagnóstico?;
- O exame de RM é apropriado para responder à questão clínica?;
- O exame de RM pode aguardar até o final da gestação?;
- A intervenção obstétrica antes do exame de RM é uma possibilidade?;
- O término da gravidez está sendo considerado?;
- O parto prematuro pode ser considerado?

No caso de trabalhadoras gestantes no setor de RM, as recomendações, as quais não estão baseadas em qualquer indício de efeitos adversos, mas sim em um princípio conservativo e de prevenção, são:

- reduzir o tempo de permanência dentro da zona IV, evitando, assim, que sua movimentação em relação ao campo magnético possa gerar sensações de vertigem, especialmente se tratando de equipamentos de 3T;
- não permanecer na sala durante a aquisição de imagens. Não por causa da RF ou dos gradientes de campo, mas devido ao alto ruído sonoro produzido pelo equipamento;
- criar uma rotina e fazer constar da política de segurança em RM da instituição essas recomendações e observações.

30. Situações de Emergência

A conduta em relação a algumas situações de emergência no ambiente da RM difere de outros locais, pois existe sempre o risco iminente do campo magnético do equipamento.

Dessa forma, é preciso pensar nas diversas situações de emergência em que o campo magnético ativo pode interferir num resgate, vistoria do local ou mesmo na aproximação de pessoas estranhas ao setor de RM.

Dois situações são especialmente importantes, pois podem ocorrer em qualquer serviço de RM: parada cardiorrespiratória e incêndio.

30.1. Parada Cardiorrespiratória

O atendimento a um paciente em parada cardiorrespiratória ou qualquer outra situação que exija atendimento do paciente não deve ser feito dentro da sala de exames.

Se o paciente estiver realizando o exame ou estiver sob a mesa de exames, a equipe deve estar treinada para retirar o paciente da maca e removê-lo da sala de exames antes de iniciar o atendimento de parada ou outro que exija equipamentos não seguros para RM e/ou equipe de fora do setor (colaboradores não RM). O risco de algum material ferromagnético ser utilizado nesse atendimento (por exemplo, carro de parada) pode colocar em risco a vida do paciente e de todos ao seu redor.

30.2. Incêndio no Setor de Ressonância Magnética

Importante diferenciar dois tipos de incêndio, pois as condutas serão diferentes: foco na sala de exames e incêndio incontrolável no setor ou no prédio.

Antes de tudo, é fundamental retirar o paciente da mesa ou da sala de exames e conduzir ele para um local seguro ou para fora do prédio.

Um foco de incêndio na sala de exames ou mesmo no magneto deve ser combatido com uso de extintores de incêndio não ferromagnéticos que devem estar em quantidade suficiente no setor (Zona III) e devidamente identificados. Não é necessário, neste caso, acionar o botão de *quench*. Somente se o foco ficar incontrolável e se tornar um incêndio.

Na eventualidade de um incêndio atingir o setor e se aproximar da sala do magneto ou mesmo estar ocorrendo de forma incontrolável na sala de exames, a equipe deve estar treinada para realizar o procedimento de desligamento do campo magnético (procedimento de *quenching*) e evacuar o setor.

Caso não seja possível acionar o botão de *quench*, pessoas da equipe de RM ou que tenham treinamento de segurança em RM devem avisar aos brigadistas da instituição ou o corpo de bombeiros que naquele local existe um equipamento de RM com o campo magnético ativo, salientando os riscos e como podem acionar o botão de *quench*.

Importante destacar que o hélio não é inflamável e não apresenta risco direto em casos de incêndio. No momento de um *quench*, a saída do gás hélio por meio do tubo de *quench* para fora do prédio pode apresentar algum problema e uma parte ou a totalidade do gás ir para dentro da sala de exame. Sendo assim, o primeiro risco é o de asfixia por substituição do ar ambiente pelo gás hélio; e o segundo é o gás supergelado formar oxigênio líquido nessa região e, este sim — por ser altamente inflamável, aumentar o risco de incêndio.

É recomendável que o setor tenha extintores não ferromagnéticos para o combate a focos de incêndio na sala do magneto, pois do contrário os cilindros convencionais ferromagnéticos serão atraídos pelo campo, podendo resultar em acidente com os presentes na sala do magneto e quebra do equipamento de RM.

31. Treinamentos e Educação Continuada

Apesar de ser este o último tópico desta revisão, consideramos esse o ponto mais importante, pois a educação e, especialmente, a educação continuada e de qualidade são o que garante a máxima segurança em qualquer atividade que ofereça risco⁴⁴.

Recomendamos que, no mínimo, um treinamento anual deve ser realizado por profissional capacitado para todos os envolvidos com o setor de RM e os conteúdos devem abranger os tópicos relatados acima. Entendem-se todos os envolvidos como não somente os colaboradores do setor de RM, mas também o grupo de enfermagem de outros setores da clínica ou do hospital, higienização, segurança patrimonial, brigada de incêndio, agendamento de exames, recepção, manutenção, engenharia clínica, segurança do trabalho e quaisquer outros profissionais internos ou externos que, por algum motivo, tenham de adentrar no setor de RM.

O treinamento deve ser repetido para colaboradores novos (novas contratações), especialmente que irão atuar diretamente na sala de exames. Uma regra importante que pode ser estabelecida em cada instituição é a de somente permitir que pessoas com treinamento em segurança em RM, comprovado e registrado no setor de pessoal ou recursos humanos, entrem na Zona III e na Zona IV (sala do magneto). Essa medida é especialmente importante se considerarmos as equipes de anestesia (médicos anestesistas), pessoal de higienização, manutenção e segurança patrimonial. Esses profissionais nem sempre atuam diretamente no setor e têm rotatividade alta.

32. Conclusão

Esta revisão de segurança em RM deve servir de base para aumentar a cultura de segurança em cada local que tem um equipamento de RM, por meio da propagação de boas práticas, políticas, rotinas e treinamentos contínuos. Buscamos, assim, englobar nesta revisão todos os riscos relacionados à imagem por RM, bem como sugestões e recomendações que garantam a segurança de pacientes, acompanhantes, trabalhadores e indivíduos em geral no ambiente de RM.

Agradecimentos

Agradecemos à equipe de contribuidores do MRIONLINE Protocols & Education, aos colegas da PhyMED Consultores em Física Médica e Radioproteção e a tantos bons profissionais que o convívio diário nos serviços de RM nos proporciona.

Referências

1. Mazzola AA. Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional. RBFM. 2009;3(1):117-29. <http://dx.doi.org/10.29384/rbfm.2009.v3.n1.p117-129>
2. Sherlock FG, Crues JV. MR Safety and the American College of Radiology White Paper. Am J Roentgenol. 2002;178(6):1349-52. <https://doi.org/10.2214/ajr.178.6.1781349>
3. Kanal E, Borgstede JP, Barkovich AJ, Bell C, Bradley WG, Etheridge S, Felmler JP, et al. American College of Radiology White Paper on MR Safety: 2004 Update and Revisions. Am J Roentgenol. 2004;182(5):1111-4. <https://doi.org/10.2214/ajr.182.5.1821111>
4. Sherlock FG, Crues JV. MR Procedures: Biologic Effects, Safety and Patient Care. Radiology. 2004;232(3):635-52. <https://doi.org/10.1148/radiol.2323030830>
5. Kanal E, Barkovich AJ, Bell C, Borgstede JP, Bradley WG, Froelich JW, et al. ACR Guidance Document for Safe MR Practices: 2007. Am J Roentgenol. 2007;188(6):1447-74. <https://doi.org/10.2214/AJR.06.1616>
6. Kanal E, Barkovich AJ, Bell C, Borgstede JP, Bradley WG, Froelich JW, et al. ACR Guidance Document on MR Safe Practices: 2013. J Magn Reson Imaging. 2013;37(3):501-30. <https://doi.org/10.1002/jmri.24011>
7. Medicines and Healthcare products Regulatory Agency. Device Bulletin: Safety Guidelines for Magnetic Resonance Imaging Equipment in Clinical Use. Medicines and Healthcare products Regulatory Agency; 2007.

8. MRI Working Group. Using MRI Safely: Practical Rules for Employees. MRI Working Group; 2008.
9. CBR. Norma Programa de Acreditação em Diagnóstico por Imagem. Versão 4. CBR; 2019.
10. Pennsylvania Patient Safety Authority. Magnetic Resonance I Patient Safety Topic [Internet]. Pennsylvania Patient Safety Authority [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: http://patientsafety.pa.gov/pst/Pages/Magnetic_Resonance/hm.aspx#
11. Bashein G, Syrovoy G. Burns Associated with Pulse Oximetry during Magnetic Resonance Imaging. *Anesthesiology*. 1991;75(2):382-3. <https://doi.org/10.1097/0000542-199108000-00043>
12. Boy, 6, Killed in Freak MRI Accident. ABC News [Internet]. [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <https://abcnews.go.com/US/story?id=92745&page=1>
13. Clausen L, Cook J, Garlock A, Perkins A, Pierce B, Seitz K, et al. Radiological Technologist Best Practices for MR Safety [Internet]. American Society of Radiologic Technologists; 2018 [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: https://www.asrt.org/docs/default-source/research/whitepapers/asrt18_mrsafetywhitepaper.pdf?sfvrsn=ca0222d0_8
14. Kugel H, Bremer C, Püschel M, Fischbach R, Lenzen H, Tombach B, et al. Hazardous situation in the MR bore: induction in ECG leads causes fire. *Eur Radiol*. 2003;13(4):690-4. <https://doi.org/10.1007/s00330-003-1841-8>
15. Haik J, Daniel S, Tessone A, Orenstein A, Winkler E. MRI induced fourth-degree burn in an extremity, leading to amputation. *Burns*. 2009;35(2):294-6. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2007.11.008>
16. Wynn K. Man stabbed in eye during brain scan. NZHerald [Internet]. 2014 [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: https://www.nzherald.co.nz/nz/news/article.cfm?c_id=1&objectid=11359290
17. Bloom D. Two Hospital Workers Spend FOUR HOURS Pinned to MRI Machine in India. Daily Mail Online [Internet]. 2014 [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-2890088/Two-hospital-workers-spend-FOUR-HOURS-pinned-MRI-machine-metal-oxygen-tank-catapulted-room-device-s-giant-magnet-turned-on.html>
18. G1. Equipamento de ressonância magnética “suga” arma de PM em SC. G1 [Internet]. 2015 [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2015/08/equipamento-de-ressonancia-magnetica-suga-arma-de-pm-em-sc.html>
19. Firstpost. Mumbai MRI Death: Nair Hospital Radiologist Arrested in Connection to Rajesh Maru's Death, Released on Bail. Firstpost [Internet]. 2018 [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <https://www.firstpost.com/india/mumbai-mri-death-nair-hospital-radiologist-arrested-in-connection-to-rajesh-marus-death-released-on-bail-4332759.html>
20. ASTM F2503-13, Standard Practice for Marking Medical Devices and Other Items for Safety in the Magnetic Resonance Environment. West Conshohocken: ASTM International; 2013.
21. IEC 60601-2-33, Medical Electrical Equipment - part 2: particular requirements for safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. In: International Electrotechnical Commission (IEC); 2010.
22. Allison J, Yanasak N. What MRI Sequences Produce the Highest Specific Absorption Rate (SAR), and Is There Something We Should Be Doing to Reduce the SAR During Standard Examinations? *Am J Roentgenol*. 2015;205(2):W140. <https://doi.org/10.2214/AJR.14.14173>
23. Shellock FG. Screening Form [Internet]. [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <http://www.mrisafety.com/ScreeningForm.html>
24. Shellock FG. MRI Safety: The List [Internet]. [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <http://www.mrisafety.com/List.html>
25. CBR. Orientações para realização de exames de ressonância magnética em portadores de dispositivos eletrônicos cardíacos [Internet]. CBR. 2018 [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <https://cbr.org.br/orientacoes-para-realizacao-de-exames-de-ressonancia-magnetica-em-portadores-de-dispositivos-eletronicos-cardiacos/>
26. Morcos SK. Extracellular gadolinium contrast agents: differences in stability. *Eur J Radiol*. 2008;66(2):175-9. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2008.01.025>
27. Frenzel T, Lengsfeld P, Schirmer H, Hütter J, Weinmann HJ. Stability of gadolinium-based magnetic resonance imaging contrast agents in human serum at 37 degrees C. *Invest Radiol*. 2008;43(12):817-28. <https://doi.org/10.1097/RLI.0b013e3181852171>
28. ACR. Manual on Contrast Media. ACR; 2018.
29. ESUR. Guidelines on Contrast Agents. ESUR; 2018.
30. Tirada N, Dreizin D, Khatri NJ, Akin EA, Zeman RK. Imaging Pregnant and Lactating Patients. *Radiographics*. 2015;35(6):1751-65. <https://doi.org/10.1148/rg.2015150031>
31. Cowper SE, Robin HS, Steinberg SM, Su LD, Gupta S, LeBoit PE. Scleromyxoedema-like cutaneous diseases in renal-dialysis patients. *Lancet*. 2000;356(9234):1000-1. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02694-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02694-5)
32. Grobner T. Gadolinium--a specific trigger for the development of nephrogenic fibrosing dermopathy and nephrogenic systemic fibrosis? *Nephrol Dial Transplant*. 2006;21(4):1104-8. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfk062>
33. Girardi M, Kay J, Elston DM, Leboit PE, Abu-Alfa A, Cowper SE. Nephrogenic systemic fibrosis: clinicopathological definition and workup recommendations. *J Am Acad Dermatol*. 2011;65(6):1095-106.e7. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2010.08.041>
34. National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Glomerular filtration rate (GFR) calculators [Internet]. National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. [acessado em 01 fev. 2019]. Disponível em: <https://www.niddk.nih.gov/health-information/communication-programs/nkdep/laboratory-evaluation/glomerular-filtration-rate-calculators>
35. Kanda T, Ishii K, Kawaguchi H, Kitajima K, Takenaka D. High signal intensity in the dentate nucleus and globus pallidus on unenhanced T1-weighted MR images: relationship with increasing cumulative dose of a gadolinium-based contrast material. *Radiology*. 2014;270(3):834-41. <https://doi.org/10.1148/radiol.13131669>
36. EMA. EMA's final opinion confirms restrictions on use of linear gadolinium agents in body scans. EMA; 2017.
37. FDA. FDA Drug Safety Communication: FDA identifies no harmful effects to date with brain retention of gadolinium-based contrast agents for MRIs; review to continue. FDA; 2017.
38. FDA. FDA Drug Safety Communication: FDA evaluating the risk of brain deposits with repeated use of gadolinium-based contrast agents for magnetic resonance imaging (MRI). FDA; 2017.
39. Jessen NA, Munk AS, Lundgaard I, Nedergaard M. The Glymphatic System: A Beginner's Guide. *Neurochem Res*. 2015;40(12):2583-99. <https://doi.org/10.1007/s11064-015-1581-6>
40. Frenzel T, Apte C, Jost G, Schöckel L, Lohrke J, Pietsch H. Quantification and Assessment of the Chemical Form of Residual Gadolinium in the Brain After Repeated Administration of Gadolinium-Based Contrast Agents: Comparative Study in Rats. *Invest Radiol*. 2017;52(7):396-404. <https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000000352>
41. Robert P, Fingerhut S, Factor C, Vives V, Letien J, Sperling M, et al. One-year Retention of Gadolinium in the Brain: Comparison of Gadodiamide and Gadoterate Meglumine in a Rodent Model. *Radiology*. 2018;288(2):424-33. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018172746>
42. McDonald RJ, Levine D, Weinreb J, Kanal E, Davenport MS, Ellis JH, et al. Gadolinium Retention: A Research Roadmap from the 2018 NIH/ACR/RSNA Workshop on Gadolinium Chelates. *Radiology*. 2018;289(2):517-34. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018181151>
43. Shellock FG, Crues JV, Karacozoff AM. MRI Bioeffects, Safety, and Patient Management. Los Angeles: Biomedical Research Publishing Group; 2014.
44. Crisp S, Dawdy K. Building a Magnetic Resonance Imaging Safety Culture from the Ground Up. *J Med Imaging Radiat Sci*. 2018;49(1):18-22. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2017.10.005>