



Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Licenciatura em Biologia Aplicada

Trabalho de Culminação de Estudos II

Trabalho de Investigação

**Tópico: Avaliação do risco toxicológico do consumo do amendoim (*Arachis hypogaea* L.)
cultivado em solos contaminados por crómio e dos mecanismos de tolerância ao stress**

Autor: Rosalino Domingos Victorino

Maputo, Abril de 2025



Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Licenciatura em Biologia Aplicada

Trabalho de Culminação de estudos II

Trabalho de Investigação

**Tópico: Avaliação do risco toxicológico do consumo do amendoim (*Arachis hypogaea* L.)
cultivado em solos contaminados por crómio e dos mecanismos de tolerância ao stress**

Autor:

Rosalino Domingos Victorino

Supervisores

Prof. Doutor Orlando Quilambo

Co- Supervisores

Prof.^a Doutora Célia Martins

Mestre Sónia Ventura Guilundo

Mestre Mário Machunguene Jr

Maputo, Abril de 2025

Agradecimentos

À Deus, pelas maravilhas que me permitiu viver ao longo deste percurso pela universidade.

Agradeço aos meus pais Domingos Victorino e Laurinda Ernesto por me terem gerado e educado e por terem moldado a pessoa que eu sou hoje.

Aos meus tios Maria Olinda e João Baptista por me terem dado o suporte durante esse percurso académico, sem eles nada disso seria possível.

À minha Avó Aduana Ali, que sempre acreditou em mim e me motivou a correr atrás dos meus sonhos, tenho muito orgulho de ser o seu neto e gostaria de algum dia poder te fazer sentir orgulho de ser o seu neto. Foi com essa mulher que eu aprendi a ser homem, foi nas tuas mãos que se moldaram as minhas crenças e princípios que hoje me orgulho de ter

Aos meus colegas de turma e amigos, Ivander Panguene, Jorge Muchanga, Esperança Rafael, Jennifer de Lille, e todos outros que não pude aqui citar.

Agradecimentos especiais

Agradeço de forma especial ao Mestre Mário Machunguene Júnior, que é a pessoa que fez a mentoria, e acompanhou o nosso trabalho desde a concepção do projecto até a elaboração final do trabalho, sem ele a realização deste trabalho não seria possível.

Aos meus supervisores, em especial Mestre Sónia Ventura Guilundo, Prof^a Doutora Célia Martins e Prof. Doutor Orlando Quilambo por todo apoio, orientação e acompanhamento, na elaboração do presente trabalho.

Dedicatória

Dedico:

À minha tia, Maria Olinda dos Santos

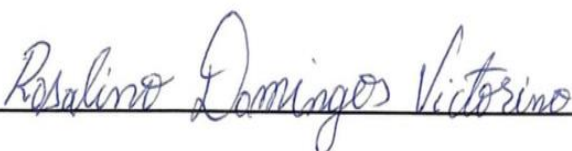
Aos meus pais, Domingos Victorino e Laurinda Ernesto

À minha Avó Aduana Ali

Aos meus irmãos, Maria Olinda Domingos, Ronaldo Domingos, Nívia Paulo Jorge

Declaração

Declaro, por minha honra que os dados presentes nesse trabalho refletem a verdade e que é reultante dos procedimentos experimentais realizados em laboratório, e que este trabalho nunca foi apresentado na sua essência ou parte dele para a obtenção de qualquer grau, sendo resultado da minha investigação, tendo sido citados e referenciadas todas as fontes utilizadas para a elaboração do mesmo.

A handwritten signature in blue ink, reading "Rosalino Domingos Victorino", is written over a solid black horizontal line.

(Rosalino Domingos Victorino)

Resumo

O presente trabalho teve como objectivo avaliar o risco toxicológico do amendoim cultivado em solos contaminados por Cr e consistiu na montagem de um ensaio experimental numa estufa, com dois níveis de Cr (10 e 30 mg.Kg⁻¹), um controlo e 4 repetições. A determinação da concentração de Cr na planta e no solo foi realizada pelo método de espectrofotometria de emissão atómica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Os resultados mostram que a concentração de Cr na planta de amendoim esteve abaixo do limite máximo permitido (LMP) pela FAO/WHO (2.3mg.Kg⁻¹), porém no tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹, os níveis de Cr na planta estiveram acima do limite máximo permitido(LMP) pela comunidade europeia/ Codex (0.3 mg.Kg⁻¹). Os factores de bioacumulação e de translocação foram maiores que uma unidade (FBA e FT>1), nos dois tratamentos. Os valores da estimativa de ingestão diária (EID), estiveram acima do limite máximo tolerável (Cr = 0.2 mg.Kg⁻¹) indicando potencial risco não carcinogénico e mais acentuado em crianças. As estimativas de quociente de risco(QR) e o risco carcinogénico incremental ao longo da vida (RCILV) para adultos e crianças estiveram abaixo do limite de segurança (QR<1; RCILV<10⁻⁴), excepto no tratamento 30mg.Kg⁻¹, onde em crianças o QR foi de 1.077, e em adultos o RCILV foi de 2.03×10⁻⁴, portanto, esses resultados sugerem a existência de riscos não carcinogénicos em crianças, e carcinogénicos em adultos que consomem amendoim cultivado em solos com esses padrões de contaminação.

Lista de abreviaturas

Af- Area foliar

CEs- Condutividade eléctrica

Chla- Clorofila

CO₂- Dióxido de carbono

Cr- crómio

CTC- Capacidade de troca Catiónica

DCB- Departamento de Ciências Biológicas

DE- Densidade estomática

FBA – Factor de bioacumulação

FT- Factor de translocação

ICP-AES- Espectrometria de emissão atómica por plasma acoplado indutivamente

M.O- Matéria orgânica

pH- Potencial Hidrogeniónico

PsPA- Peso seco da parte aérea

PsR- Peso seco da Raíz

QR- Quociente de risco

RC- Risco Carcinogénico

RPSR- Razão do peso seco da raíz

TRA- Teor Relativo de água

USEPA- Agência de protecção Ambiental dos Estados Unidos

Lista de figuras

Figura 1: Mapa da localização da área de estudo. Campus da UEM DCB	14
Figura 2: Peso seco da raíz e da parte aérea em função das concentrações de crómio.....	25
Figura 4: Área foliar das plantas de amendoim em função das concentrações de crómio.....	26
Figura 3: Densidade estomática (número de estomas por mm ²) observada nas folhas de amendoim exposto às diferentes concentrações de crómio.....	27
Figura 5: Concentração de clorofila a e clorofila b e carotenóides das plantas de amendoim em função dos três tratamentos de crómio.....	28
Figura 6: factores de bioacumulação(A) e de translocação(B) em função das concentrações de crómio.....	30

Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação do pH	9
Tabela 2: Classificação da matéria orgânica segundo os níveis e a classe textural do solo	10
Tabela 3: Caracterização físico-química dos solos com diferentes concentrações de crómio	23
Tabela 4: Teor relativo da água nas plantas do amendoim cultivado em solo contaminado por diferentes concentrações de crómio	25
Tabela 5: Concentração de Cr no solo e nas plantas do amendoim cultivado em solo contaminado por diferentes concentrações de crómio.	29
Tabela 6: Correlação entre os parâmetros fisiológicos a concentração de Cr na planta	31
Tabela 7: Estimativa da Ingestão Diária (EID) de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.	32
Tabela 8: Ingestão diária crónica (IDC) de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.	32
Tabela 9: Quociente de risco (QR) associado ao consumo de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.	33
Tabela 10: Risco Carcinogénico incremental ao longo da Vida associado ao consumo de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.	34

Índice

Agradecimentos	I
Dedicatória.....	II
Resumo	IV
Lista de abreviaturas	V
Lista de figuras.....	VI
Lista de Tabelas	VII
1. Introdução.....	1
2. Problema.....	3
3. Justificativa	4
4. Revisão Bibliográfica.....	5
5. Objectivos.....	13
5.1. Geral:.....	13
5.2. Específicos.....	13
6. Hipóteses	13
7. Área de estudo	14
8. Metodologia.....	15
8.1. Materiais	15
8.2. Equipamento de protecção individual	15
8.3. Reagentes.....	16
8.4. Equipamentos	16
8.5. Material biológico.....	16
8.6. Procedimentos.....	16
8.6.1. Preparação das soluções de crómio	16

8.6.2.	Monitoramento da experiência	17
8.6.3.	Colheita e processamento das amostras	17
8.6.4.	Caracterização físico-química do solo	18
8.6.5.	Pesagem e secagem das plantas	18
8.6.6.	Determinação de Área foliar	18
8.6.7.	Densidade Estomática	18
8.6.8.	Extracção e quantificação de pigmentos fotossintéticos	19
8.6.11.	Avaliação de Risco Toxicológico do amendoim	20
9.	Análise de Dados	22
10.	Resultados	23
11.	Discussão	35
12.	Conclusão	44
13.	Limitações	45
14.	Recomendações	45
15.	Referências bibliográficas	46
16.	Anexos	54

1. Introdução

O crómio (Cr) é o 24º elemento da tabela periódica, tem uma densidade de $7,20 \text{ g.cm}^{-3}$, branco prateado, classificado como metal pesado e ocorrem duas formas principais, o Cr^{3+} e o Cr^{6+} . Cr^{3+} é a forma que ocorre no ambiente natural, principalmente sob a forma de óxidos, hidróxidos e sulfatos, menos tóxico, de baixa solubilidade em água, baixa mobilidade e liga-se principalmente a matéria orgânica no solo e nos ambientes aquáticos. O Cr^{6+} é mais tóxico, mais solúvel em água, de alta mobilidade e que ocorre principalmente na forma de cromatos e dicromatos (Eze *et al.* 2018).

O Cr naturalmente ocorre em minerais de cromita nas rochas máficas, ultramáficas, serpentinas e também ocorre nas poeiras vulcânicas; por outro lado actividades antropogénicas como as indústrias metalúrgicas, produção de ligas de ferro-crómio, produção de tintas e pigmentos, preservação da madeira, queima de carvão mineral, etc. têm contribuído significativamente para a poluição dos ecossistemas (Jena e Hembram, 2024; Javed *et al.* 2021).

O Cr é classificado com o segundo metal que mais polui o meio ambiente, e a exposição do ser humano a doses excessivas deste metal pode causar anomalias na coagulação do sangue, falência do fígado e dos rins, quebra muscular, irritação da pele, cancro (Alexakis, 2015). A ingestão de alimentos contendo Cr pode ainda ter efeitos tóxicos no sistema imune, hematológico e no sistema reprodutor dos indivíduos do sexo masculino, para além de danos no sistema gastrointestinal (IRIS US EPA, 2024).

O risco associado aos solos contaminados por crómio reside na cadeia alimentar, visto que as plantas e seres vivos dos primeiros níveis tróficos bioacumulam este metal e à medida que os níveis vão crescendo há uma biomagnificação do metal o que pode afectar o bem estar dos animais e do ser humano em última instância (Gandhi *et al.* 2018).

O amendoim é uma planta nativa da América do Sul, no sul da Bolívia e norte da Argentina, onde começou a domesticação, e actualmente é cultivada em todos os continentes. É uma planta autopolinizadora, pertencente a família das fabáceas, cultivada como fonte de

óleos, proteínas, vitaminas, e minerais tanto para o consumo humano, assim como para a foragem dos animais (Abadya *et al.* 2019; Akram *et al.* 2018).

O Amendoim é uma das culturas de rendimento e com a maior área de cultivo entre as leguminosas de grão cultivadas em Moçambique, e é a oleaginosa de maior importância seguida pelo algodão e girassol. É cultivada em todo país, por produtores de pequena escala e em condições de sequeiro, sendo Cabo Delgado, Nampula e Zambézia os maiores produtores desta cultura em Moçambique (Muitia, 2015).

Estudos mostram que vegetais que crescem em áreas adjacentes a zonas industriais tendem a acumular altas concentrações de metais pesados, como é o caso do crómio (Amin *et al.* 2020). Machunguene Jr (2021), verificou que plantas como a mandioca (*Manihot esculenta*), alface (*Latuca sativa*) e couve (*Brassica oleracea*), cultivadas em áreas adjacentes aos Parques Industriais da Matola e Beluluane, apresentavam concentrações relativamente altas de crómio, chumbo e cádmio, posto isto, o presente trabalho teve como objectivo avaliar o risco toxicológico do amendoim cultivado em solos contaminados por crómio.

2. Problema

O Crómio é o 17º elemento mais abundante no manto da terra, cujo nível de toxicidade depende do estado de valência, apresenta vários estados de valência, mas apenas dois são mais predominantes, Cr^{3+} e a Cr^{6+} (Zulfiqar *et al.* 2023). A espécie Cr^{3+} , em pequenas quantidades, é considerada um metal traço essencial, com benefícios nutricionais para as plantas, animais e humanos, regula actividade da insulina no sangue e ajuda a prevenir a diabetes mellitus, porém a exposição a quantidades excessivas deste elemento, pode resultar numa toxicidade e carcinogenicidade a longo termo. A espécie Cr^{6+} , não apresenta nenhuma função fisiológica ou metabólica conhecida, é a forma de Cr mais tóxica, causa danos no fígado e nos rins, hemorragias internas e desordens respiratórias como diminuição da frequência respiratória e asma, é classificado com um agente carcionogénico (Grupo I) pela agência internacional de pesquisa de câncer, tendo como vias de entrada, a ingestão de alimentos, água e a inalação de ar contaminados por Cr^{6+} . (Tumolo *et al.* 2020; Focus *et al.* 2021). O Cr é um dos contaminantes ambientais que entra no solo na água e no ar por várias fontes, naturais e antropogénias (Gezahegn *et al.* 2021). As fontes antropogénicas são as que mais contribuem para a poluição do meio, e incluem indústrias de produção de tintas, curtume, produção de ligas metálicas, mineração, galvanização, tratamento da madeira (Chopala *et al.* 2016).

Estudos mostram que plantas que crescem em áreas próximas às zonas industriais acumulam nos seus tecidos quantidades significativas de Cr, excedendo limites de segurança estabelecidos pelas entidades reguladoras internacionais (Amin *et al.* 2020). Adhikari *et al.* (2022), verificaram níveis consideráveis de Cr nas folhas, analisando a deposição de poeira contendo Cr em plantas que crescem próximo a minas de Cr, fundição de ferro-Cr e nas estradas, na região de Sekhukhuneland na África do Sul, nessa mesma linha, Gezahegn *et al.* (2021) constataram níveis de Cr acima dos limites de segurança em plantas cultivadas próximo a uma indústria de curtume de couros, na cidade de Mondjo na Etiópia. Um estudo feito por Machunguene Jr *et al.* (2024) constatou que em plantas alimentares cultivadas em áreas adjacentes aos parques industrial da Matola e de Beluluane, os níveis de Cr e de outros metais pesados estavam acima dos níveis recomendados para as plantas, posto isto, surge a seguinte pergunta: Qual é o nível de risco toxicológico ao qual estão expostas as pessoas que fazem o consumo do amendoim cultivado em solos contaminados por Cr e quais são os mecanismos de tolerância das plantas de amendoim em resposta ao stress por Cr.

3. Justificativa

Os países desenvolvidos são capazes de identificar e controlar a poluição através de decretos, leis e execução de regulamentos para a protecção do meio ambiente, enquanto os países em desenvolvimento como é o caso de Moçambique, com economias emergentes têm prestado pouca atenção para os problemas ambientais (Fayiga *et al.* 2017). Na actualidade tem se verificado um crescimento no sector industrial e com isso também a poluição do meio ambiente por crómio através dos resíduos resultantes dos processos de produção, esses resíduos são eliminados na forma líquida nos efluentes industriais principalmente na forma de óxidos, hidróxidos, crómatos e dicromatos, e partículas sólidas (óxidos metálicos, cinzas e poeira metálica) e fumos metálicos contendo o crómio que acabam sendo precipitadas com as chuvas, poluindo dessa forma o solo das áreas próximas a essas indústrias. Assim, existe uma necessidade de introduzir instrumentos politico-legais de modo a fazer face ao rápido crescimento industrial e regular os níveis de resíduos tóxicos que são liberados para o meio ambiente, isso é possível através de pesquisas qualitativas e quantitativas que estabeleçam limites que possam a ser usados como padrão de referência local para o controlo da poluição do meio ambiente.

O cultivo de amendoim e outros vegetais nessas áreas que são potencialmente contaminadas por crómio e outros metais pesados pode apresentar um risco para a saúde humana, posto isto, um estudo de avaliação do risco toxicológico do amendoim cultivado em solos contaminados por crómio é essencial para acessar ao nível de risco ao qual as pessoas são expostas e permitir a elaboração de políticas de modo a limitar o uso desses solos para a prática da agricultura.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Metais pesados

Metal pesado é um termo usado para designar substâncias químicas de carácter metálico, metalóide ou mesmo ametal, que apresentem densidade e massas atómicas relativas acima de 5g.cm^{-3} e 40g.mol^{-1} respectivamente e que têm efeitos nocivos para o meio ambiente e para os seres vivos, quando excede um certo limite de concentração (Duta et al., 2021).

4.2. Contaminação de solos por metais pesados

Segundo, Naser *et al.* (2018), uma boa parte da contaminação dos solos por metais pesados decorre da acção antropogénica, e apenas uma pequena fracção, ocorre por via natural. As actividades antropogénicas, advindas da actividade industrial, mineração, indústrias metalúrgica, eliminação de lodos de esgotos municipais não tratados, descarte de resíduos industriais têm contribuído com a poluição do solo por metais pesados.

A agricultura também tem contribuído com o aumento de níveis de metais pesados nos solos, advindos do uso de fertilizantes inorgânicos e orgânicos, a calagem, lodo de esgoto e pesticidas. Os fertilizantes fosfatados podem ter na sua constituição o cádmio, crómio, níquel, chumbo e zinco que apesar de estarem em pequenas quantidades, o seu uso ao longo de um período de anos pode causar um efeito cumulativo no solo, que acaba passando para as plantas cultivadas e destas para o nível trófico seguinte (Sousa *et al.* 2018).

4.3. Crómio

Crómio é o 21º elemento químico mais comum na crosta terrestre e ocorre na forma do mineral cromita (FeCr_2O_4), tem carácter metálico e faz parte do grupo dos metais de transição, que ocorre sob diversas formas químicas e estados de valência. Ocorre na natureza nas emissões vulcânicas, em rochas ígneas e sedimentares, no solo, nas plantas, nos animais (Almeida, 2018).

O crómio é multivalente variando de 0 a +6 no seus estados de oxidação e dependendo da sua especiação, que está directamente ligada ao potencial de oxidação e redução e do pH do solo, pode se apresentar sob duas formas que são mais predominantes no solo, e na água que são as espécies de Cr^{3+} e a Cr^{6+} . (Almeida, 2018; Gezahegn, *et al.* 2021) A forma Cr^{3+} é a mais

predominante, estável e insolúvel, de pouca reactividade química e menos tóxica para os seres humanos e para o ambiente. Por outro lado, a forma Cr^{6+} é mais tóxica, de alta mobilidade e reactividade química, solúvel que facilmente migra para dentro das células dos organismos vivos, causando efeitos toxicológicos, carcinogénicos e mutagénicos (Gezahegn *et al.* 2021).

O pH, a quantidade de matéria orgânica, a capacidade de troca catiónica contribuem para presença de uma determinada espécie química de crómio em detrimento da outra, por exemplo, em pH ácido, encontra-se mais disponível o Cr^{3+} , em detrimento do Cr^{6+} (Almeida, 2018).

4.4. Efeito de Crómio nas plantas

Um estudo realizado por Gezahegn *et al.* (2021), mostrou que plantas cultivadas próximo à indústrias de bronzeamento, apresentavam concentrações de crómio acima das concentrações de crómio observadas no solo, isto é, as plantas bioacumulavam o crómio. Algumas plantas tem o potencial de acumular metais pesados nos seus tecidos, tal como é o caso de cenouras, repolho, tomate, pimenta verde, beterraba e alface. Neste estudo percebeu-se que estas plantas, apresentavam maior concentração deste metal nas raízes do que nas partes aéreas, e notou-se também que o crómio translocado para as partes aéreas era o Cr^{6+} .

4.5. Bioacumulação e translocação do crómio nas plantas.

O crómio não tem nenhuma função biológica conhecida na fisiologia da planta, porém em níveis excessivos nos tecidos vegetais, pode afectar muitos processos morfofisiológicos e bioquímicos da planta. A absorção do crómio e a sua translocação na planta, depende da espécie vegetal, estado de oxidação do Cr e a concentração do Cr no solo (Sharma *et al.* 2020)

Os factores de bioacumulação e de translocação, são medidas usadas nas ciências ambientais e na fisiologia vegetal, com o objectivo final de entender como as plantas, absorvem, acumulam e distribuem um certo contaminante presente no solo, estes dois factores são de grande importância, pois permitem avaliar o potencial fitorremediador das plantas e os possíveis riscos na cadeia alimentar (Cheng *et al.* 2015)

4.5.1. Factor de Bioacumulação (FBA)

O factor de bioacumulação quantifica a capacidade de uma planta absorver e acumular um certo contaminante em seus tecidos, ou seja é a razão entre a concentração do contaminante nos tecidos(raíz, caule, folhas, frutos, etc.) e a concentração do contaminante no solo. (Ameh *et al.* 2020).

4.5.2. Factor de translocação

o factor de translocação mede a capacidade das plantas em transportar um certo contaminante da raíz para as parte aéreas, ou seja é a razão entre a concentração do contaminante nas partes aéreas (caule, folhas, flores ou frutos) e a concentração do contaminante na raíz. Quando as plantas apresentam $FT > 1$ e $FBA > 1$, significa que as plantas podem ser usadas na fitoextração do contaminante, por outro lado, se o $FBA > 1$ e $FT < 1$, significa que as plantas podem ser usadas como fitoestabilizadoras (Prameela e Kumar, 2021).

4.6. Efeito do Crómio nos seres humanos

Nos humanos a ingestão oral do Cr^{6+} normalmente apresenta sintomas de envenenamento agudos, com os sintomas que incluem, úlceras gastrointestinais, náuseas e vômitos, febres, diarreias, danos no fígado, coma; e morte, quando se aingere quantidades que variem entre 1-3g (Briffa *et al.* 2020).

A inalação do Cr^{6+} constante e repetitiva assim como o contacto com a pele, causa um envenenamento crónico e pode apresentar sintomas como alergias, dermatites, gengivites, irritação das membranas mucosas, bronquites, doenças renais e do fígado, sinusites, pneumonias, e câncer do pulmão (Briffa *et al.* 2020).

4.7. Avaliação de risco para a saúde Humana

A avaliação de risco para a saúde humana é um processo através do qual se estima os efeitos para a saúde que resultam da exposição das pessoas à metais que podem apresentar um risco Carcinogénico ou não carcinogénico, esse processo pode ser dividido em quatro passos que são a identificação do risco, avaliação da exposição, avaliação da dose resposta; e caracterização do risco;(Alexakis, 2015).

4.7.1. A avaliação da exposição

A avaliação da exposição tem como propósito medir ou fazer uma estimativa da intensidade ou da frequência, e da duração da exposição humana a um determinado contaminante ambiental.

4.7.2. Avaliação da dose-resposta

Avaliação da dose-resposta faz uma estimativa da toxicidade através de níveis de exposição a metais pesados, e normalmente são usados dois índices de toxicidade, a dose de referencia(Drf) e o factor de inclinação para o câncer(Fic).

4.7.3. A caracterização dos riscos

A caracterização do risco prediz os potenciais riscos carcinogénicos e não carcinogénicos na saúde humana tanto para as crianças bem como para os adultos, resultante da exposição a metais pesados numa determinada área fazendo a interação de todas as informações colectadas, para chegar a estimativas quantitativas do risco carcinogénico e índices de risco. A estimativa dos riscos carcinogénicos e não carcinogénicos são calculados ou determinados usando metodologia desenvolvida pela Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA);(Samaila *et al.* 2021).

4.7.3.1. Quociente de risco(QR)

O método do quociente de risco ou quociente de risco alvo, é um método para avaliar os efeitos de substâncias nocivas para a saúde humana que foi estabelecido pela agência de protecção ambiental dos estados unidos (USEPA) no ano 2000, e pode ser usado para avaliar os riscos de um metal pesado em particular ou de uma combinação de riscos de multiplos metais pesados. A estimativa de ingestão diária (EID), refere –se a quantidade de um determinado componente presente no alimento consumido, pela média de consumo. A presença de riscos não carcinogénicos são julgados em conjunto com os quocientes de risco e a estimativa de ingestão diária(Xu *et al.* 2022).

4.8. Características do solo

O solo é um agrupamento de corpos naturais composto por materiais sólidos, líquidos e gasosos, e tridimensionais, com origem em materiais minerais, e orgânicos, contem matéria viva. são resultantes de um acção climática e da biosfera sobre o material rochoso de origem, é um

componente da crosta terrestre que apresenta um papel fundamental nos ecossistemas, tendo várias funções para a manutenção da vida das plantas, microrganismos e animais (França *et al.* 2021).

O pH do solo é definido como o logaritmo negativo da concentração do ião hidrogénio na matriz ambiental em estudo, contudo, no solo o pH denota a actividade do ião hidrónio (H_3O^+ ou H_5O^{2+}). A escala de pH que é aplicada nas ciências do solo foi introduzida pelo químico dinamarquês Soren Sorensen no começo do século XX e classificou o pH em: fortemente ácido, ácido, levemente ácido, neutro e alcalino (Kicińska *et al.* 2021).

Tabela 1: Classificação do pH

pH(H_2O)	pH(KCl)	Classificação
pH < 4,5	pH < 5	Fortemente ácido
4.5 < pH < 5.5	5 < pH < 6	Ácido
5.6 < pH < 6.5	6.1 < pH < 6,7	Levemente ácido
6,6 < pH < 7.2	6,8 < pH < 7,4	Neutro
pH > 7,2	pH > 7,4	Álcalino

A capacidade de troca catiónica (CTC) de um solo é a quantidade de iões positivos presentes no solo necessária para neutralizar as cargas negativas, ou seja, é a capacidade que um solo tem de reter e trocar iões positivos em um determinado pH. A avaliação do CTC está directamente ligada quantidade de iões de cálcio, magnésio, potássio e sódio disponíveis para a troca, e a sua eficiência é considerada baixa quando apresenta valores inferiores a 24cmol.Kg^{-1} (Maior, 2023).

A condutividade eléctrica (CEs) é a capacidade que um material tem de conduzir a corrente eléctrica, tratando-se de solos, pode se dizer que a CE_s é a capacidade que o solo tem de conduzir a corrente eléctrica. Existem diferentes níveis de condutividade eléctrica no solo, devido à grande variabilidade na composição físico-química do solo e esta medida é função da textura do solo e

estrutura do solo, sendo sensível ao teor de água, matéria orgânica e solutos (Godoy *et al.* 2019). Segundo Naser *et al.* (2018).

A textura do solo é a caracterização do solo em termos percentuais em função do tamanho das partículas deste mesmo solo, sendo argila formada por partículas de tamanho inferior a 0,002mm, silte com partículas de tamanho entre 0,002-0,05mm, e areia, com tamanho das partículas do solo entre 0,05-2mm, na fracção mais fina do solo (Sá, 2021).

A textura do solo é uma característica determinada pelos factores de formação do solo, não é alterada pelo manejo, está directamente ligada a fertilidade do solo, relacionada a capacidade de retenção de água e de nutrientes, e é um critério usado em diferentes sistemas de classificação dos solos(Sá, 2021).

A matéria orgânica é uma mistura complexa e variada de substâncias orgânicas, cujo principal componente é o carbono, que contribui com cerca de metade da sua massa na mistura, para além de carbono, encontramos também o hidrogenio (H), oxigénio(O), nitrogénio(N), enxofre(S,) e fosforo (P). A fracção orgânica do solo é composta essencialmente de microrganismos, material de origem animal e vegetal, e o produto de suas transformações (Ferreira *et al.* 2021). A quantidade de matéria orgânica no solo é mantida através do equilíbrio entre entrada da matéria orgânica e a saída do dióxido de carbono(CO₂). O teor de matéria orgânica no solo pode ser classificado em muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, esta classificação porém depende muito do tipo de solo e da textura do solo (Murphy *et al.* 2012).

Tabela 2: Classificação da matéria orgânica segundo os níveis e a classe textural do solo

Teor de matéria orgânica(%)	Classificação da Matéria orgânica segundo a classe textural do solo			
	Arenoso	Franco arenoso	Argiloso	Siltoso
0 – 0.5	Muito baixo	Muito Baixo	Muito baixo	Muito baixo
0.5 -1.0	Baixo	muito baixo	Muito baixo	Muito baixo

1.0 – 1.5	Médio	Baixo	Muito baixo	Muito baixo
1.5 -2.0	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
2.0 -2.5	Muito alto	Alto	Médio	Baixo
2.5 -3.0	Muito alto	Muito alto	Médio	Médio
3.0 -4.0	Muito alto	Muito alto	Alto	Médio
4.0 -5	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Alto
Acima de 5	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito Alto

4.9. Cultura do Amendoim (*Arachis hypogaea* L.)

4.9.1. Taxonomia

O amendoim é uma cultura oleaginosa nativa da América do Sul, concretamente nas regiões sul da Bolívia e norte da Argentina, onde começou a domesticação, Actualmente é cultivada em todos os continentes e cresce nos mais diversificados ambientes (Akram *et al.* 2018). O género *arachis* contém em torno de oitenta(80) espécies, onde a maior parte é diploide($2n=2x=20$), sendo apenas duas alelotetraplóides (AABB, $2n=4x=40$) que se acredita seja resultado da uma hibridização de duas espécies selvagens, *Arachis duranensis* e *Arachis ipaensis* (Desmae *et al.* 2018).

4.9.2. Morfologia

A planta de amendoim é uma planta herbácea anual, com ciclo de 90 à 160 dias, e atinge 50-60cm, ramificada, e de postura erecta ou não. Possui pequenas flores, completas, hermafroditas, com corola papilionácea, normalmente possui frutos secos tipo vagem com duas sementes reticuladas e cilíndricas (; Quagliato, 2020). As folhas são compostas, penínérveas, tendo quatro folíolos de forma oval, e com uma disposição alternada das folhas. A planta possui uma raíz pivotante com raízes laterais que formam um conjunto muito ramificado e profundo que permite explorar com eficiência a humidade do solo(Quagliato, 2020).

É uma cultura autopolinizadora, pertencente a família das fabáceas, cultivadas como fonte de óleos, proteínas, vitaminas, e minerais tanto para o consumo humano, assim como para a foragem dos animais (Abadya *et al.*2019). Segundo Landau e Valadares(2020), a cultura de amendoim possui mecanismos fisiológicos que a permitem se adaptar a diversas condições climáticas.

4.9.3. Produção e cultivo

O amendoim é a quarta oleaginosa mais cultivada a nível mundial, cultivada em mais de cem países de clima tropical e subtropical, com temperaturas quentes ou em regiões de clima temperado (Muitia, 2011). Os principais produtores de amendoim a nível mundial são a China, a Índia e os Estados Unidos da América, juntos detêm 80% da produção mundial (Biai *et al.*2021).

A China é o maior produtor de amendoim a nível mundial, segue-se a Índia, a Nigéria e os Estados Unidos. Até o ano de 2016, a China detinha 40% da produção mundial, com uma área de cultivo de 4,6 milhões de hectares. A Índia produzia anualmente 4,6 milhões de toneladas por ano e uma área de cultivo de 5 milhões de hectares. No continente Africano, os países da África Sub-Sahariana dominam a produção de amendoim, sendo a Nigéria o país que mais produz, sendo responsável por mais de 7% da produção mundial e 39% da produção no continente, produz em média 4,9 milhões de toneladas em uma área de 5,4 milhões de hectares. Os Estados Unidos por sua vez, produzem cerca de 2,53 milhões de toneladas por ano, sendo a maior parte deste produto destinado a produção de manteiga de amendoim/ ou creme de amendoim (Lozano, 2016).

Segundo Muitia (2011) o continente Africano contribui com mais de um quarto da produção mundial do amendoim, com uma média anual de 0,91 toneladas por hectare, estando muito abaixo da média global que ronda em 1,52 toneladas por hectare. Em Moçambique as médias de produção de amendoim são baixas considerando a média de produção em africa. No período de 1997 até 2016, a média foi de 349kg/ha,($\approx 0,35t\ ha^{-1}$), num contexto em que países como Gana, Camarões, Nigéria e África do Sul registaram $> 1000Kgha^{-1}$.

5. Objectivos

5.1. Geral:

Avaliar o risco toxicológico do consumo do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) cultivado em solos contaminados por crómio e os mecanismos de tolerância do amendoim ao stress por crómio.

5.2. Específicos

- Determinar os parâmetros fisiológicos ligados a tolerância do amendoim ao stress por crómio;
- Determinar a concentração do crómio no solo e nas plantas de amendoim
- Determinar os factores de bioacumulação e translocação do crómio,
- Correlacionar as concentrações de crómio na planta com os diferentes parâmetros fisiológicos.
- Caracterizar o risco toxicológico do consumo do amendoim contaminado por crómio

6. Hipóteses

H1: Existe um risco toxicológico resultante do consumo de amendoim cultivado em solos contaminados por crómio

H0: Não existe nenhum risco tóxicológico resultante do consumo do amendoim contaminado por crómio.

7. Área de estudo

O presente estudo foi realizado nas estufas do Departamento de Ciências Biológicas (DCB). Que se localiza no campus universitário da Universidade Eduardo Mondlane e sita na avenida Julius Nyerere, segundo as seguintes coordenadas geográficas 32°26'0" E de longitude este e 25°57'0" S de latitude sul. As estufas estão localizadas no extremo Este do compus, próximo ao Departamento de Geologia. O laboratório de Bioquímica e Fisiologia Vegetal (B1) localiza-se no edifício do DCB.

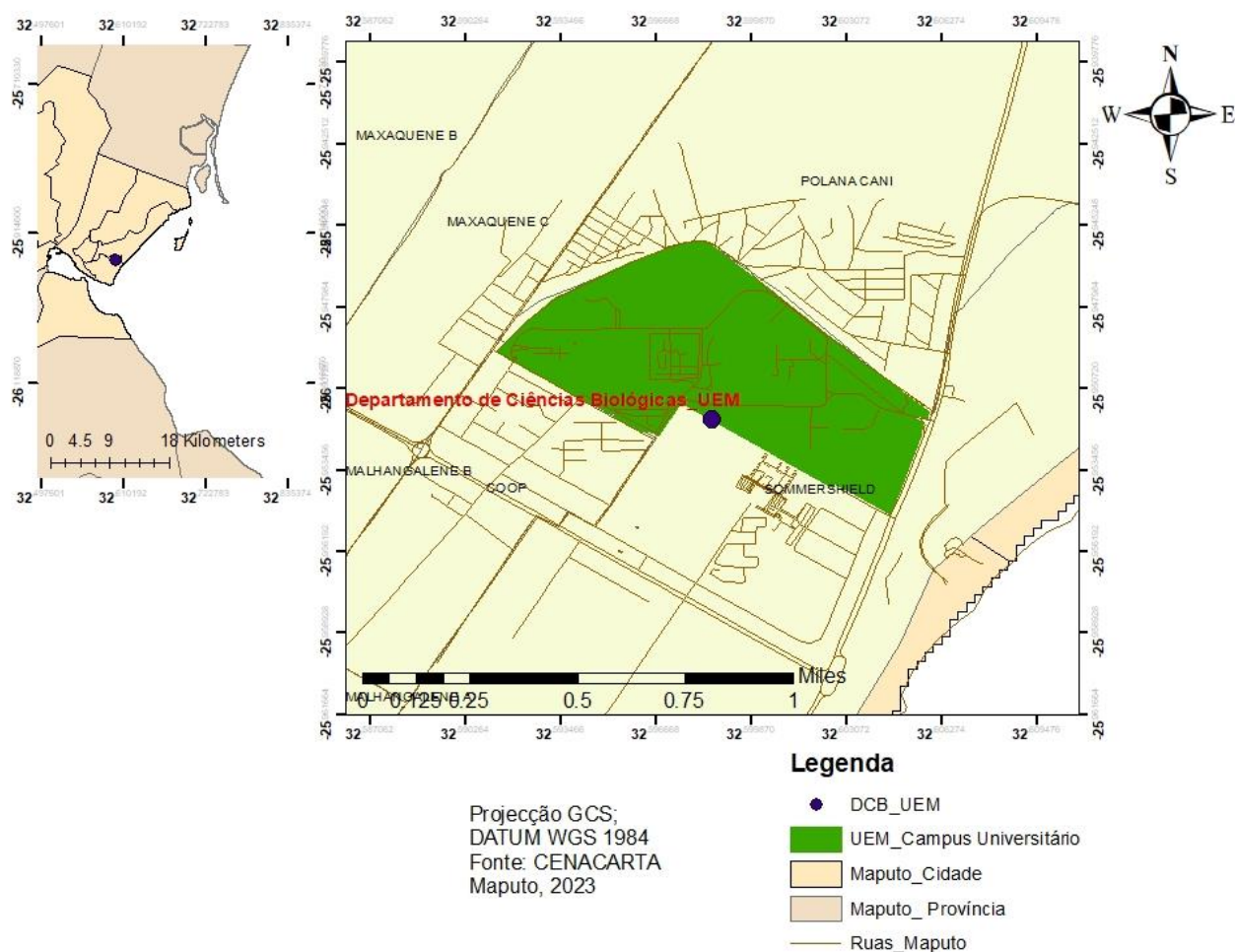


Figura 1: Mapa da localização da área de estudo. Campus da UEM DCB.

8. Metodologia

8.1. Materiais

- Cadinhos
- Copos de becker
- Balões volumétricos
- Funis de vidro
- Cadinhos plásticos
- Espátulas
- Pinças
- Garafas de vidro de 1L
- Bandejas
- Laminas e lamelas
- Papéis de filtro
- Papel de alumínio
- Ziplocks
- Envelopes
- Papel toalha
- Esguichos
- Baldes
- Esmalte
- Tesouras de poda
- Almofaris
- Areia
- Cubetas(cuvetas)
- Bandejas
- Placas de petri
- Crivos

8.2. Equipamento de protecção individual

- Máscaras N95

- Luvas
- Bata

8.3. Reagentes

- Ácido nítrico
- Ácido perclórico
- Ácido clorídrico
- Água bidestilada
- Acetona a 99,9%
- Crómio

8.4. Equipamentos

- Espectrofotometro de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente ICPE-9820
- Balança analítica
- Forno de secagem
- Bidestilador de água
- Moinho
- Espectrofotometro UV-.vis (DLAB, SP-UV1100, série PD21BAC0000022)
- Medidor de área foliar (LI-COR, Modelo LI-3100 AREA METER)
- Microscópios ópticos
- Estufa de secagem

8.5. Material biológico

- Sementes de e plantas de amendoim (*A. hypogaea* L.)

8.6. Procedimentos

O presente trabalho consistiu na montagem de um ensaio experimental com dois níveis de crómio($\text{Cr}10\text{mg.Kg}^{-1}$ e $\text{Cr}30\text{mg.Kg}^{-1}$), um grupo controlo, com quatro repetições.

8.6.1. Preparação das soluções de crómio

A concentração do crómio usada para a contaminação dos vasos foi obtida, tendo como base a legislação da África do Sul para o limite máximo permitido de Cr no solo e nos vegetais que

segundo Nyika *et al.* (2019) é de 6.5 mg.Kg^{-1} . Sendo assim, foi realizada a contaminação das plantas com crômio, a uma concentração de 10 e 30 mg/L, correspondentes valores aproximados à duas e quatro vezes o limite máximo permitido de crômio, respectivamente. Durante a preparação das soluções foram adotadas medidas de segurança usando as batas, luvas de boracha, máscaras.

8.6.2. Monitoramento da experiência

A experiência teve a duração de dois meses, desde a sementeira até ao aparecimento das primeiras flores. Durante esse período foram monitorados os seguintes parâmetros,: as características fenológicas, tal como, o tamanho e a coloração das folhas e a planta. Os vasos foram regados com 100mL de água corrente em dias alternados..

8.6.3. Colheita e processamento das amostras

A colheita foi realizada após oito semanas, e consistiu na retirada das plantas dos vasos para posterior análise dos parâmetros de crescimento e bioquímicos: a área foliar, o peso das plantas, a densidade estomática e a concentração dos pigmentos fotossintéticos.

- As plantas foram retiradas dos vasos, uma por uma, tratamento por tratamento, e colocadas num balde com água, as raízes foram lavadas para remover o solo. Depois foram transportadas para o laboratório de Bioquímica e Fisiologia Vegetal no DCB.
- No laboratório as plantas seguiram o seguinte fluxo: retirada dos baldes com água, secagem das raízes com auxílio de papel toalha, separação da raiz da parte aérea, de seguida, medição do peso fresco com auxílio de uma balança analítica.

8.6.4. Caracterização físico-químicos do solo

O solo foi colectado dos vasos e crivado com crivos de 2mm, foi colocado em envelopes de papel e secado numa estufa a 65°C até se atingir uma massa constante, e depois foram transferidos para ziplock e enviados para análises físico-químicas no Instituto de Investigação Agrária de Moçambique(IIAM), na Cidade de Maputo.

8.6.5. Pesagem e secagem das plantas

Após a pesagem, seguiu-se a colocação nos envelopes para posterior secagem na estufa(UF-30) a 65°C até atingir o peso seco constante.

O teor de água foi determinado usando a metodologia de Sá *et al.* (2017), segundo a equação:

$$TRA = \frac{PF - PS}{PF} \times 100\%$$

Onde: TRA- teor relativo de água; PF-peso fresco; e PS é o peso seco das plantas.

8.6.6. Determinação de Área foliar

A área foliar foi determinada usando um medidor automático de área foliar (LI-COR, Modelo LI-3100 AREA METER) do laboratório de Bioquímica e Fisiologia Vegetal e do DCB. Para determinar a área foliar, foram usadas três plantas por tratamento.

8.6.7. Densidade Estomática

- Foi realizada a separação das folhas para a análise estomática, foram colhidas três folhas das plantas de cada vaso, para a preparação e posterior observação e contagem dos estomas ao microscópio óptico, colocou-se uma porção de verniz transparente para unhas (marca) na superfície abaxial da folha.
- Foi usada a objectiva de 40X do microscópio óptico para a contagem dos estomas e determinação da densidade estomática.

A área de campo, usando-se a objectiva de 10X, e ocular de 10X/20, foi calculada usando a fórmula proposta por de Koenig, (2019)

$$AC = \frac{NO}{APT}$$

Fonte:

Onde: NO- é o nr da Ocular(20); APT- é a ampliação total. A área de campo visível foi de 0,2mm²

A densidade estomática (DE) foi determinada segundo Azevedo (2022), determinada através da equação:

$$DE = \frac{\text{Nº de estomas}}{\text{área de campo}}$$

8.6.8. Extracção e quantificação de pigmentos fotossintéticos

Para medir a quantidade de pigmentos fotossintéticos presentes nas plantas foi usado um espectrofotometro (DLAB, SP-UV1100, série PD21BAC0000022). A determinação da quantidade de pigmentos fotossintéticos (clorofila a e b, e carotenóides totais) presentes, foi realizada usando o método de Lichtenthaler (1984), segundo as seguintes equações:

$$Chl\ a = (13.36 \times A_{663}) - (5.19 \times A_{645})$$

$$Chl\ b = (27.43 \times A_{645}) - (8,12 \times A_{663})$$

$$Carot = [(1000 A_{470} - (2.05 \times Ca) - (\frac{Cb}{245})]$$

8.6.9. Determinação da concentração de crómio na planta

A concentração do crómio foi determinada através do método de espectrofotometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES). Antes da digestão com os ácidos as amostras de plantas passaram por um processo de secagem à 65°C até se obter massa seca constante (estufa UF-30),e moagem (moínho do tipo Willey). Para realizar a leitura no equipamento, foi necessário proceder com a digestão das amostras de solo e as de

plantas. Para o solo, foi pesada uma porção de 1g do solo e foram adicionados 6mL de HCl 37%, 12mL de HNO₃ a 55%, e 18mL de HF 48%. Para a digestão das amostras de plantas foi colocada 1g da amostra vegetal num cadinho de 250mL, na cabine de segurança, introduziu-se 12ml de HNO₃ á 55% e 3mL de HClO₄ a 70% e deixou-se numa chapa de aquecimento até que a amostra estivesse completamente digerida e com redução significativa no seu volume para 1ml; de seguida retirou-se o cadinho, acrescentou-se água bidestilada e fez-se a filtragem da solução. Finda a filtragem, transferiu-se a amostra para um tubo de falcon de 50mL e perfe-se o volume com água bidestilada, depois procedeu-se a leitura no espectrofotómetro de emissão atómica por plasma acoplado indutivamente.

8.6.10. Determinação dos factores de Bioacumulação e de translocação

Foram determinados os factores de bioconcentração (Alemu e Tegegne, 2022) e translocação (Saadaoui, 2022), segundo as seguintes equações:

$$FB = \frac{Cr\ planta}{Cr\ no\ solo}$$

$$FT = \frac{Cr\ parte\ aérea}{Cr\ na\ raíz}$$

8.6.11. Avaliação de Risco Toxicológico do amendoim

Riscos não carcinogénicos

Quociente de Risco

$$QR = \frac{EID}{DRf}$$

$$EID = \frac{IDV \times CCr}{MC}$$

Onde:

EID- estimativa de Injeção diária, **IDV-** é ingestão diária do vegetal contaminado por crómio(adultos=154.95g /dia; Crianças=105.5g /dia), **CCr-** é a concentração do crómio no vegetal, **Drfo** – é a dose de referência oral- valor para crómio é 1.5 mg.Kg⁻¹.MC⁻¹.dia⁻¹; **MC-**

Massa corporal (Adultos=60Kg; e para Crianças=25Kg) (Ongon'g *et al.*2020; Rahman e. Islam, 2019).

Ingestão Diária Crónica

$$IDC = \frac{Cr \times TI \times DE \times FE}{MC \times TME} \times 10^{-3}$$

Onde:

CCr- Concentração do crómio no vegetal

TI- Taxa de ingestão do vegetal (adultos=154.95g /dia; Crianças=105.5g /dia); **DE**-Duração de exposição (adultos=30; Crianças=6 anos); **FE**-Frequência de exposição (adultos=350dias/ano); **MC**- massa corporal (adultos=60kg; Crianças=25Kg), **FC**-Factor de conversão(10^{-3} kg/mg), **TME**- Tempo médio de exposição **TME**_{enc}=ED*365 dias,**TME**_{ca}=Tempo de vida(TV=70 anos)*365 dias; ca- carcinogénico;nc- é não carcinogénico; (Chowdhury, *et al.*2024; Xu *et al.* 2023; Rahman e. Islam, 2019).

risco carcinogénico incremental ao longo da vida(RCILV)

$$RCILV = IDC \times FaC$$

Onde: **IDC**- é a ingestão diária crónica; **FaC**- Factor associado ao câncer(FaC=0,5mg.Kg⁻¹.dia⁻¹)(Iwuanyanwu e Chioma, 2017; Christou *et al.* 2020).

9. Análise de Dados

Os dados referentes à concentração do crómio nos tecidos das plantas de amendoim e no solo, pesos seco e fresco, área foliar, densidade estomática, concentração da clorofila e carotenóides nas folhas foram organizados no programa Microsoft Excel 2010.

A análise estatística dos dados foi realizada através do software STATISTICA, versão 10. Testou-se a normalidade dos dados através do teste de Shapiro-Wilk, Foi realizado o teste ANOVA One Way para a sumarização das médias e testar a diferença entre as médias dos grupos. Foi também realizado o teste de Tukey para identificar os grupos que diferem entre si nas médias, e foi realizado o teste de correlação de Person para aferir a correlação entre a concentração do crómio na planta e os parâmetros fisiológicos (peso seco, densidade estomática,, área foliar, teor de água nas plantas e concentração de clorofila), e ainda testar a correlação entre a concentração do crómio no solo e os parâmetros físico-químicos do solo (pH, CTC, %M.O, %argila, % limo, P, Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+}).

10. Resultados

10.1. Caracterização físico-química do solo

Na tabela 3 é possível observar que o solo usado apresentou um pH neutro, segundo a escala proposta por Kicinska *et al.* (2021) tendo o controlo, Cr10mg.Kg⁻¹ e Cr30mg.Kg⁻¹ apresentando 7,413; 7,306; e 7,313 respectivamente, baixa capacidade de troca catiónica (CTC< 24 cmolKg⁻¹) e de textura arenosa, com maior percentagem de areia fina, baixa disponibilidade de fósforo(<10ppm), e baixo teor de matéria orgânica (<1 %). A ordem de disponibilidade do Ca²⁺ nas amostras de solo foi: Cr 30mg.Kg⁻¹<controlo < Cr 10mgKg⁻¹; para Mg²⁺, foi: Cr 10mgKg⁻¹<controlo< Cr 30mgKg⁻¹, para Na⁺: controlo< Cr 10mg.Kg⁻¹< Cr 30mg.Kg⁻¹; e para K⁺, registou-se a mesma quantidade de potássio disponível para os tratamentos Cr 10mgKg⁻¹ e Cr30mg.Kg⁻¹ (0,06cmol.Kg⁻¹) e a menor quantidade foi registada no controlo (0,058 cmolKg⁻¹). Em todas características físico-químicas do solo não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, excepto para a argila que apresentou valor de p<0.05.

Tabela 3: Caracterização físico-química dos solos com diferentes concentrações de crómio

Parâmetros físico-químicos do solo	Controle	Crómio10mg.Kg ⁻¹	Crómio 30mg.Kg ⁻¹	p- Value
pH (KCl)	7.413± 0.03	7.306±0.113	7.313± 0.051	0.222953
Ca (cmolKg⁻¹)	1.833±0.117	1.986±0.280	1.98±0.106	0.553719
Mg (cmolKg⁻¹)	0.32 ±0.02	0.24±0.035	0.253±0.080	0.211806
K (cmolKg⁻¹)	0.06±0.01	0.056±0.012	0.058±0.0277	0.975146
Na (cmolKg⁻¹)	0.353 ±0.058	0.313±0,0776	0.806±0.5485	0.194518
CTC (cmolKg⁻¹)	2.57±0.151	2.58±0.305	3.35±0.814	0.179632
CE(mS cm⁻¹)	0.156±0.0252	0.160±0.078	0.383±0.448	0.518933
P (ppm)	8±2.358	6.4±3.0806	7±1.706	0.732911
%M.O	0.976±0.560	0.783+ 0.160	0.9+0.576	0.882897
%Limo	2.193+0.168	2.15+0.130	2.483+0.255	0.146877

%Argila	8.666±0.725 ^{ab}	8.566±1.186 ^{cd}	6.0266±0.227 ^{ab/cd}	0.011962
%A. grossa	38.356±2.477	37.053±3.429	33.93±4.363	0.349030
%A. fina	50.79±3.303	52.23±2.489	57.56±4.384	0.116041
Textura	Arenoso	Arenoso	Arenoso	

As letras diferentes (ab/cd) rerepresentam diferenças estatísticas significativas entre os grupos que as contem. Os valores na tabela, representam as médias de 12 plantas ± o desvio padrão.

10.2. Parametros fisiológicos e bioquímicos

10.2.1. Peso seco das plantas de amendoim (*A. hypogaea* L.)

Para o peso seco, não houve diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, tendo sido observado para as raízes, uma média e desvio padrão de 0.75g ± 0.34g no controlo; 0.45g ± 0.40, no tratamento com Cr 10mg.Kg⁻¹ e 0.48± 0.39 no tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹, com p = 0,494825. Na parte aérea observou-se uma média de 2.96g± 0,48 no controlo; 2.27g± 2.12, no tratamento Cr 10mg.Kg⁻¹, e 1.84g ± 1.05 no tratamento com crómio 30mg.Kg⁻¹, com p = 0,540884 (figura 2).

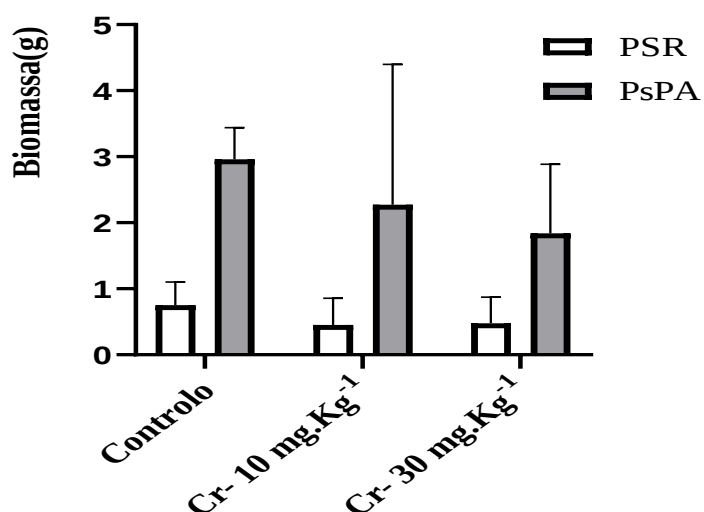


Figura 2: Peso seco da raiz e da parte aérea em função das concentrações de crómio no solo. cada barra no gráfico representam as médias de 4 plantas $\pm$ o desvio padrão. (PsPA-é peso seco da parte aérea; e PSR - é o Peso seco da raiz).

10.2.2. Teor Relativo de água (TRA)

O Teor relativo da água não mostrou diferenças estatísticas significativas entre médias dos tratamentos. Foi constatado que as plantas do6 tratamento Cr 10mg.Kg⁻¹ apresentaram valores relativamente altos em relação ao controlo e ao tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹. E foi constatado também que as raízes apresentaram valores mais altos de TRA em relação às partes aéreas, esses resultados estão sumarizados na tabela 4.

Tabela 4: Teor relativo da água nas plantas do amendoim cultivado em solo contaminado por diferentes concentrações de crómio

Tratamentos	Teor de água na raiz (%)	Teor de água na parte aérea (%)	Teor de água na planta (%)
Controlo	82.27 $\pm$ 3.03	80.68 $\pm$ 0.94	80.27 $\pm$ 2.61
Cr 10mg.Kg⁻¹	84.74 $\pm$ 2.74	82.19 $\pm$ 1.42	81.70 $\pm$ 2.63
Cr 30mg.Kg⁻¹	84.16 $\pm$ 4.36	81.45 $\pm$ 3.37	78.67 $\pm$ 5.86
P value	0,473977944	0,471230763	0,444380126

Os dados na tabela representam as médias de 4 plantas $\pm$ o desvio padrão

10.2.3. Área Foliar

A área foliar mostrou diferenças estatísticas significativas, com médias em torno de 36.55cm² $\pm$ 5,16 nas plantas controlo; 24.25 cm² $\pm$ 10.23 no tratamento Cr 10mg.Kg⁻¹, e 19.63cm² $\pm$ 2,58 no tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹, com p= 0,016817. O teste de Tukey, mostrou diferenças entre as médias do controlo e as do tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹ (figura 5).

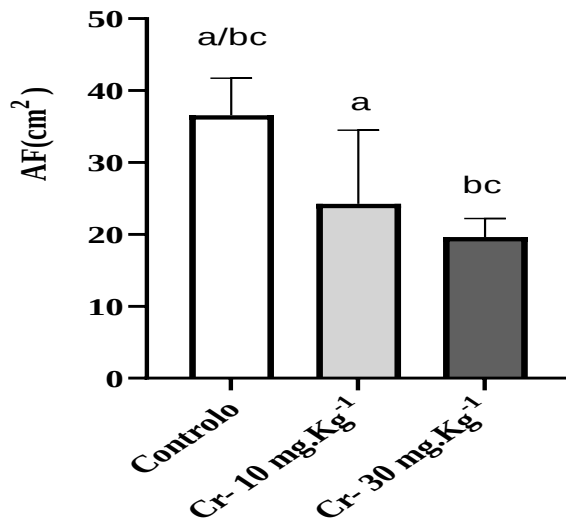


Figura 3: Área foliar das plantas do amendoim cultivadas em solo contaminado por diferentes concentrações de crómio. As letras diferentes(bc) no gráfico, representam diferenças estatísticas significativas entre os grupos que as contêm. Cada barra representa a média de 4 plantas $\pm$ desvio padrão.

10.2.4. Densidade estomática (DE)

A Densidade estomática para plantas do controle apresentaram valores relativamente menores em relação aos tratamentos, com uma média e desvio padrão de $162.74 \pm 2,49385$ estomas por milímetro quadrado (Es.mm^{-2}), $174.37 \pm 9,98509$ Es.mm^{-2} no tratamento Cr 10mg.Kg^{-1} , e $226.09 \pm 6,7747$ Es.mm^{-2} , no tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} . A densidade estomática mostrou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p= 0,00000112$), como se pode observar na figura 4, O teste de tukey evidenciou diferenças entre as médias do controlo e o tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} , e entre o tratamento Cr 10mg.Kg^{-1} e o tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} .

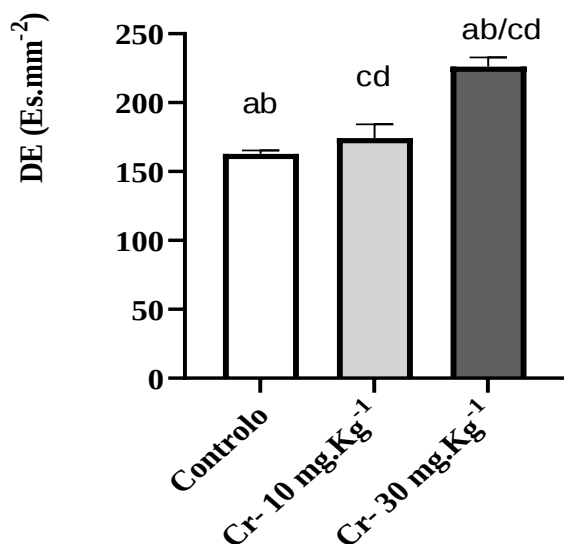


Figura 4: Densidade estomática (número de estomas por mm²) observada nas folhas de amendoim exposto às diferentes concentrações de crómio. as letras diferentes no gráfico representam diferenças estatísticas significativas entre os grupos que as contêm. Cada barra indica a média de 4 plantas $\pm$ desvio padrão.

10.2.5. Pigmentos fotossintéticos

10.2.5.1. Concentração de Clorofila *a* e *b*

A clorofila *a* apresentou, no controlo, uma média e desvio padrão de $22.56 \pm 0.53 \mu\text{g.mL}^{-1}$, $22.12 \pm 0.54 \mu\text{g.mL}^{-1}$ no tratamento Cr 10mg.Kg^{-1} , e $23.93 \pm 0.49 \mu\text{g.mL}^{-1}$ no tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} . Para clorofila *b* foi observada uma média e desvio padrão de $52.00 \pm 2.45 \mu\text{g.mL}^{-1}$ no controlo; $54.001 \pm 0.64 \mu\text{g.mL}^{-1}$ tratamento com Cr 10mg.Kg^{-1} , e $57.45 \pm 0.38 \mu\text{g.mL}^{-1}$ no tratamento com Cr 30mg.Kg^{-1} . A análise de variância mostrou diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, para clorofila *a* ($p=0.0022$) e clorofila *b* ($p=0.002$). O teste de Tukey mostrou que tanto para a *Chl a* bem como para *Chl b* existe diferenças entre as médias dos tratamento Cr 30 mg.Kg^{-1} e as do tratamento Cr 10 mg.Kg^{-1} .

10.2.5.2. Concentração de Carotenóides

A concentração de carotenóides apresentou no controlo uma média e desvio padrão iguais a $11.42 \pm 0.31 \mu\text{g.mL}^{-1}$, no tratamento 10mg.Kg^{-1} foram de $12.22 \pm 0.26 \mu\text{g.mL}^{-1}$ e no tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} forma de $12.15 \pm 0.11 \mu\text{g.mL}^{-1}$. A concentração de carotenóides mostrou diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos ($p=0.002$), tendo apresentado

diferenças entre as médias do controlo em relação ao tratamento Cr 10mg.Kg⁻¹, e as médias do controlo em relação ao tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹, tal como se pode observar na figura 5

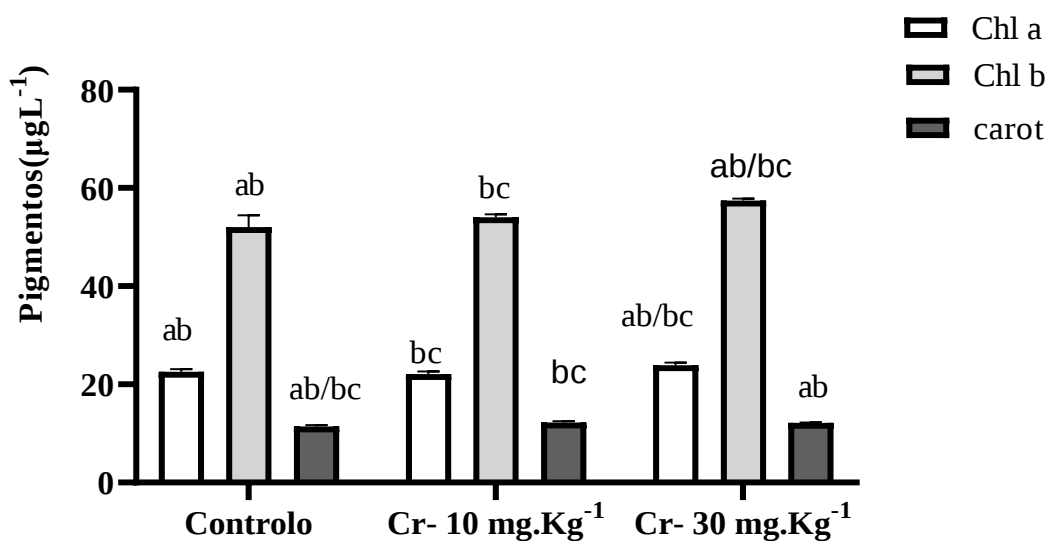


Figura 5: Concentração de clorofila a e clorofila b e carotenóides das plantas de amendoim em função dos três tratamentos de crómio. As letras diferentes nas barras dos gráficos representam diferenças estatísticas entre os grupos que as contêm. Cada barra representa a média de 4 plantas $\pm$ desvio padrão.

10.3. Concentração de crómio nas plantas e no solo

A análise realizada no ICP, para detectar a presença do crómio nos tecidos, mostrou nas raízes os seguintes valores em medias e desvio padrão: 0.0545 $\pm$ 0.019 mg/L no grupo controlo, 0.0806 $\pm$ 0.063mg/L no tratamento com Cr 10 mg.Kg⁻¹, e 0.1903 $\pm$ 0.021mg.Kg⁻¹ no tratamento Cr 30mg.Kg⁻¹. Na parte aérea foi observada uma concentração média de 0.0243 $\pm$ 0.002mg.Kg⁻¹ no grupo controlo, 0.0255 $\pm$ 0.004 mg.Kg⁻¹ no tratamento Cr 10 mg.Kg⁻¹, 0.1925 $\pm$ 0.046 mg.Kg⁻¹ no tratamento com Cr 30mg.Kg⁻¹ (ver tabela 5). O teste anova mostrou diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, para o Cr na raíz(p= 0.01320),Cr na parte aérea(p=0.00034) e o cr na planta(p=0.00032)

A análise do solo mostrou valores abaixo do nível detectável pelo aparelho nas amostras do controlo, tendo sido considerado zero o valor da concentração Cr. No tratamento Cr 10 mg.Kg⁻¹,

a concentração média com desvio padrão de Cr foi de $0.0512 \pm 0.003 \text{mg.Kg}^{-1}$, e de $0.006 \pm 0.002 \text{mg.Kg}^{-1}$ no tratamento com Cr 30mg.Kg^{-1} .

Tabela 5: Concentração de Cr no solo e nas plantas do amendoim cultivado em solo contaminado por diferentes concentrações de crómio.

Tratamento	Cr no solo	Cr na planta (mg.Kg^{-1})	Cr na R (mg.Kg^{-1})	Cr na PA (mg.Kg^{-1})
Controlo	0.000000	0.078 ± 0.02^{ab}	0.054 ± 0.019^{ab}	0.024 ± 0.002^{ab}
Cr-10mg.Kg^{-1}	0.051 ± 0.003	0.106 ± 0.067^{bc}	0.080 ± 0.063^{bc}	0.025 ± 0.004^{bc}
Cr-30mg.Kg^{-1}	0.006 ± 0.002	$0.383 \pm 0.067^{ab/bc}$	$0.190 \pm 0.021^{ab/bc}$	$0.192 \pm 0.046^{ab/bc}$
p-value	-	0.00032	0.0132	0.00034

Concentração de crómio solo, na raíz(Cr na R) e na parte aérea(Cr na PA). As letras diferentes na tabela representam diferenças estatísticas entre os grupos que as contém. A tabela representa o valores das médias de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.

10.4. Factores de bioacumulação(FBA) e de translocação(FT)

Foi constatado para o FBA, uma forte proporcionalidade dos valores de FBA em relação a concentrações de crómio aplicadas no solo. Relativamente aos factores de bioacumulação e de translocação, em todos tratamentos foram observados valores acima de uma unidade(FBA, $FT > 1$), com maior valor observado para o FBA ($FBA = 65.1$), no tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} ; e o maior valor de FT foi observado no tratamento Cr- 10mg.Kg^{-1} com uma média de 3,42.

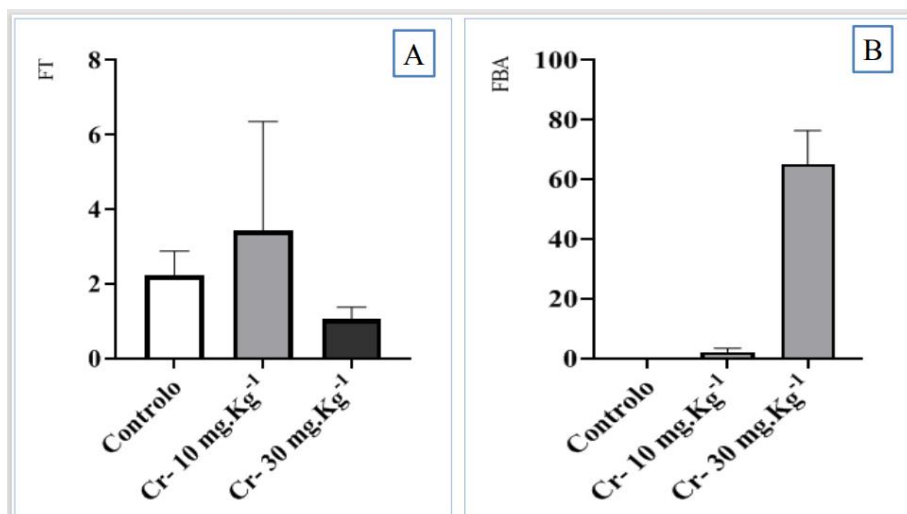


Figura 6: Factores de bioacumulação(A) e de translocação(B) em função das concentrações de crómio. Cada barra indica a média de 4 plantas $\pm$ desvio padrão.

10.5. Correlações entre os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e a concentração do Cr na planta.

As correlações entre a concentração do crómio na planta e os parâmetros fisiológicos e bioquímicos estão resumidos nas tabela 6, tendo sido verificado no tratamento Cr-10mg.Kg⁻¹, correlações positivas para o peso seco da raíz (PSR), peso seco da parte aérea (PsPA), área foliar(AF), densidade estomática(DE) e a concentração de clorofila *a* (Chla), e correlações negativas para teor relativo de água na raíz (TRA% na R), teor relativo de água na parte aérea (TRA% na PA), concentração da clorofila (Chlb) *b* e concentração dos carotenóides. Por outro lado, foram verificadas no tratamento Cr-30mg.Kg⁻¹, correlações positivas para o peso seco da parte aérea, teor relativo da água na raíz e na parte aérea, densidade estomática, concentração de clorofila *a* e clorofila *b*, e correlações negativas para o peso seco da raíz, área foliar, e a concentração de carotenóides(Tabela 6).

Tabela 6: Correlação entre os parâmetros fisiológicos a concentração de Cr na planta

Tratamento	PSR	PsPA	TRA% na R	TRA% na PA	AF	DE	Chl a	Chl b	Carot.
Cr-10mg.Kg⁻¹	0.9522	0.9852	-0.7692	-0.7032	0.6589	0.0502	0.1765	-0.7187	-0.9982
Cr-30mg.Kg⁻¹	-0.1403	0.3833	0.9882	0.9782	-0.7163	0.9844	0.9133	0.3943	-0.7809

10.6. Avaliação de risco toxicológico associado a exposição ao crómio.

10.6.1. Risco não carcinogénico

10.6.1.1. Estimativa de ingestão diária (EID)

Para os valores estimados de ingestão diária, houve diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, com ($p = 0.00032$). A EID em adultos esteve a baixo do dose de referencia oral, no controlo e em todos tratamentos, o mesmo foi observado no EID em Crianças excepto para o tratamento com Cr-30mg.Kg^{-1} , onde o EID foi de 1.62, tal como pode observar na tabela 7.

Tabela 7: Estimativa da Ingestão Diária (EID) de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.

Tratamentos	Estimativa de ingestão diária (EID) (mg.Kg ⁻¹ .MC ⁻¹ .dia ⁻¹)	
	Adultos	Crianças
Controlo	0.203386	0.332348
Cr-10mg.Kg⁻¹	0.27406	0.447836
Cr-30mg.Kg⁻¹	0.988811	1.61579
p-value	0.00032	0.32

Os valores na tabela representam as médias de 9 plantas $\pm$ o desvio padrão.

10.6.1.2. Ingestão diária Crónica(IDC)

Diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos foram observadas ($p=0.000320$) com uma tendência crescente do valores de IDC, com o aumento da concentração de Cr no solo (tabela 8). Em crianças foi observado um IDC de 0.000319 no controlo, 0.000429 no tratamento Cr-10mg.Kg⁻¹, e 0.001549 no tratamento Cr-30mg.Kg⁻¹; e em adultos o IDC foi 0.000195 no controlo, 0.000263 no tratamento Cr-10mg.Kg⁻¹ e 0.000948 no tratamento Cr-30mg.Kg⁻¹.

Tabela 8: Ingestão diária crónica (IDC) de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.

Tratamentos	Ingestão diária Crónica (IDC) em(mg/Kg)	
	Adultos	Crianças
Controlo (Cr-0 mg.Kg⁻¹)	1.95×10^{-4}	3.19×10^{-4}
Cr-10mg.Kg⁻¹	2.63×10^{-4}	4.29×10^{-4}
Cr-30mg.Kg⁻¹	9.48×10^{-4}	1.55×10^{-3}
p-value	0.000320	0.000320

Os valores na tabela representam as médias de 9 plantas $\pm$ o desvio padrão.

10.6.1.3. Quociente de risco (QR)

Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, ($p=0.000320$), um ligeiro aumento do QR com o aumento do nível de Cr no solo (tabela). As estimativas de QR, tanto para adultos, bem como para crianças, estiveram abaixo de um ($QR < 1$), com exceção do tratamento $Cr-30mg.Kg^{-1}$, onde foi observado em crianças, um $QR > 1$, e foi constatado também que nas crianças os valores estimados de QR foram relativamente mais altos em relação aos adultos. Em adultos as médias das estimativas de QR foram de 0.135591 no controlo, 0.182707 no tratamento $Cr-10mg.Kg^{-1}$, e 0.659207 no tratamento $Cr-30mg.Kg^{-1}$. Em crianças, as médias de QR foram 0.221566 no controlo, 0.298557 no tratamento $Cr-10mg.Kg^{-1}$, e 1.077194 no tratamento. Os resultados de QR estão ilustrados na tabela 9.

Tabela 9: Quociente de risco (QR) associado ao consumo de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.

Tratamentos	Quociente de risco (QR)	
	Adultos	Crianças
Controlo	0.135591	0.221566
Cr-10mg.Kg⁻¹	0.182707	0.298557
Cr-30mg.Kg⁻¹	0.659207	1.077194
p-value	0.00032	0.00032

Os valores na tabela representam as médias de 9 plantas $\pm$ o desvio padrão.

10.6.2. Risco Carcinogénico incremental ao longo da Vida (RCILV)

Os resultados sobre o risco carcinogénico apresentaram diferenças estatísticas significativas, porém foi constatado que o RCILV em adultos apresentou valores médios relativamente altos em relação às crianças, e entre os tratamentos, foi constatado que o RCILV foi aumentando em função do aumento da concentração do crómio no solo, ou seja, $RCILV \text{ no controlo} < Cr-$

$10\text{mg.Kg}^{-1} < \text{Cr-}30\text{mg.Kg}^{-1}$. Foi constatado também que o RCILV estimado para adultos esteve acima do limite de segurança ($\text{RCILV} > 1 \times 10^{-4}$) no tratamento $\text{Cr-}30\text{mg.Kg}^{-1}$, como se pode ver na tabela 10.

Tabela 10: Risco Carcinogénico incremental ao longo da Vida associado ao consumo de amendoim contaminado por diferentes concentrações de crómio.

Tratamentos	Risco Carcinogénico incremental ao longo da Vida (RCILV)	
	Adultos	Crianças
Controlo	4.2×10^{-5}	2.0×10^{-5}
Cr-10mg.Kg⁻¹	5.6×10^{-5}	2.7×10^{-5}
Cr-30mg.Kg⁻¹	2.03×10^{-4}	9.8×10^{-5}
p-value	0.00032	0.00032

Os valores na tabela representam as médias de 9 plantas $\pm$ o desvio padrão.

11. Discussão

11.1. Caracterização físico-química do solo

A análise de variâncias para o parâmetro pH, não mostrou diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos. Foi também verificado que tanto o pH do controle, quanto os tratamentos (Cr 10mgKg⁻¹, Cr 30mgKg⁻¹), apresentaram pH neutro, segundo a escala de pH usada por Kicinska *et al.* (2021). Segundo o Crispo *et al.* (2021), Milacic e Scancar (2020), a biodisponibilidade de metais pesados no solo é afectada pelo pH, sendo que em pH ácido e neutro, o crómio se encontra adsorvido às cargas negativas da matriz sólida do solo, sendo que em condições de pH alcalino o Cr⁶⁺ se encontra solúvel e altamente móvel, estando biodisponível para ser absorvido pelas plantas. Segundo Guo *et al.* (2020) em pH ácido ou neutro o Cr³⁺ se encontra na forma de um catião solúvel, e a medida que o pH aumenta, este metal é precipitado na forma de trióxido Crómio, reduzindo a sua biodisponibilidade para as plantas, em suma, em pH ácidos e neutros, a espécie Cr⁶⁺ tem menor biodisponibilidade, ao passo que em pH alcalinos, tem maior biodisponibilidade, o contrário se verifica para a espécie Cr³⁺.

Os resultados referentes à condutividade eléctrica (CE_s) não mostraram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, entretanto foi constatada uma tendência crescente da CE_s em função da concentração de crómio nos solos. As amostras de solo do controlo apresentaram (0.156 mS. cm⁻¹), 0.160 mS cm⁻¹ no tratamento Cr-10mg.Kg⁻¹ e 0.383 mS cm⁻¹ no tratamento Crómio 30mg.Kg⁻¹ (tabela 3). Um estudo feito por Tiwari *et al.* (2018), mostrou que solos agrícolas irrigados com águas residuais contendo crómio, apresentavam altos níveis de CE_s na ordem dos 345µS.cm⁻¹ (0,345mS.cm⁻¹). Os resultados deste trabalho, vão de encontro com os relatados na literatura, pois estudos realizados por Naser *et al.*(2018) sobre acumulação de metais pesados em vegetais folhosos crescendo em áreas industriais, sob vários níveis de poluição, demonstraram que solos com altos níveis de poluição apresentavam maiores valores de CE_s em relação aos de níveis médios de poluição, e o valor mais baixo de CE_s foi registado em solos com o menor nível de poluição por metais pesados.

Todos os tratamentos apresentaram uma capacidade de troca catiónica (CTC) muito inferior à 24cmol.Kg⁻¹, e não difereiram estatisticamente (p<0,05). Segundo Maior (2023), a capacidade

de troca catiónica está directamente ligada quantidade de iões disponíveis para a troca na matriz do solo, tais como cálcio (Ca^{2+}), magnésio(Mg^{2+}), potássio(K^+) e sódio (Na^+). O controlo apresentou o maior valor de CTC, indicando que provavelmente tenha tido maior quantidade de iões disponíveis para troca., Por outro lado, o solo contaminado com as duas concentrações avaliadas, apresentou valores aproximadamente iguais. O CTC é um factor que afecta a biodisponibilidade de metais pesados no solo. Contrariamente ao que é reportado neste trabalho, Xu *et al.* (2023) relataram que solos agrícolas contaminados por Cr apresentavam níveis de CTC relativamente altos, acima de 25cmol.kg^{-1} .

A quantidade de bases de troca está directamente ligada a capacidade de troca catiónica, juntas as quatro bases, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , compõem o CTC, que é a soma destas bases.

As amostras do tratamento Cr 10mg.Kg^{-1} tiveram 8mgL^{-1} de P, as do controle teve 7mgL^{-1} , e o tratamento Cr 30mgKg^{-1} teve 6mgL^{-1} , contudo esse teores de fósforo para as amostras, tanto as de controle assim como os tratamentos, são classificadas como sendo de baixo teor em fósforo, segundo Brasil e Cravo (2020), para estes, o solo é considerado de baixo teor em fosforo, se for arenoso, quando tem abaixo de 10mgL^{-1} , e para solos franco-arenosos com teores de argila entre 15-35%, são considerados de baixo teor em fósforo quando apresentam teores abaixo de 8mgL^{-1} . Tanto os solos de controlo assim como dos dois tratamentos são de baixo teor em fósforo.

o teor de matéria organica não apresentou diferenças estatísticas significativas, e também não foi observada nenhuma tendência, porém, as amostras do controlo apresentaram maiores teores em MO, a seguir foi o tratamento Cr 30mgkg^{-1} , e por fim o tratamento Cr 10mg.Kg^{-1} . Segundo Shahid et al. (2017) em solos com altos níveis de MO ocorre alteração no potencial de redução através da proliferação de microrganismos que contribuem para a especiação do metal pesado. As cargas positivas do solo e dos coloides do solo aumentam a retenção de Cr^{6+} , da mesma forma, o aumento da retenção do Cr^{3+} é devido ao aumento da capacidade de troca catiónica do solo.

11.2. Peso seco

No tratamento com Cr 10mg.Kg^{-1} , a parte aérea teve o maior peso seco em relação ao controle e ao tratamento com 30mg.Kg^{-1} . Chaab *et al.* (2015) relataram resultados similares a estes, em que plantas de milho submetidas a tratamentos com crômio apresentaram redução no peso fresco e seco. Gandhi *et al.* (2017) também relataram resultados semelhantes, uma redução do peso fresco e seco das plantas com o aumento da concentração do metal crômio, trabalhando com *Amaranthus tricolour L.* e *Sesamum indicum L.*, estes usaram concentrações próximas as usadas neste trabalho (4 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L, 12 mg/L and 15 mg/L) tendo a concentração de 4mg/L apresentado um aumento no peso seco e fresco nas plantas de *A. tricolour* em relação ao controle. Num outro estudo realizado por Rameshkumar e Saravanan (2019), trabalhando com *A. hipogaea*, os autores relataram resultados similares, no tratamento com crômio 50mg.Kg^{-1} apresentou melhor desenvolvimento. Foi observada nas raízes uma redução do peso seco, a medida que a concentração do metal crômio aumenta. Banavath *et al.* (2015) e Mishra *et al.* (2024) sugerem que a toxicidade do crômio inibe mais o crescimento e a produção da biomassa nas raízes do que na parte aérea, essa redução pode ser devida ao maior acúmulo do metal crômio nas raízes, em relação à parte aérea, e tendo em conta que é nas raízes onde ocorre a absorção dos sais minerais e água, grande parte do metal é retido na raiz e uma pequena quantidade que é translocada para parte aérea. Por outro lado, Banavath *et al.* (2015) sugerem ainda que o aumento da concentração do crômio pode causar uma deterioração no sistema de absorção da água e dos nutrientes, e como resultado haverá uma taxa menor de divisão celular e alongamento das raízes, culminado na redução do crescimento da planta.

11.3. Teor Relativo de água (TRA)

Foi observado que o TRA das plantas não apresentou diferenças estatísticas significativas nos tratamentos, porém foi verificada uma tendência de aumento, seguida de redução do TRA com o aumento do nível de Cr no solo. Em linhas gerais o tratamento Cr- 10mg.Kg^{-1} , apresentou valores relativamente mais altos de TRA em relação ao controle e ao tratamento Cr- 30mg.Kg^{-1} . Esses resultados são ligeiramente contrários com o que é relatado em alguns estudos, visto que não há uma tendência linear de aumento ou diminuição do TRA em função da concentração do Cr no solo. Gopal e Sharma (2014), verificaram que em plantas de amendoim contaminadas por Cr, reduziram o TRA com o aumento dos níveis de metal pesado no solo. Din *et al.* (2019) e

Ashraf *et al.*(2020) também relataram uma redução do TRA com o aumento da concentração de Cr no solo. O TRA e o peso fresco das plantas apresentam uma relação de proporcionalidade directa, sendo assim um aumento no TRA vai implicar um aumento no peso fresco da planta. Gandhi *et al.*(2017) relataram valores altos do peso fresco nas concentrações de Cr médias do que no controlo, o mesmo foi verificado por Rameshkumar e Saravanan (2019), isto sugere que dependendo da espécie vegetal, existe um pequeno intervalo de concentração de Cr dentro do qual pode haver maior estímulo no crescimento e desenvolvimento da planta

Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, com uma redução da área foliar em função do aumento da concentração do metal crómio, a redução da área foliar foi acentuada no tratamento com 30mg.Kg⁻¹. Esses resultados são similares aos encontrados por Stambulski *et al.*(2018) onde o aumento da concentração de crómio no solo reduziu significativamente a área foliar. Num estudo feito por Tiwari *et al.* (2023) com a planta *Cyamopsis tetragonoloba*, também foi observada uma redução da área foliar com o aumento da concentração de crómio no solo. A presença de metais pesados no solo restringe o transporte de água e nutrientes para as partes aéreas, portanto, em plantas submetidas a algum stress, a redução da área foliar pode ser uma estratégia ou mecanismo de sobrevivência, que reduz a superfície disponível para transpiração e reduz a perda de água por este processo.

Os resultados desta pesquisa, referentes a densidade estomática, apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, e sugerem um aumento da densidade estomática com aumento da concentração de Cr no solo. Estes resultados corroboram com os resultados encontrados por Nguyen *et al.*(2016), sustentando ainda, que a densidade estomática aumenta nas condições de stress por crómio e esta depende também das condições de salinidade da água e do solo, bem como das condições físico-químicas e nutricionais do solo. Segundo Guo *et al.* (2023) o aumento do número de estomas em plantas contaminadas por metais pesados pode indicar que há uma forte translocação dos metais para as outras partes da planta, com aumento das concentrações dos metais pesados, o número de estomas também aumenta, até chegar a um ponto em que o número de células estomáticas decresce devido a toxicidade do metal. O aumento na DE e redução do tamanho, reduz a área de transpiração e evita a perda de água. Ao passo que a redução na DE e aumento no tamanho, mantém o fluxo do CO₂ portanto a DE, o tamanho e número de estomas são mecanismos que podem estar directamente ligados a

adaptação das plantas ao stress causado por metais pesados. García-Sánchez *et al.* (2019) também reitera que a DE, é modificada pelos níveis metais pesados no solo, como uma forma de adaptação.

11.4. Concentração de Clorofila

No que se refere a concentração da clorofila, foi constatado que as médias entre os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas significativas, e o teste de Tukey mostrou que as diferenças ocorrem entre o tratamento Cr10 mg.Kg⁻¹ e o tratamento Cr30mgKg⁻¹. A correlação entre a concentração de clorofila (**a e b**) e a concentração de crómio na planta apresentou-se positiva, tendo sido uma correlação moderada ($r = 0,50475$) entre a clorofila **a** e a concentração de crómio na planta, e uma correlação correlação forte ($r = 0,77377$) entre a concentração de clorofila **b** e a concentração de crómio na planta, tendo sido estatisticamente significativa, com $p = 0,014$. Estes resultados contrastam com os descritos por outros autores. Por exemplo. Singh *et al.*(2021), trabalhando com duas variedades da espécie *Vigna radiata*, contaminadas com diferentes concentrações de crómio relataram resultados em que o aumento da concentração do crómio reduz significativamente a quantidade dos pigmentos fotossintéticos. Nessa mesma linha, Gandhi *et al.*(2017), sustentaram que a redução na quantidade de pigmentos fotossintéticos mantém-se quando se submete as plantas à concentrações de crómio entre 10-40mg/L. Por outro lado Christou *et al.* (2020) em plantas alimentares obtiveram resultados que corroboram com os resultados achados no presente trabalho, e justificaram os autores, que esse aumento na quantidade de clorofila em concentrações médias de crómio, pode implicar que as plantas produzem mais clorofila, como um mecanismo de defesa em condições de stress pelo metal crómio.

11.5. Concentração de Cr na planta

Foi verificado um aumento da concentração de crómio nas plantas com o aumento dos níveis deste metal no solo (Cr30 mg.Kg⁻¹ > Cr10 mg.Kg⁻¹ > Cr0 mg.Kg⁻¹). No presente trabalho, observou-se em todos os tratamentos, maior quantidade de crómio na parte aérea (caule e folhas) em relação às raízes, sendo esses resultados contrários aos que são relatados noutros estudos como o de Prameela e Kumar(2021) em plantas de amendoim (*A. hypogaea* L.) tratadas com Cr a 12,5mM(650mg/L), que relataram um acúmulo maior de crómio nas raízes

do que nas partes aéreas. Foi constatado que em todos os tratamentos, a concentração de Cr esteve a baixo de 2.3mg.Kg^{-1} , que segundo Hassain *et al.* (2016) é o limite máximo permitido nos vegetais pela FAO/WHO, entretanto no tratamento Cr 30 mg.Kg^{-1} , foi verificado um valor médio de 0.3310mg.Kg^{-1} , que esteve acima de 0.3 mg.Kg^{-1} que segundo Iwuanyanwu e Chioma (2017) é o valor recomendado pela comunidade europeia/ Codex(2001) como o máximo permitido em vegetais. Isso implica que o consumo do amendoim com estes padrões de contaminação, pode trazer complicações à saúde à longo prazo, causando anomalias na coagulação do sangue, falência do fígado, dos rins, do sistema imune e hematológico e no sistema reprodutor dos indivíduos do sexo masculino, para além dos danos no sistema gastrointestinal (Alexakis, 2015; IRIS US EPA, 2024). Por outro lado a concentração do Cr no solo foi muito inferior a 50 mg.Kg^{-1} , que segundo Feseha *et al.*(2021) é o valor estabelecido pela a FAO/WHO (2001) como limite máximo permitido para solos.

11.6. Bioacumulação e translocação do Cr na Planta

Segundo Wijeyaratne e Kumari (2021) os factores de bioacumulação e de translocação são indicadores importantes usados na toxicologia ambiental e avaliação de risco, para determinar o grau de absorção e armazenamento de um determinado metal pesado, e em plantas esses índices são usados para identificar espécies hyper-acumuladoras de um determinado metal pesado. Quando os factores de bioacumulação e de translocação são maiores que uma unidade ($\text{FBA} > 1$; $\text{FT} > 1$), as plantas são consideradas hiperacumuladoras, e Prameela e Kumar, (2021), acrescentam que também podem ser usadas na fitoextração do contaminante. O factores de bioacumulação e de translocação foram maiores que uma unidade ($\text{FBA} > 1$, $\text{FT} > 1$) nos dois tratamentos. Os resultados referentes ao FBA sugerem uma proporcionalidade directa entre a quantidade de Cr aplicada no solo e os valores de FBA ou seja, um aumento na concentração do Cr no solo se reflete no aumento da bioacumulação do Cr na planta, estes resultados vão de encontro com os achados de Bouhadi *et al.* (2024). Por outro lado os valores de FT não apresentaram uma tendência linear em relação as concentrações de Cr aplicadas no solo, foi registado maior valor de FT no tratamento Cr- 10mg.Kg^{-1} , seguido pelo controle e por último o tratamento Cr 30mg.Kg^{-1} com o menor valor de FT. Segundo Ameh *et al.* (2020) quando o $\text{FT} > 1$ e $\text{FBA} > 1$ As plantas são capazes absorver acumular e transferir o metal, para as diferentes partes da planta, portanto os resultados obtidos no presente trabalho sugerem que à baixas

concentrações de Cr, as plantas de amendoim podem ser consideradas hyperacumuladoras, e fitoextratoras, capazes extrair quantidades significativas do Cr do solo.

11.7. Avaliação do risco toxicológico do consumo do amendoim

11.7.1. Estimativa de ingestão diária (EID)

Os resultados referentes a EID apresentaram diferenças estatísticas significativas, houve tendências crescentes em função da concentração do crômio no solo, tanto para estimativa feita para crianças bem como os adultos. Segundo Chowdhury *et al.* (2024), existem um valor estabelecido como uma dose máxima de ingestão diária tolerável (MTDI, Cr = 0.2), que quando excedida pode implicar riscos não cancerígenos à longo prazo, e para Laboni *et al.* (2022) este valor está entre 0.04 à 0.2. Portanto os resultados deste trabalho referentes a EID, sugerem um potencial risco não carcinogénico associado ao consumo de amendoim cultivado em solos contaminados por Cr, visto que foram registados valores acima de 0.2 em todos os tratamentos, tanto para adultos bem como para crianças. Foi constatado que este risco é mais acentuado em crianças em relação ao adultos, visto que foram registados valores de EID mais altos em crianças, foi constatado também que o risco aumenta a medida que se aumenta o nível de Cr no solo.

11.7.2. Ingestão diária Crónica (IDC)

Segundo Feseha *et al.* (2021), a ingestão diária crónica é uma ferramenta que permite acessar os riscos de saúde á longo prazo, tanto para riscos não carcinogénicos(QR) assim como para riscos carcinogénicos (RCILV), e no final determinar o quociente de risco. Neste trabalho os valores de IDC estão descritos nas tabelas 6 e 8, para os riscos não carconogénicos e carcinogénicos respectivamente. Foi constatado que os valores de IDC tiveram uma aumento proporcional a concentração de Cr no solo, contudo, tanto a IDC para riscos carcinogénicos bem como não carcinogénicos, apresentaram, em todos os tratamentos, valores inferiores à dose de referência oral para o Cr ($Drfo=1.5 \text{ mg.Kg}^{-1}.\text{MC}^{-1}.\text{dia}^{-1}$), indicando que o risco associado a IDC é insignificante, ou negligenciável.

11.7.3. Quociente de risco (QR)

Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, com um ligeiro aumento do QR com o aumento do nível de Cr no solo (tabela 6). As estimativas de QR, tanto para adultos, bem como para crianças, estiveram abaixo de um ($QR < 1$), com exceção do tratamento Cr-30mg.Kg⁻¹, onde foi observado em crianças, um $QR > 1$ ($QR = 1.077194$), e foi constatado também que nas crianças os valores estimados de QR foram relativamente mais altos em relação aos adultos. De acordo com Pajević *et al.* (2018), quando os valores de $QR < 1$, os riscos de saúde não carcinogénicos são considerados negligenciáveis ou seja, o consumo destes vegetais não representa um risco para a saúde a longo prazo, nessa mesma linha, Ongon'g *et al.* (2020), explicam que quando o $QR > 1$, implica a existência de potenciais efeitos não carcinogénicos, quando a ingestão diária crónica (IDC) excede o limite, para este estudo, foi constatado que o consumo de amendoim contaminado por Cr a 30mg.Kg⁻¹, representa um risco em crianças.

Risco carcinogénico

11.7.4. Risco Carcinogénico incremental ao longo da Vida (RCILV)

Os resultados sobre o risco carcinogénico apresentaram diferenças estatísticas significativas, porém foi constatado que o RCILV em adultos apresentou valores relativamente altos em relação às crianças, e entre os tratamentos, foi constatado que o RCILV apresentou uma tendência crescente em função do aumento da concentração do crómio no solo, ou seja, $RCILV_{\text{controlo}} < Cr-10mg.Kg^{-1} < Cr-30mg.Kg^{-1}$. Segundo Chowdhury *et al.* (2024), se o valor estimado para o risco carcinogénico estiver acima de 1×10^{-4} , então pode se considerar que os consumidores de vegetais que estejam nesse padrão de contaminação, estão expostos a um risco carcinogénico ou o risco de desenvolver algum tipo de câncer à longo prazo, ainda nesta linha Wang *et al.* (2024) sustentam que valores de RCILV que estejam abaixo de 1×10^{-6} , são considerados seguros, ou seja não apresentam algum risco carcinogénico, e para valores de RCILV entre 1×10^{-6} e 1×10^{-4} , são considerados de baixo risco carcinogénico. Como se pode observar na tabela 9, com exceção do tratamento Cr-30mg.Kg⁻¹, onde o RCILV para adultos foi de 2.03×10^{-4} , em todos os outros tratamentos, tanto para adultos bem como para crianças os valores de RCILV estiveram no intervalo de 1×10^{-6} à 1×10^{-4} , o que sugere que o risco carcinogénico para quem consome o amendoim nestas condições é de baixo nível, por outro lado, os resultados sugerem que o consumo do amendoim cultivado em solos contaminados com

Cr-30mg.Kg⁻¹, por adultos com uma massa corporal média de 60Kg, apresenta um alto risco carcinogénico, ou seja, há um alto risco desses adultos desenvolverem algum tipo de câncer à longo prazo, associado ao consumo do amendoim nestas condições.

12. Conclusão

O aumento do nível de Cr no solo aumenta a densidade estomática, promove a redução da área foliar, aumento na concentração de clorofila e carotenóides, e redução do teor relativo da água. Os níveis de Cr nas plantas estiveram abaixo do limite máximo permitido pela FAO/WHO, no entanto, o tratamento 30mg.Kg^{-1} , apresentou um valor acima do limite máximo permitido pela comunidade europeia/ Codex(2001). Os factores de bioacumulação e de traslocação foram maiores do que uma unidade, o que implica que a planta de amendoim é capaz de bioconcentrar e translocar o Cr para as partes aéreas com eficiência.

Os valores de EID, estiveram acima do limite máximo tolerável ($\text{Cr} = 0.2 \text{ mg.Kg}^{-1}$) um potencial risco não carcinogénico, sendo mais acentuado em crianças. Foi constatado que o IDC para riscos carcinogénicos e não carcinogénicos, apresentaram, em todos os tratamentos, valores considerado negligenciáveis. As estimativas de QR e RCILV, tanto para adultos, bem como para crianças, estiveram abaixo do limite seguro ($\text{QR} < 1$; $\text{RCILV} < 10^{-4}$), excepto no tratamento 30mg.Kg^{-1} , onde em crianças o QR foi 1.077, e em adultos o RCILV foi de 2.03×10^{-4} , portanto, esses resultados sugerem a existência de riscos não carcinogénicos em crianças, e carcinogénicos em adultos que fazem o consumo de amendoim com esse padrão de contaminação.

13. Limitações

A principal limitação para a realização deste trabalho, foi a falta de recursos, para fazer as análises químicas (ICP-AES), físico-químicas e análise enzimáticas, tendo significativamente reduzido o número de amostras, e contribuído para a exclusão de certas análises previamente concebidas.

14. Recomendações

Os resultados desta pesquisa mostram que mesmo em concentrações baixas de crómio (10mg.kg^{-1} e 30mg.kg^{-1}) como as usadas nesse trabalho, as plantas podem absorver e bioconcentrar em seus tecidos, acarretando riscos para a saúde das pessoas que fazem o seu consumo, neste sentido:

- recomenda-se que se façam estudos de modo a determinar o limite máximo seguro de concentração de crómio e outros metais pesados em solos agrícolas e em vegetais
- Recomenda-se que se façam estudos para se determinar os níveis de metais pesados em solos com alguma influencia industrial onde se pratica a agricultura urbana, em águas residuais provenientes de indústrias que são usados para irrigar campos de produção de hortícolas, em hortícolas que são produzidas e comercializadas à beira das estradas e rodovias nas zonas urbanas das nossas cidades.
- Recomenda-se também que os investigadores da área de saúde, agricultura e meio ambiente redobrem esforços de modo a propor a elaboração de instrumentos legais para reger o limite máximo de concentração de metais pesados que seja específico para a nossa realidade.

15. Referências bibliográficas

- Abadya, S., H. Shimelis, P. Janila e J. Mashilo (2019). Groundnut (*Arachis Hypogaea* L.) Improvement In Sub-Saharan Africa: A Review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B —Soil & Plant Science*, Vol. 69, No. 6, 528–545.
- Akram, N. A., F. Shafiq e M. Ashraf (2018). Peanut (*Arachis hypogaea* L.): A Prospective Legume Crop to Offer Multiple Health Benefits Under Changing Climate, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol. 0, 2018.
- Alemu, A. E. A. Tegegne (2022). Assessment Of Chromium Contamination In The Soil And Khat leaves (*Catha edulis* Forsk) and its health risks located in the vicinity of tannery industries; A case study in Bahir Dar City, Ethiopia. *Heliyon* 8 e11914
- Alexakis, D. (2015). Human Health Risk Assessment Associated with Co, Cr, Mn, Ni and V Contents in Agricultural Soils from a Mediterranean Site, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62:3, 359-373, DOI: 10.1080/03650340.2015.1062088
- Almeida, R. (2018). *Fitoextração de Metais Pesados em Solo Contaminado por Escória de Minério de Chumbo, no Município de Santo Amaro*. Tese de Mestrado. 119pp. Governador Mangabeira – BA. Faculdade Maria Milza.
- Ameh, G. I., H. O. Nwamba, V. S. Njom and E. C. Ofordile (2020). Phytoremediation of Heavy Metals Using Some Selected Leguminous Crops. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology*. 23(6): 1-7; no..59787.
- Anjum, S. A., U. Ashraf, I. Khan, M. Tanveer, M. Shahid, A. Shakoor And W. Longchang (2017). Phyto-Toxicity Of Chromium In Maize: Oxidative Damage, Osmolyte Accumulation, Anti-Oxidative Defense And Chromium Uptake. *Pedosphere* 27(2): 262–273.
- Ashraf, M. A., R. Rasheed, S. Zafar, M. Iqbal e Z. A. Saqib (2020). Menadione sodium bisulfite neutralizes chromium phytotoxic effects in okra by regulating cytosolutes, lipid peroxidation, antioxidant system and metal uptake. *International Journal Of Phytoremediation*. DOI: 10.1080/15226514.2020.1854171
- Banavath, J. N., S. Konduru, V. Pandit, K. K. Guduru, S. Raju K, S. Podha, C. S. Akila And C. O. R. Puli (2015). Assessment Of Genotypic Variation In Groundnut (*Arachis Hypogaea* L.) Genotypes For Chromium Tolerance Using Physiological And

Biochemical Traits. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, ISSN 0975-6299 6(4): (B) 1077 – 1089.

- Bashir Ud Din, Amna, Muhammad Tariq Javed, Mazhar Rafique, Muhammad Aqeel Kamran, Shehzad Mehmood, Mursalin Khan, Tariq Sultan, Muhammad Farooq Hussain Munis, Hassan J. C.Din (2019). Assisted Phytoremediation Of Chromium Spiked Soils By Sesbania Sesban In Association With Bacillus Xiamenensis PM14: A Biochemical Analysis, *Plant Physiology and Biochemistry*, S0981-9428(19)30461-9
- C. N. Eze, C. K. Odoh, E. A. Eze, P. I. Orjiakor, S. C. Enemuor and U. J. Okobo (2018). Chromium (III) and its Effects on Soil Microbial Activities and Phytoremediation Potentials of *Arachis hypogaea* and *Vigna unguiculata*. *African Journal of Biotechnology* Vol. 17(38), pp. 1207-1214.
- Chaab, A., A. Moezzi, G. Sayyad and M. Chorom (2015). Effect of Chromium and Cadmium on Growth Parameters and Biochemical Responses in Soil Treated with Compost and Humic Acid. *International Journal of Plant & Soil Science* 8(4): 1-8; IJPSS.19242 ISSN: 2320-7035.
- Cheng, S. F., C. Y. Huang, S. C. Lin, K. L. Chen, Y.C. Lin (2015). Feasibility of using peanut (*Arachis hypogaea* L.) for phytoattenuation on lead-contaminated agricultural land—an in situ study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 202 (2015) 25-30.
- Christou, A., E. C. Georgiadou, A. M. Zissimos, I. C. Christoforou, C. Christofi, D. Neocleous, P. Dalias, V. Fotopoulos. (2020). Uptake of hexavalent chromium by *Lactuca sativa* and *Triticum aestivum* plants and mediated effects on their performance, linked with associated public health risks. *Chemosphere*, 128912 0045-6535.
- Duttaa, D., A. K. Pala, and P. U. Acharjeeb(2021). Physiological Studies on Seedling Growth in Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under Interactive Effects of Cadmium and Zinc. *Russian Journal of Plant Physiology*, Vol. 68, pp. S82–S91.
- Fayiga, A. O., M. O. Ipinmoroti, T. Chirenje (2018) Environmental pollution in Africa, *Environ Dev Sustain* 20:41–73
- Focus, E., M. J. Rwiza, N. K. Mohammed, e F. P. Banzi (2021). Health Risk Assessment of Trace Elements in Soil for People Living and Working in a Mining Area. *Journal of Environmental and Public Health*. <https://doi.org/10.1155/2021/9976048>

- França, D. V. B., C. M. Costa, e Q. D. Silva (2021) Propriedades Físicas Dos Solos: Uma Abordagem Teórico-Metodológica. *Ciência Geográfica - Bauru XXV - Vol. XXV*
- Gandhi, N., I. Prudhvi Raj, M. Maheshwar and D. Sirisha (2017). Germination, Seedling Growth and Biochemical Responses of Amaranthus (Amaranthus tricolour L.) and Sesame (Sesamum indicum L.) at Varying Chromium Concentrations. *International Journal of Plant and Soil Science* 20(5): 1-16.
- García-Sánchez, I. E., V. L. Barradas, C. A. P. L. Hill, M. Esperón-Rodríguez, I. R. Pérez, M. Ballinas (2019). Effect Of Heavy Metals And Environmental Variables On The Assimilation Of CO₂ And Stomatal Conductance Of Ligustrum Lucidum, An Urban Tree From Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening* 42, 72–81
- Gezahegn, A. M., F. F. Feyessa, E. A. Tekeste, and E. M. Beyen (2022) Chromium Laden Soil, Water, and Vegetables nearby Tanning Industries: Speciation and Spatial Distribution. *Journal of Chemistry* ID 5531349, 10 pp.
- Gitz III, D. C., J. T. Baker, H. Echevarria-Laza, P. Payton, J. R. Mahan, R. J. Lascano (2017). CO₂ and Chamber Effects on Epidermal Development in Field-Grown Peanut (Arachis hypogaea L.) *American Journal of Plant Sciences*, 8, 349-362.
- Godoy, F. O., A. C. C. Bernardi, F. Rossi e J. O. A. Bueno (2019). Mapeamento Da Condutividade Elétrica Aparente Do Solo E Sua Relação Com Matéria Orgânica E Granulometria. *Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola - CONBEA*
- Guo, S. Guo, C. Xiao, N. Zhou, R. Chi (2020) Speciation, toxicity, microbial remediation and phytoremediation of soil chromium contamination. *Environmental Chemistry Letters* 19:1413–1431
- Guo, Z., Y. Gao, X. Yuan, M. Yuan, Lv. Huang, S. Wang, C. Liu and C. Duan (2023). Effects of Heavy Metals on Stomata in Plants. *International Journal For Molecular Science* 24, 9302.
- Hoque, N., T. U. Arif, A. Hannan, N. Sultana, S. Akhter, Hasanuzzaman, F. Akter, S. Hossain, A. Sayed, T. Hossain, M. Skalicky, X. Li, and M. Brestič (2021). Melatonin Modulates Plant Tolerance to Heavy Metal Stress Morphological Responses to Molecular Mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*. 22, 11445.

- Ijah, U. J. J., S. A. Aransiola, and O. P. Abioye(2015). Restoration of Lead Contaminated Soil Using *Arachishypogaea*. *International Journal of Environmental Pollution and Control Research*. Vol. 20, No. 10, pp. 17-23.
- Javed, M. T., K. Tanwir, S. Abbas, M. H. Saleem, R. Iqbal, H. J. Chaudhary, (2021). Chromium retention potential of two contrasting *Solanum lycopersicum* Mill. cultivars as deciphered by altered pH dynamics, growth, and organic acid exudation under Cr stress, *Environmental Science and Pollution Research* 28:27542–27554
- Jena, P. e P. Hembram (2024). Navigating The Chromium Conundrum: A Review Of Heavy Metal Stress And Bioremediation Strategies, *Discover Environment*. 2:66.
- Kicińska, A., R. Pomysł e M. Izquierdo-Díaz (2021). Changes In Ph And Mobility Of Heavy Metals In Contaminated Soils. *European Journal Of Soil Science*.73: e13203
- Krishna, A. K., K. R. Mohan (2016). Distribution, Correlation, Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Contamination In Surface Soils Around An Industrial Area, Hyderabad, India. *Environ Earth Sci* 75:411
- Lichtenthaler, H. K. and C. Buschmann (2001). Protocols in Food Analytical Chemistry. *John Wiley & Sons, Inc* F4.3.1-F4.3.8.
- Lozano, M. G. (2016) *Amendoim (Arachis Hypogaea L.): Composição Centesimal, Ácidos Graxos, Fatores Antinutricionais E Minerais Em Cultivares Produzidas No Estado De São Paulo*. Tese de Mestrado. 87pp. Piracicaba. Universidade de São Paulo.
- M. Crispo, M. C. Dobson, R. S. Blevins, W. Meredith, J. A. Lake, J. L. Edmondson (2021), Heavy metals and metalloids concentrations across UK urban horticultural soils and the factors influencing their bioavailability to food crops. *Environmental Pollution* (288)117960.
- Machunguene Jr., M., S. V. Guilundo, R. S. Oliveira, C. M. Martins e O. A. Quilambo(2024) Assessment of heavy metals and human health risk associated with the consumption of crops cultivated in industrial areas of Maputo, Mozambique. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*.
- Machunguene, M.(2021). Avaliação do Nível de Metais Pesados em Plantas Alimentares Cultivadas em Áreas Industriais (Parque Industrial de Belulane e Parque Industrial da Matola), Tese de Licenciatura, 78pp. Universidade Eduardo Mondlane

- Maior, J. S. S (2023). *Melhoramento De Solos Expansivos Com Uso De Cal: Uma Revisão*, Teste de Dissertação. Recife (Brasil). Universidade Federal De Pernambuco
- Maseki, J., H.J. Annegarn, And G. Spiers (2017). Health Risk Posed By Enriched Heavy Metals (As, Cd, And Cr) In Airborne Particles From Witwatersrand Gold Tailings. *The Journal of The South African Institute Of Mining And Metallurgy*, Doi.Org/10.17159/2411-9717//V1
- Milacic, R. e J. Scancar (2020) Cr Speciation In Foodstuffs, Biological And Environmental Samples: Methodological Approaches And Analytical Challenges A Critical Review. *Trends in Analytical Chemistry* 127 (2020) 1158.
- Mishra, G., N. Yadav, L. Manasa, A. Kumar, A. Patnaik, M. Panigrahy, D. P. Biswal, G. R. Rout, K. C. Panigrahi (2024). Chromium Stress Influences Several Parameters Of Leaf Dynamics And Morphology In *Oryza sativa* L. Genotypes. *Plant Stress* 12,100449.
- Naser, N H. M., M. Z. Rahman, S. Sultana M. A. Quddus e M. A. Hossain (2018). Heavy Metal Accumulation In Leafy Vegetables Grown In Industrial Areas Under Varying Levels Of Pollution. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*. 43(1): 39-51.
- Negrão, L. M. V.(2022). *A Fitorremediação e Seus Mecanismos em Plantas Submetidas à Metais Pesados: Uma Revisão de Literatura*. Tese de Licenciatura. 40pp. Belém. Universidade Federal Rural da Amazônia.
- Nguyen, K. L., H. A. Nguyen, O. Richter, M. T. Pham, V. P. Nguyen (2016).Ecophysiological Responses Of Young Mangrove Species *Rhizophora Apiculata* (Blume) To Different Chromium Contaminated Environments. *Science Of The Total Environment* 574 (2017) 369–380.
- Nunes, E. A.,(2020). *Avaliação da Relação entre Fitoacumulação de Cádmio E Altos Níveis de Fertilização com Nitrogênio, Fósforo E Potássio*. Tese de Mestrado.61 pp. Campinas. Universidade Estadual de Campinas.
- Nyika, J., E. Onyari, M. O. Dinka e S. B. Mishra (2019). Heavy Metal Pollution And Mobility In Soils With a Landfill Vicinity: A South African Case Study. *Oriental Journal Of Chemistry*.34(4):1286-1296.

- Oginawati, K., S. H. Susetyo, F. A. Rosalyn, S. B. Kurniawan, S. R. S. Abdullah. (2021). Risk analysis of inhaled hexavalent chromium (Cr⁶⁺) exposure on blacksmiths from industrial area. *Environmental Science and Pollution Research*, 28:14000–14008
- Ongon’g, R. O., J. N. Edokpayi, T. A. M. Msagati, N. T. Tavengwa, G. N. Ijoma and J. O. Odiyo (2020). The Potential Health Risk Associated with Edible Vegetables Grown on Cr(VI) Polluted Soils. *International Journal Of Enviromental Research and Public Health*, 17, 470
- Prameela, T.S., A. V. S. Kumar (2021) Phytoremediation Potential And Biochemical Response Of Oil Crops To Soil Heavy Metals - A Case Study With *Arachis hypogaea* L. (Fabaceae). *Journal Of Advanced Scientific Research*. 12 (1) Suppl 1: 255-266
- Rahman, M., e M. A. Islam (2019). Concentrations and Health Risk Assessment of Trace Elements in Cereals, Fruits, and Vegetables of Bangladesh. *Biological Trace Element Research* 191:243–253
- Rameshkumar, J. and P.S. Saravanan (2017). Effect of enhanced chromium in Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) and its treatment. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP2: 452-453
- Raso, E. F, S. S. Savaio e E. P. Mulima (2021). Impacto da Mineração Artesanal do Ouro nos Solos Agrícolas: Caso do Distrito de Moatize. *Revista Verde* 17: 144-150.
- Rodrigues, A. C. D., A. M. Santos, F. S. Santos, A. C. C. Pereira e N. M. B. A. Sobrinho (2016). Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados. *Revista Virtual de Química*. 8 (1), 262-276
- Sá, F. V. S., E. F. Mesquita, F. M. Souza, S. O. Mesquita, E. P. Paiva, A. M. Silva (2017). Depleção De Água E Composição Do Substrato Na Produção De Mudas De Melancia. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.11, nº.3, p. 1398 – 1406.
- Sá, M. A. C. (2021) Dispersão Do Solo Para Análise Granulométrica-Uma Breve Revisão. *Embrapa Cerrados*, 2176-5081, 388.25 p.
- Samaila, B., B. Maidamma, B. Usman, A. I. Jega, S. A. Alhaji (2021). Assessment of Hazard Index and Incremental Life Cancer Risk Associated with Heavy Metals in the Soils. *Science Progress and Research* V. 1, (4) 298 – 319.

- Sharma, A., D. Kapoor, J. Wang, B. Shahzad, V. Kumar, A. S. Bali, S. Jasrotia, B. Zheng, H. Yuan, e D. Yan(2020) Chromium Bioaccumulation and Its Impacts on Plants: An Overview. *Plants*,(9), 100;
- Silva, C. P., F.M. Pagliosa, G. G. Prado, M. C. S. Campos(2017). Mecanismos de Tolerância de Plantas Forrageiras Tratadas com Diferentes Concentrações de Cádmio (Cd). *Instituto Brasileiro de estudos ambientais*.
- Singh, D., N. L. Sharma,C. K. Singh, V. Yerramilli, R. Narayan, S. K. Sarkar and I. Singh (2021).Chromium (VI)-Induced Alterations in Physio-Chemical Parameters, Yield, and Yield Characteristics in Two Cultivars of Mungbean (*Vigna radiata* L.). *Frontiers in Plant Science*, vol. 12,nº735129, doi: 10.3389/fpls.
- Souza A. K. R., C. Y. M. e W. B. Deus (2018) Poluição Do Ambiente Por Metais Pesados E Utilização De Vegetais Como Bioindicadores. ISSN: acta biomedical al brasil 2236-0867
- Tiwari, K. K., M. K. Bidhar, N. K. Singh (2023). Induced Toxicity and Bioaccumulation of Chromium (VI) in Cluster Bean: Oxidative Stress, Antioxidative Protection Strategy, Accumulation and Translocation of Certain Nutrient. *Jordan Journal of Biological Sciences*.16:2
- Tumolo, M., V. Ancona, D. D. Paola, D. Losacco, C. Campanale, C. Massarelli e V. F. Uricchio (2020). Chromium Pollution in European Water, Sources, Health Risk, and Remediation Strategies: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 5438
- USEPA IRIS (2021). Toxicological Review of Hexavalent Chromium [Cr(VI)]. *EPA IRIS CASRN 18540-29-9*
- Wijeyaratne, W. M. D. N. e E. A. C. S. Kumari (2021). Cadmium, Chromium, And Lead Uptake Associated Health Risk Assessment Of *Alternanthera Sessilis*: A Commonly Consumed Green Leafy Vegetable. *Journal Of Toxicology*, Article Id 9936254, 7pp.
- Xu, S., C.Yu, Qiong Wang, J. Liao, C. Liu, L. Huang, Q. Liu, Z. Wen, e Y. Feng (2022). Chromium Contamination and Health Risk Assessment of Soil and Agricultural Products in a Rural Area in Southern China. *Toxics*.11,27.

- Xu, S., C.Yu, Q. Wang, J. Liao, C. Liu, L. Huang, Q. Liu, Z. Wen and Y. Feng (2023). Chromium Contamination and Health Risk Assessment of Soil and Agricultural Products in a Rural Area in Southern China, *Toxics*, 11, 27.
- Yu, G., J. Ma, P. Jiang, J. Li, J. Gao, S. Qiao, Z. Zhao (2019). The Mechanism of Plant resistance to Heavy metal. *Earth and Environmental Science* 310 052004.
- Zulfikar, U., F. U. Haider, M. Ahmad, S. Hussain, M. F. Maqsood, M. Ishfaq, B. Shahzad, M. M. Waqas, B. Ali, M. N. Tayyab, S. A. Ahmad, I. Khan, e S. M. Eldin (2023) Chromium toxicity, speciation, and remediation strategies in soil-plant interface: A critical review, *Frontiers in Plant Science*. 13:1081624

16. Anexos

Gráficos de correlação

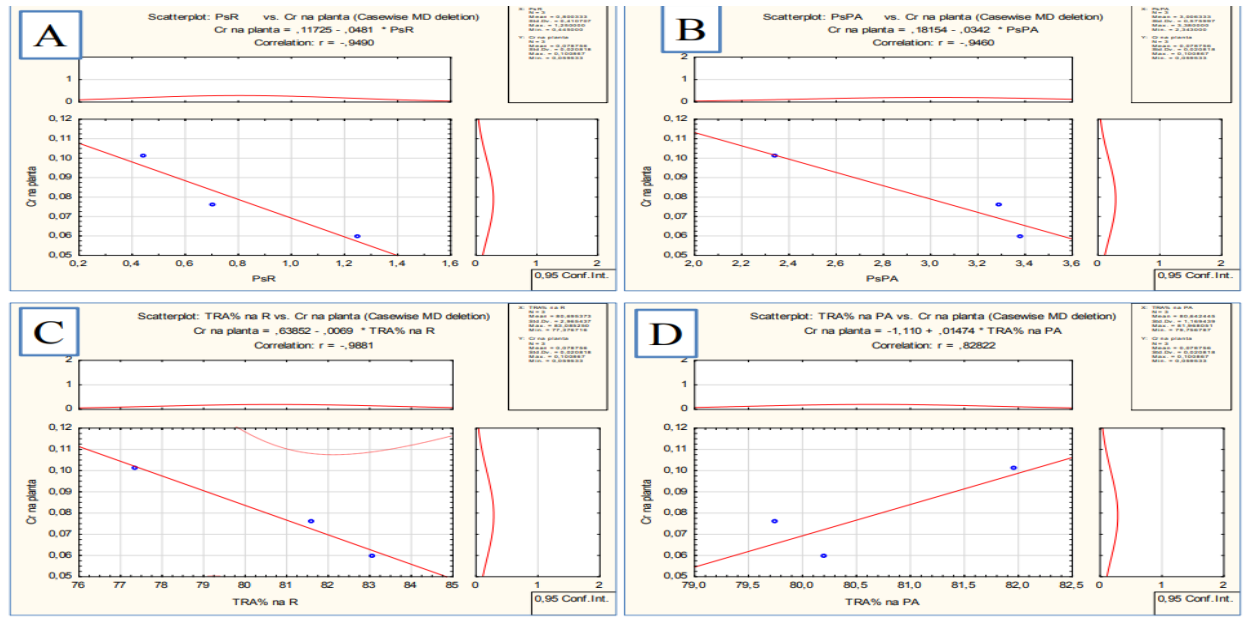


Ilustração 1: Correlações entre o a concentração de crómio na planta e o A- peso seco da raiz(PsR), B-peso seco da parte aérea(PsPA), C- teor relativo de água na raiz(TRA na R) e D-na parte aérea(TRA na PA), observadas no Controlo

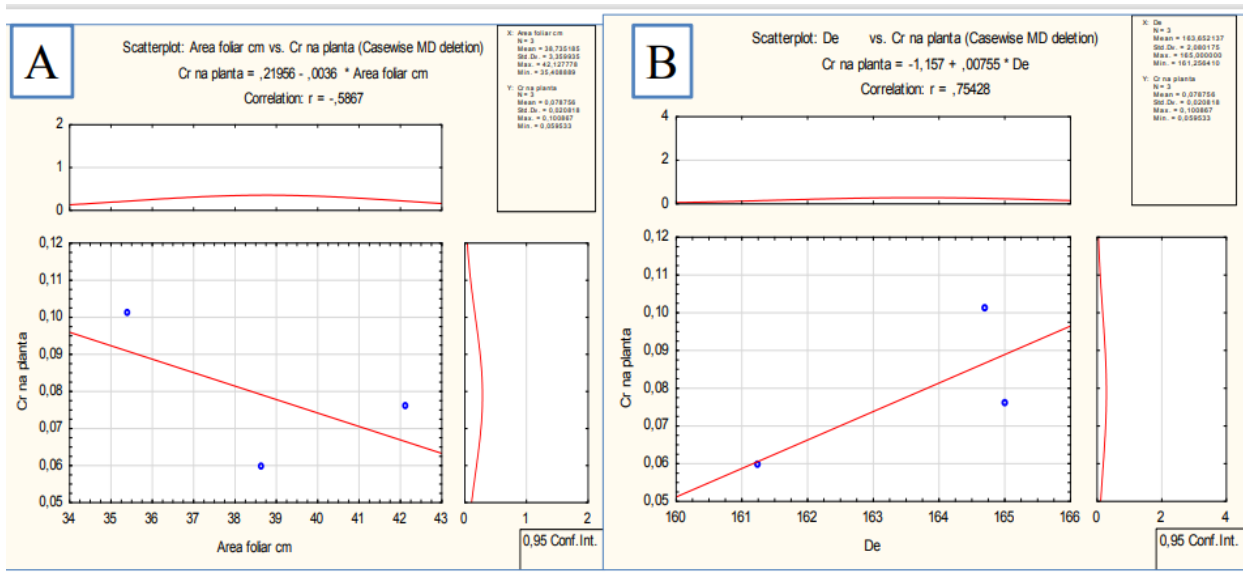


Ilustração 2: Correlações entre o crómio na planta e a A- área foliar, e B- Densidade estomática (DE) observadas no controlo.

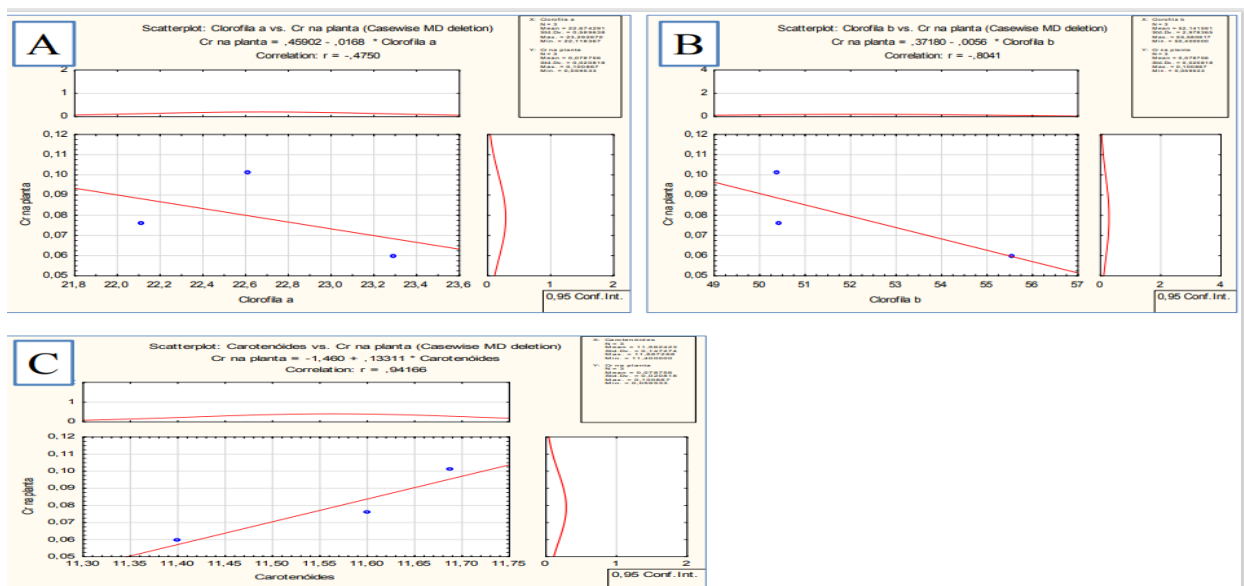


Ilustração 3: Correlação entre a concentração de Cr na planta e as concentrações de A- clorofila a, B- clorofila b, e C- Carotenóides, observadas no controle

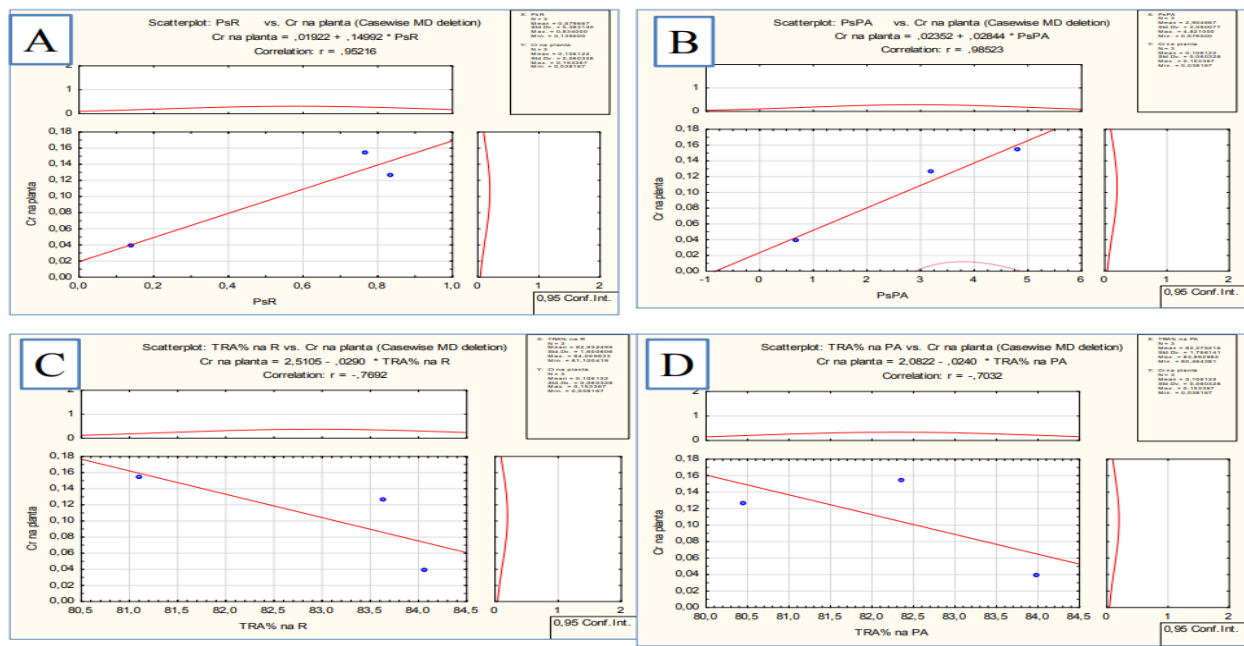


Ilustração 4: Correlações entre o a concentração de crômio na planta e o A- peso seco da raiz(PsR), B-peso seco da parte aérea(PsPA), C- teor relativo de água na raiz(TRA na R) e D-na parte aérea(TRA na PA), observadas no tratamento $\text{Cr } 10\text{mgKg}^{-1}$, $\text{Cr } 30\text{mgKg}^{-1}$

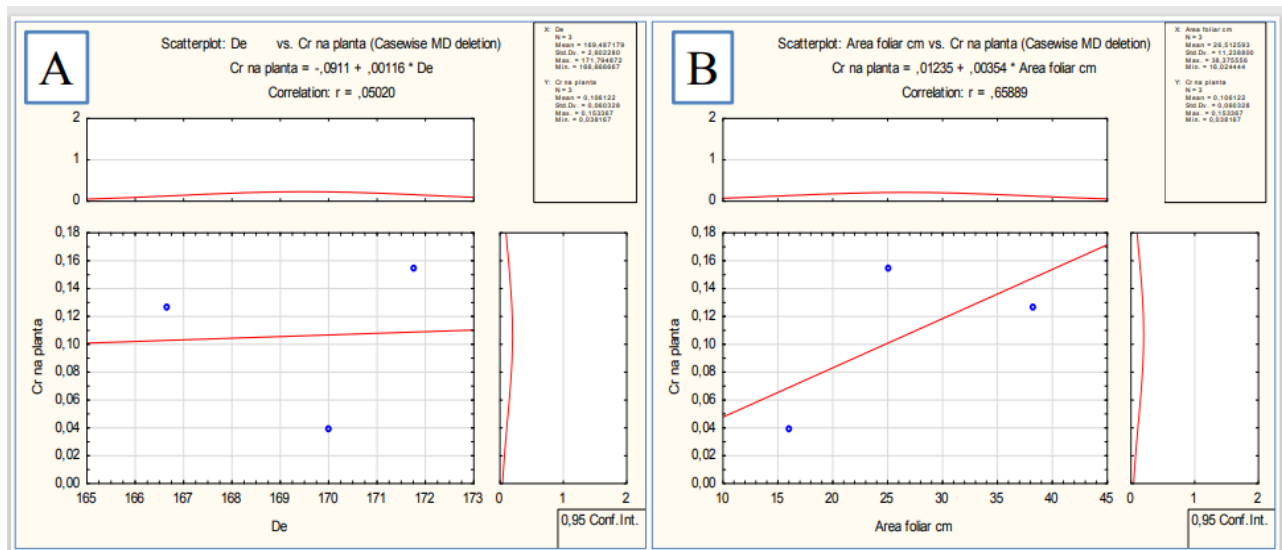


Ilustração 5: Correlações entre o crômio na planta e a A- área foliar, e B- Densidade estomática (DE) observadas no tratamento Cr 10mgKg⁻¹

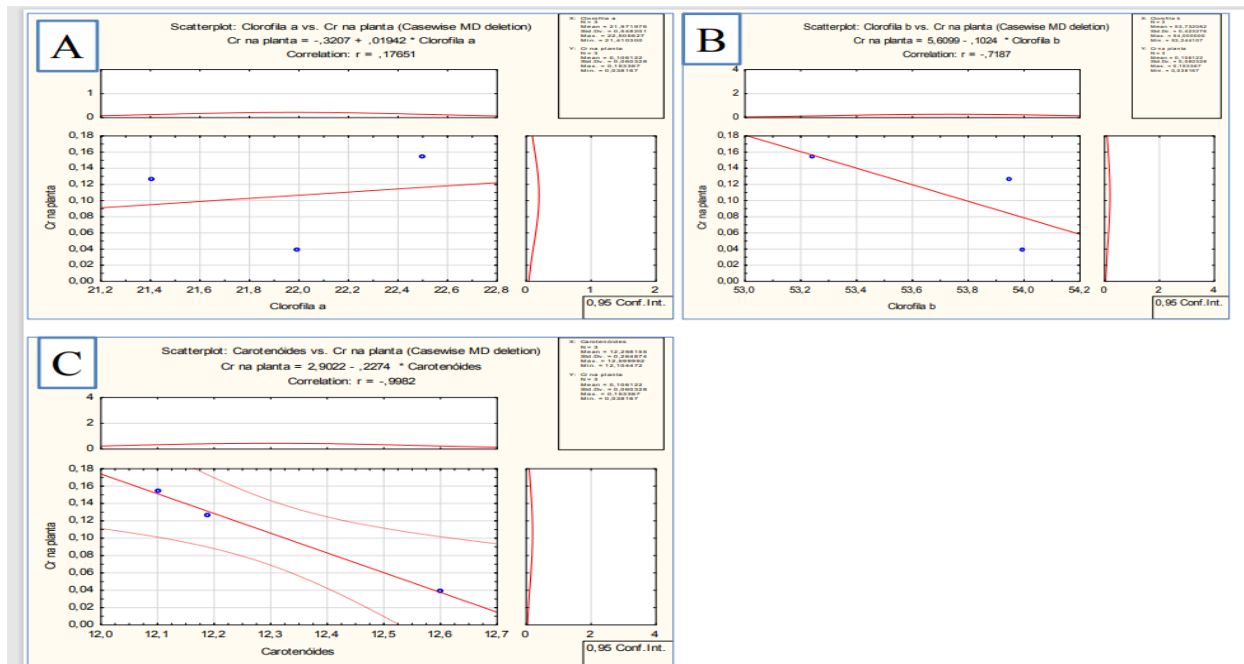


Ilustração 6: Correlação entre a concentração de Cr na planta e as concentrações de A- clorofila a, B- clorofila b, e C- Carotenóides, observadas tratamento Cr 10mgKg⁻¹

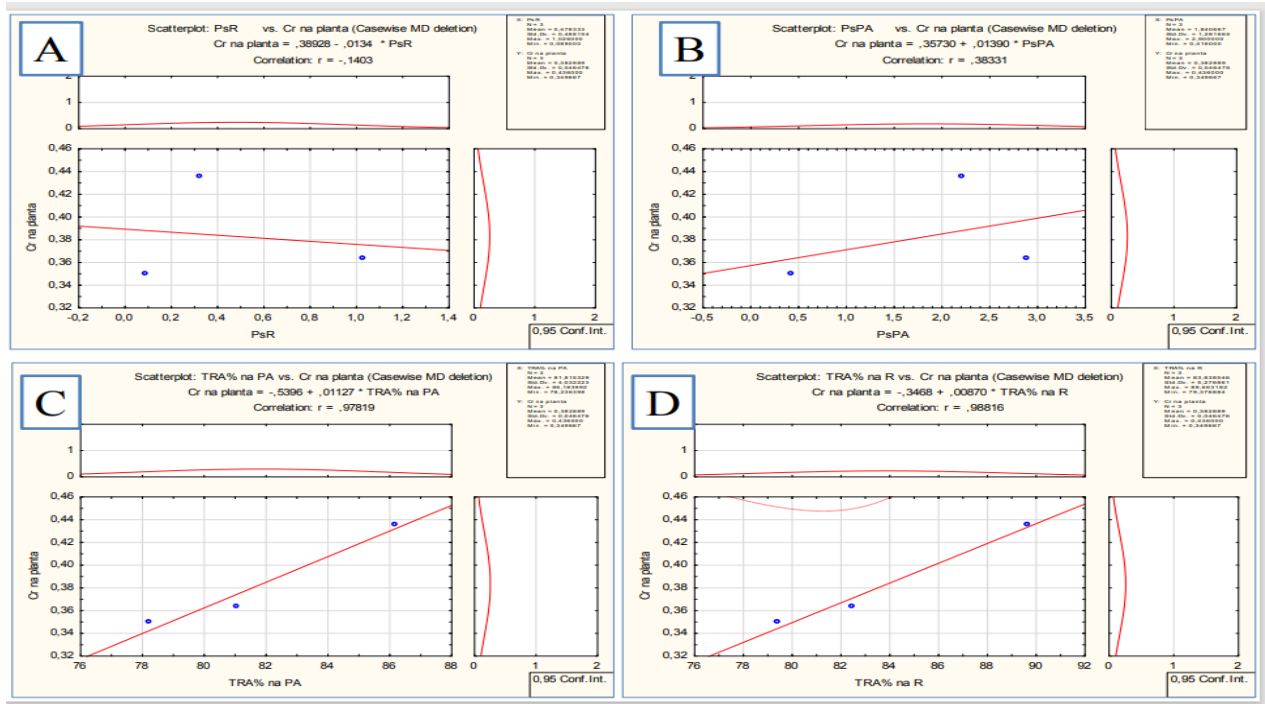


Ilustração 7: Correlações entre o a concentração de crómio na planta e o A- peso seco da raiz(PsR), B-peso seco da parte aérea(PsPA), C- teor relativo de água na raiz(TRA na R) e D-na parte aérea(TRA na PA), observadas no tratamento $Cr\ 30mgKg^{-1}$.

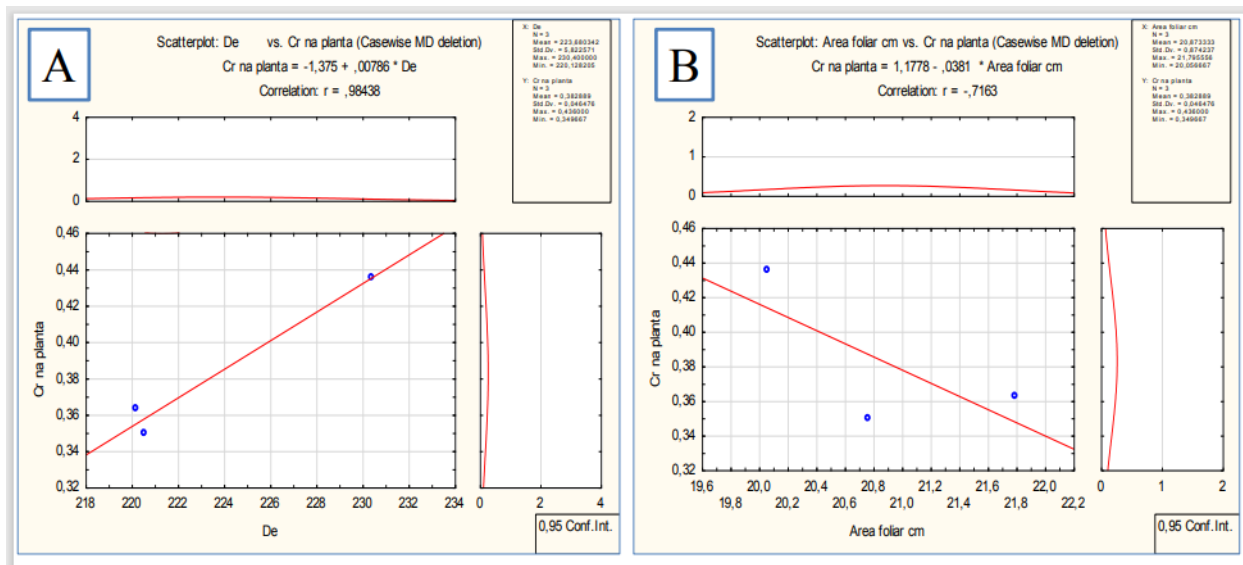


Ilustração 8: Correlações entre o crómio na planta e a A- área foliar, e B- Densidade estomática (DE) observadas no tratamento $Cr\ 30mgKg^{-1}$.

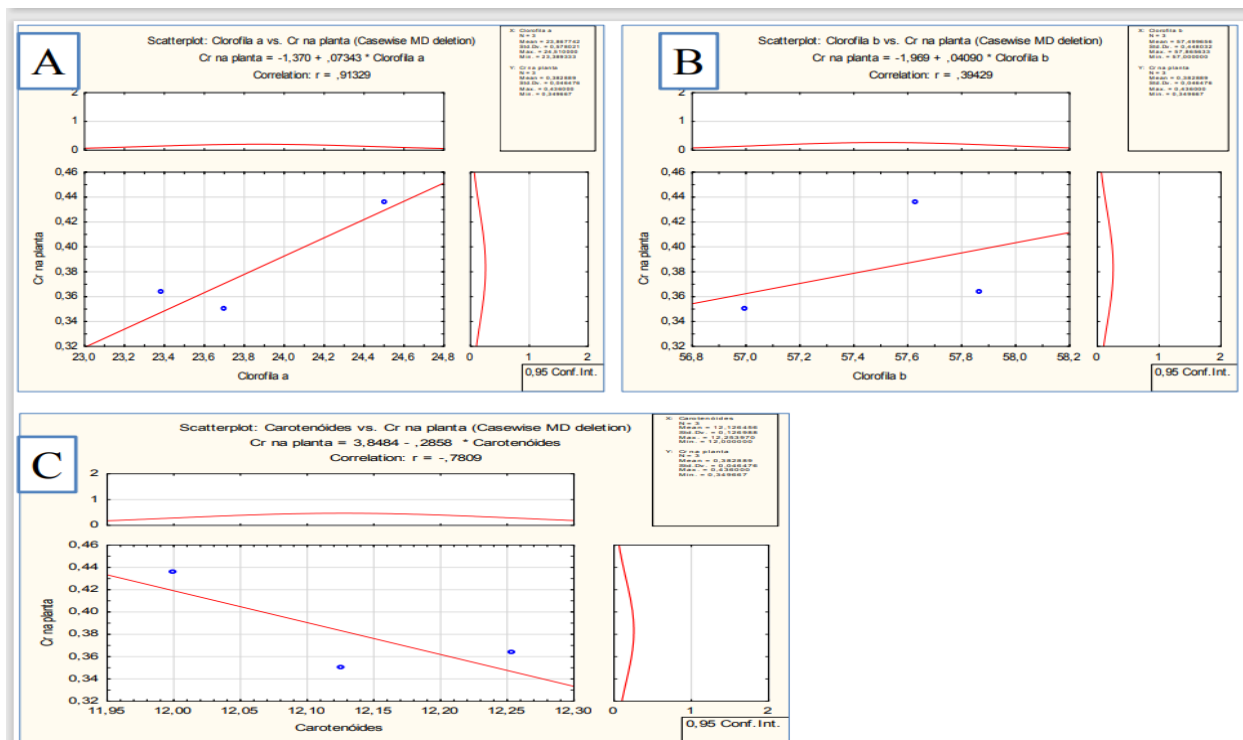


Ilustração 9: Correlação entre a concentração de Cr na planta e as concentrações de A- clorofila a, B- clorofila b, e C- Carotenóides, observadas tratamento Cr 30mgKg⁻¹

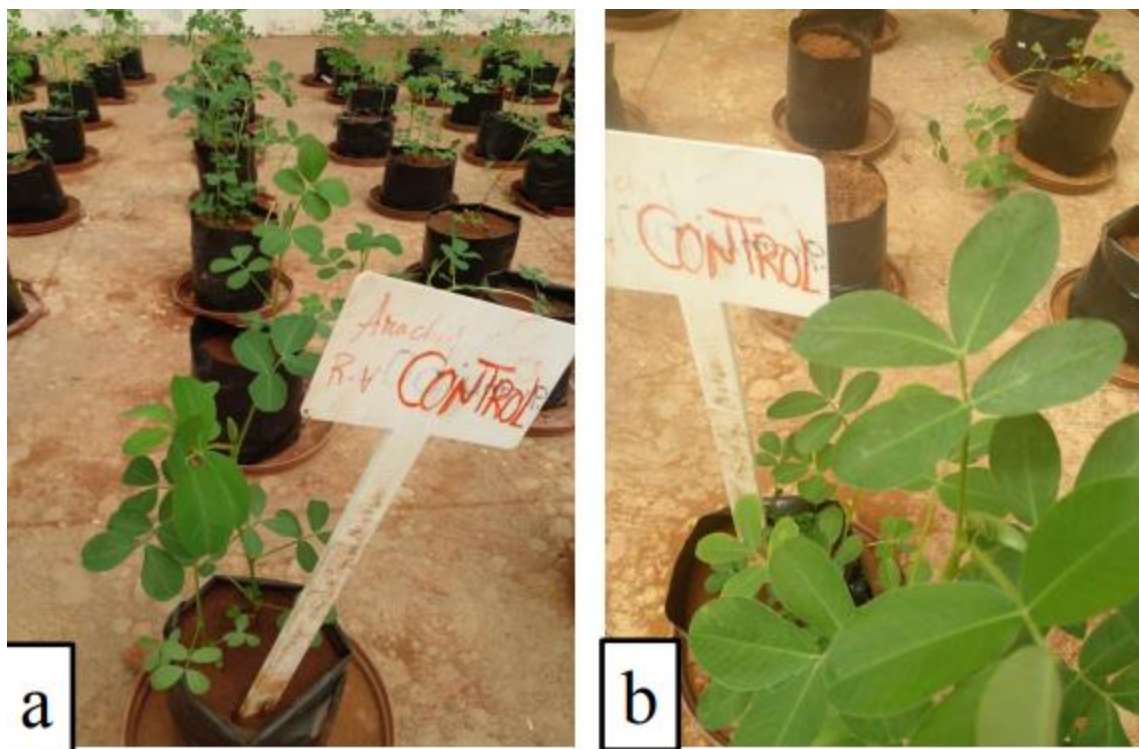


Ilustração 10: Plantas do controlo na véspera da colheita

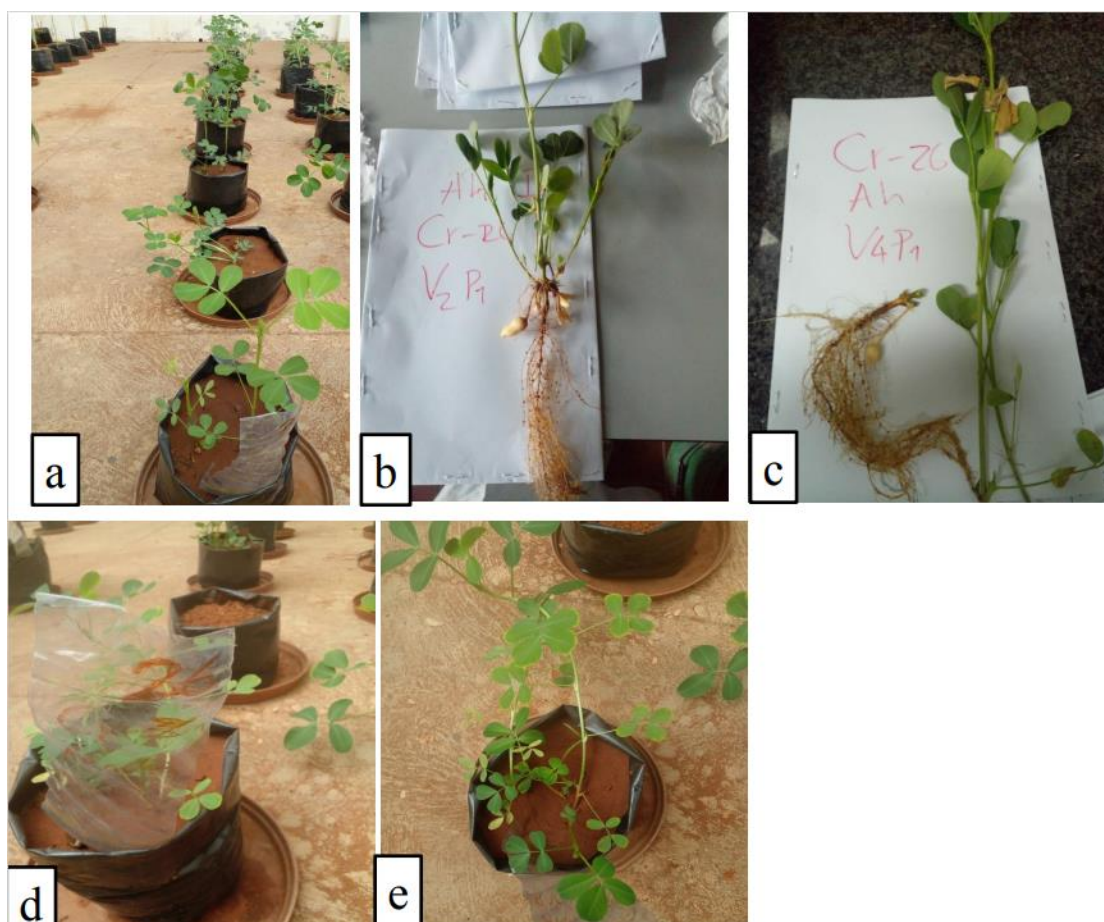


Ilustração 11: Plantas tratadas com crómio a uma concentração de aproximadamente 30mg.Kg⁻¹

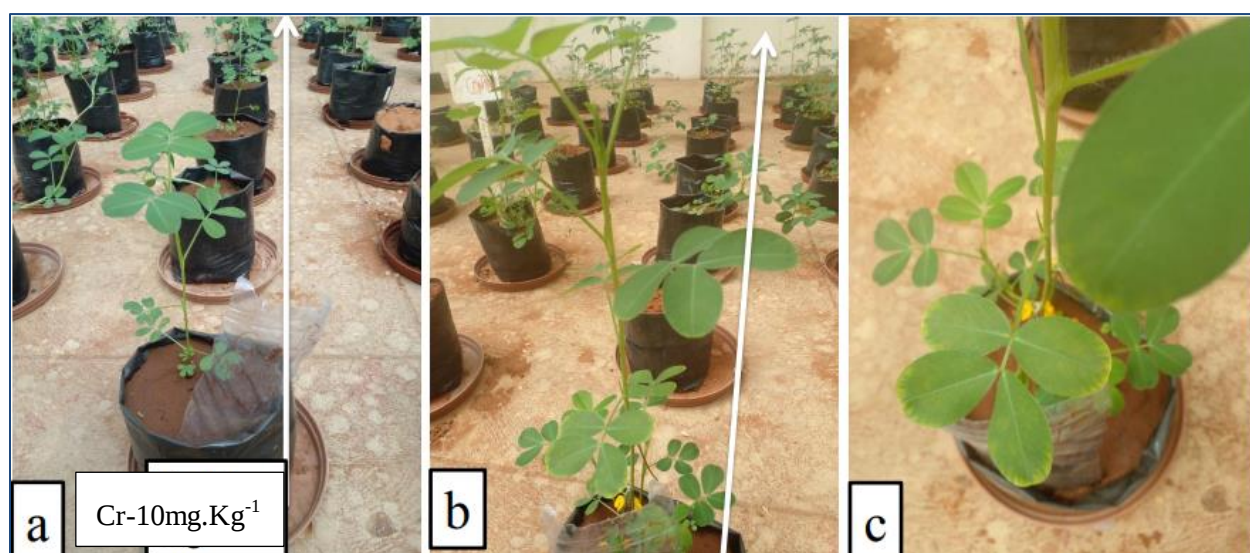


Ilustração 12: Plantas contaminadas por crómio a uma concentração aproximada de 10mg.Kg⁻¹