



Autora: Flávia Beatriz Custódio

MINERAIS E CONTAMINANTES METÁLICOS EM ALIMENTOS

Os minerais são nutrientes fundamentais na dieta humana. A demanda desses nutrientes é constante, mas em doses baixas. Quando ingeridos em concentrações elevadas, alguns minerais podem ser tóxicos. Estão presentes em produtos de origem vegetal e animal em diferentes proporções e disponibilidade para serem absorvidos.

Este capítulo abordará as principais características químicas dos minerais e suas fontes alimentares. Serão apresentados alguns fatores que impactam na variação dos teores e biodisponibilidade desses nutrientes nos alimentos. Além disso, serão apresentados alguns aspectos relacionados aos minerais que podem ser considerados como contaminantes em alimentos e apresentarem efeitos tóxicos.



7 MINERAIS E CONTAMINANTES METÁLICOS EM ALIMENTOS

Os minerais são nutrientes que estão presentes em alimentos de origem vegetal e animal em diferentes proporções e tem diversas funções nos organismos vivos. Na aplicação da alimentação e nutrição, consideram-se minerais os nutrientes que não contém carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio em sua forma elementar. Podem ser definidos também como os constituintes que permanecem na cinza após combustão da matéria orgânica.

Os minerais podem ser classificados em macroelementos, quando a ingestão diária recomendada é maior do que 50 mg (cálcio, fósforo, sódio, potássio, enxofre, magnésio, cloreto) e em microelementos ou elementos traços, quando necessários em quantidades menores que 50 mg/dia (ferro, iodo, manganês, zinco, selênio, cobre, molibdênio, cobalto, flúor). Os macroelementos constituem 60 a 80% de todo material inorgânico no corpo humano e apresentam elevada frequência nos alimentos em geral.

7.1 QUÍMICA DOS MINERAIS

Os minerais em alimentos estão presentes em diversas formas ou espécies, representados por complexos ou íons livres. A forma em que o mineral está presente no alimento afeta sua reatividade e solubilidade em água e consequentemente influencia sua absorção, seu efeito biológico e sua estabilidade ao processamento. Os elementos dos grupos I-A e VII-A da tabela periódica são encontrados nos alimentos predominantemente como espécies iônicas livres (Na^+ , K^+ , Cl^- e F^-) e apresentam boa solubilidade em água.

A maioria dos outros minerais está presente como complexos coordenados fracos, quelatos ou ânions que contêm oxigênio. Dentre os ânions, destacam-se pelo aspecto nutricional o iodeto (I^-) ou o iodato (IO_4^-) e os fosfatos nas suas diversas formas de ionização (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , PO_4^{-3} , H_2PO_4^- e H_3PO_4). Os cátions são representados por uma ampla gama de substâncias e complexos, importantes pelos aspectos nutricional ou tóxico. Os complexos resultantes das reações entre os minerais catiônicos e outros componentes dos alimentos abrangem desde hidratos de metal a pigmentos que contêm minerais e enzimas (metaloenzimas). Exemplos de íons presentes nos alimentos ligados a moléculas orgânicas incluem o ferro presente no grupo heme, o cobre nos citocromos, o magnésio na clorofila e o cobalto na vitamina B_{12} (Figura 1).

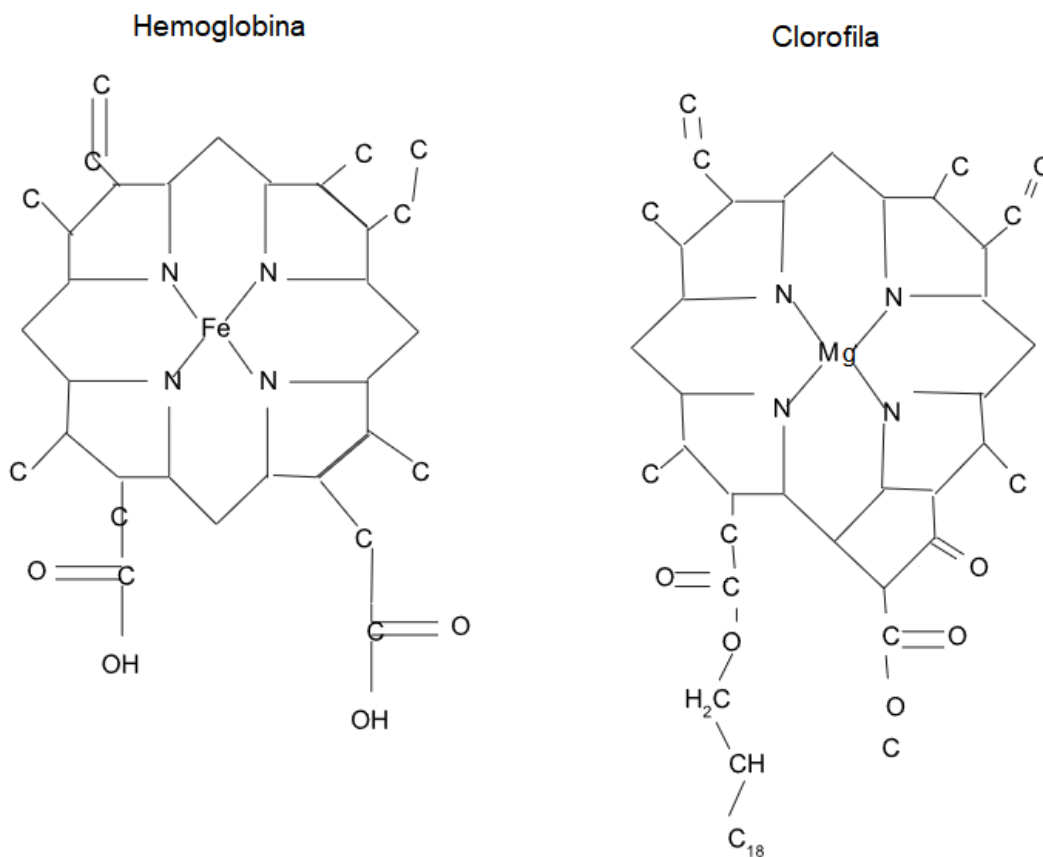


Figura 1 - Representação parcial das estruturas moleculares da hemoglobina e clorofila, com destaque para a presença do ferro e do magnésio, respectivamente, no complexo metálico.

Fonte: Adaptado de Jcauctkting (2016).

Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hemoglobin-Chlorophyll.svg>.

Acesso em 07 abr. 2021.

Na formação de complexos, as espécies ligantes são classificadas de acordo com o número de ligações que podem formar com um elemento. As espécies são denominadas ligantes monodentados, como a água e a amônia, quando são capazes de formar uma ligação e em geral, ligantes multidentados, como o oxalato, a glicina, o EDTA (íon etileno diamino-tetracético) e os fitatos (Figura 2), quando podem formar duas ou mais ligações. O complexo resultante da combinação de um íon metálico com um ligante multidentado, resultando em uma estrutura de anel que inclui o íon metálico é conhecido como quelato. Os quelatos são muito importantes em alimentos e em todos os sistemas biológicos, devido a maior estabilidade quando comparados a complexos metálicos que não são quelatos.

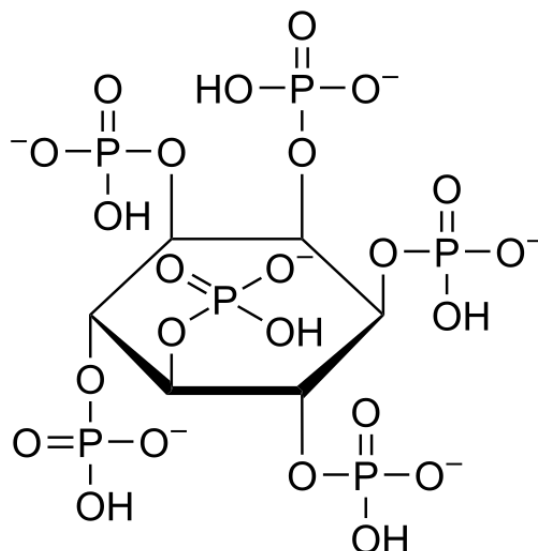


Figura 2 - Estrutura química do fitato, também conhecido como hexafosfato de *mio*-inositol, que apresenta capacidade ligante em cada grupo fosfato.

Fonte: Hbf878 (2018). Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Phytate.svg>. Acesso em 07 abr. 2021.

7.2 BIODISPONIBILIDADE DOS MINERAIS

O conteúdo de minerais em um alimento não implica necessariamente que esses nutrientes estejam disponíveis para exercer suas funções no organismo humano. Os minerais presentes nos alimentos, em geral, encontram-se já complexados ou podem interagir com outros compostos no trato digestório. Essas interações podem influenciar a absorção e o aproveitamento dos minerais de forma positiva ou negativa. Além da interferência durante a absorção, os minerais estão sujeitos a alterações desde seu transporte pela corrente sanguínea até a sua eliminação do organismo, afetando suas funções biológicas.

O termo biodisponibilidade compreende a proporção de nutrientes alimentares ingeridos, que foram efetivamente absorvidos e utilizados. Para isso é necessário considerar o nutriente desde a absorção ou captação pela mucosa intestinal, passando pela distribuição e assimilação celular, até a conversão em sua forma biologicamente ativa. A avaliação da ingestão alimentar de cada substância deve considerar a quantidade consumida na refeição a partir dos teores de minerais encontrados nos alimentos, mas também a especiação do elemento; as ligações moleculares; a matriz alimentar (característica do alimento); a presença de inibidores da absorção; o estado nutricional do indivíduo; os fatores genéticos; os fatores relacionados ao indivíduo, como ciclo da vida; e a ocorrência de interações positivas ou negativas.

Para os minerais, a biodisponibilidade é geralmente baixa, podendo variar de 2 a 50%, com algumas exceções, como o sódio e o potássio, que apresentam ampla absorção. Na tabela 1, é possível observar a redução nos teores de ferro, zinco e cálcio presentes nos diferentes alimentos após digestão enzimática *in vitro*. O grau de liberação de minerais de produtos alimentares pode variar consideravelmente, dependendo do tipo de mineral, item alimentar e sua composição matricial.

A retenção dos minerais no organismo é dependente de fatores extrínsecos, ou seja, condições relacionadas ao nutriente, e fatores intrínsecos, relacionados ao indivíduo e suas condições fisiológicas prevalentes. Os fatores extrínsecos geralmente estão intimamente associados à composição do alimento e da dieta do indivíduo, enquanto os fatores intrínsecos estão relacionados à distribuição dos nutrientes pelo organismo, mobilização, ativação, armazenamento ou excreção.

Os fatores extrínsecos estão relacionados ao aumento ou à redução da absorção dos minerais em função das variações nas condições de osmolaridade e pH, que favorecem a ocorrência de reações químicas, reduções e oxidações, adsorções entre os diversos componentes do alimento, reações de solubilização e precipitação dos minerais e competições entre os nutrientes ou competições por quelantes presentes.

Os minerais, para serem absorvidos, devem inicialmente ser extraídos da matriz alimentar e devem ser solubilizados no meio aquoso gastrointestinal. Dessa forma, é importante considerar a forma química ou espécie do mineral ingerido para se avaliar sua absorção e conseqüentemente sua biodisponibilidade. Os minerais são muito instáveis nas condições do meio intraluminal. Sua solubilidade no meio aquoso do trato digestório é influenciada pelo gradiente de pH e por sua valência e pela presença de componentes orgânicos reativos. Por exemplo, quanto mais alcalino o meio, menor será a solubilidade dos sais de cálcio e com isso menor a absorção. O fosfato inorgânico também tem sua absorção aumentada em valor de pH ligeiramente ácido.

Os minerais nas formas ou complexos orgânicos apresentam conformação mais estável, menos influenciada pelas variações de pH do trato gastrointestinal. São menos ou nada reativos e mais solúveis nas condições presentes no lúmen. Os quelatos de ferro, zinco e cálcio são as formas preferidas a serem utilizadas nos suplementos alimentares ou para a fortificação e enriquecimento de alimentos, pela estabilidade no meio intraluminal e elevada biodisponibilidade.

Tabela 1 - Teores de ferro em diferentes alimentos e teores disponíveis após digestão enzimática *in vitro*

Alimento	Teor de ferro (mg/100 g b.s.)	Ferro disponível (mg/100 g b.s.)	Redução (%)	Teor de zinco (mg/100 g b.s.)	Zinco disponível (mg/100 g b.s.)	Redução (%)	Teor de cálcio (mg/100 g b.s.)	Cálcio disponível (mg/100 g b.s.)	Redução (%)
Cevada	2,7	0,16	94,1	2,0	0,59	70,5	78,4	23,8	69,6
Milho	0,75	0,24	68,0	0,76	0,63	17,1	14,5	7,5	48,3
Cuscuz (trigo)	2,0	0,28	86,0	1,7	0,27	84,1	86,5	16,6	80,8
Arroz polido	0,67	0,16	76,1	1,6	0,48	70,0	23,6	14,7	37,7
Arroz integral	1,0	0,15	85,0	1,8	0,73	59,4	37,2	10,3	72,3
Feijão vermelho	3,5	0,33	90,6	1,9	1,0	47,4	30,5	8,4	72,5
Ervilha	3,8	0,96	74,7	1,8	1,3	27,8	69,3	29,1	58,0
Lentilha	5,3	1,7	67,9	2,3	2,1	8,7	48,4	28,5	41,1
Castanha do Brasil	2,2	0,64	68,0	2,4	0,50	79,2	170,3	32,6	80,9
Castanha de caju	5,4	2,8	48,1	3,0	1,6	46,7	24,1	6,9	71,4
Amêndoa	2,5	0,05	98,0	1,5	0,03	98,0	132,4	15,3	88,4
Noz	2,1	0,06	97,1	1,8	0,21	88,3	73,1	5,5	92,5

Fonte: Adaptado de Suliburska e Krejpcio (2014).

Leg.: b.s.: base seca.

7.2.1 Fatores facilitadores da biodisponibilidade

Alguns facilitadores podem ter sua ação baseada na melhoria da captação de nutrientes pela mucosa intestinal. Refeições ricas em proteínas têm a propriedade de aumentar a captação de nutrientes minerais pela mucosa em consequência da aceleração do fluxo sanguíneo, gerada pela entrada significativa e concomitante de aminoácidos ao enterócito. Além disso, quando quelados aos aminoácidos, os microelementos são absorvidos com eles e são menos influenciados pelo pH intraluminal ou pela presença de antagonistas. Estudos realizados com ferro, cálcio, zinco e selênio mostram incrementos de até 15% na absorção destes minerais nessas situações. A absorção de selênio parece ser melhorada na presença de maiores quantidades de aminoácidos sulfurados, presentes em carnes e ovos.

Ácidos orgânicos, como os ácidos cítrico, ascórbico e láctico, são fortes promotores da absorção de alguns minerais. Supõe-se que esses ácidos orgânicos melhoram a biodisponibilidade por formar quelatos solúveis com o mineral. O ácido ascórbico é, em especial, um potente facilitador da absorção de ferro, pois além da formação de quelante solúvel, ele apresenta poder redutor, promovendo a redução de Fe^{+3} para Fe^{+2} , que apresenta maior solubilidade e biodisponibilidade.

Outro exemplo de facilitador é o calcitriol (forma ativa da vitamina D), que promove a absorção intestinal do cálcio por favorecer o transporte ativo dos íons cálcio. Além disso, o calcitriol parece reduzir o efeito dos fitatos, provavelmente pelo estímulo na produção de fitase pelas células da mucosa intestinal.

7.2.2 Fatores inibidores da biodisponibilidade

Interações antagonistas e a saturação de receptores específicos na mucosa intestinal são eventos inibidores da absorção e do aproveitamento dos minerais. Os antagonismos ocorrem pela competição entre dois nutrientes ou com outros componentes dos alimentos de configuração química similar, por ligação a sítios comuns de absorção na mucosa intestinal, proteínas plasmáticas transportadoras ou mesmo no nível metabólico por sítios alostéricos de enzimas. Por exemplo, a relação cálcio-fósforo durante a digestão parece ser importante, devendo estar em torno de 1:1 para que a absorção de ambos se processe normalmente. Uma proporção maior de cálcio prejudica a absorção de fósforo.

A ingestão de minerais, quando excessiva e/ou desbalanceada, induz à ocorrência de interações entre eles, causando efeitos negativos na absorção e no metabolismo. A suplementação de cálcio administrada de forma inadequada pode induzir à anemia,

bloqueando a absorção e o transporte de zinco e de ferro. O mesmo pode ocorrer com a suplementação de zinco, induzindo anemia e hipocupremia; ou com a suplementação de ferro, reduzindo a captação de zinco pela mucosa, seu armazenamento no enterócito, transporte e distribuição pelo organismo.

Dentre os inibidores da absorção de minerais, predominam os presentes em produtos de origem vegetal. Destacam-se os fitatos, hemiceluloses, oxalatos, fosfatos e polifenóis. Dentre os inibidores presentes em produtos de origem animal, têm-se as fosfoproteínas, componentes do leite e dos ovos.

O ácido fítico e seus complexos de minerais (fitatos) são as principais formas de armazenamento de fósforo em sementes, como fosfato. Esses grupos fosfatos são ionizados em pH fisiológico e com isso, o ácido fítico é um potente quelante de cátions, em especial de minerais di e trivalentes, como Ca^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , Zn^{+2} e Mg^{+2} , formando quelatos com baixa biodisponibilidade. Apesar do ácido fítico reduzir a biodisponibilidade de importantes minerais, a sua eliminação, como estratégia de melhora nutricional do alimento, tem sido questionada, devido a evidências que indicam que ele tem efeito protetor contra alguns tipos de câncer e outros efeitos benéficos. Para mais informações sobre os efeitos antinutricionais e protetores do ácido fítico, consulte as referências Schlemmer *et al.* (2009), Kumar *et al.* (2010), Vucenik (2019) e Omoruyi *et al.* (2020).

Taninos e demais compostos polifenólicos presentes em diversos alimentos podem reduzir a biodisponibilidade de ferro das refeições em até 50%. O efeito inibidor marcante ocorre mais em função da quantidade de taninos, do que de suas espécies. Os oxalatos têm ação inibidora mais branda, mas pode impactar o aproveitamento do cálcio e do ferro.

7.3 ASPECTOS NUTRICIONAIS DOS MINERAIS

Os minerais não apresentam características energéticas e sim uma variedade de funções no organismo humano. Mais de um quarto de todas as enzimas conhecidas necessitam de cátions metálicos para exercer sua atividade catalítica (MORAN *et al.*, 2013). Além disso, são identificadas outras diversas funções como regulação do equilíbrio ácido-base dos líquidos corporais e pressão osmótica, regulação da contração e relaxamento muscular, sinalização celular, resistência e rigidez dos ossos e dentes, transporte de oxigênio e gás carbônico (Quadro 1).

O organismo não é capaz de sintetizar esses compostos e dessa forma, os minerais são considerados nutrientes essenciais. A necessidade humana de ingestão de minerais varia de alguns microgramas a cerca de 1 g por dia (IOM, 2000). Esses minerais essenciais

apresentam uma faixa recomendada de ingestão, com um limite inferior para que não ocorra deficiência e um limite superior para que não haja efeito tóxico. A manutenção da quantidade de minerais no corpo é alcançada pelo consumo de diversos alimentos e pelos mecanismos homeostáticos do organismo, que regulam a absorção, excreção e armazenamento desses nutrientes.

Quadro 1 - Principais minerais em alimentos e aspectos nutricionais

(Continua)

Mineral	Principais funções	Deficiência	Principais fontes
Cálcio	Consolidação do tecido ósseo e dentes; contração muscular e tonicidade cardíaca; coagulação sanguínea; transmissão nervosa.	Redução do crescimento, osteomalácia, cáries dentárias.	Leite e derivados, gema de ovo e hortaliças folhosas verdes.
Fósforo	Consolidação do tecido ósseo e dentes; metabolismo energético; sinalização celular; reprodução celular.	Rara. Fraqueza, desmineralização óssea.	Carnes, ovos, leites e derivados, cereais e bebidas acidificadas com H_3PO_3 .
Sódio	Equilíbrio hídrico e ácido base do líquido corporal; transmissão dos impulsos nervosos.	Rara. Câibras musculares.	Sal de cozinha, alimentos marinhos.
Potássio	Equilíbrio do líquido corporal; transmissão neural; contração muscular; tônus vascular.	Fraqueza muscular.	Frutas, hortaliças, cereais integrais.
Enxofre	Constituintes de compostos ativos dos tecidos, cartilagens e tendões.	Sem relatos.	Ovos, carnes, leguminosas, brócolis, cebola, repolho e couve-flor.
Magnésio	Cofator de diversas enzimas.	Rara, exceto em algumas situações clínicas. Falha de crescimento, fraqueza, espasmos.	Hortaliças folhosas verdes, grãos integrais, castanhas e leguminosas.
Ferro	Transporte de oxigênio; constituintes de enzimas envolvidas no metabolismo energético.	Anemia ferropriva (fraqueza, palidez, falta de ar, resistência reduzida a infecções).	Fígado, carnes vermelhas, leguminosas e hortaliças folhosas verdes.
Iodo	Síntese de hormônios da tireoide.	Bócio. Retardo no crescimento e retardo mental.	Sal iodado e alimentos marinhos.

(Conclusão)

Mineral	Principais funções	Deficiência	Principais fontes
Cobre	Cofator de enzimas; necessário na maturação dos leucócitos; responsável por mobilizar o ferro para a síntese de hemoglobina.	Anemia, defeitos na síntese de tecido conjuntivo com consequências vasculares e problemas ósseos, disfunções imunológicas e no sistema nervoso central.	Castanhas, fígado e frutos do mar.
Zinco	Cofator de metaloenzimas; regulação da expressão gênica; regulação da atividade dos linfócitos CD4 e NK; maturação do esperma e da ovulação.	Retardo no crescimento, atraso na maturação sexual, dificuldades de cicatrização, diminuição da resposta imune.	Carnes, vísceras, ovos, pescado, castanhas e gérmen de trigo.
Manganês	Cofator de enzimas. Participa no processo de crescimento e reprodução.	Anomalias esqueléticas, distúrbios do sistema nervoso e anomalias reprodutivas.	Cereais, leguminosas, castanhas, frutas e hortaliças.
Cobalto	Constituinte da vitamina B ₁₂	Não relatada.	Carnes, vísceras, leite.
Molibdênio	Constituintes de várias enzimas	Não relatada.	Leguminosas, cereais, vísceras.
Selênio	Antioxidante, metabolismo dos hormônios tireoidianos, regulação de células T imunitárias e modulação de resposta inflamatória.	Miocardite, osteoartrite, aumento do risco de algumas neoplasias.	Castanha do Brasil, pescado, cereais integrais, leite.
Cromo	Síntese de ácidos graxos e colesterol no fígado; ativação da insulina.	Hiperglicemia, glicosúria.	Carnes, gorduras, óleos vegetais e grãos integrais.
Flúor	Manutenção da estrutura óssea	Cárie dental.	Água fluorada, frutos do mar, chá, café, arroz, espinafre, alface.

Fonte: autoria própria.

De forma geral, os minerais apresentam ampla faixa entre a ingestão segura e o limite superior, de modo que a deficiência ou a toxicidade não são comuns, quando dietas variadas são consumidas e os mecanismos homeostáticos funcionam adequadamente. O sódio tem sido foco de importante discussão devido ao seu alto consumo em muitas populações e a identificação desse consumo excessivo estar correlacionado a maior risco de agravos de doenças cardiovasculares. A recomendação atual da Organização Mundial

de Saúde (OMS) é de que o consumo de sódio seja inferior a 2 g por dia. O NaCl, principal constituinte do sal de cozinha, contém 40% de sódio em peso, o que significa um consumo inferior a 5 g de sal por dia.

Concomitantemente com a sugestão de ingestão reduzida de sódio, a OMS também sugere uma ingestão mínima de 3,5 g de potássio por dia, reconhecida como fator protetor da hipertensão, pois induz a perda de água e sódio no corpo. A razão entre as concentrações de sódio e potássio tem uma associação mais forte com a hipertensão incidente do que as doses desses minerais individualmente. Para altas proporções de Na/K, o risco de hipertensão é maior do que em proporções menores (IWAHORI *et al.*, 2017) e essa proporção em dietas saudáveis deve permanecer menor ou igual a 1.

Contrapondo a ingestão elevada de sódio, as deficiências para alguns elementos minerais são comuns, com grandes variações das prevalências entre as regiões geográficas e socioeconômicas. Dentre esses minerais, podemos citar deficiências nas dietas humanas de cálcio, iodo, ferro, selênio, zinco e cobalto (como vitamina B₁₂). A deficiência desses minerais resulta da combinação entre a ingestão baixa desses minerais, devido à alimentação desbalanceada (consumo de alimentos pobres em nutrientes ou baixo consumo de alimentos) e um baixo aproveitamento desses minerais, que está relacionado à biodisponibilidade.

A desnutrição mineral tem sido apontada como um dos maiores problemas nutricionais mundiais. Dentre os principais minerais discutidos estão o ferro, o cálcio e o zinco. A anemia por deficiência de ferro é um problema global de saúde pública que afeta países em desenvolvimento e desenvolvidos e tem um forte impacto na saúde humana, bem como no desenvolvimento social e econômico. Essa anemia se manifesta em todas as etapas do ciclo de vida, mas é mais prevalente em mulheres grávidas e crianças jovens.

O cálcio é um micronutriente essencial necessário para as funções biológicas do corpo, como indicado no Quadro 1. A ingestão adequada de cálcio reduz o risco de doenças crônicas, como osteoporose, hipertensão, câncer de cólon, câncer de mama, cálculo renal, síndrome dos ovários policísticos, câncer de ovário e vários outros distúrbios. A captação insuficiente de cálcio resulta em doenças como raquitismo em crianças e osteoporose em idosos. O zinco também está envolvido em diversas funções metabólicas, fazendo parte de várias metaloenzimas com diversas ações. A deficiência de zinco gera diminuição da resposta imune, dificultando a cicatrização de feridas e redução do apetite.

Dentre as estratégias para redução das deficiências nutricionais estão a diversificação da dieta; a suplementação, como em alguns casos de patologias e grupos susceptíveis; a fortificação; e a biofortificação. A fortificação ou enriquecimento de

alimentos significa a adição de um ou mais nutrientes essenciais a um alimento com o objetivo de prevenir ou corrigir uma deficiência nutricional na população ou em grupos populacionais específicos. A fortificação ocorre em uma etapa do processamento de alimentos e fatores como interferência nas características do alimento e estabilidade do nutriente devem ser considerados. A fortificação mineral de alimentos é prática comum e podemos citar no Brasil a obrigação da adição de iodo no sal marinho e a adição de ferro em farinhas. Atualmente, a biofortificação tem sido pesquisada e incentivada como uma prática mais sustentável de enriquecimento dos alimentos. Na biofortificação, obtêm-se, a partir de melhoramento genético convencional ou engenharia genética, variedades que apresentem maior conteúdo de minerais e vitaminas.



Facilitando o entendimento!

Assista ao vídeo “Biofortification: It all starts with a seed” produzido pela HaverstPlus (2018), contendo uma animação sobre a biofortificação: <https://www.youtube.com/watch?v=kSzHCdtJ_v0>.

O vídeo apresenta uma animação que fornece um breve panorama da técnica de criação conhecida como “biofortificação” e como ela pode combater a fome oculta (deficiência de micronutrientes) e melhorar a vida das pessoas.

7.4 FATORES QUE INFLUENCIAM OS TEORES DE MINERAIS NOS ALIMENTOS

O conteúdo mineral em alimentos pode variar bastante, dependendo de fatores genéticos e climáticos, manejo agrícola, composição do solo e grau de maturação do alimento. Alterações também ocorrem no processamento, como em processos térmicos e separações de materiais.

Os solos têm composição mineral variada e o pH pode influenciar significativamente a biodisponibilidade do mineral para as plantas. O aumento no valor de pH do solo, por exemplo, diminui a disponibilidade de ferro, zinco, manganês e níquel para as plantas e aumenta para o molibdênio e selênio. Além disso, as plantas têm mecanismos fisiológicos para a regulação da absorção de minerais do solo e isso pode variar entre espécies e cultivares.

Alguns estudos têm buscado evidências científicas para diferenças de composição de alimentos orgânicos, principalmente, em comparação com os alimentos produzidos convencionalmente. Algumas diferenças têm sido identificadas entre a composição nutricional, polifenóis e alguns contaminantes metálicos (BRANTSÆTER *et al.*, 2017; MIE *et al.*, 2017). Muitas discussões têm sido realizadas em relação aos praguicidas utilizados na agricultura. O uso de alguns fertilizantes e agroquímicos pode carrear metais ao solo, que podem migrar para o alimento e ser consumido pelo ser humano ou por animais (LOPES *et al.*, 2011).

Algumas alterações no teor e na biodisponibilidade de minerais podem ocorrer durante o processamento de alimentos. Perdas por lixiviação durante o cozimento e branqueamento podem ser consideráveis para os minerais mais solúveis e que não estão complexados. A biodisponibilidade de minerais é influenciada pelo pH da preparação. Cocção de alimentos em meio ácido pode favorecer a redução de alguns minerais, afetando negativamente sua solubilidade no meio intraluminal.

Nos cereais e em outros grãos, os minerais estão concentrados no farelo, gérmen e nas camadas mais externas do endosperma. Dessa forma, a moagem para obtenção de farinhas, remove os minerais junto dos farelos e gérmen. A farinha de trigo branca, por exemplo, pode apresentar uma perda em torno de 75% de ferro, zinco, manganês e cobre comparado aos teores desses minerais no grão de trigo integral.

Os compostos fenólicos e fitatos podem ser parcialmente degradados pelo processamento térmico, o que pode contribuir para melhorar a biodisponibilidade dos minerais. Dessa forma, a opção por alguns alimentos processados pode favorecer o aproveitamento dos minerais que complexam com compostos fenólicos e fitatos. No entanto, não é sempre que o processamento térmico influencia positivamente no aproveitamento de minerais. Foi observada a diminuição da biodisponibilidade de ferro, zinco e cálcio em fórmulas enterais que foram aquecidas, possivelmente pela perda de ácido ascórbico e interações com outras moléculas (GALÁN; DRAGO, 2014).

Alguns minerais podem ser adicionados durante o processamento, como é o caso da adição de cálcio na produção de alguns queijos. No caso do cálcio em queijos, deve-se observar ainda o pH. Em valores mais baixos de pH, a perda desse mineral solubilizado no soro drenado é maior.

O processamento pode apresentar um fator de concentração para os minerais. Isso pode ser observado nos produtos desidratados. A retirada da fração gordurosa, como no caso da obtenção do cacau em pó a partir da massa de cacau, também apresenta fator de concentração de vários minerais, visto que a maioria apresenta hidrossolubilidade e

permanecem na fração não lipídica.

A escolha dos materiais de equipamentos e embalagem deve ser criteriosa para que não haja migração de metais, na maioria das vezes indesejáveis, para o alimento.

7.5 CONTAMINANTES INORGÂNICOS

Níveis excessivos de minerais, inclusive os essenciais, podem ser prejudiciais ao organismo humano. Os macroelementos raramente apresentam efeitos tóxicos, no entanto, uma importante discussão atual é a consequência do consumo elevado de sódio. Nesse cenário a ingestão excessiva de sódio está relacionada à adição do sal de cozinha nas preparações culinárias e nos produtos industrializados. Por outro lado, temos a possibilidade de ter nos alimentos minerais não essenciais, que são indesejáveis devido aos seus potenciais efeitos tóxicos. Os metais não essenciais de interesse em alimentos devido aos seus efeitos toxicológicos são arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg).



Facilitando o entendimento!

Assista ao vídeo “Bioacumulação e biomagnificação” produzido por F.B. Paganini e F. Tubenchlak (2013), contendo uma animação explicando o que é a bioacumulação e o que é a biomagnificação: <<https://www.youtube.com/watch?v=zvy2rlhwO8Y>>.

O vídeo apresenta a definição de bioacumulação, ou seja, o acúmulo de uma substância ao longo da vida de um organismo vivo, e biomagnificação, que é o aumento do teor de uma substância a medida que aumentamos o nível da cadeia alimentar

7.5.1 Arsênio

O arsênio apresenta propriedades químicas e físicas intermediárias entre um metal e um não metal e por isso é frequentemente denominado metaloide ou semimetal. O arsênio pode existir em quatro estados de valência: -3 , 0 , $+3$ e $+5$. O arsenito (As^{+3}) e o arseniato (As^{+5}) são os estados predominantes em condições redutoras e oxidantes respectivamente. Além do arsênio inorgânico, encontramos em materiais biológicos, compostos arsenicais orgânicos, como ácido monometilarsônico, ácido dimetilarsínico, arsenobetaina e arsenocolina.

O arsênio é amplamente distribuído na crosta terrestre em baixos teores em todas as rochas, solo, água e ar. Estima-se que cerca de um terço do fluxo atmosférico de arsênico seja de origem natural. O arsênio inorgânico de origem geológica é encontrado nas águas subterrâneas usadas como água potável em várias partes do mundo. A mineração, a fundição de metais não ferrosos e a queima de combustíveis fósseis são os principais processos industriais que contribuem para a contaminação antrópica por arsênio do ar, da água e do solo. Historicamente, o uso de pesticidas contendo arsênico deixou grandes áreas de terras agrícolas contaminadas. O uso de arsênio na preservação da madeira também levou à contaminação do meio ambiente.

A principal fonte de exposição ao arsênio pela população em geral é pelo consumo de alimentos e água. Baixos teores de arsênio inorgânico e orgânico são encontrados na maioria dos alimentos. As maiores concentrações são encontradas em pescado, seguido de carnes, cereais, vegetais, frutas e produtos lácteos. Arsênio inorgânico é a forma predominante nas carnes, aves, produtos lácteos e cereais e os compostos orgânicos predominam no pescado, frutas e vegetais.

Os compostos inorgânicos são mais tóxicos que as formas parcialmente metiladas (ácidos monometilarsônico e dimetilarsínico). Muitos compostos orgânicos, presentes em sistemas biológicos são muito menos tóxicos, como a arsenobetaina e a arsenocolina. Os efeitos tóxicos da exposição crônica por arsênico estão relacionados a sintomas gastrointestinais, distúrbios das funções cardiovasculares e do sistema nervoso. Os compostos arsenicais inorgânicos são carcinogênicos para humanos (Grupo 1), enquanto os ácidos monometilarsônico e dimetilarsínico foram considerados pela International Agency for Research on Cancer - IARC (2012) como possível carcinógeno para humanos (Grupo 2B).

7.5.2 Cádmio

O cádmio ocorre naturalmente no ambiente em sua forma inorgânica, como resultado de emissões vulcânicas e intemperismo das rochas. Além disso, o cádmio pode ser liberado no meio ambiente por águas residuais e incineração de resíduos, e a contaminação de solos agrícolas pode ocorrer pelo uso de fertilizantes, por deposição do ar e por lodo de esgoto contendo cádmio. O fator de transferência do cádmio do solo para a planta é elevado e dessa forma, alimentos cultivados em solos contaminados são a principal fonte de exposição desse metal para a população em geral.

O cádmio pode atravessar membranas biológicas por diferentes mecanismos e

uma vez dentro das células, liga-se a metaloproteínas, dentre outros ligantes, e não é facilmente eliminado pelas células. Dessa forma, o cádmio se acumula no organismo em tecidos, como intestino, fígado e rins. O tempo de meia vida do cádmio no corpo humano é estimado em 10 a 30 anos. Esse acúmulo pode levar à disfunção tubular renal irreversível.

O cádmio não tem função biológica conhecida em animais e humanos, mas simula outros metais divalentes que são essenciais para diversas funções biológicas. O desequilíbrio da homeostase do cálcio, zinco ou ferro desempenha um papel fundamental em sua ação toxicológica. A alta ingestão de cádmio pode levar a distúrbios no metabolismo do cálcio e na formação de cálculos renais, além de afetar o sistema esquelético e o sistema respiratório. Ainda de acordo com IARC (2012), existem evidências suficientes em seres humanos e em animais experimentais para a carcinogenicidade do cádmio.

Arroz, trigo, raízes e tubérculos, vegetais folhosos e moluscos representam grupos de alimentos que contribuem significativamente para a exposição alimentar total ao cádmio.

7.5.3 Chumbo

O chumbo é um metal tóxico ubíquo na natureza e de ocorrência natural no meio ambiente. De maneira geral, a contaminação dos alimentos advém, principalmente, do meio ambiente (pelo solo, água e ar), do processamento e do uso de utensílios e recipientes de armazenamento. Plantas e animais podem bioacumular o chumbo sem ocasionar a biomagnificação na cadeia alimentar terrestre ou aquática, devido ao fato de que, em vertebrados, o chumbo é estocado principalmente nos tecidos ósseos, reduzindo o risco de sua transferência para outros indivíduos da cadeia trófica.

A alimentação é a principal via de exposição ao chumbo para a população não ocupacional. A biodisponibilidade do chumbo no organismo humano varia consideravelmente com a idade, estado fisiológico (gravidez, lactação, menopausa) e com as propriedades físico-químicas do alimento e da dieta. A distribuição do chumbo na corrente sanguínea ocorre pela interação com metalo-proteínas e peptídeos. Em indivíduos adultos, aproximadamente 94% do total do chumbo corpóreo está concentrado nos ossos, e em crianças, esse percentual é de 73%. O tempo de meia-vida no sangue é de aproximadamente 30 dias e nos ossos de 10 a 30 anos

Mesmo em níveis relativamente baixos de chumbo no sangue, efeitos adversos no

organismo têm sido associados a esse metal, podendo afetar vários sistemas do organismo humano, incluindo o neurológico, hematológico, gastrointestinal, cardiovascular e renal. A exposição humana ao chumbo está associada ao retardo no desenvolvimento mental com consequente perda de QI (quociente de inteligência) de crianças, a danos renais e ao aumento na pressão sanguínea em adultos. Para saber mais sobre a presença e teores de chumbo em alimentos produzidos e/ou comercializados no Brasil, consulte o artigo de revisão sistemática de Vasconcelos Neto *et al.* (2019).

7.5.4 Mercúrio

De modo geral, duas categorias de mercúrio podem ser estabelecidas como agente tóxico de fonte alimentar: mercúrio inorgânico e compostos orgânicos de mercúrio. As formas inorgânicas estão presentes amplamente nos alimentos, principalmente vegetais, devido à absorção pelo solo. As formas orgânicas têm fonte em pescado, principalmente como metilmercúrio, mas já foram identificadas outras formas, como etilmercúrio e fenilmercúrio.

O metilmercúrio sofre bioacumulação e biomagnificação e dessa forma, a quantidade de mercúrio é maior em espécies carnívoras e em peixes mais velhos. Os peixes acumulam mercúrio tanto pelo alimento, quanto pela água, no entanto, à medida que o nível trófico aumenta, a contribuição da água como fonte de metilmercúrio decresce. Aves que se alimentam desses peixes também podem receber elevada carga de mercúrio bioacumulado.

O metilmercúrio é quase que completamente absorvido pelo trato gastrointestinal, enquanto a absorção do mercúrio inorgânico não passa de 15% por essa via. O mercúrio inorgânico apresenta efeitos renais, incluindo danos no túbulo proximal e nefropatia progressiva. A maior parte do metilmercúrio se distribui entre o cérebro, fígado e rins. A distribuição ocorre por todos os tecidos num período de quatro dias, tendo limites máximos estabelecidos no cérebro dentro de 5 a 6 dias. Pela elevada deposição no córtex cerebral, os principais danos à saúde humana estão relacionados aos efeitos neurotóxicos em adultos e de forma mais sensível em cérebros em desenvolvimento (fetos, recém-nascidos e crianças).

A toxicidade do metilmercúrio ocorre principalmente pela interrupção do metabolismo cerebral do selênio. O selênio apresenta atividade antioxidante e é necessário para as atividades de selenoenzimas com papéis críticos no desenvolvimento do cérebro fetal, crescimento e metabolismo dos hormônios da tireóide. Já foi demonstrado que o excesso de selênio (razão molar Se:Hg acima de 1:1) pode reduzir ou inibir o efeito

tóxico do metilmercúrio. Para saber mais a respeito, vocês podem ler os artigos de Bjørklund *et al.* (2017); Ralston e Raymond (2018); Ralston *et al.* (2019) e Spiller (2018).

REFERÊNCIAS

BELITZ, H.-D.; GROSCH, W.; SCHIEBERLE, P. **Food Chemistry**. 4 ed., Berlin: Springer, 2009, p. 421-428.

BJØRKLUND, G., AASETH, J., AJSUVAKOVAD, O.P., NIKONOROV, A.A., SKALNY, A.V., SKALNAY, M.G., & TINKOV, A.A. Molecular interaction between mercury and selenium in neurotoxicity. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 332, p. 30-37, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.10.009>

BRANTSÆTER, A.L.; YDERSBOND, T.A.; HOPPIN, J.A.; HAUGEN, M.; MELTZER, H.M. Organic Food in the Diet: Exposure and Health Implications. **Annual Review of Public Health**, v. 38, p. 295–313, 2017.

COZZOLINO, S.M.F. (Org.) **Biodisponibilidade de Nutrientes**. 5 ed., Barueri, SP: Manole, 2016. 1443 p.

GALÁN, M.G.; DRAGO, S.R. Food matrix and cooking process affect mineral bioaccessibility of enteral nutrition formulas. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 3, p. 515-521, 2014. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6280>.

IARC – International Agency for Research on Cancer. Arsenic, metals, fibres, and dusts. cadmium and cadmium compounds: a review of human carcinogens. **IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans**, 100C, p. 121-145, 2012. Disponível em <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C-8.pdf>. Acesso em 01 jun 2020.

IOM - Institute of Medicine. **Dietary reference intakes**: applications in dietary assessment. Washington, D.C.: National Academy Press, 2000.

IWAHORI, T.; MIURA, K.; UESHIMA, H. Time to Consider Use of the Sodium-to-Potassium Ratio for Practical Sodium Reduction and Potassium Increase. **Nutrients**, v. 9, n. 7, p. 700, 2017. <https://doi.org/10.3390/nu9070700>

KUMAR, V.; SINHA, A.K.; MAKAR, H.P.S.; BECKER, K. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review. **Food Chemistry**, v. 120, n. 4, p. 945-959, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.052>

LOPES, C.; HERVA, M.; FRANCO-URÍA, A.; ROCA, E. Inventory of heavy metal content in organic waste applied as fertilizer in agriculture: evaluating the risk of transfer into the food chain. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 18, p. 918-939, 2011.

MIE, A.; ANDERSEN, H.R.; GUNNARSSON, S.; KAHL, J.; KESSE-GUYOT, E.; REMBIAŁKOWSKA, E.; QUAGLIO, G.; GRANDJEAN, P. Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review. **Environmental Health**, v. 16, p. 111-133, 2017.

MILLER, D.D. Minerais, p. 409-444. In: DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L.; FENNEMA, O.R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4 ed., Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

MORAN, L.A.; HORTON, H.R.; SCRIMGEOUR, K.G.; PERRY, M.D. **Bioquímica**. 5 ed., São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. 798 p.

OMORUYI, F.O.; STENNETT, D.; FOSTER, S.; DILWORTH, L. New frontiers for the use of IP6 and inositol combination in treating Diabetes Mellitus: a review. **Molecules**, v. 25, n. 7, p. 1720, 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25071720>.

RALSTON, N.V.C., & RAYMOND, L.J. Mercury's neurotoxicity is characterized by its disruption of selenium biochemistry. **Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects**, v. 1862, p. 2405–2416, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.009>.

RALSTON, N.V.C., KANEKO, J.J., & RAYMOND, L.J. Selenium health benefit values provide a reliable index of seafood benefits vs. risks. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 55, p. 50-57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.05.009>

REIS, N.T. **Nutrição clínica: interações**. Rio de Janeiro: Rubio, 2004. 580 p.

SCHLEMMER, U.; FRØLICH, W.; PRIETO, R.M.; GRASES, F. Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 53, Suppl 2, p. S330-S375, 2009. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900099>.

SHIBAMOTO, T.; BJELDANES, L.F. **Introdução à Toxicologia de Alimentos**. 2 ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 320 p.

SPILLER, H.A. Rethinking mercury: the role of selenium in the pathophysiology of mercury toxicity. **Clinical Toxicology**, v. 56, p. 313-326, 2018. <https://doi.org/10.1080/15563650.2017.1400555>

SULIBURSKA, J.; KREJPCIO, Z. Evaluation of the content and bioaccessibility of iron, zinc, calcium and magnesium from groats, rice, leguminous grains and nuts. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, p. 589-594, 2014. <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13197-011-0535-5>

VASCONCELOS NETO, M.C.; SILVA, T.B.C.; ARAÚJO, V.E.; SOUZA, S.V.C. Lead contamination in food consumed and produced in Brazil: Systematic review and meta-analysis. **Food Research International**, v. 126, p. 108671, 2019.

VUCENIK, I. Anticancer Properties of Inositol Hexaphosphate and Inositol: An Overview. **Journal of Nutrition Science and Vitaminology** (Tokyo), v. 65, S18-S22, 2019. <https://doi.org/10.3177/jnsv.65.S18>