

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO SAÚDE E DESENVOLVIMENTO NA
REGIÃO CENTRO-OESTE**

ALESSANDRO CARVALHO DA FONSECA

**BIOACUMULAÇÃO DE MACRO E MICROELEMENTOS EM PLANTAÇÃO DE
FEIJÃO (*Vigna unguiculata* L. WALP) E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL RISCO AO
CONSUMO HUMANO**

CAMPO GRANDE

2022

ALESSANDRO CARVALHO DA FONSECA

**BIOACUMULAÇÃO DE MACRO E MICROELEMENTOS EM PLANTAÇÃO DE
FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* L. WALP) E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
RISCO AO CONSUMO HUMANO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de mestre pela Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Valter Aragão do Nascimento. Área de concentração: Tecnologia e Saúde. Linha de pesquisa: Metabolismo e Nutrição.

CAMPO GRANDE

2022

**Ata de Defesa de Dissertação**
Programa de Pós-Graduação em Saúde e Desenvolvimento na Região Centro-Oeste
Mestrado

Aos vinte e dois dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e dois, às oito horas, na videoconferência (à distância), da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos membros: Valter Aragao do Nascimento (UFMS), Elaine Silva de Padua Melo (UFMS) e Rita de Cassia Avellaneda Guimaraes (UFMS), sob a presidência do primeiro, para julgar o trabalho do aluno: **ALESSANDRO CARVALHO DA FONSECA**, CPF 77041178153, Área de concentração em Tecnologia e Saúde, do Programa de Pós-Graduação em Saúde e Desenvolvimento na Região Centro-Oeste, Curso de Mestrado, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, apresentado sob o título "**BIOACUMULAÇÃO DE MACRO E MICROELEMENTOS EM PLANTACÃO DE FEIJÃO (*Vigna unguiculata* L. WALP) E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL RISCO AO CONSUMO HUMANO**" e orientação de Valter Aragao do Nascimento. O presidente da Banca Examinadora declarou abertos os trabalhos e agradeceu a presença de todos os Membros. A seguir, concedeu a palavra ao aluno que expôs sua Dissertação. Terminada a exposição, os senhores membros da Banca Examinadora iniciaram as arguições. Terminadas as arguições, o presidente da Banca Examinadora fez suas considerações. A seguir, a Banca Examinadora reuniu-se para avaliação, e após, emitiu parecer expresso conforme segue:

EXAMINADOR	ASSINATURA	AVALIAÇÃO
Dr. Valter Aragao do Nascimento (Interno)	<u>Aprovado</u>	<u>Valter Aragao do Nascimento</u>
Dr. Bruno Spolon Marangoni (Externo) (Suplente)	_____	_____
Dra. Danielle Bogo (Interno) (Suplente)	_____	_____
Dra. Elaine Silva de Padua Melo (Externo)	<u>Aprovado</u>	<u>Elaine S. de Padua Melo</u>
Dra. Rita de Cassia Avellaneda Guimaraes (Interno)	<u>Aprovado</u>	<u>Rita de Cassia Guimaraes</u>

RESULTADO FINAL: Aprovação Aprovação com revisão Reprovação**OBSERVAÇÕES:**

Nada mais havendo a ser tratado, o Presidente declarou a sessão encerrada e agradeceu a todos pela presença.

Assinaturas:

Valter Aragao do Nascimento
Presidente da Banca Examinadora

Alessandro C. da Fonseca
Aluno

Dedicatória
A minha filha Amada Hayla Arfux de Castro Fonseca

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora do Carmo pela dádiva da vida e por me iluminar e me dar forças para conciliar a vida acadêmica profissional e pessoal.

Aos meus pais, Ernani Mendes da Fonseca e Ivanete Carvalho da Fonseca por terem me incentivado desde a primeira escolarização até a minha formação acadêmica a correr atrás dos meus sonhos, que tudo é possível, apesar das dificuldades encontradas, partilho a alegria com vocês neste momento.

A minha filha amada Hayla Arfux de Castro Fonseca, meu grande amor da minha vida, você me dá forças para superar todos os obstáculos que a vida me oferece, agradeço a Deus por ter você na minha vida. Seu pai te ama muito!

Aos meus irmãos Ernani Mendes da Fonseca Júnior e Nilcéia Carvalho da Fonseca por todo apoio que tive durante todo o período do mestrado.

Aos meus amigos Marcio Lorentz da Costa e Laura Costa que sempre me apoiaram nessa jornada e principalmente por disponibilizarem o seu escritório para a qualificação e defesa do mestrado.

As professoras Maria Inês e Lucileide Dorisbor pelo curso de inglês o qual me propiciaram passar no exame de proficiência.

A toda equipe do setor de Suprimentos do HU-UFGD o qual através dos meus chefes (Carlos Alexandre Dias e Paulo Henrique Loddi) agradeço por todo apoio que tive para conclusão do mestrado.

Ao meu orientador Prof. Valter Aragão do Nascimento um herói do nosso Brasil pela sua dedicação e abnegação em prol da ciência e da pesquisa, ao senhor minha eterna gratidão por tudo que o senhor faz por nós discentes.

A minha Prof. Elaine Silva de Pádua Melo pela excelência das instruções, pelo acolhimento, pelo apoio, pelo compartilhamento de saberes e orientações os quais propiciaram desenvolver toda a parte prática da pesquisa. A senhora minha gratidão.

Agradeço a possibilidade de participação junto ao grupo de Pesquisa GEBABS (Grupo de Espectroscopia e Bioinformática aplicados a Biodiversidade e à saúde), pela receptividade de todos os membros do grupo, que de forma colaborativa contribuíram para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Epígrafe

“A persistência é o caminho do êxito”

Autor: Charles Chaplin

RESUMO

O feijão é uma das leguminosas de maior importância para o consumo humano no mundo e representa uma importante fonte de proteína para a dieta. O Brasil é um dos maiores consumidores de feijão do mundo e um dos principais produtores de feijão-caupi da América do Sul. No entanto, a concentração de minerais nesse alimento pode representar um risco à cadeia alimentar humana. Dessa forma, prever ou medir os prováveis riscos oriundos da exposição aos metais pesados provenientes do solo, água, deposição atmosférica e acúmulo em diferentes culturas alimentícias tem se tornado cada vez mais comum e essa avaliação de risco é analisada juntamente com os dados de índices de poluição, fatores de transferência e bioacumulação, para melhor compreensão das ameaças à saúde humana. O objetivo deste estudo foi investigar o acúmulo e a transferência de macro e microelementos do solo para os grãos, folhas e vagem de feijão-caupi, bem como avaliar os índices de poluição do solo e os riscos à saúde associados ao consumo da parte comestível da cultura. Foi realizada a quantificação dos minerais As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn por ICP OES, em amostras de grão, folha, vagem e solo da lavoura de feijão-caupi, localizadas em Campo Grande-MS e circundadas por córrego, aterro sanitário, vegetação e rodovia. Com os dados das concentrações dos macro e microelementos, foram realizados os cálculos de índice de poluição, coeficiente de bioacumulação, estimativa de ingestão, risco cancerígeno e não cancerígeno. O conteúdo de Cd e Pb nos grãos, se mostrou acima da dose oral máxima diária. Os quocientes de risco dos elementos As, Cd, Pb, Se e V, foram acima do limite de segurança ($HQ > 1$) para todos os elementos analisados e com base na dose diária de ingestão crônica, os metais pesados As, Cd, Cr e Pb apresentam risco carcinogênico. A proximidade da lavoura de feijão-caupi com a rodovia e com o aterro contribuiu para a contaminação do solo e consequentemente dos grãos de feijão-caupi. Esses achados evidenciam a importância do monitoramento e compreensão do sistema solo-planta-humano, principalmente quando as condições ambientais em torno das lavouras são favoráveis à contaminação, representando um grande risco para a saúde pública.

Palavras-chave: metal pesado, leguminosa, toxicidade, bioacumulação, poluição

ABSTRACT

Beans are one of the most important leguminous for human consumption in the world and represents an important source of protein for the diet. Brazil is one of the largest consumers of beans in the world and one of the main producers of cowpea in South America. However, the accumulation of minerals in this food can pose a risk to the human food chain. Thus, predicting or measuring the likely risks arising from exposure to heavy metals from soil, water, atmospheric deposition and accumulation in different crops used as food, has become increasingly common and this risk assessment is analyzed together with the data of pollution indices, transfer and bioaccumulation factors, for a better understanding of the threats to human health. The aim of this study was to investigate the accumulation and transfer of macro and microelements from the soil to grains, leaves and pods of cowpea. And to evaluate the levels of soil pollution and the health risks associated with the consumption of the edible part of the crop. The quantification of minerals As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Pb, Se, V and Zn by ICP OES was carried out in grain, leaf, pod and soil samples from the cowpea crop, located in Campo Grande-MS and surrounded by a stream, landfill, vegetation and highway. With the data on the concentrations of macro and microelements, calculations of the pollution index, bioaccumulation coefficient, estimated intake, carcinogenic and non-carcinogenic risk were performed. The content of Cd and Pb in the grains was above the maximum daily oral dose. The risk quotients of the elements As, Cd, Pb, Se and V, were above the safety limit, the risk index was > 1 for all elements analyzed and based on the daily dose of chronic ingestion, the heavy metals As, Cd, Cr and Pb present carcinogenic risk. The proximity of the cowpea crop to the highway and the landfill contributed to the contamination of the soil and, consequently, of the cowpea grains. These findings show the importance of monitoring and understanding the soil-plant-human system, especially when the environmental conditions around the crops are favorable to contamination, representing a great risk to public health.

Keywords: heavy metal, leguminous, toxicity, bioaccumulation, pollution

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

BCF – coeficiente de acumulacoo biológica

CDI – ingesto crônica diria

CR – risco carcinogênico

HI – ndice de risco

HQ – quocientes de risco

ICP-OES – espectroscopia de emisso óptica com plasma indutivamente acoplado

LD – limite de detecoo

LQ – limite de quantificacoo

PI – ndice de poluioo

RfD – dose oral de referência de ingestoo

SF – fator de inclinaoo oral carcinogênico

VRQs – valores orientadores de referência de qualidade

LISTA DE SÍMBOLOS

Al – Alumínio

As – Arsênio

Ba – Bário

Ca – Cálcio

Cd – Cádmio

Cr – Cromo

Cu – Cobre

Fe – Ferro

Hg – Mercúrio

K – Potássio

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

P – Fósforo

Pb – Chumbo

Se – Selênio

V – Vanádio

Zn – Zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Órgãos constituintes do feijão-caupi. A) flor; B) vagens e folhas verdes; C) grãos de diferentes cultivares.....	20
Figura 2	Descrição esquemática do delineamento experimental, para estudar o efeito da contaminação por metal pesado em feijão plantado em diferentes distâncias de um aterro sanitário, em relação à diferentes distâncias de uma rodovia. Em destaque aparecem as partes coletadas da planta (folha, vagem e grão) e do solo.....	37
Figura 3	Distribuição da concentração dos metais pesados nos grãos de feijão-caupi nos diferentes pontos da lavoura.....	48
Figura 4	Representação esquemática da acumulação biológica (BCF) de macro e microelementos em feijão-caupi.....	55
Figura 5	Estimativa de ingestão diária (EDI) de cada elemento devido ao consumo de feijão-caupi, para homens e mulheres adultos de 30 anos e 70 Kg de peso corporal.....	61
Figura 6	a) Quociente de risco (HQ) dos elementos As, Cd, Se, e V considerando o consumo de feijão-caupi, por homens e mulheres adultos; b) Índice de risco crônico (HI) baseado no somatório de HQ dos elementos (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn). HQ e HI acima da linha pontilhada representam valores > 1, que indicam riscos à saúde humana.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição nutricional do feijão-caupi.....	24
Tabela 2	Resumo dos efeitos tóxicos de alguns metais pesados na saúde humana.....	34
Tabela 3	Programa de digestão em bloco (grão, folha, vagem).....	39
Tabela 4	Programa de digestão em bloco (solo).....	39
Tabela 5	Parâmetros instrumentais para a determinação de elementos utilizando ICP-OES.....	40
Tabela 6	Teste de adição e recuperação para o grão do feijão.....	39
Tabela 7	Figuras de mérito obtidas na análise em ICP-OES.....	40
Tabela 8	Dose oral de referência (RfD) para metais pesados.....	45
Tabela 9	Concentração de macro e microelementos nas amostras de grão de feijão-caupi.....	49
Tabela 10	Concentração de macro e microelementos presentes no solo.....	51
Tabela 11	Índices médios de poluição de As, Cd, Cu, Mo, Pb e Zn no solo de cultivo de feijão-caupi.....	53
Tabela 12	Coeficiente de acumulação biológica (BCF) de metais pesados em diferentes partes do feijão-caupi (vagem, folha e grão).....	56
Tabela 13	Quociente de risco (HQ) e índice de risco crônico (HI) de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn, considerando o consumo de feijão-caupi por brasileiros adultos (homens e mulheres) de 70 Kg.....	62
Tabela 14	Risco carcinogênico dos metais As, Cd, Cr e Pb, para mulheres e homens adultos de 30 anos de idade e 70 Kg de peso corporal ao consumir uma porção de 142,2 g / dia.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Consumo e produção de feijão no mundo.....	22
--	-----------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i>).....	19
2.1.1	Classificação botânica e características morfológicas.....	19
2.1.2	Origem, produção e consumo.....	19
2.2	Importância do feijão-caupi na alimentação humana	22
2.3	Importância do solo usado para o cultivo	26
2.4	Regulamentação dos metais pesados em solo brasileiro.....	28
2.5	Metais pesados e sua toxicidade à saúde humana.....	29
2.5.1	Cádmio (Cd).....	31
2.5.2	Cromo (Cr).....	31
2.5.3	Mercúrio (Hg).....	32
2.5.4	Chumbo (Pb).....	32
2.5.5	Arsênio (As).....	33
2.5.6	Manganês (Mn).....	33
3	OBJETIVOS	35
3.1	Objetivo geral.....	35
3.2	Objetivos específicos.....	35
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	Área experimental.....	36
4.2	Delineamento experimental.....	36
4.3	Coleta das amostras de feijão-caupi.....	36
4.4	Coleta de solo.....	38
4.5	Digestão ácida para análise em ICP-OES.....	38
4.6	Espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).....	40
4.7	Índice de poluição (PI).....	42
4.8	Coeficiente de acumulação biológica (BCF).....	43
4.9	Cálculo de risco de ingestão.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Concentração de macro e microelementos nos grãos de feijão-caupi.....	47

5.2	Concentração de macro e microelementos no solo de cultivo da lavoura de feijão.....	50
5.3	Índice de poluição (PI).....	53
5.4	Bioconcentração de macro e microelementos nas diferentes partes do feijão-caupi.....	54
5.5	Risco à saúde associado à ingestão do feijão-caupi.....	59
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

O feijão é uma das leguminosas de maior importância para o consumo humano no mundo, representa uma valiosa fonte de proteína para complementar cereais, raízes amiláceas e tubérculos e apresenta um potencial nutricional importante, por ser fonte de fibras alimentares, ácido fólico, zinco, vitaminas do complexo B e outros nutrientes. Representa uma das fontes de proteína mais baratas na maioria dos países em desenvolvimento, localizados em continentes como África e Ásia e na América Latina (RAHATE; MADHUMITA; PRABHAKAR, 2021).

A principal espécie de feijão cultivada é a *Phaseolus vulgaris* L. (feijão comum ou feijão seco), porém o feijão-caupi (*Vigna unguiculada* (L.) Walp.), também conhecido como feijão de corda, feijão vigna, feijão verde ou feijão macassar apresenta uma produção expressiva e é cultivado em sua maioria nos países da África, como Nigéria e Níger (OECD, 2019; ABEBE; ALEMAYEHU, 2022).

O Brasil fica entre um dos principais produtores de feijão-caupi na América do Sul, tem expressiva produção em 17 unidades da federação, mas suas produções concentram-se nas regiões Nordeste (1,2 milhão de hectares) e Norte (55,8 mil hectares), mas a produção no Centro-Oeste vem crescendo, devido principalmente as condições climáticas favoráveis nessa região (EMBRAPA, 2019).

O Brasil não é o maior exportador de feijão desse tipo, mas é um dos maiores consumidores de feijão do mundo e o consumo do feijão-caupi é bem aceito pelos brasileiros e esse consumo se dá principalmente pela praticidade de prepará-lo e pelo preço acessível (FERREIRA; PELOSO; FARIA, 2002). Além disso, ele é uma das leguminosas mais adaptadas e tolerantes ao estresse e seus grãos possuem um perfil nutricional muito semelhante ao feijão comum, mas proporciona um maior teor de ácido fólico e níveis mais baixos de fatores antinutricionais e causa menos flatulência (CHOW *et al.*, 2018).

Para atender a ampliação da produção de alimentos e manutenção dos cultivos de leguminosas, são utilizados fertilizantes e defensivos agrícolas, que, por vezes são usados de forma indiscriminada e podem causar sérios riscos ao ambiente e à saúde pública (KHATUN; INTEKHAB; DHAK, 2022). Outras atividades antropogênicas, como crescimento industrial contínuo, representam as principais

fontes da geração de metais pesados e vem aumentando de forma alarmante nos últimos anos, o que afeta diretamente a saúde humana, as propriedades do solo e comprometem a cadeia alimentar, trazendo riscos à segurança alimentar (NOGUEIRA, 2012; EMBRAPA, 2019; SHARMA *et al.*, 2022; YADAV *et al.*, 2022).

Aliado a esses fatores, a proximidade das plantações junto às vias de tráfego rodoviário também representa um fator favorável a deposição de metais pesados provenientes da fuligem e escapamentos (ROSA *et al.*, 2022). Assim como o rápido desenvolvimento econômico e a urbanização que estão associados à grande produção de resíduos sólidos urbanos, estimada em ~2,2 bilhões de toneladas por ano em todo o mundo até 2025 e considerados um dos poluentes mais prevalentes globalmente, que causam sérios riscos ao meio ambiente e aos seres vivos devido à presença de metais pesados que lixiviam facilmente para o solo e a água (OKEREAFOR *et al.*, 2020; SHARMA *et al.*, 2022).

O termo metal pesado refere-se a qualquer elemento químico metálico que tenha uma densidade alta e maior peso atômico e pode ser tóxico mesmo em baixas concentrações, como o As, Cd, Cr, Hg e o Pb, que são os principais elementos que podem ser associados à contaminação do solo, da água e da cadeia alimentar causando risco ao consumo humano (SHABAN; ABDU; HASSAN, 2016). Esses metais pesados são naturalmente encontrados na crosta terrestre, mas devido às atividades antropogênicas, como o uso industrial, agrícola e doméstico, os metais pesados podem ser lançados no ambiente causando riscos à saúde humana (KHATUN; INTEKHAB; DHAK, 2022).

O acúmulo desses metais pesados no corpo humano, a exemplo do mercúrio, pode provocar sérios problemas à saúde, incluindo dor abdominal, vômitos, anemia grave, hemoglobinúria, neuropatia periférica, distúrbios psicológicos, distúrbios renais e arritmias, e câncer (SHABAN; ABDU; HASSAN, 2016). Porém, elementos considerados como micronutrientes essenciais à manutenção do metabolismo humano, como Cu, Fe, Mn, Ni e Se quando consumidos em altas concentrações ou por longo prazo, também podem acarretar potenciais efeitos nocivos em níveis elevados (KHATUN; INTEKHAB; DHAK, 2022).

Sabendo que esses elementos químicos de maneira geral apresentam uma rede complexa de captação, sequestro e transporte dentro dos vegetais, além de apresentarem as características de essencialidade e potencial toxicidade (SHABBIR *et al.*, 2020), é fundamental monitorar o comportamento dos elementos químicos nos

sistemas solo-planta-humano, especialmente quando se trata de vegetais que compõem a cadeia alimentar humana (YANG *et al.*, 2022).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi investigar a concentração, a transferência e o acúmulo de macro e microelementos do solo para os grãos, folhas e vagem de feijão-caupi e avaliar o índice de poluição no solo e os riscos à saúde humana associados ao consumo do grão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Feijão-caupi (*Vigna unguiculata*)

2.1.1 Classificação botânica e características morfológicas

O feijão-caupi tem vários nomes populares, além daqueles já citados anteriormente como feijão-de-praia, feijão-miúdo, feijão-frade e feijão fradinho, pertence à classe Dicotiledônea da ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolineae, gênero *Vigna*, subgênero *Vigna*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. e subespécie *unguiculata* (FREIRE FILHO *et al.*, 2011; OECD, 2019).

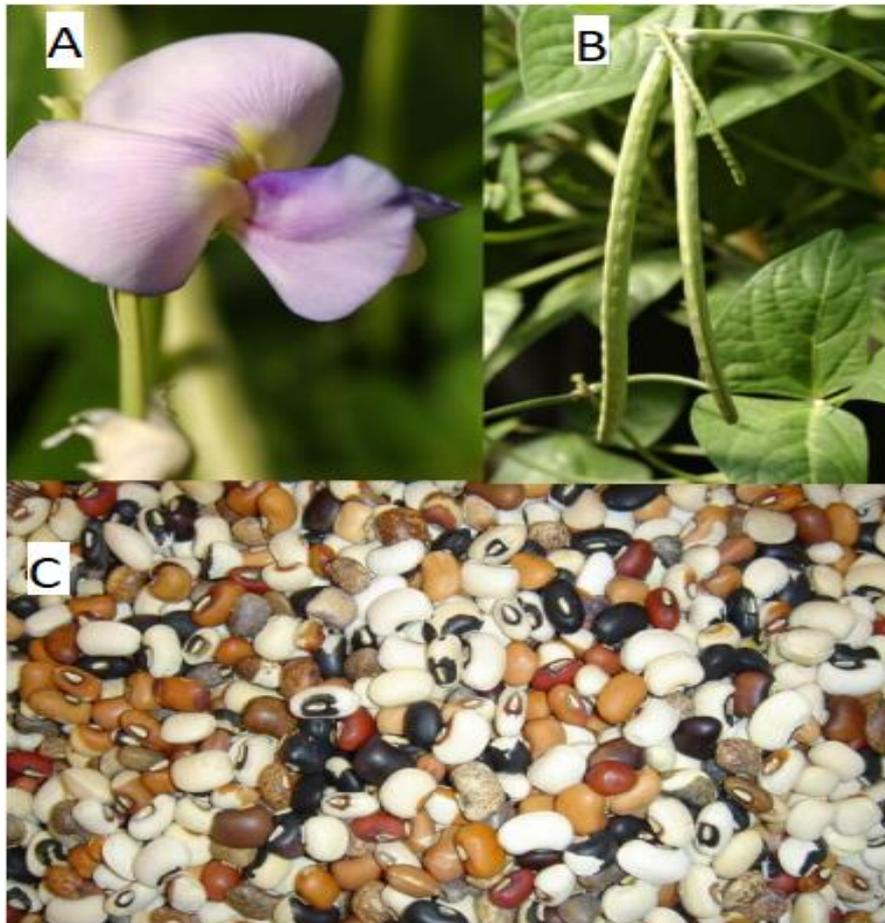
É uma leguminosa de cultura anual, herbácea, com hábito de crescimento geralmente indeterminado, de forma ereta, semiereta, semiprostrada ou prostrada (WANG *et al.*, 2017). Tem uma longa raiz principal e mecanismos de adaptação como virar as folhas para cima para evitar que fiquem muito quentes e fechar os estômatos que ajudam a dar tolerância à seca, isto é, períodos em que a leguminosa recebe pouca ou nenhuma água. Na Figura 1 é possível observar mais detalhes dos órgãos constituintes do feijão-caupi. A flor pode ter coloração de branco-amarelada e branco-violeta (Figura 1A), as vagens ocorrem aos pares e as folhas são trifolioladas com folíolos ovais (Figura 1B). Apresenta considerável diversidade morfológica do grão, incluindo a cor do tegumento e o tamanho (Figura 1C) e diversidade genética limitada (OECD, 2019).

2.1.2 Origem, produção e consumo

O feijão-caupi é originário da África do Sul, foi introduzido na alimentação brasileira no século XVI, com maior concentração de cultivo no nordeste brasileiro, tempos depois se expandiu para outras regiões brasileiras. Essa leguminosa tem ampla adaptabilidade às diferentes condições tropicais, bem como ao intenso trabalho de melhoramento da espécie (FREIRE FILHO, 1988). O grande crescimento se deu por variedades de forma de colheitas dos grãos, uma delas é deixando a forma tradicional de colheita manual, restrita somente aos pequenos

produtores da agricultura familiar, e substituindo pelo cultivo mecanizado, do preparo do solo até o beneficiamento do grão (COSTA, 2020).

Figura 1. Órgãos constituintes do feijão-caupi. A) flor; B) vagens e folhas verdes; C) grãos de diferentes cultivares.



Fonte: OECD, 2019.

O feijão no Brasil é classificado em dois grupos: I e II, que dentro do grupo I está o feijão comum, que pertence à espécie *Phaseolus vulgaris*, já no grupo II está o feijão-caupi que pertence à espécie *Vigna unguiculata* (L) Walp. O feijão-caupi, por sua vez, é classificado em cinco grupos de cultivares: biflora, melanophthalmus, sesquipedalis, textilis e unguiculata (OECD, 2019).

Com a ampliação geográfica da plantação de feijão, o cultivo de feijão-caupi, deixou de ser restrito à agricultura familiar e passou para grandes áreas de cultivos da espécie desse feijão. O cultivo desse feijão tem sido bem variado em torno de 1.000 kg/ha em cultivo sequeiro e de 1.700 kg/ha em cultivo irrigado. Com base em pesquisas genéticas do feijão-caupi tem muito potencial para grandes avanços em

sua produtividade e em sua qualidade nutritiva para que possa ser mais bem consumido e comercializado (FERREIRA; PELOSO; FARIA, 2002). Entre os países da América do Sul, o Brasil apresentou um aumento recente no cultivo do feijão-caupi, colocando o país em terceiro lugar em termos de área global e produção (CONAB, 2020; OECD, 2019).

O Nordeste é um dos principais produtores desse feijão-caupi possui solos semiáridos, o clima é quente e seco com pouca variação de temperatura durante o ano, tem uma média anual entre 25°C e 28° C, que ajuda no desenvolvimento da produção do feijão, sendo a maior parte do tempo de clima seco que é apropriado para a plantação do feijão (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2018).

A produção mundial de feijão-caupi foi de aproximadamente 8,90 milhões de toneladas, com produtividade de 616,26 kg/ha⁻¹ em uma área plantada de 14,5 milhões de hectares (FAO, 2016). Nas Américas, a produção em 2017/2018 foi de 819 mil toneladas de grão seco e a produção brasileira do grão representou 91% deste total (OECD, 2019).

A produção nacional na última safra 2020/2021 foi estimada em 712,6 mil com produtividade média de 545 kg/ha (CONAB, 2020). Devido à modernização aplicada à agricultura, a cultura do feijão-caupi tem se expandido pelo Cerrado, especialmente, no período de safrinha, alcançando altas produtividades e qualidade (FREIRE FILHO *et al.*, 2011). A produção nacional na safra 2020/2021 foi estimada 712,6 mil toneladas, com área plantada de 1.307.800 ha. O Ceará é o estado com maior área plantada, chegando a 380,4 mil hectares, porém com produtividades de 305 kg/ha⁻¹, inferiores às do Centro-Sul e Região Norte que chegam a 1376 kg/ha⁻¹. É o segundo feijão mais cultivado, ficando atrás apenas no feijão comum (Quadro 1), e tem sua safra concentrada no Nordeste brasileiro, com maiores produtividades principalmente no Piauí e Bahia (CONAB, 2020).

No Brasil, nos últimos anos, o estado do Mato Grosso vem se destacando como o maior produtor de feijão-caupi do país, sendo que em 2017, produziu 165,3 mil toneladas de grãos, graças à grande produtividade apresentada, de 1.274,2 kg/ha⁻¹ (IBGE, 2020), decorrente da tecnificação de seu cultivo no estado.

Quadro 1. Consumo e produção de feijão no mundo.

País	Consumo e produção
Índia	A produção de feijão foi de 6,82 milhões de toneladas em 2019, com projeção para 8,31 milhões de toneladas em 2025, crescimento de 3,8% a.a. no período. É o maior produtor de feijão do mundo e tem expandido fortemente sua produção nos últimos quatro anos.
Brasil	O consumo de feijão foi de 2,84 milhões de toneladas em 2019, e com previsão de crescimento de 3,6% a.a., estima-se para 2025 cerca de 3,48 milhões de toneladas. É um dos maiores produtores e consumidores mundiais de feijão. No entanto, o feijão vem perdendo espaço na alimentação dos brasileiros.
Estados Unidos	Importaram 518,2 mil toneladas de feijão em 2019, que deve chegar a 572,3 mil toneladas métricas até 2025, representa crescimento de 5,5% a.a. durante o período da previsão. O valor das importações foi de US\$ 358,5 milhões em 2019, e está projetado para US\$ 403,3 milhões até 2025, 5,3% a.a. Foram o quarto maior importador mundial, com 4,1% do valor total das importações, em 2019.
Rússia	Exportou 1,2 milhão de toneladas de feijão em 2019, e deve chegar a 1,36 milhão de toneladas em 2025 (3,5% a.a.). O valor das exportações de feijão foi de US\$ 358,8 milhões em 2019, e projeta-se para 2025 US\$ 404,3 milhões (3,8% a.a.). É o sétimo maior exportador de grãos secos do mundo, com uma participação em valor de exportação de 4,3%. Paquistão, Turquia, Índia, Emirados Árabes Unidos e Bangladesh são os principais importadores da Rússia.

Fonte: Adaptado de Mordor Intelligence (2020).

2.2 Importância do feijão-caupi na alimentação humana

A importância atual do feijão-caupi na alimentação humana decorre em grande parte de seu uso como cultura com alto conteúdo proteico (23% a 25% em média) de curta temporada para consumo humano. Além disso, se destaca pela presença de nutrientes (Tabela 1) como aminoácidos essenciais, carboidratos (62% em média), fibras alimentares, minerais e vitaminas (OECD, 2019).

O feijão-caupi pode ser consumido na alimentação na forma de grão seco, grão verde e vagem verde, assim como, na produção de farinha, grãos para

enlatamento e congelamento e vagens para salada (EMBRAPA, 2021). As folhas de feijão-caupi também podem ser colhidas para o consumo, durante os períodos de escassez de alimentos, como ocorre nos países africanos (OECD, 2019).

Tabela 1. Composição nutricional do feijão-caupi.

Nutrientes	Percentagem de matéria seca					
	Sementes imaturas	Cozido	Cru	Grãos integrais	Folhas/partes aéreas	Grão decorticado
Carboidratos	23,8	20,8	60,03	59,6	–	57,9
Gordura	0,66	0,53	1,26	2,1	2,8	1,6
Proteína	8,49	7,73	23,52	23,9	18,1	21,3
Fibra dietética total	6,4	6,5	10,6	10,7	24,1	1,4
Açúcar total	4,46	3,3	6,9	–	–	
Cinza	0,99	0,94	3,24	3,39	11,3	2
Água	66,1	70	11,95	11,1	79,1	15,9
Vitamina A	–	–	–	0,00002	-	-
Tiamina (B1)	–	–	–	0,00076	-	-
Riboflavina (B2)	–	–	–	0,00019	–	–
Niacina (B3)	0,00073	0,0005	0,0021	0,00314	–	–
Vitamina B6	–	–	–	0,00041	–	–
Vitamina C	0,0026	0,0004	0,0015	0,00169	–	–
Vitamina E	–	–	–	–	–	–
Cálcio	0,023	0,024	0,11	0,095	1.250	0,764
Ferro	0,00212	0,00251	0,0083	0,0112	0,169	0,0046
Magnésio	0,05	0,053	0,184	0,374	0,31	0,346
Fósforo	0,122	0,156	0,424	0,492	0,24	
Potássio	0,375	0,278	1.112	1.544	1.910	0,74
Sódio	0,005	0,0004	0,016	6.500	–	–
Selênio	0,0034	0,0025	0,009	–	–	–
Zinco	0,00142	0,00129	0,0034	0,0069	0,0046	0,009

Fonte: Abebe e Alemayehu (2022).

O feijão-caupi apresenta nutrientes necessários à saúde humana e contribui para a segurança alimentar e a saúde da população em todo o mundo, pois possui qualidades nutricionais e nutracêuticas, tais como o ferro, fósforo, magnésio, manganês e vitaminas do complexo A e B, é rico em fibras, tem função antioxidante e é um alimento com pouco teor de sódio e gordura (ABEBE; ALEMAYEHU, 2022).

O feijão fornece carboidratos, que proporcionam energia, além de nutrientes essenciais para uma boa nutrição, como proteínas ricas em lisina, vitaminas (principalmente as do complexo B), sais minerais (como ferro, cálcio, potássio e fósforo) e fibras que ajudam no bom funcionamento do intestino e no controle dos níveis de colesterol e glicose do sangue. A concentração elevada do aminoácido lisina no feijão é considerada de grande valor na complementação das proteínas dos cereais, como o arroz (CHAVES; BASSINELLO, 2014).

Conforme revisado por Abebe e Alemayehu (2022), a composição química e nutricional do feijão-caupi varia muito entre suas cultivares, mas de forma geral, seus grãos fornecem a maioria dos macro e micronutrientes, sendo abundante em vitaminas, fitonutrientes, antioxidantes, carboidratos e minerais. Além disso, a inclusão do feijão-caupi na dieta pode contribuir na redução de doença cardíaca devido à presença de compostos antioxidantes, pode melhorar a digestão, o paladar, e aumenta a mobilidade intestinal e é livre de colesterol.

Fatores antinutricionais também estão presentes no feijão e podem interferir na absorção de nutrientes, serem tóxicos ou acarretar danos à saúde quando ingeridos em grande quantidade. Entre eles, destacam-se os taninos, polissacarídeos, ácido fítico e inibidores de tripsina que são normalmente produzidos e armazenados durante a maturação do grão, para serem utilizados na germinação ou como mecanismo de defesa da planta. Os taninos inibem a digestibilidade das proteínas, enquanto o ácido fítico reduz a biodisponibilidade de alguns minerais essenciais (AVANZA *et al.*, 2013).

Quando ingeridos, esses fatores antinutricionais podem ter efeitos que prejudiquem a biodisponibilidade dos nutrientes, como o efeito quelante dos minerais Ca, Zn, Fe, Co, K e Mg, a inibição da digestão das proteínas e a diminuição da digestibilidade dos oligossacarídeos que causam flatulência. Mas esses efeitos podem ser minimizados ou eliminados com o remolho de 18 a 22 horas e a cocção do feijão (HIGASHIJIMA *et al.*, 2020; CHAVES; BASSINELLO, 2014). Porém, a

cozimento do feijão geralmente diminuiu o conteúdo de proteínas em torno de 3 a 6% e de carboidratos em torno de 35%. Essa considerável perda de carboidrato é atribuída principalmente à solubilização do amido solúvel presente na leguminosa durante o processo de cozimento (AVANZA *et al.*, 2013).

2.3 Importância do solo usado para o cultivo

Para o equilíbrio nutricional e para um solo produtivo é necessário ter boas características químicas que sustentam o crescimento da planta. Solo fértil fornece níveis ideais de nutrientes disponíveis para o crescimento das plantas, deixando mais vigorosas e saudáveis, com maior resistência a doenças, insetos, seca, frio e solos encharcados. Para uma boa produção a longo prazo é fundamental que o solo tenha uma boa fertilidade, uma vez que os solos funcionam como uma interface entre a hidrosfera, atmosfera, biosfera e litosfera e faz parte do ecossistema (CACHADA, 2007).

O solo funciona como se fosse um filtro, ele tem a capacidade de adsorver grande parte dos poluentes nele depositados, porém essa capacidade é limitada, podendo ocorrer alterações da qualidade do solo em virtude do efeito cumulativo da deposição de poluentes atmosféricos e resíduos sólidos urbanos, industriais e radioativos e da aplicação de fertilizantes e outros produtos agrícolas (LOURENÇO; LANDIM, 2005).

Sob a ação da atmosfera, hidrosfera, biosfera e das trocas de energia que se inter-relacionam o solo é um meio complexo e heterogêneo como as rochas e os sedimentos, assim se constituem por quantidades variadas de minerais, matérias orgânicas, água da zona não saturada e saturada, ar e organismos vivos, como as plantas, bactérias, fungos, protozoários, invertebrados e outros animais (BRADY; WEIL, 2013).

São as boas condições do solo que constituem importantes fatores para o desenvolvimento de uma plantação de feijão-caupi. De acordo com Pinho *et al.* (2005), os elementos climáticos são os que mais influenciam: na radiação solar, na temperatura, na luminosidade, no vento e na disponibilidade de água durante o

período de desenvolvimento da cultura. Dentre esses elementos climáticos, a temperatura e a água são os que mais interferem. O feijão-caupi se desenvolve bem na faixa de temperatura compreendida entre 19 e 34°C e necessita de pelo menos 50 mm de precipitação por mês, durante seu desenvolvimento (OLIVEIRA; CARVALHO, 1988).

Cravo e Smyth (2005) consideram que os principais problemas característicos de natureza química ocorrem em solos que contém as seguintes deficiências de P, K, S, Ca, Mg, Zn, toxina de alumínio e baixa capacidade de troca catiônica, os quais representam maiores entraves para o desenvolvimento adequado da maioria das culturas da plantação de feijão-caupi. Já as características de natureza físicas, são solos muito favoráveis ao uso agrícola, pois se trata de solos profundos e bem drenados, ocorrendo em relevo plano a suave ondulado, de fácil mecanização, sem grandes problemas de erosão.

A contaminação química ocorre por meio do uso de pesticidas nas plantações e pelo uso de medicamentos na criação de animais, os quais podem levar à contaminação dos solos. Todas as formas utilizadas para o controle de pragas no meio ambiente deve ser fiscalizadas e atenderem as normas brasileira estabelecidas pelos órgãos reguladores. Já a contaminação ambiental é quanto ao preparo da terra para plantio no qual introduzem substâncias acima do permitido e esse acúmulo pode contaminar o solo e conseqüentemente a plantação (CERRI NETO, 2008).

Os metais pesados nas plantas entram principalmente através do sistema radicular por absorção seletiva ou difusão do solo. A maioria dos metais pesados acumulados nas plantas localiza-se predominantemente nas raízes, e apenas uma pequena proporção é translocada para os tecidos aéreos (PERALTA-VIDEA *et al.*, 2009).

Esses produtos quando liberados ao solo acima da sua capacidade permitida contaminam as lavouras; conseqüentemente, os alimentos plantados naquela região. Outro tipo de contaminação pode ocorrer pelas indústrias quando elas lançam resíduos no esgoto sem os devidos tratamentos, muitas vezes, esses efluentes contêm metais pesados que chegam aos corpos d'água, conseqüentemente causando degradação aos solos (KHAN *et al.*, 2017).

2.4 Regulamentação dos metais pesados em solo brasileiro

O solo é fundamental para a atividade agrícola e manutenção da cadeia alimentar humana e animal. Porém, o solo pode acumular metais pesados oriundos de atividades industriais, agrícolas e urbanas e esse problema é global, por isso a necessidade de compreender o risco de exposição humana a metais pesados em solos contaminados e tomar medidas oportunas de gestão de riscos para prevenir problemas à saúde. Muitos países ainda não estabelecem sua própria estrutura de gerenciamento de risco e a maioria se baseia nos modelos e parâmetros da USEPA (YANG *et al.*, 2023).

No Brasil, o conselho nacional do meio ambiente (CONAMA) fez publicar no Diário Oficial da União nº 249, de 30/12/2009 a Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009 e posteriormente a Resolução nº 460, de 30 de dezembro de 2013, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

Dessa forma, o CONAMA estabelece as diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias de metais pesados. O conselho nacional do meio ambiente, no uso de suas atribuições e competências que lhes são conferidas pelo art. 8º, inciso VII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, tendo em vista o disposto em seu regimento interno:

Considerando a necessidade de prevenção da contaminação do solo visando à manutenção de sua funcionalidade e a proteção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas;

Considerando que a existência de áreas contaminadas pode configurar sério risco à saúde pública e ao meio ambiente;

Considerando a necessidade de prevenir a contaminação do subsolo e das águas subterrâneas que são bens públicos e reservas estratégicas para o abastecimento público e o desenvolvimento ambientalmente sustentável;

Considerando a necessidade de estabelecer critérios para definição de valores orientadores para a prevenção da contaminação dos solos e de definir diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas;

Parágrafo único. Na ocorrência comprovada de concentrações naturais de substâncias químicas que possam causar risco à saúde humana, os órgãos competentes deverão desenvolver ações específicas para a proteção da população exposta (CONAMA, 2009, p. 1).

Conforme a Resolução nº 420 do CONAMA, os valores orientados de substâncias químicas são estabelecidos sobre a qualidade do solo e da água. Segundo essa resolução, no anexo A, item 4, cada Estado da Federação poderá estabelecer, por substância, um único VRQ (Valor de Referência da Qualidade) ou um VRQ para cada tipo de solo; o VRQ é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de 47 diversos tipos de solos; estes VRQs para metais pesados em solos, em âmbito mundial, são bastantes heterogêneos (CONAMA, 2009).

A legislação brasileira estabelece três valores orientadores distintos: os Valores Orientadores de Referência de Qualidade (VRQs), os de Prevenção (VP) e os de Investigação (VI) como pode ser observado na Resolução nº 420 do CONAMA, Art. 6º, incisos XXII, XXIII e XXIV (CONAMA, 2009). No Brasil, poucos estudos podem estabelecer esses valores, para monitoramento ambiental necessitam de indicadores capazes de servir como referência para cada avaliação continuada dos impactos ambientais causados sobre os solos (PAYE *et al.*, 2010).

Os Valores Orientadores de Referência de Qualidade (VRQs), segundo a resolução são variáveis em função dos usos dos solos que podem ser assim citados: residencial, industrial e agrícola. Cada um dos VRQs são definidos pelos estados da federação e devem ser baseados na análise de dados sob condição natural e em análise de risco (CONAMA, 2009).

A determinação dos teores naturais, em cada unidade da federação, como indicado pelo CONAMA, é o primeiro passo para a unidade de valores orientadores de situações de contaminação, essencial para a construção de uma legislação voltada para o monitoramento e intervenção legal condizentes com a realidade local, evitando intervenções inadequada que incorram em prejuízos financeiros e sociais (BAIZE; STERCKEMAN, 2001).

2.5 Metais pesados e sua toxicidade à saúde humana

Os metais pesados são compostos por elementos químicos que na sua forma pura são sólidos e podem ser tóxicos quando ingeridos pelo organismo humano, e

que com o acúmulo desses metais pesados no organismo podem causar danos à saúde humana. Esses metais são elementos naturalmente existentes que têm peso atômico relativamente alto e uma densidade mínima equivalente a cinco vezes a densidade da água, eles são muito utilizados pelas áreas das indústrias, da agricultura e da medicina e por ter compostos altamente tóxicos quando levados a sua ampla distribuição no meio ambiente, prejudica à saúde humana (ALOSMAN *et al.*, 2019).

Os metais pesados podem desencadear danos irreversíveis para a saúde humana, em especial no sistema nervoso, cardiovascular, hematopoiético, medula óssea, sistema renal e gastrointestinal (Tabela 2). Os metais pesados também podem alterar as estruturas das células, as enzimas e substituir metais cofatores de atividades enzimáticas e são quimicamente muitos reativos. Assim, os metais pesados podem causar várias doenças humanas graves, como problemas respiratórios, patologia renal, distúrbios neurológicos e câncer (ALI *et al.*, 2020; SHABAN; ABDU, HASSAN, 2016).

A exposição dos seres humanos aos metais pesados considerados tóxicos à saúde acontece de forma inalatória de poluentes do ar, do consumo de água potável e dos alimentos contaminados pelos solos os quais contém os metais pesados além da quantidade permitida pelos órgãos de regulamentação (SHEN *et al.*, 2018). Os metais pesados causam danos à saúde quando as concentrações dessas substâncias se tornam excessivas para o corpo humano (ASUBIOJO *et al.*, 1997).

A maioria dos metais pesados é fortemente cancerígeno, além disso, essas substâncias podem produzir atrasos no crescimento e desenvolvimento humano, e interrupções de sistemas biorreguladores responsáveis por distúrbios funcionais ou psicossomáticos, como síndrome da fadiga crônica e patologias neurodegenerativas, (SHABAN; ABDU; HASSAN, 2016).

O consumo contínuo de alimentos contendo metais pesados tem causado preocupação, devido à toxicidade que os metais causam na saúde humana. Há uma grande diversidade de metais tóxicos, que causam alterações na qualidade nutricional do alimento que com o tempo acarreta danos à saúde humana (NOGUEIRA, 2012).

2.5.1 Cádmio (Cd)

O Cd é amplamente utilizado por indústrias para o processo de galvanização na fabricação de tintas, fertilizantes e baterias, sua composição é instável e duradoura por isso ele permanece anos na natureza quando é liberado de maneira incorreta no meio ambiente. O Cd é um metal não essencial que está naturalmente presente em todas as solos contaminando crustáceos, cereais e raízes. O mesmo ocorre no solo como um cátion bivalente (Cd^{2+}), em concentrações tipicamente variando de 0,1 a 1,0 mg kg⁻¹ (SMOLDERS *et al.*, 1999).

O Cd é biopersistente, pois tem meia-vida prolongada e poder de permanência no ambiente e nos tecidos, assim que absorvido pelo organismo, permanece resistente por muitos anos. Nos seres humanos afeta várias enzimas levando a disfunção renal (NOGUEIRA, 2012).

O Cd é um elemento potencialmente tóxico para as plantas, animais e homens. É particularmente perigoso devido à sua mobilidade relativamente alta em solos e transferência para as plantas. Além disso, plantas que crescem em solos contaminados podem acumular Cd nos tecidos comestíveis em grandes quantidades sem qualquer sintoma visível de toxicidade. O Cd tem recebido atenção especial por sua associação com diversos problemas na saúde humana (NOGUEIRA, 2012).

2.5.2 Cromo (Cr)

O metal Cr é um elemento de ocorrência natural e seu estado é oxidativo e hexavalente, ambos quando presentes no ambiente é derivado da ação dos humanos. O Cr pode ser encontrado nos estados de oxidação de Cr^{+2} a Cr^{+6} e os mais comuns devido à sua estabilidade são o trivalente Cr^{+3} e o Cr^{+6} (HOSSNER *et al.*, 1998). Este metal é mais usado na produção de aço refratário, lamas de perfuração, agentes de limpeza de galvanoplastia, fabricação catalítica e muito utilizados nas indústrias metalúrgicas (SHANKER *et al.*, 2005).

Estudos revelam que esse metal influencia em vários processos de desenvolvimento da planta, como o da germinação, toxicidade do Cr^{6+} deve-se à formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), durante a redução de Cr^{6+} ao Cr^{3+}

no interior da célula, com altas concentrações de ROS causando o estresse oxidativo que explica a maior parte da toxicidade de Cr nas plantas (ERTANI *et al.*, 2017). Os sintomas que esse metal causa na saúde humana é a deficiência em neuropatia, perda de peso e disfunção do metabolismo de glicose, o cromo trivalente resulta em uma diminuição dos níveis sérios de glicose, colesterol e regressão da aterosclerose (ZHITKOVICH, 2011).

2.5.3 Mercúrio (Hg)

O Hg é encontrado naturalmente no ambiente e existe em três formas: mercúrio elementar (metálico) que são usados em termômetros, amálgama odontológica, lâmpadas fluorescentes, interruptor elétrico, mineração e processos industriais, já o compostos inorgânicos de mercúrio são formados quando o mercúrio combina-se com outros elementos, como enxofre e oxigênio formando compostos ou sais, e podem ocorrer naturalmente no ambiente e os compostos orgânicos de mercúrio são elementos que estão presentes na extração de minérios, nas atividades industriais, em alguns fungicidas empregados na agricultura (CETESB, 2014).

O Hg ainda pode ser usado como conservantes de vacinas, em cosméticos, sabões, clareadores e na forma de agrotóxicos, estes usos são proibidos no Brasil, sendo permitidos o uso de mercúrio como antisséptico, na de timerosal (etilmercúrio tiossalicilato de sódio), para conservação de algumas vacinas. A inalação de altas concentrações de vapor de mercúrio metálico pode causar rápido danos aos pulmões, e podem causar distúrbios neurológicos, problemas de memória, erupções cutâneas e insuficiência renal como também pode produzir irritação e corrosão no sistema digestivo (CETESB, 2014).

2.5.4 Chumbo (Pb)

O Pb é altamente tóxico para a saúde humana e é um dos que mais são difundidos no solo, e não tem função biológica, porém pode causar disfunções morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas. De certa forma, as plantas

desenvolvem uma ampla gama de mecanismos de tolerância que são ativados em resposta a exposição ao Pb, uma vez que este elemento afeta as partes das plantas, por meio dos seus sistemas radiculares (SHARMA; DUBEY, 2005).

O Pb é usado em tubulações, maquinários industriais e outras superfícies. Dentro desse processo as plantações nas redondezas podem ser contaminadas por esse metal pesado, além das plantas, os rios e afluentes também podem ser contaminados, entretanto, insumos de origem animal e vegetal absorvem a substância. A forma mais comum de contaminação humana ocorre, principalmente, por via respiratória, logo pode ser por qualquer via, em decorrência das várias formas de exposição, entra na circulação sanguínea, e tem sua carga corpórea determinada pela exposição, dessas cerca de 60% do Pb absorvido são retirados pelo organismo e 40% excretados (PAOLIELLO; CAPITANI, 2003).

2.5.5 Arsênio (As)

Esse elemento é tóxico e a sua ingestão em por períodos longos tem sido associada com aparecimento de câncer, doenças cardiovasculares (hipertensão e aterosclerose), desordens neurológicas, distúrbios gastrointestinais, doenças renais e hepáticas, efeitos reprodutivos (SAKUMA; CAPITANI; TIGLEA, 2003). O As está presente em pesticidas, fontes de água mineral, plantas que entram em contato com a substância, a contaminação das plantas ocorre com a irrigação e no cultivo e com animais pela ingestão e água contaminada (FAITA *et al.*, 2013).

2.5.6 Manganês (Mn)

O Mn não ocorre naturalmente na forma metálica, mas é componente de mais de cem minerais, incluindo sulfetos, óxidos, carbonatos, silicatos, fosfatos e boratos. Os minerais, contendo Mn, mais comuns incluem pirolusita (dióxido de manganês), rodocrosita (carbonato de Mn), e rodonita (silicato de Mn) (OMS, 1999). As fontes de contaminação ocorrem naturalmente pelo ar, contudo as atividades humanas são fontes significativas de emissão de vários metais para o ambiente. Aerossóis, pesticidas e fertilizantes são possíveis fontes de contaminação do solo que se

somam a carga de Mn naturalmente presente na água doce e salgada, portanto em níveis elevados, o manganês pode causar efeitos tóxicos em diferentes regiões do corpo, sendo mais preocupantes os efeitos sobre o sistema nervoso central (AZEVEDO; CHASIN, 2003).

Tabela 2. Resumo dos efeitos tóxicos de alguns metais pesados na saúde humana.

Metal pesado	Toxidade	Referências
Cd	Distúrbios respiratórios, dérmicos, gastrointestinal e doenças renais;	Khatun, Intekhab e Dhak (2022)
Cr	Doenças de pele, anemia, câncer, teratogênico e mutagênico	Beukes <i>et al.</i> , (2017) Zhitkovich, (2011)
Hg	Distúrbios do sistema nervoso (memória, funções sensoriais, coordenação)	Balali-Mood <i>et al.</i> , (2021)
Pb	Distúrbios nos sistemas nervoso, hematopoiético, reprodutivo e cardiovascular	Shaban, Abdou e Hassan (2016)
As	Doenças cardiovasculares (hipertensão e aterosclerose), desordens neurológicas, distúrbios gastrointestinais, doenças renais e hepáticas, efeitos reprodutivos;	Sakuma, Capitani e Tiglia (2003)

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a concentração, transferência e acúmulo de macro e microelementos do solo para os grãos, folhas e vagem de feijão-caupi e avaliar o índice de poluição do solo os riscos à saúde humana associado ao consumo do grão.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar a concentração dos macro e microelementos (Cr, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, Ni, As, Al, Pb, Ba, V e Zn) em amostras de solo e feijão-caupi (folha, vagem e grão) coletados próximos a uma rodovia e a um aterro sanitário;
- Comparar as concentrações de minerais obtidas de diferentes posições da lavoura e sua relação com a distância horizontal da rodovia, e longitudinal ao aterro sanitário;
- Comparar as concentrações de metais pesados obtidos em solos com os valores estabelecidos pela Conama/Brasil para solos brasileiros;
- Calcular o índice de poluição do solo da lavoura do feijão-caupi;
- Calcular o coeficiente de acumulação de metais pesados do sistema solo/planta;
- Avaliar o risco à saúde humana dos metais pesados, associado à ingestão dos grãos de feijão-caupi.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área experimental

Este estudo foi realizado em uma lavoura de feijão-caupi presente em uma propriedade próxima a BR 040, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, de acordo com as coordenadas geográficas (20°34'05'S 54°32'58"W), no mês de setembro de 2021.

4.2 Delineamento experimental

O arranjo experimental foi o delineamento em blocos, formados por três linhas, com espaçamento entre linhas de 100 m, iniciando-se à uma distância de 50 m de um aterro sanitário em direção a um córrego e três colunas distribuídas a partir de 64 m de uma rodovia, com espaçamento de 200 m entre as colunas em direção a vegetação (Figura 2). Ao total formou-se 9 pontos de coletas, denominados de A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 e C3. Em cada ponto foi determinado um raio de 1 m para a realização das coletas.

4.3 Coleta das amostras de feijão-caupi

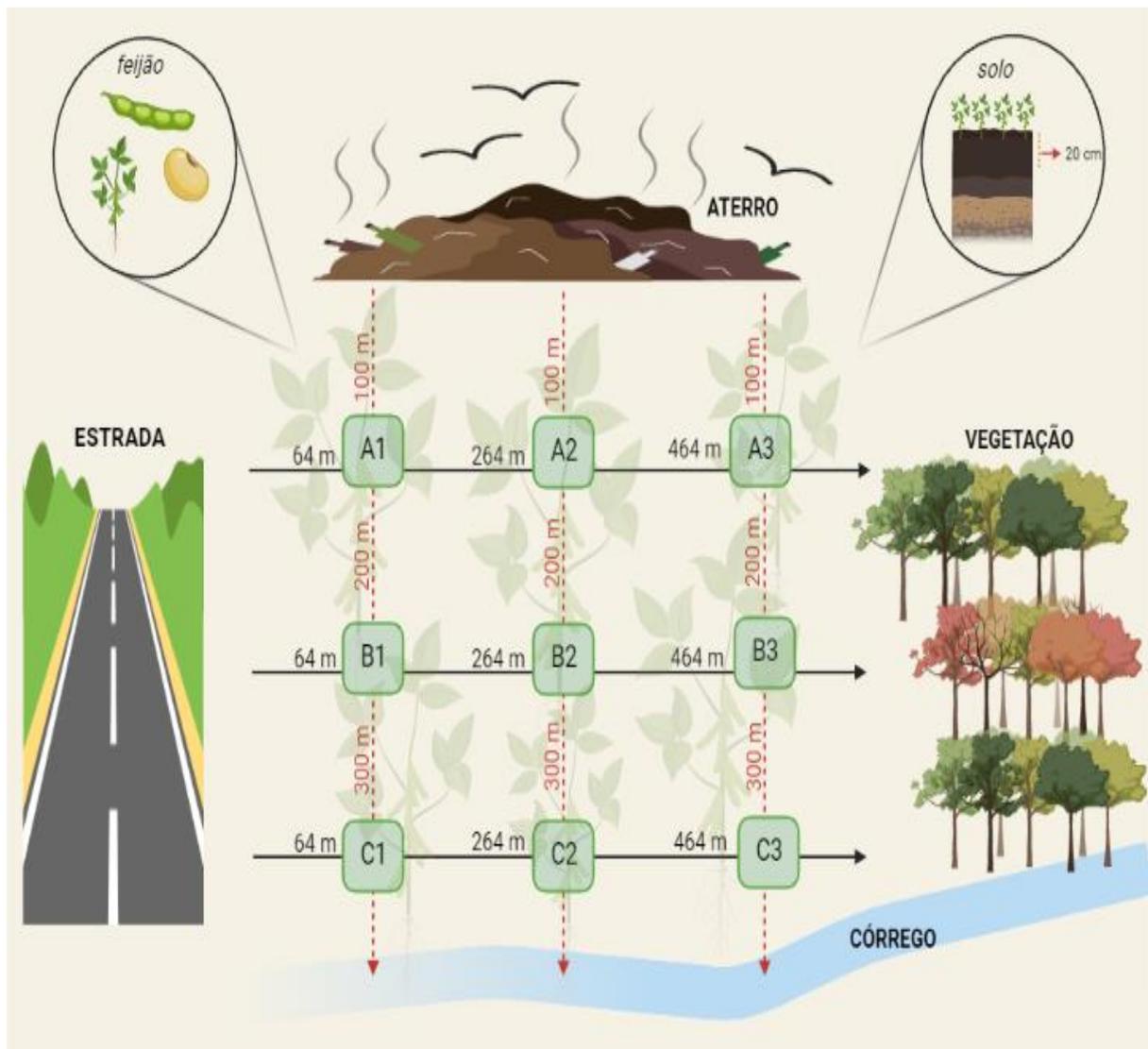
Em cada um dos pontos estabelecidos, foram coletadas 15 subamostras da planta de feijão-caupi, distribuídas aleatoriamente em um raio de 1 m. As subamostras foram misturadas para compor uma amostra composta, representativa de cada um dos nove pontos e foram depositadas em um saco plástico limpo, devidamente identificadas e encaminhadas para o Laboratório de Metabolismo Mineral e Biomaterial - UFMS para posterior processamento.

No laboratório, foi realizado o descasque e a separação de cada parte da planta, a ser utilizada, entre elas as folhas, as vagens e os grãos. As amostras não foram higienizadas para não alterar possíveis contaminações ambientais. Separadamente as amostras foram então secas em estufa de circulação de ar forçada a aproximadamente 65 °C por 72 h, trituradas em processador com lâminas

de aço inox (EKA® A11 basic), depositadas em coletor universal e mantidas a temperatura ambiente e em local seco para posterior análise.

Uma amostra representativa da espécie vegetal, contendo todas as partes da planta (caule, folha, flor, vagem, grão e raiz) foram depositadas no Herbário CGMS do Instituto de Biociências da UFMS para a devida identificação botânica, da espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp., Família Fabaceae.

Figura 2: Descrição esquemática do delineamento experimental, para estudar o efeito da contaminação por metal pesado em feijão plantado em diferentes distâncias de um aterro sanitário, em relação à diferentes distâncias de uma rodovia. Em destaque aparecem as partes coletadas da planta (folha, vagem e grão) e do solo.



Fonte: O autor (2022).

4.4 Coleta de solo

Em cada um dos pontos estabelecidos para a coleta do feijão-caupi, foram coletadas 5 subamostras de solo distribuídas aleatoriamente em um raio de 1 m, a uma profundidade de 20 cm, com o auxílio de um trado holandês. As subamostras foram misturadas para compor uma amostra composta, representativa de cada um dos nove pontos e foram depositadas em um saco plástico limpo, devidamente identificadas e encaminhadas para o Laboratório de Metabolismo Mineral e Biomaterial - UFMS para posterior análise.

No laboratório, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira granulométrica de 2 mm, homogeneizadas, depositadas em coletor universal e mantidas a temperatura ambiente.

A classificação do solo foi realizada por laboratório credenciado pela PAQLF da Embrapa Solos, de acordo com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, segundo a Instrução Normativa Nº 2, de 09 de outubro de 2008. O solo coletado foi classificado como solo tipo 2, que é um solo de textura média, com teor mínimo de 15% de argila e menor do que 35%, nos quais a diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila é menor do que 50.

4.5 Digestão ácida para análise em ICP-OES

Uma massa de 250 mg de cada amostra de folha, vagem e grão, individualmente, foi pesada em tubo de borosilicato de 25 mm e adicionado 3 mL de ácido nítrico (Merck - Darmstadt, Alemanha) a 65%, 2 mL de peróxido de hidrogênio a 30% (Merck - Darmstadt, Alemanha) e 1 mL de H₂O ultrapura. Em seguida, os tubos foram homogeneizados em agitador do tipo vortex (Biomixer QL-901), tampados com um funil de borosilicato de 50 mm e inseridos em um bloco digestor (Tecnal), sob as condições de operações de temperatura e tempo otimizadas conforme demonstrado na Tabela 3. O processo de digestão foi realizado em triplicata para as amostras de feijão, branco e para o teste de adição e recuperação (spike). Após a digestão, as soluções contendo os analitos das amostras de feijão, foram transferidas para um tubo de polietileno e reconstituídas para um volume final

de 10 mL com água ultrapura. Na Figura 2 é possível observar um resumo esquemático.

Tabela 3. Programa de digestão em bloco (grão, folha, vagem).

Estágio	Temperatura (°C)	Tempo (min)
1	80°	30
2	100°	90
3	150°	60

A pré-digestão do solo foi realizada com 300 mg de cada amostra e 5 mL de ácido nítrico (Merck - Darmstadt, Alemanha) a 65%, em tubo de borosilicato de 25 mm, que permaneceu overnight a temperatura ambiente (23 - 25 °C). Decorrida a pré-digestão, os tubos foram homogeneizados em agitador do tipo vortex (Biomixer QL-901), tampados com um funil de borosilicato de 50 mm e incubados em bloco digestor seguindo a ciclagem demonstrada na Tabela 4.

Após a digestão, as amostras de solo foram primeiramente filtradas em filtro Nalgon 7,5 µm, avolumadas para 10 mL e posteriormente armazenadas em tubo de polietileno.

Tabela 4. Programa de digestão em bloco (solo).

Estágio	Temperatura (°C)	Tempo (min)
pré-digestão	23 - 25	720
1	120	240
2	140	30

4.6 Espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

A dosagem dos macro e microelementos (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn) nas amostras de feijão e solo foram realizadas através da espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado - ICP OES, modelo iCAP 6300, Thermo Scientific, em visão axial.

Os elementos foram quantificados de acordo com o seu respectivo comprimento de onda, como segue: As (228.812 nm), Cd (226.502 nm), Cr (267.716 nm), Cu (324.754 nm), Fe (259.940 nm), Mg (279.553), Mn (257.610 nm), Mo (202.030 nm), Se (196.09 nm), Pb (283.306 nm), V (309.30 nm) e Zn (213.856 nm). As condições de operação do ICP-OES estão resumidas na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros instrumentais para a determinação de elementos utilizando ICP-OES.

Parâmetros	Configuração
Potência RF	1150 W
Fluxo do plasma	12 L min ⁻¹
Taxa de fluxo da amostra	0.45 L min ⁻¹
Fluxo auxiliar	0.5 L min ⁻¹
Nebulizador	20 psi
Integração	15 time(s)
Estabilização	20 time(s)
Gás (99.999%)	Ar

A curva de calibração externa foi construída com base na diluição de uma solução padrão estoque multi-elementar (SpecSol, Quimlab) contendo 100 mg/L de cada elemento. Para a análise quantitativa dos elementos foram utilizadas nove concentrações diferentes de cada um dos analitos contidas no intervalo de 0,001 a 2,0 mg/L.

Para a verificação da exatidão do método de quantificação de minerais por ICP-OES, foi realizado um teste de adição e recuperação, no qual 1 mg/Kg de cada um dos analitos analisados foi adicionado à uma amostra e a recuperação calculada após a quantificação. O teste de adição e recuperação apresentou um intervalo de 95 a 110% (Tabela 6) e está de acordo com o estabelecido pela IUPAC (THOMPSON; ELLISON, WOOD, 2002).

A determinação da concentração dos analitos na amostra foi realizada a partir da regressão linear: $Y = ax + b$ (y = intensidade; a = interseção com eixo y , quando $x = 0$; x = concentração do analito; b = inclinação da curva analítica).

Tabela 6. Teste de adição e recuperação para o grão do feijão.

Elementos	Recuperação (%)
As	95
Cd	100
Cr	98
Cu	102
Fe	100
Mg	102
Mn	99
Mo	97
Pb	110
Se	95
V	97
Zn	103

O limite de detecção (LD) foi calculado seguindo a equação 3 vezes o desvio padrão do branco, dividido pela inclinação da curva. E o limite de quantificação (LQ) foi calculado seguindo a equação dez vezes o desvio padrão do branco, dividido pela inclinação da curva (LONG; WINEFORDNER, 1983). Na Tabela 7 estão apresentados os dados referentes ao LD, LQ e o coeficiente de correlação (R^2) para cada elemento analisado. Os valores de LD e LQ dos 12 elementos analisados, apresentaram um intervalo de 0,0001-0,007 e 0,0004-0,022, respectivamente. O R^2 para as curvas de calibração variou entre 0,9987 e 0,9993.

Todos os materiais de plástico e de vidro utilizados no processamento das amostras foram previamente descontaminados de resíduo mineral por lavagem em

solução de Extran (Merck) a 5%, enxaguados abundantemente em água corrente e depois em água ultrapura. Em seguida os materiais foram imersos por, pelo menos, 24 horas em solução de ácido nítrico a 10%, enxaguados novamente em água ultrapura e secados em temperatura ambiente.

Tabela 7 - Figuras de mérito obtidas na análise em ICP-OES.

Elementos	LD (mg/Kg)	LQ (mg/Kg)	R²
As	0,003	0,001	0,9987
Cd	0,0003	0,0009	0,9990
Cr	0,0009	0,003	0,9987
Cu	0,001	0,004	0,9989
Fe	0,003	0,009	0,9989
Mg	0,0007	0,002	0,9993
Mn	0,0001	0,0004	0,9983
Mo	0,0005	0,002	0,9987
Pb	0,003	0,010	0,9990
Se	0,007	0,022	0,9992
V	0,0006	0,002	0,9986
Zn	0,001	0,005	0,9991

LD – limite de detecção; LQ – limite de quantificação e R² – coeficiente de correlação.

4.7 Índice de poluição (PI)

O índice de poluição (IP) foi calculado para avaliar a grau de poluição do metal pesado no solo, de acordo com a Equação 1:

$$PI = C_s / C_r \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

C_s é a concentração do mineral quantificada no solo (mg/kg) e C_r é a concentração de referência para solo brasileiro (mg/kg). Os valores de C_r utilizados, foram baseados na Resolução N^o 420, de 28 de dezembro de 2009 do CONAMA, que estabelece critérios e valores orientadores de qualidade (VRQs) do solo, quanto à presença de substâncias químicas e foram determinados a partir da análise de risco

baseada em saúde humana (CONAMA, 2009) e são mostrados na Tabela 10. De acordo com o valor de PI, o grau de poluição por minerais da superfície do solo é classificado em leve ($PI \leq 1$), moderado ($1 < PI \leq 3$) ou grave ($PI > 3$) (LU et al., 2019).

4.8 Coeficiente de acumulação biológica (BCF)

A avaliação da transferência dos metais do solo para as partes aéreas da planta, corresponde ao coeficiente de acumulação biológica (BCF). O BCF relaciona a quantidade total ou parcial de um elemento químico presente na espécie vegetal ou parte dela (acumulada em diferentes órgãos) com seu respectivo conteúdo total no solo (KIM; BAE, HWANG, 2023). A relação é definida pela Equação 2:

$$\text{BCF} = C_{\text{vagem}}/C_{\text{solo}}, C_{\text{folha}}/C_{\text{solo}}, C_{\text{grão}}/C_{\text{solo}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

C_{vagem} , C_{folha} e $C_{\text{grão}}$: concentrações de metais pesados na vagem, folha e grãos da planta (mg/Kg);

C_{solo} : concentrações de metais pesados no solo (mg/Kg).

Quando o $BCF \leq 1$, indica que a planta só pode absorver, mas não acumular metais pesados. Quando $BCF > 1$, indica que a planta pode acumular metais. Desta forma, há maior absorção do metal do solo pela planta e maior adequação da planta para fitoremediação e fitoextração. No entanto, quando $BCF < 1$, a espécie de planta não apresenta potencial de fito remediação como as conhecidas plantas hiper acumuladoras (TONG et al., 2022).

4.9 Cálculo de risco de ingestão

O valor estimado do potencial risco de danos à saúde devido ao consumo de metais pesados foi determinado com base nos valores de quocientes de risco (HQ) e índice de risco (HI), a partir da concentração dos macro e microelementos

quantificados no feijão e na ingestão crônica diária (CDI), que representa a dose diária de metais pesados (mg/Kg) à qual os consumidores podem estar expostos, seguindo a Equação 3 (USEPA, 2011):

$$\text{CDI} = \frac{C_w * IR * EF * ED}{B_w * AT} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

C_w – concentração do metal (mg/Kg);

IR – taxa de ingestão (0,1422 Kg / dia) (IBGE, 2020);

EF – frequência de exposição (350 dias / anos)

ED – duração da exposição (30 anos);

B_w – peso médio corporal (70 Kg);

AT – tempo médio de exposição para efeito não cancerígeno (10950 dias);

Os parâmetros utilizados para o cálculo do CDI, como taxa de ingestão, frequência de exposição e duração da exposição foram baseados em Onyele e Anyanwu (2018). Após ter obtido o CDI, foi calculado o valor do risco não cancerígeno para metais pesados. O HQ é a razão entre o CDI obtido na equação anterior e a dose oral de referência (RfD) (USEPA), considerado prejudicial à saúde e HI é a soma de todos os elementos “HQ” presente no feijão.

Para determinar a possibilidade de risco não cancerígeno de um elemento, o valor de HQ calculado deve ser menor que um, e valores acima de um, são considerados com possível risco cancerígeno. Na Equação 4 (USEPA, 1999), considera-se que o risco tóxico ocorre se $HQ > 1$, enquanto $HQ < 1$ representa perigo negligenciável (efeitos adversos não cancerígenos).

$$\text{HQ} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

CDI – é a dose de ingestão diária crônica de metais pesados (mg/kg/dia) obtido na equação 1;

RfD – dose oral de referência/ingestão (mg/kg/dia) (Tabela 8).

Com os valores de HQ individuais de cada elemento, foi realizado o cálculo do índice de risco por meio de mais de um metal pesado (HI), conforme a Equação 5 descrita abaixo.

$$HI = \sum HQ (HQ_{As} + HQ_{Cr} + HQ_{Cu} + HQ_{Pb} \dots) \quad \text{Eq. (5)}$$

O HI pressupõe a magnitude dos efeitos adversos proporcionais à soma das exposições à vários elementos a partir da soma dos quocientes de riscos, calculados na Equação 4.

Tabela 8 - Dose oral de referência (RfD) para metais pesados.

Elemento	RfD (mg/kg/dia)
As	3×10^{-4}
Cd	1×10^{-4}
Cr	3×10^{-3}
Cu	4×10^{-2}
Fe	0,70
Mn	0,14
Mo	5×10^{-3}
Pb	$3,5 \times 10^{-3}$
Se	5×10^{-3}
V	5×10^{-3}
Zn	0,30

O risco carcinogênico (CR) reflete a probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer durante a vida devido à exposição a um elemento químico com potencial para ser cancerígeno. Para estimar o risco de câncer foi usada a Equação 6:

$$CR = \frac{CDI}{SF} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

CDI – é a dose de ingestão diária crônica de metais pesados (mg/kg/dia) obtido na Equação 3;

SF – é o fator de inclinação oral carcinogênico.

O SF disponível para os metais pesados considerados carcinogênicos são os seguintes: As = 1,5 mg/kg/dia; Cd = 6,1 mg/kg/dia; Cr = 0,5 mg /kg/dia; Pb = 0,0085 mg/kg/dia (USEPA). Assim, quando a CR for inferior a 10^{-6} é considerado desprezível; um entre 10^{-6} e 10^{-4} é considerado aceitável (risco médio de desenvolver câncer em um ser humano, enquanto um valor de CR acima de 10^{-4} é considerado uma indicação de risco de câncer de alto potencial para a população exposta ao longo da vida (USEPA, 2010).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Concentração de macro e microelementos nos grãos de feijão-caupi

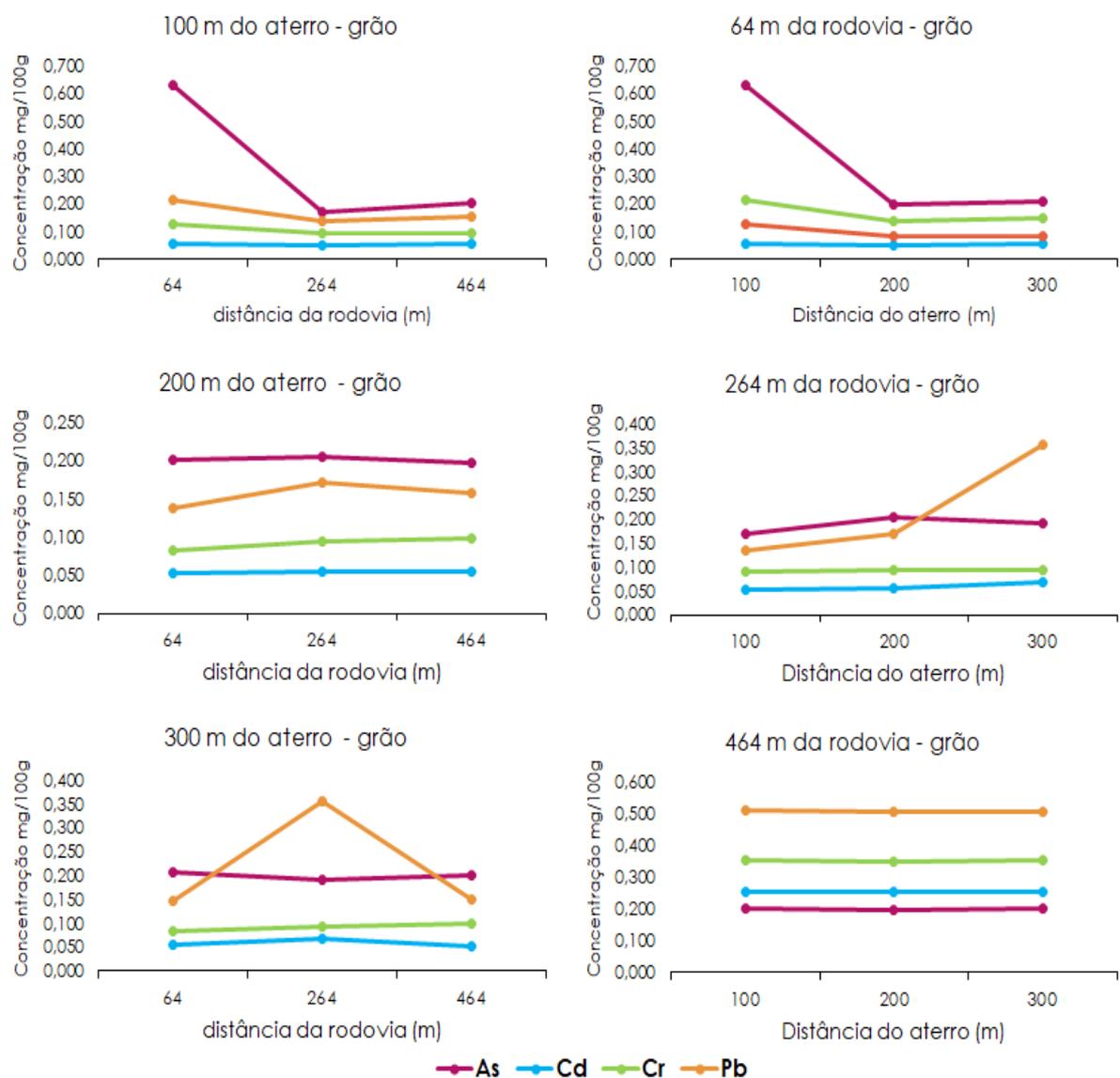
Os dados sobre a concentração de cada elemento no grão de feijão estão apresentados em mg/100g na Tabela 9. No presente estudo, a concentração de macro e microelementos do grão de feijão-caupi nas distâncias de 64 m, 264 m e 464 m da estrada e à 100 m do aterro diminui na seguinte ordem: A1 (64 m) - Fe > Mn > Mg > Zn > Cu > As > V > Se > Mo > Pb > Cr > Cd; A2 (264 m) - Mn > Fe > Mg > Zn > Cu > V > Se > As > Mo > Pb > Cr > Cd; A3 (464 m) - Fe > Mg > Zn > Mn > Cu > V > Se > As > Pb > Mo > Cr > Cd. Nas distâncias de 64 m, 264 m e 464 m da estrada e à 200 m do aterro diminui na seguinte ordem: B1 (64 m) - Mn > Fe > Mg > Zn > Cu > V > Se > Mo > As > Pb > Cr > Cd; B2 (264 m) - Mn > Fe > Mg > Zn > Cu > V > Se > As > Mo > Pb > Cr > Cd; B3 (464 m) - Mg > Fe > Zn > Mn > Cu > V > Se > As > Mo > Pb > Cr > Cd. E nas distâncias de 64 m, 264 m e 464 m da estrada e à 300 m do aterro diminui na seguinte ordem: C1 (64 m) - Mn > Mg > Fe > Zn > Cu > V > Mo > Se > As > Pb > Cr > Cd; C2 (264 m) - Fe > Mn > Mg > Zn > Cu > V > Pb > Se > As > Mo > Cr > Cd; C3 (464 m) - Fe > Mg > Zn > Mn > Cu > V > Se > As > Mo > Pb > Cr > Cd.

Os macro e microelementos quantificados em amostras coletadas no ponto A1, correspondente a 64 m da estrada e à 100 m do aterro, com exceção do Mn, apresentaram a maior concentração média nos grãos de feijão-caupi entre todas as distâncias avaliadas, que variaram de 7,132 mg/Kg de Fe a 0,053 de Cd, demonstrando a influência da maior proximidade concomitante da estrada e do aterro na concentração dos elementos. Pois, níveis elevados de metais pesados são frequentes em plantas cultivadas ao longo de vias de tráfego pesado, próximas a aterros sanitários e irrigadas com águas residuais tratadas ou não tratadas (NWACHUKWU; FENG; ALINOR, 2010).

Metais pesados foram detectados nos grãos de feijão-caupi em todos os pontos analisados e apresentaram um intervalo de concentração média de 0,170 - 0,629 mg/ Kg; 0,052 - 0,069 mg/ Kg; 0,082 - 0,123 mg/ Kg; 0,136 - 0,356 mg/ Kg para As, Cd, Cr e Pb, respectivamente. Essas informações podem ser melhor observadas na Figura 3. Interessante destacar que atualmente não existe um nível

de ingestão máxima tolerável (UL) estabelecido para crianças ou adultos em relação a estes elementos, tanto no Brasil como em outros países, apesar de serem tóxicos para os seres humanos (SADEE; FOULKES; HILL, 2016) e causarem graves problemas de saúde entre eles o câncer, alterações genéticas, doenças neurológicas e doenças cardiovasculares causadas pelo As (BARDACH *et al.*, 2015).

Figura 3. Distribuição da concentração dos metais pesados nos grãos de feijão-caupi nos diferentes pontos da lavoura.



Fonte: O autor, 2022.

Tabela 9. Concentração (média \pm desvio padrão) de macro e microelementos nas amostras de grão de feijão-caupi.

Mineral	Concentração de mineral no grão de feijão-caupi (mg/100g)								
	100 m*			200 m*			300 m*		
	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
As	0,629 \pm 0,016	0,170 \pm 0,002	0,201 \pm 0,005	0,200 \pm 0,006	0,205 \pm 0,004	0,197 \pm 0,001	0,208 \pm 0,001	0,190 \pm 0,005	0,202 \pm 0,008
Cd	0,054 \pm 0,005	0,052 \pm 0,001	0,055 \pm 0,006	0,053 \pm 0,003	0,055 \pm 0,006	0,054 \pm 0,006	0,054 \pm 0,006	0,069 \pm 0,008	0,053 \pm 0,002
Cr	0,127 \pm 0,263	0,091 \pm 0,013	0,096 \pm 0,250	0,082 \pm 0,007	0,095 \pm 0,022	0,098 \pm 0,019	0,085 \pm 0,011	0,094 \pm 0,003	0,100 \pm 0,033
Cu	1,052 \pm 0,246	0,622 \pm 0,048	0,987 \pm 0,309	0,670 \pm 0,173	0,751 \pm 0,150	0,764 \pm 0,231	0,642 \pm 0,233	0,663 \pm 0,187	0,729 \pm 0,130
Fe	7,132 \pm 1,546	3,861 \pm 0,414	4,361 \pm 1,806	3,768 \pm 0,864	4,444 \pm 0,831	4,317 \pm 1,233	3,362 \pm 1,222	4,369 \pm 1,182	4,232 \pm 0,986
Mg	3,519 \pm 0,541	3,484 \pm 0,804	4,331 \pm 0,426	3,414 \pm 1,003	3,913 \pm 2,356	4,498 \pm 4,551	3,557 \pm 0,188	3,198 \pm 1,561	4,069 \pm 1,939
Mn	3,644 \pm 0,802	5,392 \pm 0,393	2,449 \pm 0,969	6,312 \pm 1,236	5,292 \pm 0,690	2,088 \pm 0,592	4,885 \pm 1,559	3,736 \pm 0,973	1,521 \pm 0,348
Mo	0,227 \pm 0,027	0,148 \pm 0,008	0,144 \pm 0,033	0,212 \pm 0,014	0,191 \pm 0,023	0,194 \pm 0,020	0,321 \pm 0,034	0,164 \pm 0,028	0,182 \pm 0,026
Pb	0,216 \pm 0,054	0,136 \pm 0,019	0,156 \pm 0,060	0,137 \pm 0,038	0,170 \pm 0,089	0,156 \pm 0,087	0,148 \pm 0,060	0,356 \pm 0,099	0,149 \pm 0,033
Se	0,284 \pm 0,053	0,246 \pm 0,041	0,277 \pm 0,055	0,279 \pm 0,099	0,292 \pm 0,037	0,285 \pm 0,057	0,293 \pm 0,044	0,265 \pm 0,020	0,284 \pm 0,053
V	0,383 \pm 0,070	0,406 \pm 0,039	0,457 \pm 0,152	0,393 \pm 0,071	0,469 \pm 0,078	0,450 \pm 0,100	0,435 \pm 0,102	0,415 \pm 0,092	0,448 \pm 0,076
Zn	2,4364 \pm 0,321	2,819 \pm 0,191	2,525 \pm 0,631	2,081 \pm 0,241	3,274 \pm 0,415	2,398 \pm 0,248	2,027 \pm 0,239	2,436 \pm 0,256	2,523 \pm 0,366

(*) Distância em relação ao aterro sanitário; (**) Distância em relação à estrada.

De acordo com Sadee, Foulkes e Hill (2016), as diferentes concentrações de As em diferentes partes da planta de feijão (*Vicia faba*) claramente tem relação direta com o potencial tóxico de metal nesta cultura alimentar, principalmente se for cultivada em solo que tenha metais pesados disponíveis, o que representa um risco para as pessoas que consomem o alimento.

5.2 Concentração de macro e microelementos no solo de cultivo da lavoura de feijão

Em relação aos resultados obtidos no solo de cultivo da lavoura de feijão-caupi (Tabela 10) observou-se que o As nas distâncias A3, C1 e C3 apresentaram concentrações superiores ao valor de referência estabelecido pelo órgão de controle brasileiro que é de 15 mg/Kg (CONAMA, 2009), determinados a partir da análise de risco baseada em saúde humana, acima do valor estabelecido pelo órgão de controle chinês que é de (9,2 mg/Kg) (CHEN *et al.*, 1991), para solos com atividades agrícolas, industriais e de mineração, bem como acima dos valores estabelecidos nos EUA (5,2 mg/Kg). Enquanto o Cd apresentou concentrações maiores do que os valores de referência estabelecidos pelo Brasil/Conama (1,3 mg/Kg) e China (0,07 mg/Kg), nas distâncias A1, A3, B3, C1 e C3. Os demais elementos apresentaram concentração inferior aos valores de referência estabelecidos pelo Brasil, China e EUA.

De acordo com Rai *et al.*, (2019) e Alengebawy *et al.*, (2021), os metais pesados podem estar presentes naturalmente no solo, porém o uso excessivo de fertilizantes empregados com o intuito de atender à crescente demanda por alimentos e o uso de pesticidas utilizados para o controle de pragas, aumentam consideravelmente a disponibilidade de metais pesados no solo. Além disso, o transporte e o destino dos metais do solo para os cultivos, dependem principalmente da biodisponibilidade, da forma química e da especiação dos mesmos (ISLAM; AHMED; HABIBULLAH-AL-MAMUN, 2015).

Tabela 10. Concentração (média \pm desvio padrão) de macro e microelementos presentes no solo.

Mineral	Concentração de minerais no solo (mg/Kg)									Valor de referência (mg/Kg)		
	100 m*			200 m*			300 m*			CONAMA	EUA	China
	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**			
A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3				
As	11,514 \pm 0,127	8,021 \pm 0,076	18,653 \pm 0,135	11,537 \pm 0,140	8,441 \pm 0,044	14,032 \pm 0,014	10,707 \pm 0,092	10,213 \pm 0,008	19,230 \pm 0,036	15	5,2	9,2
Cd	1,307 \pm 0,011	1,047 \pm 0,008	1,649 \pm 0,008	1,294 \pm 0,009	0,995 \pm 0,005	1,361 \pm 0,006	1,411 \pm 0,011	1,092 \pm 0,007	1,709 \pm 0,008	1,3	ND	0,07
Cr	17,304 \pm 0,180	13,345 \pm 0,248	28,780 \pm 0,400	19,240 \pm 0,270	13,436 \pm 0,165	22,648 \pm 0,269	21,145 \pm 0,068	16,333 \pm 0,209	31,550 \pm 0,689	ND	37	54
Cu	56,429 \pm 0,139	40,907 \pm 0,982	80,471 \pm 2,327	60,602 \pm 0,940	36,642 \pm 0,547	71,317 \pm 2,067	75,860 \pm 1,237	51,040 \pm 0,793	90,715 \pm 2,484	200	17	20
Fe	12244,365 \pm	10557,132 \pm	12980,991 \pm	12377,409 \pm	10960,032 \pm	12655,634 \pm	11799,617 \pm	11328,787 \pm	13310,766 \pm	ND	1,8	2,8
	172,943	111,276	162,378	82,207	148,529	67,988	164,467	195,557	214,568			
Mg	121,117 \pm 3,462	75,102 \pm 1,627	174,654 \pm 5,342	130,513 \pm 0,467	60,338 \pm 1,573	195,398 \pm 1,641	137,938 \pm 5,540	95,423 \pm 1,854	180,215 \pm 3,542	ND	0,44	0,67
Mn	231,207 \pm 5,651	137,258 \pm 2,756	242,425 \pm 2,353	216,691 \pm 4,989	122,514 \pm 1,499	229,182 \pm 5,204	212,425 \pm 2,546	160,141 \pm 2,269	287,632 \pm 0,514	ND	333	432
Mo	2,507 \pm 0,026	1,707 \pm 0,012	4,125 \pm 0,031	2,482 \pm 0,032	1,797 \pm 0,012	3,073 \pm 0,019	2,293 \pm 0,024	2,200 \pm 0,009	4,251 \pm 0,017	30	0,59	1,2
Pb	15,825 \pm 0,135	11,250 \pm 0,067	22,876 \pm 0,197	15,631 \pm 0,126	11,719 \pm 0,042	18,134 \pm 0,095	14,609 \pm 0,171	13,753 \pm 0,112	24,107 \pm 0,114	72	16	24
Se	20,413 \pm 0,139	14,039 \pm 0,172	32,296 \pm 0,243	20,172 \pm 0,152	14,73 \pm 0,035	24,449 \pm 0,166	18,644 \pm 0,169	17,761 \pm 0,101	33,236 \pm 0,164	ND	0,26	0,22
V	90,018 \pm 5,201	70,928 \pm 1,124	124,860 \pm 1,850	97,668 \pm 0,506	68,951 \pm 1,671	111,364 \pm 1,374	104,265 \pm 1,030	93,253 \pm 1,667	144,583 \pm 3,762	ND	ND	ND
Zn	21,443 \pm 0,266	17,161 \pm 0,140	27,024 \pm 0,205	23,387 \pm 0,292	13,818 \pm 0,065	25,943 \pm 0,174	22,664 \pm 0,251	16,275 \pm 0,067	35,951 \pm 0,127	300	48	67

* Distância do aterro sanitário em direção ao córrego; ** Distância da rodovia em direção a vegetação. ND - valores não determinados.

A concentração de macro e microelementos quantificados no solo de cultivo do feijão-caupi nas distâncias de 64 m, 264 m e 464 m da estrada e à 100 m do aterro diminui na seguinte ordem: A1 (64 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Zn > Se > Cr > Pb > As > Mo > Cd; A2 (264 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Zn > Se > Cr > Pb > As > Mo > Cd; A3 (464 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Se > Cr > Zn > Pb > As > Mo > Cd.

Nas distâncias de 64 m, 264 m e 464 m da estrada e à 200 m do aterro diminui na seguinte ordem: B1 (64 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Zn > Se > Cr > Pb > As > Mo > Cd; B2 (264 m) - Fe > Mn > V > Mg > Cu > Se > Zn > Cr > Pb > As > Mo > Cd; B3 (464 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Zn > Se > Cr > Pb > As > Mo > Cd. E nas distâncias de 64 m, 264 m e 464 m da estrada e à 300 m do aterro diminui na seguinte ordem: C1 (64 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Zn > Cr > Se > Pb > As > Mo > Cd; C2 (264 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Se > Cr > Zn > Pb > As > Mo > Cd; C3 (464 m) - Fe > Mn > Mg > V > Cu > Zn > Se > Cr > Pb > As > Mo > Cd.

Diferentemente do grão de feijão-caupi, que apresentou a maior concentração de elementos entre todas as distâncias avaliadas no ponto A1, ou seja, no ponto mais próximo da estrada e do aterro, os macro e microelementos quantificados no solo apresentaram maior concentração no ponto C3, correspondente a 464 m da estrada e à 300 m do aterro, com exceção do Mg, que teve maior concentração no ponto B3. A concentração máxima foi de 13310,766 mg/Kg de Fe e a mínima de 1,709 de Cd, demonstrando que a proximidade com a vegetação e o córrego, tornou o solo mais rico em minerais, incluindo os metais pesados. Interessante observar que essa maior concentração de minerais também ocorre nos outros pontos (A3 e B3) mais próximos da vegetação quando comparado com os pontos localizados nas demais distâncias.

A deposição dos resíduos sólidos urbanos em aterro, particularmente os lixões a céu aberto, é o método mais comum de gestão de resíduos em países em desenvolvimento e normalmente não ocorre o gerenciamento adequado e não são projetados adequadamente para a coleta do chorume, o que provoca a lixiviação de cargas significativas de contaminantes para o ambiente (ESSIEN *et al.*, 2022), principalmente metais pesados, pois estes, estão presentes em locais de descarte de resíduos industriais e domésticos e podem facilmente lixiviar e contaminar o solo

e as águas subterrâneas, representando riscos elevados para o ambiente e à saúde humana (OKEREAFOR *et al.*, 2020).

5.3 Índice de poluição (PI)

Os índices médios de poluição (Pi) dos elementos As, Cd, Cu, Mo, Pb e Zn, no solo da lavoura do feijão-caupi, estão demonstrados na Tabela 11. Conforme pode ser observado na Tabela 10, não há valores de referência estabelecido pelo CONAMA para Cr, Fe, Mg, Mn, Se, V e Zn no solo, dessa forma, não foi calculado o Pi para estes elementos.

Com base no Pi médio, a poluição do solo causada por As, foi considerada moderada nos pontos A3 e C3, correspondente aos pontos mais distantes da rodovia e mais próximos da vegetação e leve nas demais áreas do cultivo. O Cd também causou poluição moderada do solo, porém, em todos os pontos de coleta da lavoura, com exceção dos pontos A2, B2 e C2, que correspondem a uma distância intermediária entre a rodovia e a vegetação local. Os demais elementos avaliados para o cálculo de Pi, causaram contaminação leve do solo em toda a extensão da lavoura. Tanto o As como o Cd, não desempenham função fisiológica conhecida nas plantas e podem ser translocados do solo e acumulados nas partes comestíveis das plantas através do sistema solo-planta (ALI *et al.*, 2020).

Tabela 11. Índices médios de poluição de As, Cd, Cu, Mo, Pb e Zn no solo de cultivo de feijão-caupi.

Distância do aterro (m)	Distância da rodovia (m)	Ponto de coleta	Índice de poluição (PI)					
			As	Cd	Cu	Mo	Pb	Zn
100	64	A1	0,77	1,01	0,28	0,08	0,22	0,07
	264	A2	0,53	0,81	0,20	0,06	0,16	0,06
	464	A3	1,24	1,27	0,40	0,14	0,32	0,09
200	64	B1	0,77	1,00	0,30	0,08	0,22	0,08
	264	B2	0,56	0,77	0,18	0,06	0,16	0,05
	464	B3	0,94	1,05	0,36	0,10	0,25	0,09
300	64	C1	0,71	1,09	0,38	0,08	0,20	0,08
	264	C2	0,68	0,84	0,26	0,07	0,19	0,05
	464	C3	1,28	1,31	0,45	0,14	0,33	0,12

Nos últimos anos, a contaminação do solo por metais pesados tem atraído cada vez mais a atenção e têm sido foco de diversos estudos em todo o mundo, principalmente em relação a sua toxicidade, persistência e bioacumulação no sistema solo-planta e solo-planta-humano (LU *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2022; MAVAKALA *et al.*, 2022; KIM; BAE; HWANG, 2023). Pois uma vez liberado para o solo, esses metais não sofrem degradação bioquímica e podem permanecer por muito tempo, devido a ampla meia-vida (ALI *et al.*, 2020), causando a degradação do solo, a contaminação das lavouras de produção de alimentos, ameaçando a cadeia alimentar e a saúde humana (TONG *et al.*, 2022).

5.4 Bioconcentração de macro e microelementos nas diferentes partes do feijão-caupi

Na Tabela 12 são apresentados os resultados do Coeficiente de Bioconcentração (BCF), considerando a razão entre a concentração dos elementos As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn contidos nas diferentes partes da planta em relação a concentração dos elementos presentes no solo obtido na lavoura de feijão-caupi (Figura 4), o que representa a taxa de transferência e acumulação dos elementos do solo para as partes aéreas do feijão (YAÑEZ *et al.*, 2019).

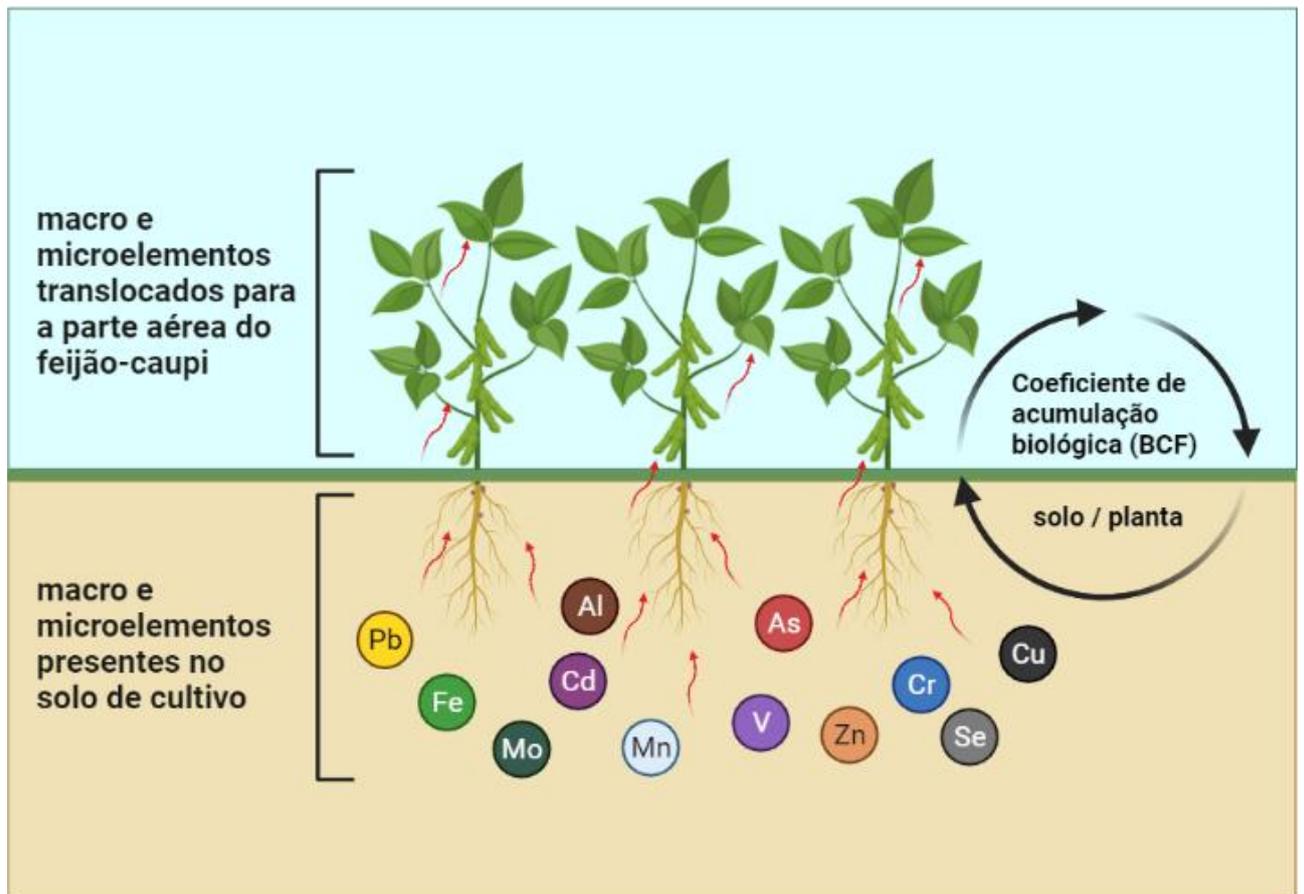
Os dados mostram que os elementos As, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Se e V apresentaram $BCF < 1$, tanto nas folhas, vagens, como nos grãos. Mg, Mn, Mo e Zn, apresentaram um $BCF > 1$, sendo que Mg e Mn foi maior na folha e na vagem, Mo no grão e Zn nas folhas, vagens e grãos, o que representa uma maior capacidade de absorver e acumular esses elementos nas diferentes partes da planta (TONG *et al.*, 2022).

Levando em consideração as diferentes partes do feijão-caupi e os diferentes pontos de coletas, o BCF de Mn, decresce na seguinte ordem: folha > vagem > grão, mantendo esse perfil em todos os pontos de coleta; Mg: folha > vagem > grão nos pontos A1 - A3, B1 - B3, C1 e C3; e vagem > folha > grão no ponto C2. Mo decresce na seguinte ordem: grão > folha > vagem em todos os pontos de coleta, com

exceção de B3 que apresenta o perfil de grão > vagem > folha. E por fim, Zn decresce na seguinte ordem: grão > folha > vagem em todos os pontos de coleta.

Apesar do As ter apresentado $BCF < 1$, o feijão-caupi apresentou a capacidade de absorver As, com BCF decrescendo na seguinte ordem: folha > vagem > grão, em todos os pontos de coleta com exceção do ponto A1 que apresentou o perfil: grão > folha > vagem. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Yañes *et al.* (2019), Sadee; Foulkes e Hill *et al.*, (2016) e Rafiq *et al.* (2017) que quantificaram as concentrações de As em lavouras de feijão da espécie *Vicia faba* L. e observaram a maior absorção pelas folhas, do que nos grãos.

Figura 4. Representação esquemática da acumulação biológica (BCF) de macro e microelementos em feijão-caupi.



Fonte: O autor, 2022.

Tabela 12. Coeficiente de acumulação biológica (BCF) de metais pesados em diferentes partes do feijão-caupi (vagem, folha e grão).

Elemento	Parte da planta	Coeficiente de acumulação biológica (BCF) solo/planta								
		100 m*			200 m*			300 m*		
		64 m** Ponto A1	264 m** Ponto A2	464 m** Ponto A3	64 m** Ponto B1	264 m** Ponto B2	464 m** Ponto B3	64 m** Ponto C1	264 m** Ponto C2	464 m** Ponto C3
As	Vagem	0,229	0,318	0,140	0,241	0,316	0,167	0,011	0,266	0,135
	Folha	0,547	0,724	0,318	0,515	0,751	0,369	0,024	0,573	0,261
	Grão	0,546	0,212	0,108	0,173	0,243	0,141	0,009	0,186	0,105
Cd	Vagem	0,437	0,550	0,346	0,465	0,592	0,418	0,435	0,547	0,339
	Folha	0,603	0,715	0,459	0,641	0,795	0,516	0,569	0,883	0,455
	Grão	0,415	0,497	0,331	0,410	0,548	0,399	0,385	0,629	0,312
Cr	Vagem	0,124	0,078	0,038	0,056	0,081	0,045	0,052	0,116	0,035
	Folha	0,165	0,124	0,059	0,103	0,177	0,076	0,084	0,140	0,047
	Grão	0,074	0,069	0,033	0,043	0,071	0,043	0,040	0,058	0,032
Cu	Vagem	0,307	0,154	0,070	0,139	0,226	0,095	0,106	0,128	0,108
	Folha	0,225	0,196	0,102	0,188	0,226	0,191	0,135	0,172	0,161
	Grão	0,186	0,152	0,123	0,111	0,205	0,107	0,085	0,130	0,080
Fe	Vagem	0,006	0,004	0,004	0,007	0,004	0,003	0,005	0,005	0,005
	Folha	0,061	0,029	0,025	0,044	0,024	0,024	0,022	0,027	0,026
	Grão	0,006	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003
Mg	Vagem	0,623	0,682	0,450	0,589	1,125	0,359	0,678	0,824	0,428
	Folha	0,879	2,714	1,007	0,912	1,562	0,627	0,775	0,780	0,489
	Grão	0,291	0,464	0,248	0,262	0,648	0,230	0,258	0,335	0,226
Mn	Vagem	0,813	1,862	0,411	1,675	1,612	0,233	1,386	0,914	0,151
	Folha	4,410	4,582	2,621	8,254	9,706	1,505	6,462	5,401	0,568

	Grão	0,158	0,393	0,101	0,291	0,433	0,091	0,230	0,176	0,053
	Vagem	0,541	0,520	0,218	0,379	0,555	0,456	0,529	0,418	0,205
Mo	Folha	0,608	0,670	0,281	0,550	0,702	0,370	0,589	0,542	0,246
	Grão	0,907	0,869	0,348	0,853	1,065	0,633	1,398	0,746	0,428
	Vagem	0,119	0,178	0,083	0,142	0,209	0,105	0,155	0,231	0,084
Pb	Folha	0,309	0,396	0,193	0,322	0,433	0,270	0,327	0,352	0,183
	Grão	0,136	0,120	0,068	0,088	0,145	0,086	0,101	0,259	0,062
	Vagem	0,191	0,264	0,116	0,206	0,271	0,142	0,214	0,229	0,113
Se	Folha	0,404	0,516	0,226	0,429	0,567	0,264	0,423	0,419	0,191
	Grão	0,139	0,175	0,086	0,138	0,198	0,117	0,157	0,149	0,085
	Vagem	0,091	0,087	0,072	0,095	0,114	0,073	0,106	0,101	0,062
V	Folha	0,011	0,218	0,124	0,085	0,178	0,123	0,134	0,110	0,082
	Grão	0,043	0,057	0,037	0,040	0,068	0,040	0,042	0,045	0,031
	Vagem	0,673	1,543	0,758	0,641	2,041	0,804	0,734	1,032	0,553
Zn	Folha	0,686	0,783	0,495	0,580	1,961	0,623	0,563	0,972	0,543
	Grão	1,136	1,643	0,934	0,890	2,369	0,924	0,894	1,497	0,702

* Distância do aterro sanitário em direção ao córrego; ** Distância da rodovia em direção a vegetação.

Os resultados do nosso estudo, estão de acordo com o que foi proposto por CHOW *et al.*, 2018) em que afirma que o feijão da espécie *V. unguiculata*, parece possuir um sistema de defesa acionado em resposta ao estresse oxidativo induzido por metais pesados presentes na água de irrigação ou no solo, em que a vagem desempenha um papel protetor do grão. Assim, apesar da contaminação dos alimentos por metais pesados e o potencial risco à saúde humana, a maioria das plantas pode armazenar níveis significativos de metais em seus tecidos e, em seguida, translocá-los para seus brotos e folhas (YADAV *et al.*, 2022). Em nosso estudo, os elementos potencialmente tóxicos apresentaram BCF < 1, ou seja, apresentam a capacidade de absorver, mas não de acumular.

Esse movimento dos elementos, tanto dos essenciais como dos potencialmente tóxicos são coordenados por uma complexa rede de captação, sequestro, transporte e desintoxicação dentro das plantas, assim, é de grande importância monitorar o comportamento desse sistema solo-planta-humano (SHABBIR *et al.*, 2020). Pois na cadeia alimentar, os seres humanos dependem muito do solo, pois se alimentam de plantas e / ou de animais que comem plantas e que podem acumular níveis desfavoráveis de metal pesado, assim a contaminação do solo está diretamente relacionada com a saúde humana (SHABAN; ABDU; HASSAN, 2016; KHATUN; INTEKHAB; DHAK, 2022).

É importante salientar que a disponibilidade e translocação dos metais pesados no sistema solo-planta, também são afetados por outros fatores, como a taxa de transpiração planta, o pH do solo, a matéria orgânica, o conteúdo de argila do solo, a capacidade de troca catiônica, bem como, o teor de óxido de ferro e manganês, as condições climáticas e a presença de microorganismos (TONG *et al.*, 2022).

Além da absorção radicular, outra fonte importante de metal pesado para o feijão que deve ser considerada, é a deposição atmosférica que causa impacto direto na concentração de metais nas partes aéreas, como folha, vagem, flores e caule, seguida da absorção e distribuição pela planta (TEMMERMAN *et al.*, 2015). Esses metais pesados atmosféricos, decorrente em sua maioria da poluição lançada no ambiente em áreas urbanas e industriais, penetram nas plantas por meio de

órgãos foliares como as cutículas e depois são acumulados nos tecidos subjacentes (SHAHID *et al.*, 2017).

5.5 Risco à saúde associado a ingestão do feijão-caupi

Prever ou medir os prováveis riscos para a saúde humana oriundos da exposição aos metais pesados provenientes principalmente do solo, água, deposição atmosférica e acúmulo em diferentes culturas utilizadas como alimento, tem se tornado cada vez mais comum (ALI *et al.*, 2020). E essa avaliação de risco é analisada juntamente com os dados de índices de poluição do solo, fatores de transferência do solo para a planta e de bioacumulação, para melhor compreensão das ameaças à saúde humana.

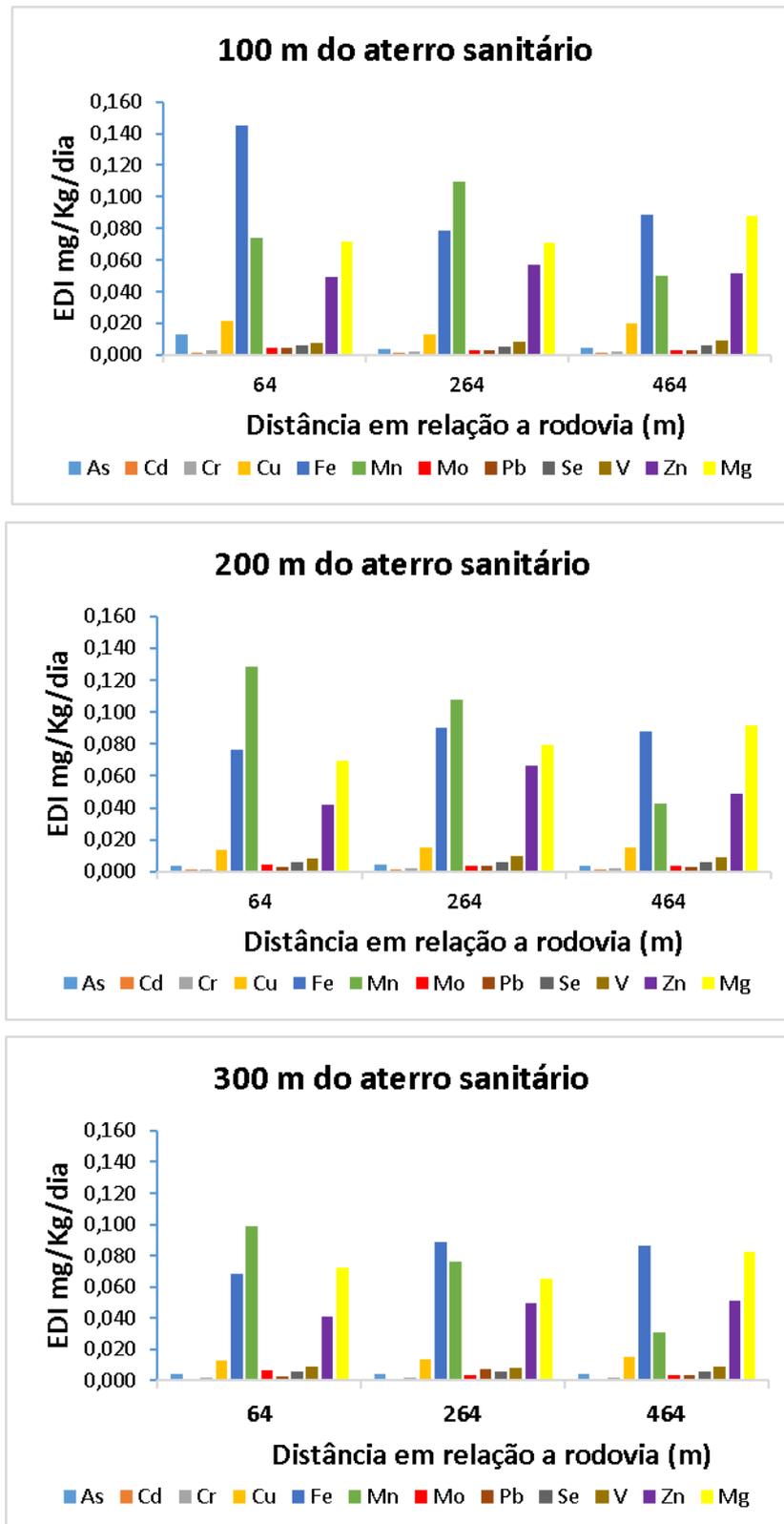
A estimativa de ingestão diária (Figura 5) de metais pesados para adultos devido ao consumo de feijão-caupi se mostrou abaixo da dose oral máxima diária recomendada pela USEPA para o Cr ($3,00 \times 10^{-3}$ mg kg d), Cu ($4,00 \times 10^{-2}$ mg kg d), Mn ($1,40 \times 10^{-1}$ mg kg d) e Zn ($3,00 \times 10^{-1}$ mg kg d), estando assim dentro de um limite seguro para o consumo, não oferecendo riscos à saúde de adultos quando expostos a uma frequência de exposição 350 dias/ano a esses elementos.

Por outro lado, a estimativa de ingestão diária de metais se mostrou acima da dose oral máxima diária, para o Cd ($1,00 \times 10^{-3}$ mg kg d) em todos os pontos e para o Pb ($3,50 \times 10^{-3}$ mg kg d) nos pontos A1 (64 m / 100 m), B2 (264 m / 200 m) e C2 (264 m / 300 m). Esses resultados demonstram que o consumo de feijão-caupi pode expor o consumidor a metais pesados, mesmo que a níveis baixos. A consequência disso, é que a exposição a longo prazo, pode fazer com que os metais se acumulem em órgãos vitais do corpo humano e podem representar riscos à saúde humana (BALALI-MOOD *et al.*, 2021), como câncer, distúrbios ósseos, efeitos neurológicos, renais, hematopoiéticos e reprodutivos (SHABAN; ABDYOU; HASSAN, 2016).

Em nosso estudo, os resultados indicaram que os valores de HQ (Tabela 13) de metais pesados no grão de feijão-caupi para os elementos As, Cd, Pb, Se e V, foram acima do limite de segurança de 1 e o HI de todos os elementos estudados foram maior que 1 (Figura 6), com valor mínimo de 27 no ponto A2 e máximo de 58,28 no ponto A1, sendo que a maior contribuição para o elevado valor de HI foi de

As e Cd. Importante destacar que o maior valor de HQ foi de As (40,84) no ponto A1, que representa o ponto mais próximo da rodovia e do aterro sanitário, concomitantemente, contribuindo com 70% para o valor de HI do ponto A1. O HQ para Mg não pode ser calculado, pois não há disponível o valor de R_{fd}. Esses achados sugerem que metais pesados na parte comestível do feijão-caupi (grão) podem causar efeitos prejudiciais à saúde de adultos.

Figura 5. Estimativa de ingestão diária (EDI) de cada elemento devido o consumo de feijão-caupi, para homens e mulheres adultos de 30 anos e 70 Kg de peso corporal.



Fonte: O autor (2022).

Tabela 13. Quociente de risco (HQ) e índice de risco crônico (HI) de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn, considerando o consumo de feijão-caupi por brasileiros adultos (homens e mulheres) de 70 Kg.

Elementos	HQ (Adultos de 30 anos de idade)								
	100 m*			200 m*			300 m*		
	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
As	40,84	11,04	13,07	12,98	13,33	12,82	13,52	12,36	13,12
Cd	10,56	10,15	10,64	10,34	10,62	10,58	10,60	13,38	10,36
Cr	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cu	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Fe	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Mn	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Mo	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1,25	<1	<1
Pb	1,20	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1,98	<1
Se	1,11	<1	1,08	1,09	1,14	1,11	1,14	1,03	1,11
V	1,49	1,58	1,78	1,53	1,83	1,75	1,69	1,62	1,75
Zn	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
HI	58,28	27,00	29,73	29,50	30,66	29,46	30,79	32,75	29,37

Além disso, após estimar o risco carcinogênico (CR) (Tabela 14) com base na dose diária de ingestão crônica dos metais pesados, considerando a porção de 142,2 g / dia de feijão-caupi e nos valores de inclinação (SF) (USEPA 2010) para os elementos As (1,5 mg/kg/dia), Cd (6,1 mg/kg/dia), Cr (0,5 mg/kg/dia) e Pb (0,0085 mg/kg/dia), observa-se que os quatro elementos apresentam risco carcinogênico, com valor máximo para As ($1,8 \times 10^{-2}$) no ponto A1 e valor mínimo de $2,24 \times 10^{-5}$ para Pb no ponto A2, por apresentarem valores acima do limite aceitável (10^{-6} a 10^4).

Figura 6. a) Quociente de risco (HQ) dos elementos As, Cd, Se, e V considerando o consumo de feijão-caupi, por homens e mulheres adultos; b) Índice de risco crônico (HI) baseado no somatório de HQ dos elementos (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Se, V e Zn). HQ e HI acima da linha pontilhada representam valores > 1 , que indicam riscos para à saúde humana.

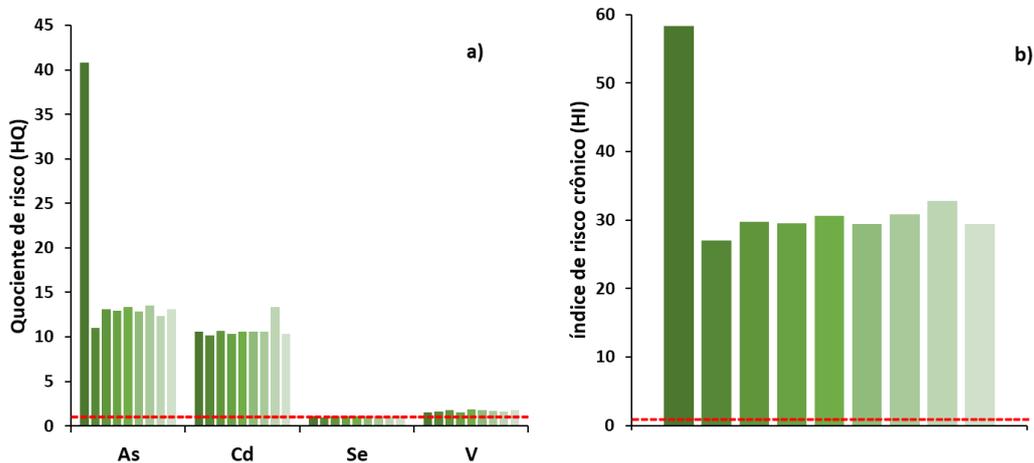


Tabela 14. Risco carcinogênico dos metais As, Cd, Cr e Pb, para mulheres e homens adultos de 30 anos de idade e 70 Kg de peso corporal ao consumir uma porção de 142,2 g / dia.

Elementos	Risco carcinogênico (CR)								
	100 m*			200 m*			300 m*		
	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**	64 m**	264 m**	464 m**
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
As	1,8 x10-02	5,0 x10-03	5,9 x10-03	5,8 x10-03	6,0 x10-03	5,8 x10-03	6,1 x10-03	5,6 x10-03	5,9 x10-03
Cd	1,6 x10-03	1,5 x10-03	1,6 x10-03	2,0 x10-03	1,6 x10-03				
Cr	3,7 x10-03	2,7 x10-03	2,8 x10-03	2,4 x10-03	2,8 x10-03	2,9 x10-03	2,5 x10-03	2,7 x10-03	2,9 x10-03
Pb	3,6 x10-05	2,2 x10-05	2,6 x10-05	2,3 x10-05	2,8 x10-05	2,6 x10-05	2,4 x10-05	5,9 x10-05	2,5 x10-05

CONCLUSÃO

A presença de metais pesados no sistema solo-planta-humano tem atraído cada vez mais a atenção e têm sido foco de diversos estudos em todo o mundo, principalmente em relação a sua toxicidade, persistência e bioacumulação que afeta toda a cadeia alimentar colocando em risco a saúde humana.

Nesse sentido, os resultados deste trabalho, demonstraram que as concentrações de As, Cd, Cr e Pb nos grãos de feijão foram detectados em todos os pontos avaliados e a concentração de todos os elementos foram mais elevadas no ponto A1, demonstrando a influência da proximidade concomitante da estrada e do aterro na concentração dos elementos.

A concentração do As e do Cd no solo de cultivo do feijão-caupi, ultrapassaram o valor de referência estabelecido pelo CONAMA que é de 15 mg/Kg e 1,3 mg/Kg, respectivamente, determinado com base na análise de risco à saúde humana, em alguns pontos da lavoura. Com base no PI, esses elementos também foram responsáveis pela contaminação moderada do solo em maior parte da lavoura. O As causou maior contaminação do solo próximo à rodovia, enquanto o Cd, causou contaminação tanto nos pontos próximos da rodovia, como da vegetação. Neste estudo, uma maior contaminação do solo próximo ao aterro sanitário, só foi evidente no ponto A3.

O feijão-caupi apresentou uma maior capacidade de absorver e acumular Mg e Mn na folha, seguida da vagem e grão e Mo e Zn no grão, seguido da folha e vagem, com um BCF > 1. O grão parece ter recebido uma proteção da vagem, pois elementos potencialmente tóxicos como As, Cd, Cr e Pb, foram absorvidos pelo grão em todos os pontos da lavoura, porém não apresentaram a capacidade de acumulação na parte comestível.

Os elementos Cr, Cu, Mn e Zn apresentaram concentração no grão dentro dos limites seguros para o consumo. Porém, a estimativa de ingestão de Cd e Pb se mostrou acima da dose oral máxima diária. Além disso, os quocientes de risco dos elementos As, Cd, Pb, Se e V, foram acima do limite de segurança, o índice de risco foi > 1 para todos os elementos analisados e com base na dose diária de ingestão crônica, os metais pesados As, Cd, Cr e Pb apresentam risco carcinogênico.

A proximidade da lavoura de feijão com a rodovia e com o aterro contribuíram para a contaminação do solo e conseqüentemente do feijão-caupi, expondo os

consumidores aos metais pesados principalmente da parte comestível (grão), oferecendo riscos à saúde de adultos. Esses achados evidenciam a importância do monitoramento e compreensão do sistema solo-planta-humano, principalmente quando as condições ambientais em torno das lavouras, são favoráveis a contaminação, representando um grande risco para a saúde pública.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEBE, B. K.; ALEMAYEHU, M. T. A review of the nutritional use of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) for human and animal diets. **Journal of Agriculture and Food Ressorce**, v. 10, p. 100383, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100383>.
- ALENGEBAWY, A. et al. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. **Toxics**, v. 9, n. 3, p. 42. 2021. doi:10.3390/toxics9030042.
- ALI, W. et al. Comprehensive review of the basic chemical behaviours, sources, processes, and endpoints of trace element contamination in paddy soil-rice systems in rice-growing countries. **Journal of Hazardous Materials**, v. 397, p. 122720, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122720>.
- ALOSMAN, M.; FEI YANG, I. Y. M. Exposure routes and health effects of heavy metals on children. **Biometals**. <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00193-5>, 2019.
- ARAÚJO FILHO, J. C. et al. **Ambientes e solos do semiárido: potencialidades, limitações e aspectos socioeconômicos**. In: ARAÚJO FILHO, J. C. Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro: Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil-BNB, 2018. p. 17-84.
- ASUBIOJO, N. A. et al. Elementos traço em amostras de água potável e subterrânea no sul da Nigéria. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 208, p. 1-8, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00178-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00178-2).
- AVANZA, M. et al. Nutritional and anti-nutritional components of four cowpea varieties under thermal treatments: Principal component analysis. **LWT - Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 148-157, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.010>.
- AZEVEDO, F. A.; CHASIN, A. A. M. **Metais: Gerenciamento da Toxicidade**. São Paulo: Editora Atheneu, 2003.
- BAIZE, D.; STERCKEMAN, T. Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. **Science of the Total Environment**, v. 264, n. 1, p. 127-139, 2001.
- BALALI-MOOD, M. et al. Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic, *Frontiers in Pharmacology*, v. 12, doi=10.3389/fphar.2021.643972.
- BARDACH, A. E. et al. Epidemiology of chronic disease related to arsenic in Argentina: A systematic review. *Science of the total environment*, v. 538, p. 802-816, 2015.
- BEUKES, J.P. et al. Review of Cr(VI) environmental practices in the chromite mining and smelting industry – Relevance to development of the Ring of Fire, Canada, *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 874-889, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.176>.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

CACHADA, A. F. O. **Geoquímica e qualidade ambiental de solos urbanos**. 2007. Dissertação de Mestrado em Geoquímica - Universidade de Aveiro, Portugal.

CERRI NETO, M. **Impacto ambiental, degradação ambiental, poluição, contaminação e dano ambiental: comparação entre conceitos legal e técnico**. 2008. 125 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/92757>. Acesso em: 03 de jan. 2022.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2014. **Valores orientadores**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/qualidade-do-solo/>. Acesso em 10 jan. 2022.

CHAVES, M. O.; BASSINELLO, P. Z. O feijão na alimentação humana. In: GONZAGA, A. C. de O. (Ed.). **Feijão: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 15-23. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1015009#:~:text=http%3A//www.infotec.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1015009>. Acesso em 10 de jan. 2022.

CHEN, J.; et al. Background concentrations of elements in soils of China. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 57, p. 699-712, 1991.

CHOW, Y. N. et al. Phytotoxic effects of trivalent chromium-enriched water irrigation in *Vigna unguiculata* seedling, **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 101-108, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.144>.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perspectivas para a agropecuária**. vol. 8, safra 2020/21, edição grãos. Brasília: 2020. disponível em: <https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria>. Acesso em: 26 dez. 2021.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 420**, de 28 de dezembro de 2009, publicado no DOU nº 249, de 30/12/2009, p. 81-84.

COSTA, A. F. **Cadernos do Semiárido riquezas & oportunidades**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco. v. 17, n.3, 2020. Recife: CREA-PE: Editora UFRPE, 2020.

CRAVO, M. S.; SMYTH, T.J. **Atributos físico-químicos e limitações dos solos de áreas produtoras de feijão-caupi no nordeste do Estado do Pará**. XXX. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo - Anais - Recife - PE, 2005. CORAM.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/42217659/especialistas-comentam-polemico-declinio-do-consumo-de-feijao-no-brasil>. Acesso em 25 de out. 2021.

ERTANI, A.; et al. Chromium in agricultural soils and crops: a review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 5, p. 190, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3356-y>.

ESSIEN, J. P. et al. Ocorrência e distribuição espacial de metais pesados em lixiviados de aterros sanitários e ecossistema de água doce impactado: uma ameaça ambiental e à saúde humana. **PLoS ONE**, v. 17, n. 2, p. E0263279. 2022 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263279>

FAITA, F.; CORI, L; BIANCHI, F.; ANDREASSI, M.G. Arsenic-Induced genotoxicity and genetic susceptibility to arsenic-related pathologies. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 10, n. 4, p. 1527-46, 2013.

FAO STAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Statistics. 2016. <http://www.fao.org/food-agriculture-statistics/en/>

FERREIRA, C. M.; PELOSO, M. J. D. L.; FARIA, C. de. **Feijão na economia nacional**. 2002. Publisher: Embrapa Arroz e feijão ISBN: 1516-7518; 135. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325976419_feijao_na_economia_nacional. Acesso em 10 de set. 2021.

FREIRE FILHO, F. R. (Ed.). **Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011. 84 p.

FREIRE FILHO, F. R. **Origem, evolução e domesticação do caupi**. In: ARAÚJO J. P. P.; WATT, E. E. O Caupi no Brasil. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP; Ibadan: ITTA, 1988. p. 26-46.

HIGASHIJIMA, N. S.; LUCCA, A.; REBIZZ, L. R. H.; REBIZZI, L. M. H. Fatores antinutricionais na alimentação humana. *Segurança Alimentar e Nutricional*, Campinas, SP, v. 27, p. e020013, 2020. doi: 10.20396/san.v27i0.8653587.

HOSSNER, L. R. et al. **Literature review: phytoaccumulation of chromium, uranium and plutonium in plant systems**. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, p. 51, 1998. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/604402-literature-reviephytoaccumulation-chromium-uranium-plutonium-plant-systems>. Acesso em: 11 jan. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018**. Análise do consumo alimentar pessoal no Brasil. Ministério da Economia. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101742>. Acesso em: 25 de nov. 2021.

ISLAM, S.; AHMED, K.; AL-MAMUN, H. Distribution of trace elements in different soils and risk assessment: A case study for the urbanized area in Bangladesh. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 158, p. 212-222, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.07.017>.

KHATUN, J.; INTEKHAB, A.; DHAK, D. Effect of uncontrolled fertilization and heavy metal toxicity associated with arsenic(As), lead(Pb) and cadmium (Cd), and possible remediation. **Toxicology**, v. 477, p. 153274, 2022. doi: 10.1016/j.tox.2022.153274.

KIM, S. H.; BAE, S.; HWANG, Y. S. Comparative bioaccumulation, translocation, and phytotoxicity of metal oxide nanoparticles and metal ions in soil-crop system. **Science of The Total Environment**, v. 856, n. 2, p. 158938, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158938>.

LONG, G. L.; WINEFORDNER, J. D. Limit of detection: A closer look at the IUPAC definition. **Analytical Chemistry**, v. 55, p. 712a-724a, 1983.

LOURENÇO, R.W.; LANDIM, P.M.B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 21, n. 1, 150-160, 2005.

LU, J. et al. Trace metal element pollution of soil and water resources caused by small-scale metallic ore mining activities: a case study from a sphalerite mine in North China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 24630-24644, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05703-z>.

MAVAKALA, B. K. et al. Evaluation of heavy metal content and potential ecological risks in soil samples from wild solid waste dumpsites in developing country under tropical conditions. **Environmental Challenges**, v. 7, p. 100461, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100461>.

MORDOR INTELLIGENCE/EMIS - ISI Emerging Markets Group Company. Global Dry Beans Market (2020-2025). Disponível em: <https://www.emis.com/pt>. Acesso em: 13 jan. 2021.

NOGUEIRA, T. A. R. **Disponibilidade de Cd em latossolos e sua transferência e toxicidade para culturas de alface, arroz e feijão**. 2012. 158f. Tese (doutorado) – Centro de Energia nuclear na agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

NWACHUKWU, M.A.; FENG, H.; ALINOR, J. Assessment of heavy metal pollution in soil and their implication within and around mechanic villages. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 7, p. 347-358, 2010.

OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. "**Cowpea (*Vigna unguiculata*)**", in **safety assessment of foods and feeds derived from transgenic crops**, 2019. Volume 3: Common bean, Rice, Cowpea and Apple Compositional Considerations, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/68bcd659-en>.

OKEREAFOR, U. et al. Metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 7, p. 2204, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17072204. PMID: 32218329.

OLIVEIRA, I. P.; CARVALHO, A. M. **A cultura do caupi nas condições de clima e de solo dos trópicos úmido e semi-árido do Brasil**. In: ARAÚJO, J. P. P.; WATT, E. E. Caupi no Brasil. Brasília - DF Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa - Departamento de Publicações, 1988. P. 63 - 96.

OMS - Organização Mundial da Saúde. Concise International Chemical Assessment Document 12 - Manganese and its compounds. Geneva: WHO; 1999.

ONYELE, O. G.; ANYANWU, E. D. Human health risk assessment of some heavy metals in a rural spring, southeastern Nigeria. **African Journal of Environment and Natural Science Research**, v. .1, n. 1, p.15-23, 2018.

PAOLIELLO, M. M. B.; CAPITANI, E. M. **Metais: gerenciamento da toxicidade**. Chumbo. Fausto Antônio de Azevedo, Alice A. da Matta Chasin. São Paulo: Editora Atheneu, 2003. cap.12, p. 353-398.

PAYE, H. S.; et al. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6. 2010.

PERALTA-VIDEA, D. et al. A bioquímica da absorção ambiental de metais pesados pelas plantas: implicações para a cadeia alimentar. **O Jornal Internacional de Bioquímica e Biologia Celular**, v. 41, p. 1665-1677, 2009.

PINHO, J. L. N.; TÁVORA, F. J. A. F.; GONÇALVES, J. A - Capítulo 4. **Aspectos fisiológicos**. In: FREIRE FILHO, F. R; LIMA, J. A. A e RIBEIRO, V. Q. (Eds.) Feijão-Caupi - Avanços tecnológicos. Brasília - DF, 2005. Embrapa informação Tecnológica. p. 191-210.

RAFIQ, M. et al. A comparative study to evaluate efficiency of EDTA and calcium in alleviating arsenic toxicity to germinating and young *Vicia faba* L. seedlings. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 2271-2281, 2017.

RAHATE, K. A.; MADHUMITA, M.; PRABHAKAR, P. K. Nutritional composition, anti-nutritional factors, pretreatments-cum-processing impact and food formulation potential of faba bean (*Vicia faba* L.): A comprehensive review. **LWT- Food Science and Technology**, v. 138, p. 110796, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110796>.

RAI, P. K. et al. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. **Environment International**, v. 125, p. 365-385, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>.

ROSA, A. C. G. et al. Transfer of Metal(loid)s from Soil to Leaves and Trunk Xylem Sap of Medicinal Plants and Possible Health Risk Assessment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, p. 660, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020660>.

SADEE, B. A.; FOULKES, M. E; HILL, S. J. A study of arsenic speciation in soil, irrigation water and plant tissue: A case study of the broad bean plant, *Vicia faba*. **Food Chemistry**. v. 210, p. 362-370, 2016.

SAKUMA, A. M.; CAPITANI, E. M.; TIGLEA, P. **Metais: gerenciamento da toxicidade**. Fausto Antônio de Azevedo, Alice A. da Matta Chasin. São Paulo: Editora Atheneu, 2003. cap.8, p.203-238.

SHABAN, N.S.; ABDU, K. A.; HASSAN, N. E. H. Y. Impact of toxic heavy metals and pesticide residues in herbal products. **Beni-Suef University Journal of Basic**

and Applied Sciences, v. 5, n. 1, p. 102-106, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2015.10.001>.

SHABBIR, Z. et al. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. **Chemosphere**, v 259, p. 127436, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>.

SHAHID, M. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. **Journal of Hazardous Materials**, v. 325, p. 36-58, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>.

SHARMA, P. et al. Role of microbes in bioaccumulation of heavy metals in municipal solid waste: Impacts on plant and human being. **Environmental Pollution**, v. 305, p. 119248, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119248>.

SHARMA, P; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>.

SHEN, Y, et al. Thiol functionalization of short channel SBA-15 through a safe, mild and facile method and application for the removal of mercury (II). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, p. 5420-5433, 2018.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207423>.

SMOLDERS, E. et al. Cadmium fixation in soils measured by isotopic dilution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 1, p. 78-85, 1999.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300010013x>.

TEMMERMAN, L. et al. Accumulation of atmospheric deposition of As, Cd and Pb by bush bean plants. **Environmental Pollution**, v. 199, p. 83-88, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.014>.

THOMPSON, M.; ELLISON, S. L. R.; WOOD, R. Harmonized guidelines for single-laboratory validation of methods of analysis (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, p. 835-855, 2002.

TONG, S. et al. Bioaccumulation characteristics, transfer model of heavy metals in soil-crop system and health assessment in plateau region, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 241, 2022, p. 113733,
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113733>.

USEPA (US Environmental Protection Agency) Risk-based Concentration Table 2010. Disponível em: <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/index.htm>. Acesso em 15 mai. de 2022.

USEPA IRIS. Program Information about the Integrated Risk Information System: Chronic Oral Reference Dose (RfD). Disponível em:
 <<https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/>>. Acesso em: 02 abr. 2021.

USEPA. Integrated Risk Information System (IRIS). Chemical Search. Oral Slope Factor. USEPA. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/>. Acesso em 17 jun 2022.

YADAV, M. et al. Genetically engineered plants for phytoremediation of heavy metals, Editor(s): Sharma, P.; et al. *Current Developments in iotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2022, Chapter 11 p. 223-239. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99907-6.00017-7>.

YAÑEZ, L. M. et al. Arsenic accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) and broad bean (*Vicia faba* L.) crops and its potential risk for human consumption. **Heliyon**, v. 5, n. 1, p. e01152, 2019. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01152.

YANG, Q. et al. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach. **Environmental Research**, v. 214, n. 1, p. 113772, 2022.

YANG, S. et al. Towards an integrated health risk assessment framework of soil heavy metals pollution: Theoretical basis, conceptual model, and perspectives, *Environmental Pollution*, v. 316, n. 2, p. 120596, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120596>.

ZHITKOVICH, A. Chromium in drinking water: Sources, metabolism, and cancer risks. **Chemical Research in Toxicology**, v. 24, n. 10, p.1617-29, 2011. doi: 10.1021/tx200251t.