

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

CICERO APARECIDO FERREIRA ARAÚJO

**RELAÇÃO ENTRE SALINIDADE DO SOLO E FITOEXTRAÇÃO DE
CÁDMIO POR *Atriplex nummularia* Lindl**

RECIFE

2024

Cícero Aparecido Ferreira Araújo
Engenheiro Agrônomo

Relação entre salinidade do solo e fitoextração de cádmio por *Atriplex nummularia* Lindl

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador:
Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Coorientadores:
Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

**Recife
2024**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A663r Araújo, Cicero Aparecido Ferreira
RELAÇÃO ENTRE SALINIDADE DO SOLO E FITOEXTRAÇÃO DE CÁDMIO POR *Atriplex nummularia* Lindl / Cicero Aparecido Ferreira Araújo. - 2024.
91 f. : il.

Orientador: Edivan Rodrigues de Souza.
Coorientador: Clístenes Williams Araújo do Nascimento. Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2024.

1. Fitorremediação. 2. Condutividade elétrica. 3. Metais pesados. 4. Luvissolo. I. Souza, Edivan Rodrigues de, orient. II. Nascimento, Clístenes Williams Araújo do, coorient. III. Título

CDD 631.4

CICERO APARECIDO FERREIRA ARAÚJO

Relação entre salinidade do solo e fitoextração de cádmio por *Atriplex nummularia* Lindl

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2024

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Alexsandro Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará

A Deus.

À minha mãe, Maria Gorette.

Ao meu pai, Divaldo Torquato

Ao meu irmão Clelso Torquato

Às minhas avós, Rainha e Laura (in memoriam)

E a todos que viveram essa fase comigo

AGRADECIMENTOS

Agradecer é reconhecer que eu nunca estive só neste percurso. A gratidão é uma dádiva que eu preservo em meu coração, e até o fim da minha existência serei grato a todas as pessoas citadas abaixo

Primeiramente, agradeço a Deus e aos seres de luz por me darem forças, além do que eu imaginava ter, para seguir firme e forte nessa caminhada difícil e muito solitária.

Aos meus pais, Gorette e Divaldo, fonte inesgotável de amor, por acreditarem nos meus sonhos e me incentivarem a continuar, ao meu irmão Clelso e minha prima Luana Lucena, pela amizade e momentos de partilha durante esses anos.

Ao amigo Sávio, pela parceria durante esses anos, na graduação, mestrado, apartamento e agora no doutorado.

Um reconhecimento especial aos governos do Partido dos Trabalhadores - PT, que, por meio de políticas públicas voltadas para a educação, tornaram possível minha entrada na graduação por meio de cotas. Essa oportunidade foi fundamental para que eu trilhasse os caminhos que culminaram na conclusão do mestrado. Expresso minha gratidão ao PT em nome da ex-presidenta Dilma Rousseff e do Presidente Luiz Inácio Lula da Silva.

Quero expressar minha sincera gratidão ao Dr. Edivan Rodrigues de Souza, meu orientador, pelo dedicado empenho na elaboração desta pesquisa. Ele demonstrou total comprometimento e não mediu esforços para garantir o sucesso deste trabalho. Agradeço a Deus por sua existência e por tê-lo colocado em meu caminho como um orientador excepcional, cuja contribuição foi fundamental para o meu desenvolvimento profissional. Suportou com paciência, depositou confiança em meu potencial e compartilhou preciosos momentos de conhecimento. Agradeço profundamente por tudo.

Também sou muito grato ao meu coorientador Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento por todo empenho na minha formação, como também na disponibilidade em todos os momentos que eu precisei das suas valiosas contribuições, seja na discussão de algum parâmetro, como também na gentileza de ceder a estrutura do seu laboratório para a realização desta pesquisa. Gratidão por tudo!

A minha amiga/irmã Martha Katharinne, por ter sido incrível nesta pesquisa ao meu lado. Por ter sido, além das portas do laboratório, o meu porto seguro, minha confidente, minha AMIGA VERDADEIRA, minha FAMÍLIA, meu ABRIGO, minha BI. Obrigado Martinha, por dividir essa viagem da VIDA comigo! Você foi, é e sempre será lembrada por mim até o meu último suspiro ofegante de vida. Gratidão a Deus pela sua vida e por ter a oportunidade de viver

no mesmo plano terrestre que você. Obrigado por ter segurado na minha mão em todos os momentos desse mestrado. Tudo se tornou mais divertido com você ao meu lado. Não tenho palavras suficientes para descrever tudo que você representa para mim. Agradeço por cada risada, cada lágrima e cada triunfo que compartilhamos nesta jornada inesquecível. Você é muito mais do que possa imaginar. Você é uma grande POTÊNCIA MUNDIAL! Te amo!

A minha amiga Cinthia Carla, pela amizade verdadeira e por todos os momentos felizes e cheios de alegria que compartilhamos juntos. Jamais esquecerei tudo que fez por mim. Amo a nossa sintonia de milhões. Você também foi a minha família nesses dois anos. Você é incrível, amiga! O mundo é pequeno para você. Gratidão por tudo! Te amo!!<3

Ao meu amigo Alfredo Nunes, que foi a primeira pessoa que me acolheu no grupo quando ingressei no mestrado e teve a gentileza de me apresentar o laboratório. Mal sabíamos que a partir desse dia, iríamos compartilhar vários momentos bons e ruins, mas também especiais de muita alegria e muito café. Amigo, obrigado por tudo que fez/faz por mim. Obrigado por toda ajuda em vários momentos desta pesquisa. Você é uma pessoa muito especial e sou muito grato pela sua amizade. Amo tu <3

Aos melhores estagiários do UNIVERSO, Diana Honorato, Allef Rodrigues e Wellington Gonçalves. Vocês foram incríveis em todas as etapas dessa pesquisa. Agradeço especialmente pela amizade construída, provando que no ambiente de trabalho podemos sim construir laços fortes e perenes. E agradeço infinitamente por todo suporte técnico e emocional. Aprendi muito com vocês. Torço muito pelo sucesso de vocês! Amo muito vocês <3

A Steffany Daiana, uma grande inspiração de força e inteligência. Amiga, obrigado pela partilha de bons momentos. Tenho certeza que vamos conseguir todos os nossos objetivos! Obrigado por tudo!

Ao Dr. Lucas Leal, pela amizade construída nesse último ano e por toda ajuda em várias etapas da construção desse trabalho. Você é uma pessoa muito querida e especial. Uma inspiração de ser humano. Obrigado por tudo que fez/faz por mim. Gratidão pelos nossos cafés da tarde de muita ciência, conversas e reflexões. <3

Ao amigo Fabiano Simplício, pela convivência, pela amizade pelas conversas e momentos de descontração nesses dois anos e também por me ajudar quando precisei. Gratidão pela amizade e por tudo. Torço pelo seu sucesso profissional. Você é uma pessoa muito querida e especial

Ao amigo Rafael Luis Bolla, pela amizade e pelos bons momentos no grupo que vivemos. Estamos juntos!

De modo geral, ao Grupo Solo-água-plantas (SAP), pela acolhida e por me darem total apoio na construção desta pesquisa. Este grupo me fez crescer incondicionalmente e por isso sou muito grato a cada membro que nele faz parte e foi citado anteriormente em cada parágrafo acima

Aos amigos do Laboratório de Física do Solo- LaFis, Alisson, Arnaldo, Edilson, Paulo, Talmo e Lua, pela convivência agradável, momentos de descontração e de muita alegria. Tenho um carinho especial por cada um.

Ao Técnico do Laboratório de Física do Solo, Eudes Oliveira, por todo suporte laboratorial, como também pela amizade construída. Gratidão!

A Técnica do Laboratório de Química Ambiental, Dra. Simone Lins, por todo suporte nas análises de determinação dos metais, e pela celeridade na leitura destes para que eu pudesse concluir a redação da dissertação. Agradeço também a Dra. Adriana pelo suporte laboratorial cedido. Gratidão!

A Dra. Cintia Caroline pela ajuda em várias etapas dessa pesquisa em todas vezes que fui ao laboratório de microbiologia do solo, onde tive todo o seu empenho em ajudar. Fora isso, agradeço pela amizade verdadeira que construímos e pela ajuda que você me deu onde gentilmente me cedeu seus materiais para que pudesse estudar para seleção do doutorado. Você é uma pessoa maravilhosa e eu que tenho muito apreço e carinho. Obrigado por tanto! Amo tu!

Aos estimados Dr. Luiz Henrique e Dr. Fernando Bruno, pela ajuda metodológica para a digestão dos metais pesados. Gratidão!

A coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, professora Dra. Giselle Fracetto, pela maestria com que vem coordenando o programa, e por todos os conselhos, acolhida e ensinamentos. Você é incrível!

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE que eu tive o prazer de tanto aprender nesses dois anos, em especial: Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos, Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, Dr. Mario de Andrade Lira Junior, Dra. Caroline Miranda Biondi, Dr. Felipe Fracetto, Dr. Valdomiro Severino de Souza Junior e Dr. Mateus Rosas Ribeiro Filho. Gratidão por tudo que me ensinaram! Vocês são grandes inspirações.

Aos professores Dr. Ygor Jacques e Dra. Caroline Biondi pelas contribuições na escrita do projeto. Obrigado!

A Socorro Santana, nossa querida “Help” “Socorrinha”, Vânia e a secretária do Programa, Isabela, por todo apoio incondicional durante esse período, e pelos vários momentos felizes e leves que vivi com vocês. Gratidão!

A minha grande amiga Verônica Leal, por ter sido intensa, verdadeira e, acima de tudo, estado ao meu lado durante todo o percurso. Amiga, sua amizade é um presente para mim! Sou grato a Deus pela sua vida! Obrigado por tanto e por tudo que fez/faz por mim! Jamais esquecerei todos os nossos momentos juntos em Recife, cheios de amor, alegria, leveza e altooooo papos. Te amooooooooo! <3 <3

As amigas Karol e Giórgia, por tudo que fizeram por mim! Além disso, agradeço pela amizade de longos anos e por tudo que vivemos em Recife, nossos almoços em família, risadas, momentos especiais, cheios de amor e partilha. Obrigado por tudo! Nós vamos dominar esse mundo! Do cariri para o mundo! <3

A minha amiga Raquel Rodrigues, pela amizade verdadeira, pelos momentos de partilha, de choro e também de felicidades! Sou imensamente grato por estar vivendo essa fase com você. Você é uma amiga excepcional que eu quero SEMPRE na minha vida! Te amo

As minhas amigas e meus amigos que conheci em Recife e que tenho um apreço imenso e que amo estar perto e colecionando momentos especiais: Luciana Lucena, Brenna Veríssimo, Daiza Alves, Pablo Acácio, Karina Burity, Luara Gomes, Rayana Jacques, Marília Sousa, Barbara Oliveira, Nara Núbia, Beatriz Torres, Taila Milane, Rafaela Santos, Pamella Sena, Igor Revelles, Laura Santana, Joyse Matos, Gratidão pela acolhida, pelos abraços fraternos e verdadeiros e por todos os dias felizes que compartilhamos juntos. Vocês são inspirações para mim! AMO de paixão<3

Aos vizinhos José, Larissa e Eduarda, por todos os bons momentos de compartilhamos aqui em Recife. Vocês foram os melhores presentes que tive aqui. Agradeço a Deus por tê-los perto de mim e pela nossa sintonia. Amo vocês! <3

Ao meu melhor amigo, Cicero Cordeiro, por toda ajuda durante esse mestrado. Por todas as ligações e por nunca termos soltado a mão do outro, mesmo que estivéssemos distantes. Obrigado por também contribuir com o meu trabalho, com suas valiosas dicas da ABNT e por ensinar sempre. Da faculdade para a VIDA. <3

Ao meu querido e amado companheiro, Felipe Alves, pela partilha de bons momentos no caminhar da vida, pela paciência e resiliência durante esses anos de relacionamento “EAD” e por me dar forças em todos os sentidos. Você é a minha inspiração de ser humano. Te amo muito!

A minha grande amiga Itamara Meneses, pela amizade verdadeira e por estar ao meu lado em momentos ruins (quando estive com pneumonia) e bons (vários momentos). Amiga, amo você e sou grato por tanto e por tudo que fez e faz por mim.

E por último e não menos importante, gostaria de dar uma de **ANITTA** e agradecer a mim. Agradeço a mim mesmo por todas as experiências vivenciadas durante as disciplinas, a condução do experimento e a redação desta dissertação. Neste momento, reconheço que a vida continua e nunca cessará para esse momento. Expresso gratidão à minha coragem, determinação, resiliência, inteligência e por jamais ter desistido dos meus sonhos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*Renda-se, como eu me rendi.
Mergulhe no que você não conhece como eu mergulhei.
Não se preocupe em entender, viver ultrapassa qualquer entendimento.*
Clarice Lispector

Relação entre salinidade do solo e fitoextração de cádmio por *Atriplex nummularia* Lindl

RESUMO

A fitoextração pode ser uma técnica de remediação eficiente para solos contaminados por metais pesados e sais, incluindo situações onde esses estressores ocorrem juntos. A halófita *Atriplex nummularia* tem sido utilizada em programas de manejo de solos afetados por sais e tem sido sugerida também tolerar metais pesados. Entretanto, a capacidade de extração de metais pesados por *Atriplex* ainda é desconhecido. Nesse sentido, essa pesquisa tem como objetivo avaliar a tolerância de *A. nummularia* a cádmio (Cd), bem como a influência da salinidade no processo de fitoextração. Para isso, foi conduzido um experimento e avaliado o efeito da salinidade utilizando dois Luvisolos com ausência ou presença de caráter salino e seis concentrações de Cd (0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg⁻¹). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em arranjo fatorial 2 (ausência e presença de salinidade) x 6 (doses de Cd), com quatro repetições. Foram avaliados a biometria (altura, biomassa fresca e seca da parte aérea e raízes) teores de Cd na parte aérea (folha+caule) e nas raízes, fator de translocação de Cd, teores de Na⁺ e Cl⁻ na parte aérea, trocas gasosas foliares (fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração, eficiência do uso da água e eficiência intrínseca do uso da água), potencial hídrico foliar, potencial osmótico, potencial de pressão, ajustamento osmótico, teor relativo de água, suculência foliar, fluorescência da clorofila *a* e pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*,*b* e carotenoides). As plantas cultivadas em solo salino apresentaram valores menores de potencial hídrico e osmótico, como também maiores valores de ajustamento osmótico em comparação com as cultivadas em solo não salino. A biomassa seca da parte aérea não foi afetada pelas doses de Cd em solo não salino. Para o solo salino as biomassas relativas em relação a dose controle foram de 75, 57, 45, 39 e 40% para 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg⁻¹ de Cd respectivamente. Entretanto, a biomassa da *Atriplex* até a dose de 30 mg kg⁻¹ de Cd foi maior em solo salino, indicando possivelmente um efeito aditivo dos estresses salino e por dose de Cd > 30 mg kg⁻¹. Quanto as variáveis fisiológicas, não foi observado efeito do Cd para o potencial hídrico foliar, indicando que o turgor não foi o responsável por eventuais reduções de rendimentos. Entretanto, houve reduções da fotossíntese líquida, condutância estomática e na transpiração com o aumento das doses de cádmio. De todo modo, a eficiência do uso da água (EUA) foi maior sob condição de salinidade. Os teores médios de Cd na parte aérea de *Atriplex* foram de 49 e 25 mg kg⁻¹ para o solo salino e não-salino respectivamente, indicando a influência positiva da salinidade no potencial de acumulação de Cd e também o efeito da salinidade em diminuir a capacidade da planta de evitar a absorção ou translocação. A salinidade do solo otimizou o fator de translocação do Cd. Os resultados dessa pesquisa confirmam o efeito potencializador da salinidade no processo de acumulação de Cd pela *A. nummularia* e que a salinidade do solo, bem como a capacidade natural de tolerância ao Cd da *Atriplex*. Em função da falta de dados fisiológicos que associem salinidade e metal pesado, essa pesquisa será de grande relevância para trabalhos de fitoextração de Cd, em condições de salinidade ou não.

Palavras-chave: Fitorremediação. Condutividade elétrica. Metais pesados. Luvisolo

Relationship between soil salinity and cadmium phytoextraction by *Atriplex nummularia* Lindl.

ABSTRACT

Phytoextraction can be an efficient remediation technique for soils contaminated with heavy metals and salts, including situations where these stressors occur together. The halophyte *Atriplex nummularia* has been used in soil management programs affected by salts and has also been suggested to tolerate heavy metals. However, the capacity of *Atriplex* to extract heavy metals is still unknown. In this regard, this research aims to evaluate the tolerance of *A. nummularia* to cadmium (Cd), as well as the influence of salinity on the phytoextraction process. For this purpose, an experiment was conducted to assess the effect of salinity using two Luvisols with absence or presence of saline character and six concentrations of Cd (0, 10, 20, 30, 40, and 50 mg kg⁻¹). The experimental design was a randomized complete block design in a 2 (absence and presence of salinity) x 6 (Cd doses) factorial arrangement, with four replications. Biometrics (height, fresh and dry biomass of shoots and roots), Cd content in shoots (leaves+stem) and roots, Cd translocation factor, Na⁺ and Cl⁻ content in shoots, leaf gas exchange parameters (net photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, water use efficiency, and intrinsic water use efficiency), leaf water potential, osmotic potential, pressure potential, osmotic adjustment, relative water content, leaf succulence, chlorophyll a fluorescence, and photosynthetic pigments (chlorophyll a, b, and carotenoids) were evaluated. Plants grown in saline soil showed lower values of water and osmotic potential, as well as higher values of osmotic adjustment compared to those grown in non-saline soil. Shoot dry biomass was not affected by Cd doses in non-saline soil. For saline soil, the relative biomasses compared to the control dose were 75, 57, 45, 39, and 40% for 10, 20, 30, 40, and 50 mg kg⁻¹ of Cd, respectively. However, *Atriplex* biomass up to the dose of 30 mg kg⁻¹ of Cd was higher in saline soil, possibly indicating an additive effect of saline and Cd stress > 30 mg kg⁻¹. Regarding physiological variables, no effect of Cd on leaf water potential was observed, indicating that turgor was not responsible for any yield reductions. However, there were reductions in net photosynthesis, stomatal conductance, and transpiration with increasing Cd doses. Nevertheless, water use efficiency (WUE) was higher under salinity conditions. The average Cd contents in *Atriplex* shoots were 49 and 25 mg kg⁻¹ for saline and non-saline soil, respectively, indicating the positive influence of salinity on the potential accumulation of Cd and also the effect of salinity in reducing the plant's capacity to avoid absorption or translocation. Soil salinity optimized the Cd translocation factor. The results of this research confirm the potentiating effect of salinity on Cd accumulation by *A. nummularia* and the salinity of the soil, as well as the natural capacity of Cd tolerance of *Atriplex*. Due to the lack of physiological data associating salinity and heavy metal, this research will be of great relevance for Cd phytoextraction studies, under saline or non-saline conditions.

Keywords: Phytoremediation. Electric conductivity. Heavy metals. Luvisoil.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Localização do município de Belém do São Francisco, Estado de Pernambuco... | 31 |
| Figura 2 – Biomassa fresca da parte aérea (BMF _{PA}) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio | 39 |
| Figura 3 — Biomassa seca da parte aérea (BMS _{PA}) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na ausência e na presença de salinidade | 40 |
| Figura 4 — Biomassa seca da raiz (BMS _R) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na ausência e na presença de salinidade. | 41 |
| Figura 5 — Biomassa seca da raiz (BMS _R) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio | 42 |
| Figura 6 — Altura das plantas de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de Cd na presença e ausência de salinidade..... | 43 |
| Figura 7 — Altura das plantas de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de Cádmio | 44 |
| Figura 8 — Potencial Hídrico foliar (Ψ_w) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 45 |
| Figura 9 — Potencial osmótico foliar (Ψ_o) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 46 |
| Figura 10 — Potencial de pressão (Ψ_p) de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 48 |
| Figura 11 —Ajustamento osmótico (AO) de folhas de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 49 |
| Figura 12 —Teor Relativo de Água (TRA) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 50 |
| Figura 13 —Teor Relativo de Água (TRA) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio | 51 |
| Figura 14 — Suculência foliar (SF) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 52 |
| Figura 15 — Suculência foliar (SF) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio | 53 |
| Figura 16 -- A-Fotossíntese líquida(A); B - Condutância estomática(gs) e C- Transpiração (E)de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 --Eficiência do Uso da Água (EUA) da <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio..... | 56 |
| Figura 18 -- Eficiência Intrínseca do Uso da Água (EiUA) da <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade..... | 57 |
| Figura 19 —Teor de carotenoides em folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio..... | 59 |
| Figura 20 — Fluorescência inicial (F0) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio..... | 60 |
| Figura 21 — Fluorescência inicial (F0) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 61 |
| Figura 22 — Fluorescência máxima (Fm) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 62 |
| Figura 23 — Fluorescência variável (Fv) de folhas <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade | 63 |
| Figura 24 — Teor de potássio(K ⁺) da parte aérea da <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade..... | 65 |
| Figura 25 — Teor de sódio (Na ⁺) e cloro (Cl ⁻) da parte aérea da <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade..... | 66 |
| Figura 26 — Teor de cádmio (Cd) da parte aérea da <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade..... | 68 |
| Figura 27 —Teor de cádmio (Cd) da parte aérea da <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio..... | 69 |
| Figura 28 — Teor de cádmio (Cd) na raiz de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade..... | 70 |
| Figura 29 — Fator de translocação de Cd de <i>Atriplex nummularia</i> cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade..... | 72 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Caracterização físico-química dos solos utilizados nos experimentos | 28 |
|---|----|

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IPA - Instituto Agronômico de Pernambuco

TRA – Teor Relativo de Água

SF – Suculência Foliar

AO – Ajustamento Osmótico

CE – Condutividade Elétrica

A – Taxa de Assimilação Líquida de CO₂

gs – Condutância Estomática

E – Transpiração

EUA – Eficiência do Uso de Água

EUiA- Eficiência Intrínseca do Uso de Água

Ψ_w – Potencial hídrico

Ψ_o – Potencial osmótico

Ψ_p – Potencial de pressão

Ψ_{o100} – Potencial Osmótico a Completo Turgor

BMF - Biomassa Fresca

BMT - Biomassa Túrgida

EROs - Espécies Reativas De Oxigênio

LISTA DE SÍMBOLOS

K- Graus Kelvin

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 Hipóteses..... | 21 |
| 1.2 Objetivos..... | 21 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 21 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 21 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1 Cádmio (Cd)..... | 22 |
| 2.2 Salinidade..... | 23 |
| 2.3 Fitoextração de solos afetados por metais | 24 |
| 2.4 Plantas halófitas fitoextratoras e mecanismos adotados | 24 |
| 2.5 <i>Atriplex nummularia</i> Lindl | 26 |
| 2.6 Salinidade e metais pesados no solo e na planta..... | 27 |
| 2.7 Mecanismos fisiológicos de tolerância a estresses por metais pesados..... | 29 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 Localização | 31 |
| 3.2 Obtenção das mudas de <i>Atriplex nummularia</i> e condução do experimento | 32 |
| 3.3 Incubação das doses de cádmio | 33 |
| 3.4 Delineamento experimental e tratamentos | 33 |
| 3.5 Variáveis analisadas | 33 |
| 3.5.1 Avaliações biométricas..... | 33 |
| 3.6 Relações hídricas..... | 34 |
| 3.6.1 Potencial Hídrico foliar (Ψ_w)..... | 34 |
| 3.6.2 Potencial osmótico foliar (Ψ_o) | 34 |
| 3.6.3 Potencial de pressão foliar (Ψ_p) | 34 |
| 3.6.4 Potencial osmótico a pleno turgor | 35 |
| 3.6.5 Cálculo do ajuste osmótico..... | 35 |
| 3.6.6 Teor Relativo de Água (TRA)..... | 35 |
| 3.6.7 Suculência Foliar(SF) | 36 |
| 3.7 Performance Fotossintética..... | 36 |
| 3.7.1 Trocas Gasosas foliares | 36 |
| 3.7.2 Fluorescência da Clorofila a | 37 |
| 3.7.3 Pigmentos fotossintéticos | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.8 | Determinação do cloreto, sódio, potássio e cádmio | 37 |
| 3.8.1 | Fator de translocação (FT) | 38 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 39 |
| 4.1 | Biometria | 39 |
| 4.1.1 | Biomassa fresca da parte aérea (BMF _{PA}) | 39 |
| 4.1.2 | Biomassa seca da parte aérea (BMS _{PA})..... | 40 |
| 4.1.3 | Biomassa seca da raiz (BMS _R)..... | 41 |
| 4.1.4 | Altura das plantas | 42 |
| 4.2 | Relações hídricas | 44 |
| 4.2.1 | Potencial hídrico foliar (Ψ_w) | 44 |
| 4.2.2 | Potencial Osmótico foliar (Ψ_o) | 46 |
| 4.2.3 | Potencial de Pressão foliar (Ψ_p)..... | 47 |
| 4.2.4 | Ajustamento osmótico (AO) | 48 |
| 4.2.5 | Teor Relativo de Água (TRA)..... | 49 |
| 4.2.6 | Suculência foliar (SF) | 51 |
| 4.3 | Performance fotossintética | 54 |
| 4.3.1 | Trocas gasosas foliares..... | 54 |
| 4.3.2 | Pigmentos fotossintéticos..... | 58 |
| 4.3.3 | Fluorescência da clorofila a | 59 |
| 4.4 | Teores de Sódio (Na ⁺), Cloro (Cl ⁻), Potássio (K ⁺) e Cádmio (Cd) na Parte Aérea e Raízes | |
| | 64 | |
| 4.4.1 | Teores de Sódio (Na ⁺), Cloro (Cl ⁻), Potássio (K ⁺) | 64 |
| 4.4.2 | Teor de cádmio..... | 67 |
| 4.4.3 | Fator de Translocação | 71 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 74 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

1 INTRODUÇÃO

O estresse abiótico em plantas pode ser definido como qualquer condição ambiental que impeça a planta de alcançar seu potencial genético pleno. Fatores como temperaturas extremas, déficit hídrico, salinidade do solo, presença de metais pesados e radiação ultravioleta são exemplos de estresses abióticos que desafiam a capacidade adaptativa das plantas.

Essas condições adversas desencadeiam respostas fisiológicas, bioquímicas e moleculares nas plantas, visando minimizar os danos causados pelos estresses. Mecanismos de defesa, como a ativação de enzimas antioxidantes e a acumulação de compostos osmoprotetores, são acionados para preservar a integridade celular e manter o equilíbrio osmótico. Além disso, algumas plantas desenvolveram estratégias específicas para tolerar condições extremas, como a formação de cutículas espessas em resposta à seca ou a ativação de genes envolvidos na detoxificação de metais em solos contaminados. Compreender e mitigar o estresse abiótico em plantas é fundamental não apenas para a agricultura e a produção de alimentos, mas também para a conservação da biodiversidade e a sustentabilidade dos ecossistemas.

A recuperação de áreas contaminadas pelas atividades antrópicas feita por abordagem convencional possui um custo econômico e ambiental muito elevado, e muitas vezes torna-se realizar a remediação em larga escala. Partindo disso, surgem as novas tecnologias com o objetivo de recuperar as áreas contaminadas com o menor custo e impacto ambiental possível. Dentre essas tecnologias, a fitorremediação surge como alternativa ambientalmente correta e promissora na recuperação dos solos poluídos por metais. A técnica de fitorremediação consiste no uso de plantas para remoção de poluentes do ambiente a fim de torná-los menos nocivos. Dentre os principais mecanismos, a fitoextração, onde as plantas absorvem os contaminantes e acumulam na parte aérea, tem sido o mais estudado.

O uso de espécies halófitas como um método de fitoextração natural, econômico e útil em solos salinos tem recebido crescente atenção da pesquisa. As plantas halófitas, como a *Atriplex nummulária*, são classificadas como plantas que podem tolerar altas concentrações de íons, principalmente de Na^+ e Cl^- em solos afetados por sais. Recentemente, plantas com capacidade de secreção de sal do solo têm sido testadas para remoção de metais pesados como Cd, Pb, Cu e Zn dos solos (LU *et al.*, 2021).

A *A. nummularia* tem sido estudada no contexto da tolerância à salinidade do solo, principalmente pelo seu crescimento e produção de biomassa que são estimulados em concentrações entre 150 a 200 mmol L^{-1} de NaCl (PARVEZ *et al.*, 2020). Considerando o seu

bom desempenho na fitoextração de sais e os relatos de sua tolerância a metais pesados, há necessidade de avaliar o desempenho dessa espécie na fitoextração desses elementos.

Estes contaminantes podem ser encontrados de forma natural ou serem gerados por atividades humanas, como agricultura, mineração ou indústria. Entre os principais estão os metais pesados como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e metaloides. Especificamente, o cádmio é reconhecido como um dos metais mais prejudiciais para as plantas devido à sua alta solubilidade em água, mobilidade relativa e longa meia-vida biológica (WANG et al., 2014).

Nesta pesquisa, será examinado a influência da salinidade do solo na fitoextração de cádmio pela *Atriplex nummularia*, investigando os mecanismos envolvidos na absorção, translocação e acumulação do metal pela planta.

1.1 Hipóteses

1. A *Atriplex nummularia* acumula maior concentração de Cd em solo salino, podendo ser empregada em programas de fitoextração em ambiente com estresse combinado (salinidade + metal pesado).
2. A salinidade do solo auxilia no desenvolvimento da *A. nummulária*, não afetando as variáveis fisiológicas como relações hídricas e trocas gasosas foliares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial fitoextrator de Cd e as características fisiológicas de *A. nummularia* em solos com ou sem salinidade e submetidos a doses do metal.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Avaliar o crescimento, tolerância e potencial fitoextrator de Cd pela *A. nummularia*;
- II. Quantificar os teores de Na^+ , Cl^- , K^+ na parte aérea (folha+caule) da *A. nummularia*, e de Cd na parte aérea e raízes, bem como calcular o fator de translocação para Cd;
- III. Utilizar indicadores como relações hídricas, trocas gasosas foliares, fluorescência da clorofila e pigmentos fotossintéticos para avaliar a tolerância de *A. nummularia* ao cádmio sob influência de salinidade

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cádmio (Cd)

A contaminação por metais pesados no solo é um risco potencial para a segurança ambiental e a saúde humana (YANG *et al.*, 2021). Os metais pesados estão entre os principais poluentes do solo que limitam a produção agrícola em todo o mundo (NOOR *et al.*, 2022).

Os metais pesados são classificados como metais ou metalóides que possuem uma densidade superior a 5 g cm^{-3} , alguns dos quais são requeridos em baixas concentrações pelas plantas, como por exemplo, molibdênio (Mo), cobre (Cu), níquel (Ni), manganês (Mn), ferro (Fe), boro (B), e zinco (Zn), (PAGE; FELLER, 2015; MADANAN *et al.*, 2021). No entanto, chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), estrôncio (Sr), titânio (Ti), vanádio (V), lantânio (La), tálio (Tl) e cromo (Cr) são poluentes que causam efeitos deletérios nas funções vitais das plantas (EDELSTEIN; BEN-HUR, 2018)

Esses poluentes podem ser encontrados naturalmente ou resultar de atividades humanas, como agricultura, mineração ou indústria (CHOPPALA *et al.*, 2014). Os principais são os metais pesados como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e metaloides (CLEMENS, 2006; SARRY *et al.*, 2006). Especificamente, o cádmio é altamente fitotóxico devido à sua alta solubilidade em água, relativa mobilidade e longa meia-vida biológica (WANG *et al.*, 2014). Não sendo um nutriente essencial para as plantas, sua toxicidade é alta mesmo em concentrações relativamente baixas (REDONDO-GÓMEZ *et al.*, 2010).

Vários estudos demonstraram que o cádmio afeta o metabolismo das plantas de diversas maneiras, incluindo inibição do crescimento (CLEMENS, 2006; VERBRUGGEN *et al.*, 2009; SBARTAI *et al.*, 2012; ZEMANOVÁ *et al.*, 2016), abertura estomática (MESNOUA *et al.*, 2012; ZEMANOVÁ *et al.*, 2016), absorção prejudicada de nutrientes (ZHOU e QIU, 2005; DAL CORSO *et al.*, 2013; HUANG *et al.*, 2017) e consequente desequilíbrio osmótico (SINGH e TEWARI, 2003). Além disso, o cádmio afeta negativamente o processo fotossintético, danificando os fotossistemas I e II (LI *et al.*, 2015; MESNOUA *et al.*, 2016) e inibindo algumas enzimas do ciclo de Calvin (PENDIAS e KABATA-PENDIAS, 2000).

Uma concentração elevada de cádmio também pode aumentar a intensidade respiratória (SBARTAI *et al.*, 2008) e as atividades do ciclo do ácido tricarbóxico (LIPHADZI *et al.*, 2005). Por fim, o cádmio pode induzir a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) nas células vegetais, causando danos oxidativos como peroxidação de lipídios de membrana e carbonilação de proteínas (GILL *et al.*, 2012).

2.2 Salinidade

A salinidade do solo, definida como uma alta concentração de sais solúveis no solo, é um dos maiores desafios globais que afeta a produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental (SHAHID *et al.*, 2018). Em escala global, cerca de 350 milhões de hectares são propensos à desertificação devido à salinidade do solo (ivuskin *et al.*, 2019). O problema é causado por uma variedade de fatores, como manejo inadequado dos solos, especialmente práticas inadequadas de irrigação/drenagem, e mudanças climáticas (SHRIVASTAVA; KUMAR, 2015; MOMIROVIC *et al.*, 2019)

Os impactos negativos que os altos níveis de salinidade podem causar são desequilíbrio na absorção de nutrientes do solo, como íons Na^+ e Cl^- , que eventualmente leva à toxicidade iônica (KHARE; JAIN. 2021), diminuição do potencial osmótico da água, resultando em danos de estresse osmótico às culturas devido à absorção inibida de água pelas raízes (BAZIHIZINA *et al.*, 2012) e a diminuição da taxa de germinação das sementes e do crescimento normal das plântulas devido ao desequilíbrio hormonal e outros processos bioquímicos (YAÑEZ-YAZLLE *et al.*, 2021).

O estresse salino afeta a fotossíntese, absorção e transporte de nutrientes minerais, translocação de assimilados (exportação de carbono), estado hídrico dos tecidos, alongamento celular e divisão celular (GRATTAN; GRIEVE, 1998). Também causa a superprodução de espécies reativas de oxigênio, diminuição das atividades enzimáticas e interrupção dos pigmentos fotossintéticos (NKOMO *et al.*, 2019). O estresse oxidativo também ocorre quando sementes ou plântulas são expostas ao estresse salino, pois o equilíbrio dinâmico de enzimas antioxidantes e espécies reativas de oxigênio pode ser perturbado sob estresse salino (SACHDEV *et al.*, 2021). Isso envolve sérios danos à membrana plasmática, estrutura proteica DNA, RNA e outras organelas funcionais da célula (OKON, 2019). Por causa desses eventos, o estresse salino dá origem a uma perda significativa de rendimento por uma redução no acúmulo de matéria seca (BILALIS *et al.*, 2020). Em resposta à salinidade, as plantas adotaram mecanismos de tolerância nos níveis molecular, fisiológico e morfológico (TÜRKAN; DEMIRAL, 2009; OKON, 2019).

A recuperação de solos afetados por sais não tem sido comum no Brasil (FREIRE *et al.*, 2020), sendo comum que as áreas salinizadas sejam abandonadas. O retorno da vegetação nessas áreas iniciaria um processo de recuperação. A fitorremediação é uma opção adequada e de baixo custo, frequentemente utilizada quando solos ou águas residuais estão contaminados

por metais pesados, mas também pode ser utilizada em solos sódicos ou salino-sódicos (SOUZA *et al.* 2014; MIRANDA *et al.* 2018).

2.3 Fitoextração de solos afetados por metais

A fitorremediação é considerada uma tecnologia ecologicamente correta, barata e energeticamente eficiente em comparação com os métodos tradicionais de remediação química e física (TAUQEER *et al.*, 2016). Consiste no emprego de plantas na descontaminação do solo e sua eficácia depende da capacidade das plantas em absorver, transferir, estabilizar, concentrar e/ou excluir contaminantes (ZALEWSKA; DANOWSKA, 2017; KATAWETEETHAM *et al.*, 2020).

Dentre as técnicas de fitorremediação, a fitoextração é uma técnica de remediação *in situ* que utiliza plantas hiperacumuladoras para extrair metais de solos contaminados (WENZEL, 2008; LI *et al.*, 2018; WAN *et al.*, 2020). Se quantidades suficientes dos elementos-alvo se acumularem nos tecidos vegetais das plantas hiperacumuladoras, a remoção da biomassa atingirá o objetivo de remediação do solo (CHANEY *et al.*, 2007).

Duas abordagens têm sido testadas para atingir esse objetivo: a primeira é a fitoextração natural, na qual plantas hiperacumuladoras com excepcional capacidade natural de acúmulo de metais são usadas para remover metais do solo, e em segundo a fitoextração quimicamente assistida, ou seja, a utilização de plantas cultivadas com alta biomassa induzidas a acumular metais através da aplicação de quelantes no solo. Ambas as abordagens têm vantagens e desvantagens. Uma planta hiperacumuladora de Cd é aquela capaz de acumular concentração no tecido vegetal de mais de 100 mg kg⁻¹ (ANDRADE *et al.*, 2009; NASCIMENTO *et al.*, 2021)

2.4 Plantas halófitas fitoextratoras e mecanismos adotados

As plantas halófitas surgiram como plantas valiosas com vários benefícios econômicos (alimentos, rações e recursos fibrosos), além de possuir potencial para fitoextração de sais e metais de solos contaminados (MANOUSAKI; KALOGERAKIS, 2011; FREIRE *et al.*, 2020). Crescem em habitats extremos (tanto em condições salinas quanto secas) nos quais a maioria das glicófitas não se desenvolvem (HEIDA, 2014). Elas podem ser usadas em terras marginais como culturas forrageiras e para produzir biomassa para bioenergia com propriedade adicional de fitorremediação do solo (VAN OOSTEN; MAGGIO, 2015, MUJEEB *et al.*, 2020). A tolerância ao metal sob condições salinas pode ser atribuída a mecanismos de conversa cruzada entre a salinidade e o estresse do metal (HAMED *et al.*, 2013). A microbiota associada às raízes

das plantas também pode ajudar na bioabsorção de metais (VACHERON *et al.*, 2013).

Microorganismos com características promotoras de crescimento de plantas, as chamadas rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP), são conhecidas por estimular a absorção de nutrientes pelas plantas, mitigar a toxicidade de metais, imobilizar/mobilizar metais pesados no solo e podem melhorar a saúde das plantas (FERRANI *et al.*, 2021). A resistência de plantas halófitas perenes a metais traço está intimamente relacionada com seu sistema de raízes profundas e biomassa (ANJUM *et al.*, 2014, WANG *et al.*, 2014). As halófitas auxiliam na dissolução de calcitas do solo na rizosfera juntamente com a bioabsorção de metais (GHNAYA *et al.*, 2005).

Algumas das espécies halófitas também são relatadas como tendo esses mecanismos que ajudam na remediação de metais (SRUTHI *et al.*, 2016). Exsudatos radiculares contendo aminoácidos e ácidos orgânicos (fitosideróforos) são úteis na quelatação de metais, o que aumenta a disponibilidade de metais na solução do solo (SRUTHI *et al.*, 2016).

Desta forma, as plantas restringem o acúmulo de íons metálicos nas células por estratégia de prevenção ou exclusão. Estudos sugerem que a tolerância ao metal pesado e a salinidade é parcialmente baseada em mecanismos fisiológicos semelhantes (FITZGERALD *et al.*, 2003, ALMEIDA *et al.*, 2006, REBOREDA; CAÇADOR, 2007, PEREIRA *et al.*, 2009, MARQUES *et al.*, 2011).

Em algumas halófitas, íons metálicos, bem como sais, podem ser excretados da raiz ou através de estruturas foliares especializadas, por exemplo, glândulas de sal e tricomas (LOKHANDE; SUPRASANNA, 2012), embora isso seja alcançado por diferentes canais de transporte.

O mecanismo abrangente subjacente à translocação de metais do solo para planta inclui a fitovolatilização e a fitoextração, ambas requerem a transferência de íons dos metais das raízes para a parte aérea das plantas (RUBIO *et al.*, 2020). A relação entre a quantidade de metais tóxicos movidos das raízes para a parte aérea é definida como o Fator de Translocação (CHEN *et al.*, 2020)

A biodisponibilidade de metais tóxicos para as plantas está relacionada a fatores associados ao solo, como textura (os solos argilosos retêm mais íons tóxicos quando comparados aos solos arenosos), umidade do solo, potencial redox (Eh), capacidade de troca catiônica (CTC) e o pH. A literatura relata que o pH é o fator mais importante para a biodisponibilidade e absorção desses íons pelas raízes (SHAH; DAVEREY, 2020).

No meio extracelular, ainda na rizosfera, os ácidos orgânicos podem ser liberados por microrganismos associados às raízes das plantas (por exemplo, bactérias e fungos) e

desempenham um papel importante no sequestro, absorção, transporte e tolerância à metais. Exemplos de ácidos orgânicos que ajudam a aumentar a biodisponibilidade dos metais são ácido glucônico, ácido tartárico, ácido cítrico, ácido húmico, ácido málico e ácido oxálico (WANG *et al.*, 2017).

Geralmente, os íons tóxicos de metais pesados são armazenados em partes/organelas onde causam menos danos a processos celulares essenciais, por exemplo, em tecidos vegetais como epiderme, tricomas, cutículas e vacúolos. Os vacúolos representam cerca de 60 a 95% do volume das células epidérmicas e parenquimatosas, sendo apontados como o principal local de armazenamento (TAIZ *et al.*, 2015). A deposição de íons tóxicos de metais nos vacúolos de raízes ou brotos pode ser considerada uma estratégia interessante induzida por plantas, uma vez que essa organela possui atividade metabólica limitada (SHAH; DAVEREY, 2020).

Dessa forma, as halófitas, como a *Atriplex nummularia*, exibem tolerância à salinidade, o que pode também se estender à tolerância a metais pesados. Essa capacidade é atribuída aos diversos mecanismos adaptativos contribuindo para sua sobrevivência em condições de estresse abiótico (WANG *et al.*, 2014; NIKALJE; SUPRASANNA, 2018; SURUTI *et al.*, 2017).

2.5 *Atriplex nummularia* Lindl

O gênero *Atriplex* spp, pertencente à família Chenopodiaceae, reúne cerca de 400 espécies distribuídas nas mais diversas regiões áridas e semiáridas do mundo, em especial na Austrália que é seu centro de origem (FRANCIET; LE HOUÉROU, 1971). As plantas halófitas possuem a capacidade de sobreviver em ambientes com elevadas concentrações de sais (BONILLA *et al.*, 2000).

As espécies de *Atriplex* caracterizam-se, em geral, por suportar tanto a aridez quanto a salinidade e produzem forragens ricas em proteína e caroteno. Também apresentam a propriedade de manter abundante fitomassa foliar ativa durante os períodos desfavoráveis do ano, sobretudo na época das secas (OLIVARES, 1983). Por essas questões, o gênero tem sido estudando na capacidade de fitoextrair sais em ambientais salinos sódicos de regiões com baixa pluviosidade e por esta se adaptar e se desenvolver bem nesses ambientes (SOUZA, *et al.*, 2011).

A espécie *Atriplex nummularia* vem sendo muito estudada nos últimos anos em relação a sua capacidade de fitoextrair sais do solo, além de sua alta adaptabilidade a ambientes com alto teor de salinidade e seus altos rendimentos da biomassa seca, indicando o potencial desta halófitas para restauração de solos afetados por sal (SOUZA, *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2014;

MELO *et al.*, 2018). Outros estudos como de Paulino *et al.*, (2020), avaliando a função dos tricomas da *Atriplex* submetidos a salinidade, verificaram que essas estruturas deram uma grande contribuição para parâmetros fisiológicos e bioquímicos, com indicação de enrijecimento da parede celular e manutenção do turgor, além que a presença de tricomas foi capaz de regular os processos estomáticos para que a planta mantenha o desempenho fotossintético.

Em estudo conduzido por Lins *et al.* (2018) investigou o efeito de métodos para determinação do potencial osmótico (Ψ_o) em *Atriplex nummularia*, utilizando técnicas que preservam a estrutura foliar em comparação com métodos destrutivos. Este estudo visou determinar as relações hídricas da espécie sob concentrações crescentes de NaCl. Com base nos resultados desta pesquisa, concluiu-se que, em estudos com espécies que apresentam vesículas acumuladoras de sal na epiderme, como as plantas do gênero *Atriplex*, a construção de curvas Pressão-Volume é mais apropriada do que abordagens destrutivas. Essa abordagem não apenas fornece informações precisas sobre as relações hídricas da planta, mas também contribui para uma compreensão mais abrangente da sua adaptação a ambientes salinos, reforçando seu potencial para a fitoextração de sais do solo.

2.6 Salinidade e metais pesados no solo e na planta.

A poluição se tornou um dos grandes agravantes do meio ambiente em decorrência do grande impacto a longo prazo, em especial de metais pesados que, diferente das substâncias orgânicas, possuem um tempo de residência muito longo no solo (KAHLI *et al.*, 2021). Em muitos casos, vários elementos estão simultaneamente presentes em excesso, levando a um ambiente de estresse complexo. Este é especialmente o caso de metais pesados e metaloides tóxicos. Esses poluentes persistentes podem ocorrer como consequência de processos geológicos, mas também resultam de atividades humanas (CLEMENTE *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019; WEN *et al.*, 2019).

Dentre os metais, o Cd possui as características de possuir elevada solubilidade em água e uma alta meia vida, o que lhe traz uma fitotoxidez e uma maior preocupação em relação aos demais metais (WANG *et al.*, 2014).

Na planta, os danos causados pela exposição do Cd, mesmo que em pequenas concentrações são a inibição do crescimento e da abertura estomática (ZEMANOVÁ *et al.*, 2016; MESNOUA *et al.*, 2016); diminuição na absorção e transporte de nutrientes (HUANG *et al.*, 2017) e aumento das espécies reativas de oxigênio (ROS), causando danos oxidativos (GIL *et al.*, 2012)

Em certas áreas do mundo, o problema da contaminação por metais pesados geralmente acompanha o da salinização, em especial áreas áridas, semiáridas e costeiras impactadas por atividades urbanas, onde a mineração contribui com a liberação de íons metálicos. (KAHLI *et al.*, 2021). Essas regiões são zonas típicas que sofrem com a presença simultânea de salinidade e excesso de metais pesados (LIU *et al.*, 2019). Tem sido relatado que a salinidade aumenta a mobilidade de metais pesados nos solos (DU LAING *et al.*, 2008; ACOSTA *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2013). Os parâmetros do solo que controlam a química de metais pesados e a biodisponibilidade são a mineralogia do solo, teor de matéria orgânica, pH e condutividade elétrica.

Em ambientes salinos ocorre a competição de cátions derivados de sal com metais pesados carregados positivamente para sorção na fase sólida e capacidade de complexação de ânions derivados de sais com metais pesados. As consequências da salinidade na mobilidade de metais pesados estão bem documentadas para o Cd formando facilmente complexos estáveis com ligantes de cloreto ($CdCl_n^{2-n}$) que estão fracamente ligados às partículas do solo (MCLAUGHLIN *et al.*, 1997 ; FILIPOVIĆ *et al.*, 2018). O Cd-clorocomplexo está menos disponível do que o Cd^{2+} livre para absorção pela raiz, mas o Cd pode, no entanto, entrar nas raízes diretamente ou se dissociar do clorocomplexo após atingir os locais de ligação na superfície da raiz (FILIPOVIĆ *et al.*, 2018). O estudo de Acosta *et al.* (2011) demonstrou que o impacto da salinidade na mobilidade do metal pesado varia dependendo do metal pesado considerado e também necessita da salinidade e um aumento na força iônica por qualquer sal tem geralmente menor impacto na mobilização de Zn e Pb do que no Cd. Em alguns casos, a alta salinidade pode até reduzir a mobilidade de metais pesados como consequência de precipitados contendo Zn (bechererita e hordaita) ou contendo Pb (laurionita) (TANDON *et al.*, 2018). BAI *et al.* (2019) demonstraram que a salinidade pode aumentar significativamente a mobilidade do arsênico em solos de zonas úmidas costeiras, mesmo que esse elemento esteja comumente presente no solo em formas aniônicas (arsenato ou arsenito , dependendo do potencial redox do solo). Dentre as técnicas de remediação de solos contaminados *in situ*, a fitoextração se destaca como solução interessante e barata para reduzir a concentração de contaminantes ou seus efeitos tóxicos, ou torná-los inofensivos (HUANG *et al.*, 2017). Porém, grande parte das plantas utilizadas neste processo são glicófitas, que não possuem capacidade de sobreviver em áreas salinas poluídas por metais pesados, ao contrário das halófitas, que são plantas naturalmente adaptadas a esses ambientes hostis, e podem ser as candidatas ideais para fitorremediação (LIANG *et al.*, 2016; NIKALJE; SUPRASANNA, 2018)

Recentemente, os estudos mostraram a alta tolerância de plantas halófitas expostas à

alta concentração de metais pesados, especialmente em ambientes salinos (WANG *et al.*, 2013; MANOUSAKI ;KALOGERAKIS, 2009 ; WALI *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2018 ,KAHLI *et al.*,2021). O ambiente rizosférico dessas plantas possui elevada concentração de NaCl, que contribui com a mobilidade do Cd modificando a especiação do Cd através da formação de complexos de Cd e cloreto. O Cd originário desses complexos pode penetrar diretamente nas raízes e/ou dissociar-se delas, desencadeando sua competição com o sódio nos sítios de adsorção, aumentando assim a atividade e a biodisponibilidade do Cd e causando sua absorção pelas raízes. (LÓPEZ-CHUKEN *et al.*, 2010; FILIPOVIĆ *et al.*, 2018).

2.7 Mecanismos fisiológicos de tolerância a estresses por metais pesados

As plantas desenvolvem mecanismos que as auxiliam a adquirir tolerância ao estresse causado por metais pesados, permitindo-lhes sobreviver em ambientes desafiadores. A resposta a esse estresse é influenciada pelas características intrínsecas da espécie, pelo elemento causador do estresse e pelas condições ambientais específicas em que a planta está inserida (WANG *et al.*, 2013). Os mecanismos destinados a tolerar o estresse de metais pesados abrangem desde a redução da absorção desses metais, o sequestro em vacúolos, a ligação a fitoquelatinas/metalotioneínas até a ativação de antioxidantes (TIWARI; LATA, *et al.*, 2018).

Para resistir aos danos oxidativos, as plantas possuem um sistema eficaz de captura de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), composto por antioxidantes tanto enzimáticos quanto não enzimáticos (SARWAR *et al.*, 2010; CHOPPALA *et al.*, 2014). Enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), guaiacol peroxidase (GPX) e catalase (CAT) desempenham um papel crucial no controle dos níveis de EROs. Algumas espécies podem utilizar a exclusão como mecanismo de desintoxicação, enquanto outras recorrem à excreção para eliminar o excesso de metal de tecidos sensíveis, como observado em *A. halimus*, *A. nummularia*, *A. marina*, *Armeria maritima* e *Tamarix aphylla*. Nessas plantas, as glândulas não apenas excretam íons de sal, mas também liberam outros íons metálicos tóxicos (LOKHANDE e SUPRASANNA, 2012).

Além da excreção de íons tóxicos, os mecanismos intracelulares de desintoxicação adotados pelas plantas incluem o sequestro de íons metálicos por meio da formação de complexos com ácidos orgânicos ou aminoácidos. Essa abordagem representa uma alternativa promissora para a desintoxicação de metais dentro dos tecidos vegetais. A síntese de proteínas específicas do estresse, a acumulação do aminoácido prolina e o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio também são observados em resposta à toxicidade por metais como

Cd, Pb e Cu (SHRUTI; DUBEY, 2010).

Dessa forma, as plantas halófitas, devido à sua tolerância à salinidade, também podem exibir tolerância a metais pesados. Isso se deve aos diversos mecanismos adaptativos presentes nessas espécies, os quais desempenham um papel crucial na sobrevivência diante de estresses abióticos (NIKALJE; SUPRASANNA, 2018).

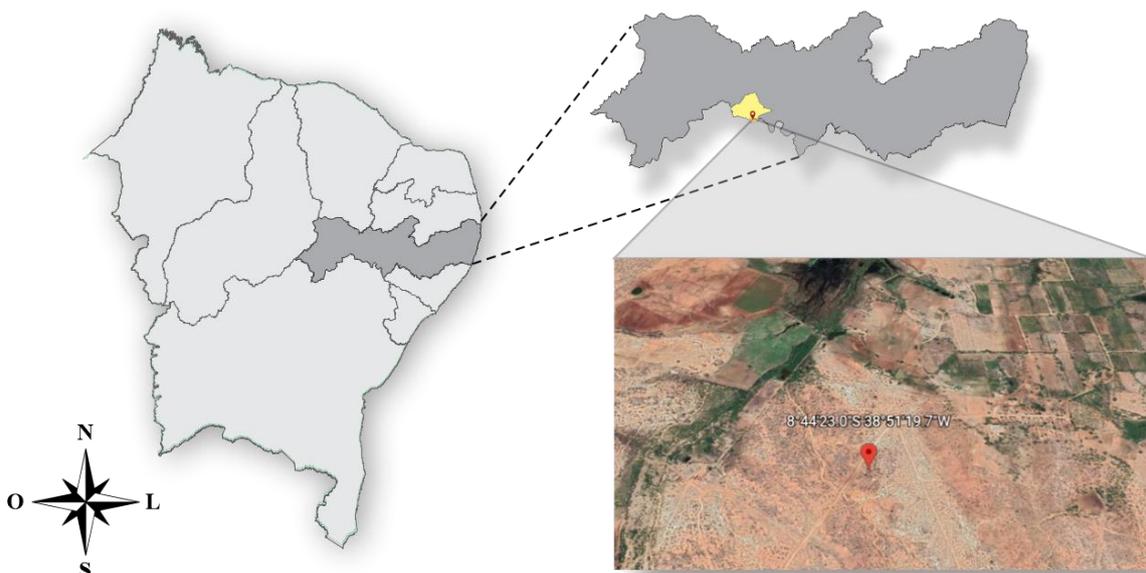
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização

O experimento foi conduzido em ambiente protegido no Departamento de Agronomia, no campus sede da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE (8°01'01'' de latitude sul, 34°56'41'' de longitude oeste e altitude de 4 m. A estrutura era composta lateralmente por tela anti-anfideo e sua cobertura com filme plástico de difusão, sendo suas dimensões internas 11x6m, totalizando 66 m². Foram utilizadas amostras do horizonte B de tipos de solos de mesma ordem e classificados com Luvissole, sendo uma amostra salina e uma amostra não-salina. Os solos foram coletados na região do Sertão Pernambucano, no Perímetro Irrigado Manga de Baixo, localizado no município de Belém do São Francisco, Estado de Pernambuco (Figura 1). O solo foi secado ao ar, destorroado, homogeneizado e passado em peneira com abertura de 4 mm para preenchimento dos vasos. Para caracterização física e química (Tabela 1) foram utilizadas subamostras passadas em malha com abertura de 2 mm

As unidades experimentais foram compostas de um sistema fechado composto por vasos de polietileno preenchidos com 5 kg de solo.

Figura 1 – Localização do município de Belém do São Francisco, Estado de Pernambuco



Fonte: Autor

Tabela 1– Caracterização físico-química dos solos utilizados nos experimentos

| ATRIBUTOS | SOLOS | |
|-----------------------------|----------------------|------------------|
| | LUVISSOLO NÃO SALINO | LUVISSOLO SALINO |
| | <i>Média</i> | <i>Média</i> |
| Ds (g/cm ³) | 1,53 ±0,01 | 1,68 ±0,01 |
| Dp (g/cm ³) | 2,70 ±0,03 | 2,74 ±0,03 |
| Pt (%) | 43,48 ±0,01 | 38,94 ±0,01 |
| AT (g/Kg ⁻¹) | 70,90 ±0,60 | 63,00 ±0,80 |
| AF (g/Kg ⁻¹) | 54,70 ±0,70 | 48,90 ±1,00 |
| AG (g/Kg ⁻¹) | 16,20 ±0,50 | 14,10 ±0,50 |
| Argila(g/Kg ⁻¹) | 506,70 ±1,20 | 462,90 ±0,80 |
| Silte(g/Kg ⁻¹) | 422,40 ±0,01 | 474,10 ±0 |
| ADA (%) | 124,93 ±0,00 | 175,29 ±0 |
| CE (dS m ⁻¹) | 1,89 ±0,12 | 14,23 ±0,61 |
| P (mg/dm ³) | 5 ±0,01 | 2 ±0,01 |
| Ca(cmolc/dm ³) | 6,50 ±0,01 | 15,9 ±00,01 |
| Mg(cmolc/dm ³) | 1,90 ±0,01 | 4,30 ±0,01 |
| Na(cmolc/dm ³) | 0,28 ±0,01 | 1,11 ±0,01 |
| K(cmolc/dm ³) | 0,40 ±0,01 | 0,13 ±0,01 |
| Al(cmolc/dm ³) | 0,00 ±0,01 | 0,00 ±0,01 |
| H(cmolc/dm ³) | 0,49 ±0,01 | 1,07 ±0,01 |
| S(cmolc/dm ³) | 9,1 ±0,01 | 21,4 ±0,01 |
| CTC(cmolc/dm ³) | 9,6 ±0,01 | 22,5 ±0,01 |
| V(%) | 95 ±0,01 | 95 ±0,01 |
| m(%) | 0 ±0,01 | 0 ±0,01 |
| pH (H ₂ O) 1:2,5 | 7,20 ±0,04 | 6,21 ±0,04 |
| GF (%) | 70,42 ±0,00 | 63,03 ±0 |
| Classe textural | Argilo siltosa | Argilo siltosa |

Ds:Densidade do solo, pelo método da proveta; *Dp*:Densidade de partícula, pelo método do balão volumétrico; *PT*: Porosidade total; *AT*: Areia total; *AG*: Areia grossa; *AF*: areia fina; *ADA*: Argila dispersa em água; *CE*:Condutividade elétrica; *pH*: potencial hidrogeniônico; *GF*: Grau de floculação; *CTC*: Capacidade de troca de cátions; *V*(%)= saturação por base; *m*(%)= saturação por alumínio;

3.2 Obtenção das mudas de *Atriplex nummularia* e condução do experimento

As mudas de *A. nummularia* foram obtidas do Instituto Agrônomo de Pernambuco

(IPA), onde foram multiplicadas por estaquia a partir de uma única planta matriz a fim de diminuir a variabilidade genética. As estacas foram cultivadas em sacos de polietileno contendo areia lavada como substrato e irrigadas diariamente com solução nutritiva de Hoagland, Arnon (1950) a ½ de força iônica. Após 60 dias do plantio, as mudas foram transferidas para os vasos onde foram aplicadas as doses de cádmio.

3.3 Incubação das doses de cádmio

Foi feita uma contaminação artificial do solo com a adição de cloreto de cádmio (CdCl_2), em seis concentrações distintas (0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg^{-1} de Cd) ao volume de solo, onde passaram 20 dias incubadas a 80% da capacidade de campo para obter o equilíbrio químico. O experimento foi conduzido por 30 dias após o início da incubação e mantido com umidade equivalente a 80% da capacidade de campo monitorada por meio de pesagem dos vasos.

3.4 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados em arranjo fatorial 2x6 com quatro repetições. Os fatores foram dois solos (salino e não salino), e seis concentrações (0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg^{-1}) de Cd totalizando 48 unidades experimentais. Os dados foram analisados por meio de Análise de variância (ANOVA) teste de comparação de média de Tukey a 5% de probabilidade e análise de regressão.

3.5 Variáveis analisadas

3.5.1 Avaliações biométricas

Foram realizadas medições das alturas das plantas aos 7, 14, 21, 28 dias após o transplante. Completados os 30 dias de experimento, as plantas foram cortadas na altura do solo, separadas em parte aérea (folhas e o caule), e raízes pesados para a obtenção da massa fresca. A raiz foi lavada com água corrente para total remoção do solo. A lavagem foi realizada em peneira com abertura de malha de 4 mm, para evitar perdas de material vegetal. A massa seca foi obtida após a secagem das plantas em estufa a 65°C até atingirem peso constante. As amostras secas foram moídas em moinho de bolas para digestão. Para a discussão dos dados de produção foi utilizada a variável biomassa relativa (BR) por meio da relação entre a produção da dose controle (0 mg kg^{-1} de Cd) e da dose de interesse multiplicado por 100, conforme equação abaixo:

$$BR(\%) = \frac{\text{Biomassa da dose de interesse}}{\text{Biomassa do controle}} * 100 \quad \text{Equação (01)}$$

3.6 Relações hídricas

3.6.1 Potencial Hídrico foliar (Ψ_w)

A determinação do potencial hídrico foliar antes do amanhecer (condição definida como *predawn*), aos 30 dias após o início da aplicação dos tratamentos utilizando ramos e folhas do terço médio com auxílio da câmara de pressão de Scholander (Scholander *et al.*, 1965) Modelo, 1515D, PMS instrument Company

3.6.2 Potencial osmótico foliar (Ψ_o)

Para a determinação do potencial osmótico utilizou-se as folhas oriundas da análise do potencial hídrico. A amostra foi macerada em nitrogênio líquido, a seiva obtida nesse processo foi filtrada em tecido musseline e centrifugada a 10.000 g por 15 min a 4°C (Silveira *et al.*, 2009). O sobrenadante foi separado e uma alíquotada 10 μL foi utilizada para a determinação da osmolalidade do tecido com osmômetro de pressão de vapor (VAPRO, Modelo 5600, Wescor). Os valores obtidos em mmol kg^{-1} foram convertidos em potencial osmótico, por meio da equação de Van't Hoff:

$$\Psi_o = -RTC \quad \text{Equação (02)}$$

Em que:

R= Constante geral dos gases ($0,00831 \text{ kg MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T= Temperatura em Kelvin (K)

C= Concentração do soluto (mol kg^{-1})

3.6.3 Potencial de pressão foliar (Ψ_p)

A estimativa do potencial de pressão foi feita a partir dos valores obtidos nas

determinações de potencial hídrico e potencial osmótico (Silveira *et al.*, 2009). Admitindo-se que o potencial hídrico é igual ao somatório do potencial osmótico e de pressão (Equação 03) possibilitando calcular o potencial de pressão a partir da equação 04.

$$\Psi_w = \Psi_o + \Psi_p \quad \text{Equação (03)}$$

$$\Psi_p = \Psi_w - \Psi_o \quad \text{Equação (04)}$$

3.6.4 Potencial osmótico a pleno turgor

Para obtenção do potencial osmótico a pleno turgor por osmometria foram selecionadas e coletadas folhas do terço médio das plantas onde foram submetidas a saturação ao escuro em placa de petri, a 20 °C por um período de 24h para atingir o pleno turgor.

Passado esse tempo, o excesso de água na folha foi cuidadosamente retirado com o auxílio de papel toalha. Após esse processo, a folha foi macerada em nitrogênio líquido e a seiva extraída foi filtrada e centrifugada a 10.000 g por 15 minutos a 4 °C para leitura da osmolalidade em osmômetro por pressão de vapor pipetando-se uma alíquota de 10 µL do sobrenadante derivado da centrifugação. As leituras obtidas no osmômetro por pressão de vapor em mmol kg⁻¹ e convertidos em MPa partir da equação de Van't Hoff.

3.6.5 Cálculo do ajuste osmótico

De posse dos dados que foram obtidos nas análises anteriores o ajustamento osmótico foi estimado a partir da equação 05 (BLUM,1989).

$$AO_{total} = To_{100Controle} - To_{100Estressadas} \quad \text{Equação (05)}$$

Em que, AO_{total} é o ajustamento osmótico total; $\Psi_o^{100_{controle}}$ é o potencial osmótico das plantas que não foram submetidas ao estresse a pleno turgor; e Ψ_o^{100} o potencial osmótico das plantas submetidas ao estresse a pleno turgor.

3.6.6 Teor Relativo de Água (TRA)

A determinação do teor relativo de água foi realizada em folhas coletadas em ramos próximos aos coletados para determinação do potencial hídrico. Cinco discos foliares de 8 mm de diâmetro foram retirados das folhas coletadas e pesados em balança analítica obtendo-se a

biomassa fresca (BMF) em grama.

Após à pesagem, os discos foram saturados por 24 horas até atingir pleno turgor. Os discos completamente saturados foram pesados obtendo-se o peso da biomassa túrgida (BMT). O peso de biomassa seca (BMS) foi obtido após secagem dos discos a 80°C em estufa de circulação forçada de ar por 48h. A determinação do TRA foi feita conforme proposto por Silveira *et al.* (2003) e calculado a partir da Equação 6.

$$TRA (\%) = \frac{BMF - BMS}{BMT - BMS} \times 100\% \quad \text{Equação (06)}$$

3.6.7 Suculência Foliar (SF)

Os valores de suculência foliar foram obtidos a partir dos dados do teor relativo de água utilizando a relação entre massa fresca, seca e área dos discos foliares, representada pela equação abaixo (Equação 07), propostas por Delf (1912).

$$SF = \frac{(BMF - BMS)}{A} \quad \text{Equação (07)}$$

Em que:

SF = Suculência Foliar (g cm⁻²)

A – Área dos discos foliares (cm²)

3.7 Performance Fotossintética

3.7.1 Trocas Gasosas foliares

As avaliações das trocas gasosas foliares das plantas foram realizadas aos 30 dias após a imposição dos tratamentos com auxílio do Analisador Portátil de Gás Infravermelho (IRGA), modelo LICOR LI-6400XT. Através deste, foram determinadas as variáveis: Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), a transpiração (E), carbono interno (Ci) calculando-se posteriormente a eficiência instantânea do uso da água (EUA - A/E) e a eficiência intrínseca do uso da água (EUA - A/g_s).

As leituras ocorreram entre 8 e 11h, com auxílio de câmara de luz sendo o sistema ajustado para fornecer uma radiação fotossinteticamente ativa (RFA) de 1800 μmol m⁻² s⁻¹,

temperatura do bloco de 27°C, umidade relativa do ar de referência variável na faixa de 50 a 60% e concentração de CO₂ do ar de referência de 400 μmol m²s⁻¹.

3.7.2 *Fluorescência da Clorofila a*

As avaliações da fluorescência da clorofila *a* foram realizadas aos 30 dias após a imposição dos tratamentos sendo determinada através de fluorômetro portátil (Modelo Fluorpen FP 100) em folhas não destacadas, sadias e totalmente expandidas da região do terço médio das plantas. Para avaliação, as folhas amostradas foram submetidas ao escuro por um período de 30 minutos a fim de promover a abertura dos centros de reação do Fotossistema II - FSII e após esse período, a fluorescência inicial (F₀) foi determinada a partir da incidência de um pulso de luz modulada de baixa intensidade (< 0,1 μmol m⁻² s⁻¹). A fluorescência máxima (F_m) foi obtida a partir da incidência de um pulso de luz saturante 0,3 s de duração. E a F_v foi determinada pela diferença entre F_m e F₀. Determinou-se o rendimento quântico pela relação F_v/F_m.

3.7.3 *Pigmentos fotossintéticos*

Aos 30 dias após a imposição dos tratamentos, foram coletadas folhas sadias e completamente expandidas utilizadas na análise de fluorescência com o objeto de obter uma melhor correlação da performance do FSII com os teores de pigmentos. Destas folhas, foram extraídas 10 discos foliares com cerca de 8mm de diâmetro e colocados em frascos contendo 10 mL de álcool 95% e envoltos com papel alumínio. O material foi acondicionado em geladeira por 48 h até ocasião da leitura em fotocolorímetro na faixa de absorvância de 665nm para clorofila a, 649 nm para clorofila b, e 470nm para caratenóides e as concentrações foram calculadas conforme equação 09 descrita por Lichtenthaler, (1987).

3.8 **Determinação do cloreto, sódio, potássio e cádmio**

As amostras foram analisadas quanto ao Na⁺ e o K⁺, na parte aérea (folhas + caule) pelo método da extração em água, onde foram pesados 0,1g do material vegetal em Erlenmeyer de 125mL, adicionando-se 25mL de água destilada, posteriormente foram colocados em mesa agitadora, onde agitou-se a 100 rotações por minuto (rpm), para posterior filtração (Malavolta et al.,1989). Os teores de Na⁺ e K⁺ foram determinados usando espectrofotômetro de chama.

O cloreto foi determinado por extração em água e titulação com nitrato de prata

(Malavolta et al., 1989).

Para digestão de Cd na parte aérea (folha + caule) e raízes, foram utilizadas 0,5 g do material vegetal + 2 mL de H₂O₂ + 8 mL de HNO₃ em tubos de teflon (USEPA, 1996). O conjunto foi submetido a temperatura de 180° durante 10 min em forno micro-ondas e posteriormente, o material foi filtrado e seu volume completado para 25 mL, sendo esta solução armazenada para determinação de Cd, por espectrometria de emissão ótica com plasma (ICP-OES/Optima 7000 Perkin Elmer).

3.8.1 Fator de translocação (FT)

Para o cálculo do Fator de Translocação (FT) (Marchiol *et al.*, 2004) foi utilizado a seguinte equação:

$$FT = \frac{\text{Teor de Cd na parte aérea}}{\text{Teor de Cd na raíz}} \quad \text{Equação (08)}$$

O FT teve por objetivo de avaliar a habilidade da planta em translocar o metal pesado das raízes para as partes aéreas, no qual é um comportamento desejável nos estudos de fitorremediação

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

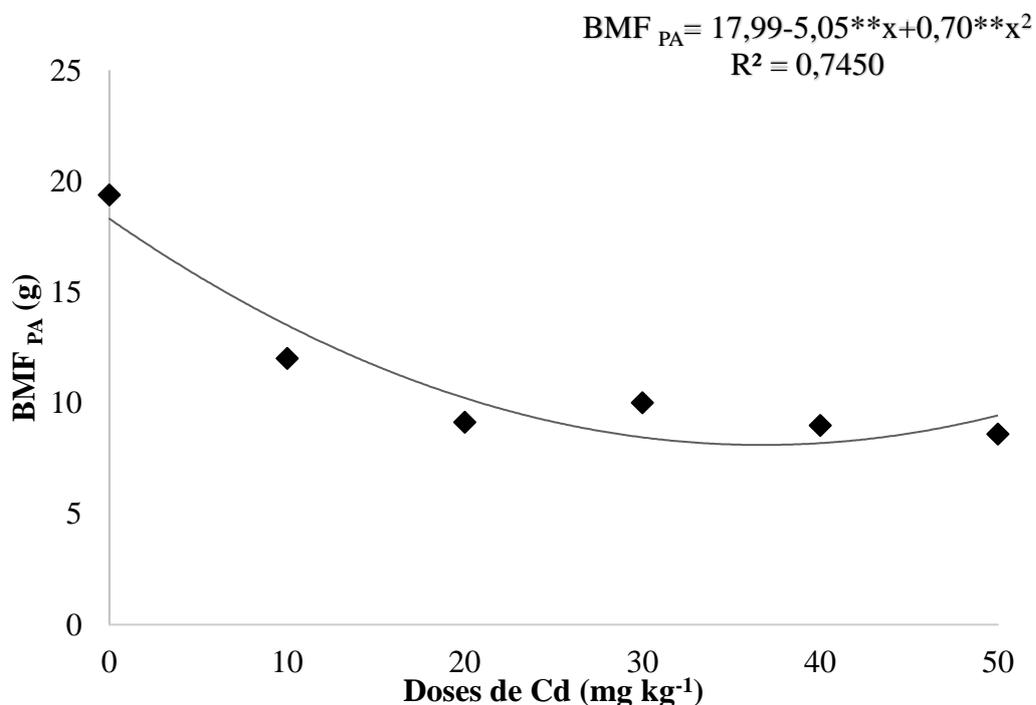
4.1 Biometria

As variáveis biomassa fresca da parte aérea (BMF_{PA}), biomassa seca da raiz (BMS_R) e altura apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$) para o fator doses de cádmio. Para o fator salinidade do solo, houve efeito significativo ($p < 0,05$) para as variáveis BMS_R e altura, conforme evidenciado pelo teste F. Houve efeito da interação para a biomassa seca da parte aérea (BMS_{PA}).

4.1.1 Biomassa fresca da parte aérea (BMF_{PA})

As biomassas relativas para as doses de 10, 20, 30, 40 e 50 $mg\ kg^{-1}$ de Cd foram de 74%, 56%, 46%, 45, e 52%, respectivamente (Figura 2).

Figura 2— Biomassa fresca da parte aérea (BMF_{PA}) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



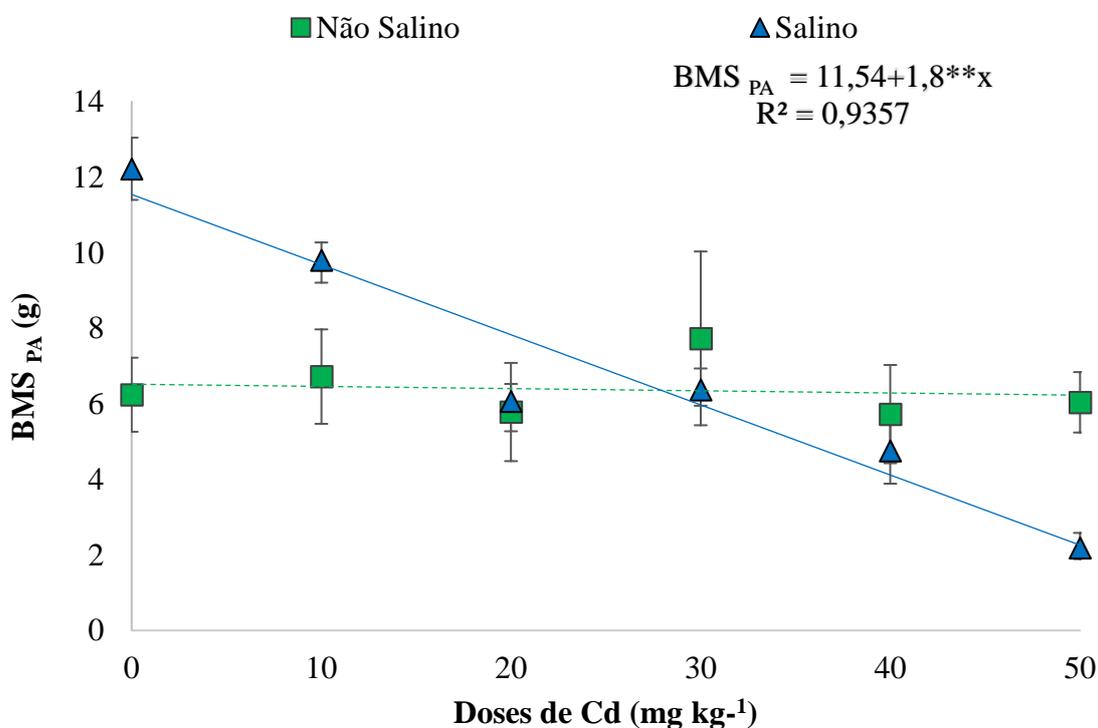
Os resultados deste estudo concordam com os achados de Nedjimi *et al.* (2022), nos quais a aplicação de Cd ($CdCl_2$) resultou em uma redução significativa na biomassa fresca da parte aérea de *A. nummularia*. Nas concentrações mais elevadas de Cd (22 e 34 $mg\ kg^{-1}$),

observou-se um rendimento relativo à dose controle de 68% e 76% na biomassa da parte aérea, evidenciando uma resposta adversa pronunciada a essas concentrações de cádmio. Paralelamente, Sai Kachout *et al.* (2009) revelaram que as biomassas de *Atriplex hortensis* e *Atriplex rosea* foram severamente impactadas pela presença de uma concentração de 45 mg kg^{-1} de Cd em solução nutritiva.

4.1.2 Biomassa seca da parte aérea (BMS_{PA})

Houve uma resposta distinta da biomassa seca da parte aérea em função do fator salinidade do solo (Figura 3). Na salinidade, a planta obteve maior biomassa, especialmente nas doses menores de Cd. Os rendimentos relativos foram de 75%, 57%, 45%, 39% e 40% para 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg^{-1} de Cd respectivamente. Não ocorreu ajuste de regressão para o solo não salino, sugerindo que a planta tolerou as doses de Cd, uma vez que não houve variação na biomassa.

Figura 3 — Biomassa seca da parte aérea (BMS_{PA}) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na ausência e na presença de salinidade. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



A diminuição da biomassa seca da parte aérea observada em *A. nummularia* em função do aumento das doses de Cd, é provavelmente devida à toxicidade do Cd acumulada nos tecidos

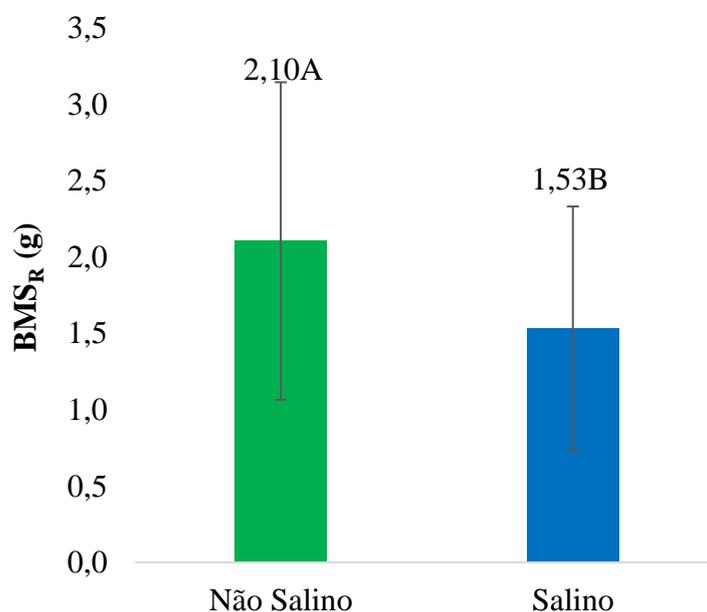
e/ou ao comprometimento da nutrição mineral (HAIDER *et al.*, 2021). No entanto, a redução no crescimento deve-se principalmente à elevada translocação de Cd para a parte aérea (SEREGIN e IVANOV, 2001).

Os resultados indicam uma influência positiva da salinidade do solo, ou seja, um alívio na toxicidade de Cd, até a dose de 30 mg kg⁻¹ (Figura 2). A presença de salinidade exerceu um efeito benéfico nesse intervalo. Como halófitas, é esperado que as espécies de *Atriplex* apresentassem uma resposta positiva à salinidade antes do aparecimento de efeitos prejudiciais causados por condições osmóticas ou de toxicidade (FLOWERS *et al.*, 2015)

4.1.3 Biomassa seca da raiz (BMS_R)

A salinidade no solo foi identificada como um fator determinante na diminuição observada na BMS_R de *A. nummularia*. Em comparação com as plantas cultivadas em solo não salino, aquelas submetidas à salinidade apresentaram diminuição de aproximadamente 28% na biomassa seca da raiz (Figura 4).

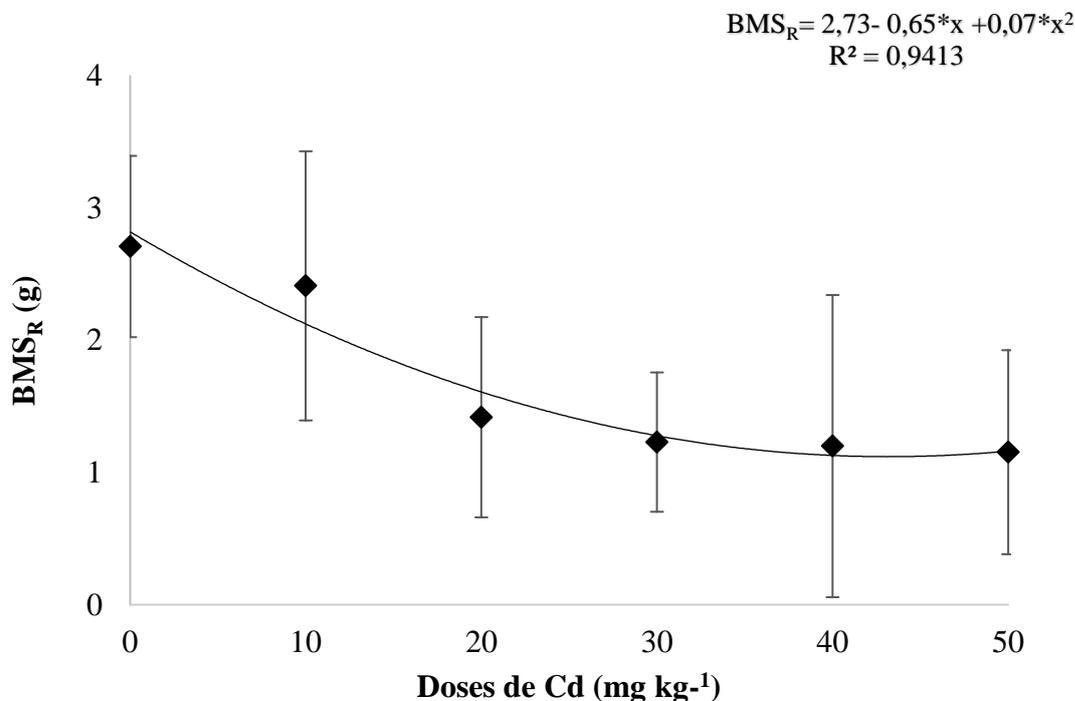
Figura 4 — Biomassa seca da raiz (BMS_R) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na ausência e na presença de salinidade.



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão.

Em relação as doses, as plantas tiveram BR de 85%, 69%, 52%, 36% e 20% para 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg⁻¹ de Cd respectivamente, comparadas às plantas controle (Figura 5).

Figura 5 — Biomassa seca da raiz (BMS_R) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



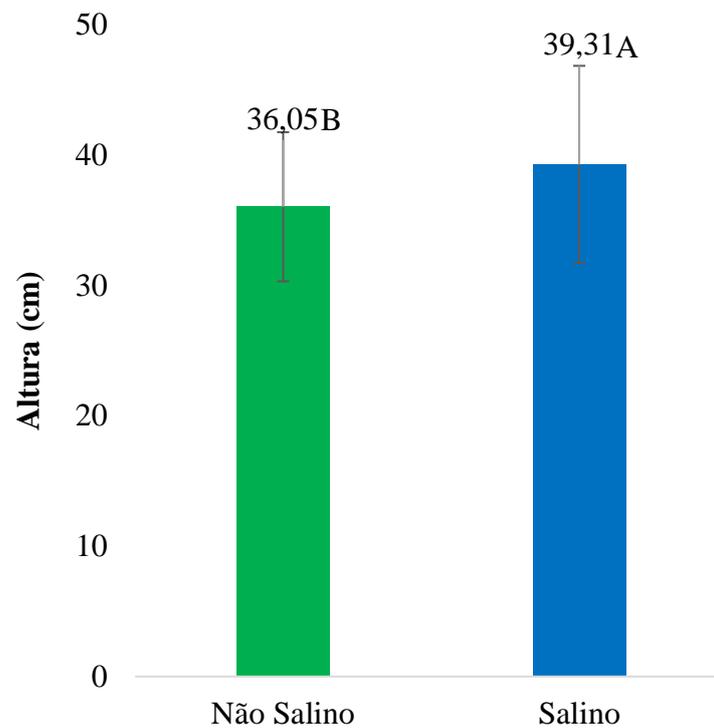
Em estudo semelhante com halófitas, Amjad *et al.*, (2022) constataram que a incorporação de 30 mg kg⁻¹ de CdCl₂ no meio de cultivo resultou na inibição de 50% no crescimento das raízes da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.).

O sistema radicular é a primeira parte da planta a apresentar alterações morfológicas rápidas e sensíveis devido à exposição aos metais pesados. O efeito adverso do Cd no crescimento das raízes pode ser devido ao contato direto das raízes com o Cd, induzindo a inibição da divisão celular da raiz e/ou alongamento da raiz (SEREGIN e IVANOV, 1998).

4.1.4 Altura das plantas

A salinidade do solo estimulou a altura da planta indicando uma resposta positiva a essa condição ambiental (Figura 6).

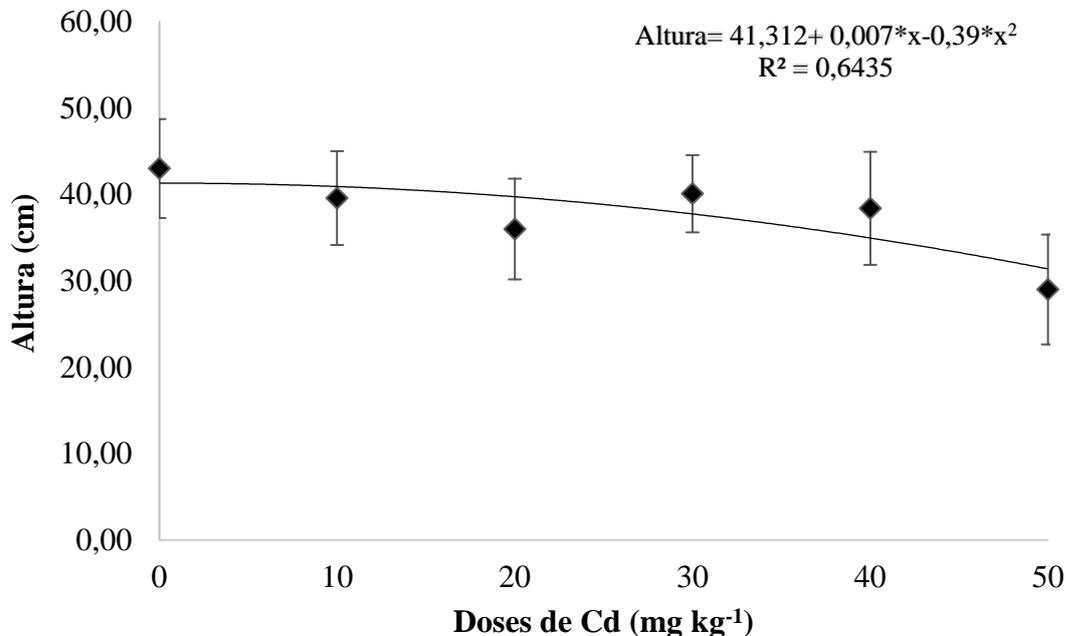
Figura 6 — Altura das plantas de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de Cd na presença e ausência de salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

No entanto, tanto no solo salino quanto no solo não salino, foi observada uma diminuição no crescimento das plantas à medida que as doses de cádmio aumentavam, registrando um rendimento relativo de 32% em relação a dose controle, (Figura 7).

Figura 7 — Altura das plantas de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de Cádmi. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



A redução da biomassa de crescimento devido à aplicação de Cd é bem documentada em muitas espécies halófitas, por exemplo; em *Atriplex lentiforme* o tratamento com Cd produziu um retardo de crescimento significativo em termos de redução da altura das plantas e do peso seco da parte aérea na dose de 240 mg kg⁻¹ (EISSA; ABEED, 2019).

4.2 Relações hídricas

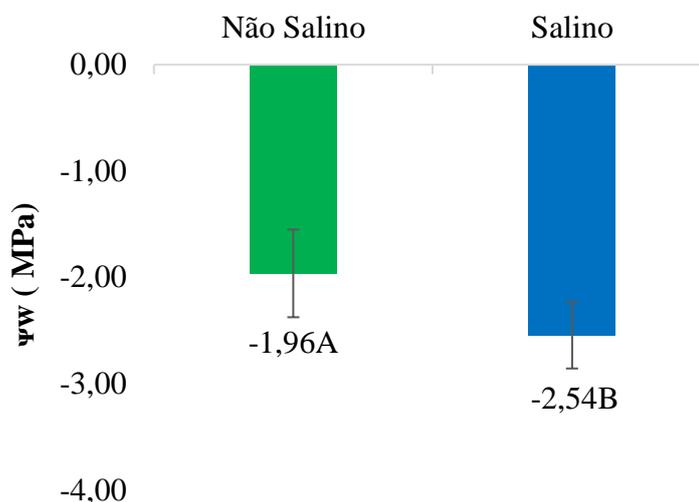
Os potenciais hídrico (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_o), o ajustamento osmótico (AO), teor relativo de água (TRA) e suculência foliar (SF) apresentaram efeito significativo para o fator salinidade ($P < 0,05$), conforme evidenciado pelo teste F. Para o fator doses de cádmio, observou-se efeito significativo ($P < 0,05$) para as variáveis Ψ_o e TRA. Considerando a interação, foi constatado um efeito significativo na variável potencial de pressão (Ψ_p).

4.2.1 Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

O potencial hídrico foliar foi 29,59% menor para o solo salino em comparação ao não salino (Figura 8). Este resultado é particularmente relevante, pois indica a ausência de impacto das diferentes doses de cádmio no potencial hídrico foliar, evidenciando uma aparente

tolerância da planta quanto ao status hídrico para as elevadas concentrações do metal.

Figura 8 — Potencial Hídrico foliar (Ψ_w) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras correspondem ao desvio padrão.

Tais resultados foram consistentes com os encontrados por Paulino *et al.* (2020), onde o aumento na concentração de NaCl nas soluções de irrigação causou redução nos valores de Ψ_w em comparação às plantas controle, atingindo médias de -3,29 e -4,36 MPa para as soluções de 30 e 60 dS/m respectivamente

Essa diferença nos valores de Ψ_w pode ser atribuída principalmente à presença solutos inorgânicos na solução do solo salino (LINS *et al.* 2018). Considerando que a *A. nummularia* é uma halófito, a diferença significativa nos valores de potencial hídrico (Ψ_t) entre os tipos de solo pode ser atribuída à adaptação específica dessa espécie a ambientes salinos (MELO *et al.*, 2018).

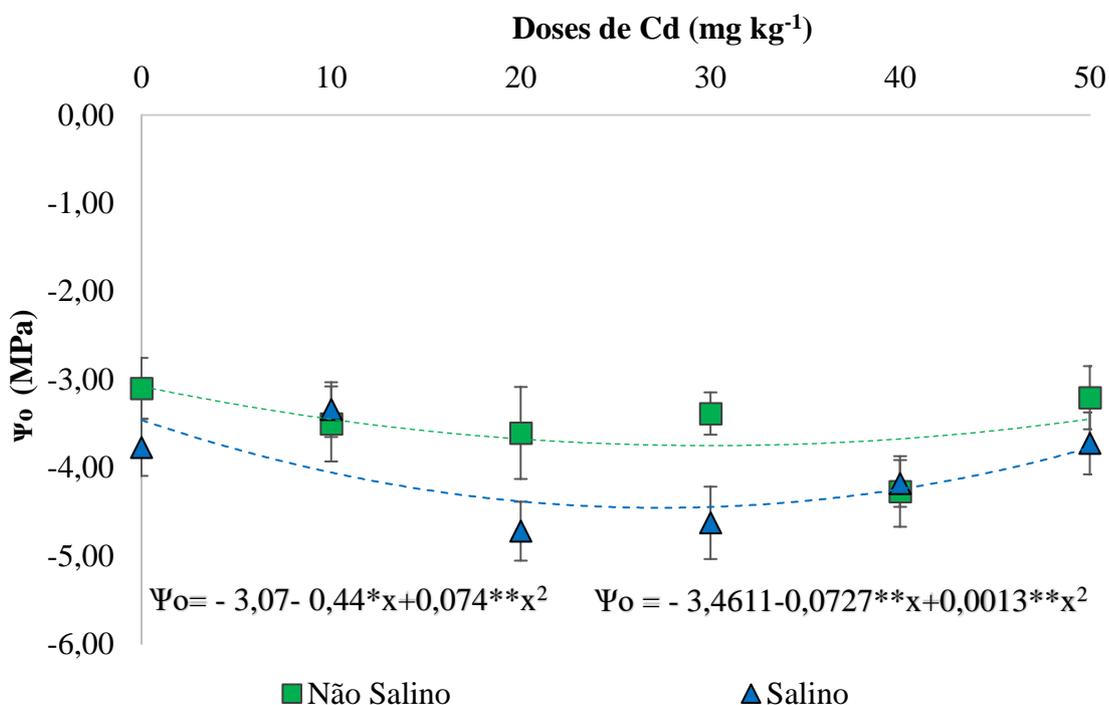
As halófitas, exemplificadas pela *A. nummularia*, desenvolveram mecanismos fisiológicos que lhes conferem a habilidade de prosperar em ambientes salinos, em contraste com plantas não adaptadas. A adaptação das halófitas a solos salinos frequentemente inclui a capacidade de tolerar concentrações mais elevadas de sais, como o sódio, nas células (LEITE *et al.*, 2020). Em face dessas condições, as halófitas podem ajustar seus potenciais hídricos para otimizar a absorção de água, mesmo em ambientes salinos (PAULINO *et al.*, 2020). Portanto, a observação de valores de potencial hídrico mais baixos nas plantas de *A. nummularia* cultivadas em solo salino pode indicar um ajuste adaptativo dessas halófitas para otimizar a

captação de água em ambientes salinos, sugerindo uma resposta positiva à salinidade em vez de um estado de estresse.

4.2.2 Potencial Osmótico foliar (Ψ_o)

As plantas de *A. nummularia*, cultivadas em solo salino, exibiram valores significativamente menores de potencial osmótico em comparação com aquelas cultivadas em solo não salino. Este resultado reflete a clara influência da salinidade do solo nas propriedades osmóticas das plantas (Figura 9).

Figura 9 — Potencial osmótico foliar (Ψ_o) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



A redução no potencial osmótico foliar, em resposta ao aumento das concentrações de sais no solo salino em comparação com o solo não salino, pode ser atribuída a um possível ajuste osmótico realizado pela *Atriplex*, evidenciando um mecanismo adaptativo dessa planta. Além desse ajuste, a *Atriplex* emprega um mecanismo de compartimentalização de sais nos vacúolos e nos tricomas vesiculares, levando à diminuição da concentração no citoplasma e, conseqüentemente, a uma redução adicional no potencial osmótico. Esses ajustes podem contribuir para a regulação osmótica, permitindo que as plantas mantenham a absorção de água em ambientes com elevada salinidade no solo (ÁLVAREZ *et al.*, 2012; BELKHEIRI, *et al*

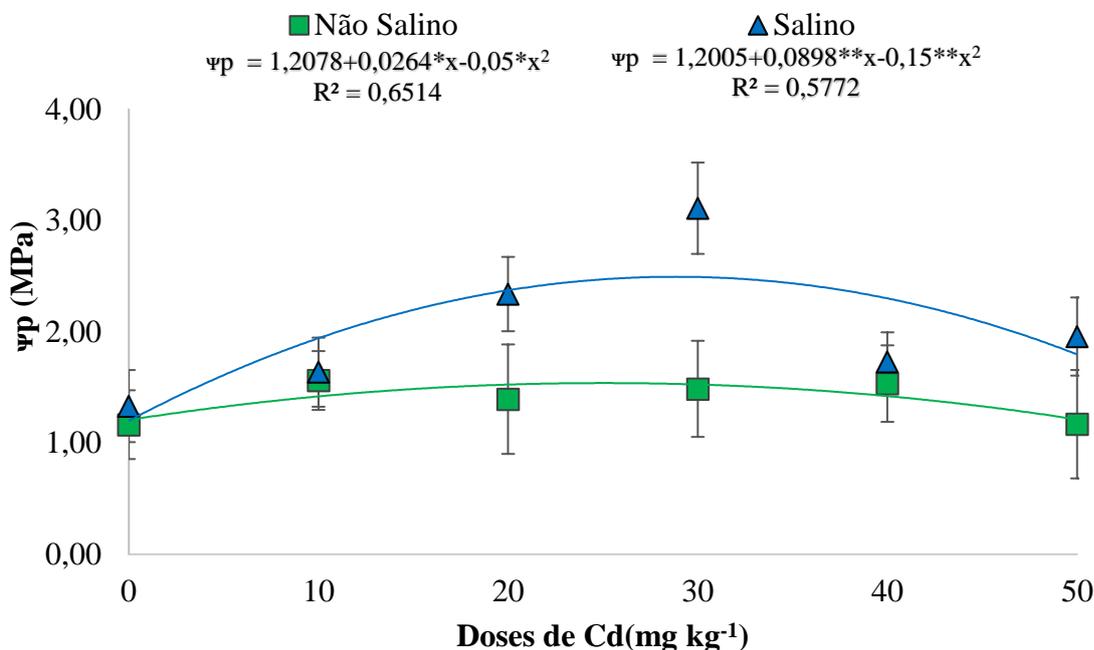
2013). Resultados semelhantes foram identificados em estudos realizados por Lins *et al.* (2018), e Paulino *et al.* (2020), nos quais foi observada uma redução no potencial osmótico em relação ao aumento da salinidade.

Este padrão evidencia uma resposta diferenciada das plantas a Cd, dependendo das condições específicas do solo, com uma notável influência da salinidade na regulação dos níveis de potencial osmótico. Os valores mais negativos do potencial osmótico nas folhas permitiram que *A. nummularia* absorvesse água mesmo de solos com alta salinidade. Essa habilidade possibilita o desenvolvimento da planta em ambientes sujeitos a estresse salino, como em solos afetados por sal e em climas semiáridos, nesta espécie isso ocorre devido à compartimentalização dos sais tanto nos vacúolos celulares quanto nas células especializadas denominadas tricomas, contribuindo para mitigar o estresse associado à presença de metais (SOUZA *et al.*, 2012).

4.2.3 Potencial de Pressão foliar (Ψ_p)

Os valores de potencial de pressão foram maiores nas plantas cultivadas em solo salino, cerca de 45% (Figura 10). Esse resultado indica maior eficiência na absorção de água por parte das plantas cultivadas nessas condições específicas de solo

Figura 10 — Potencial de pressão (Ψ_p) de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



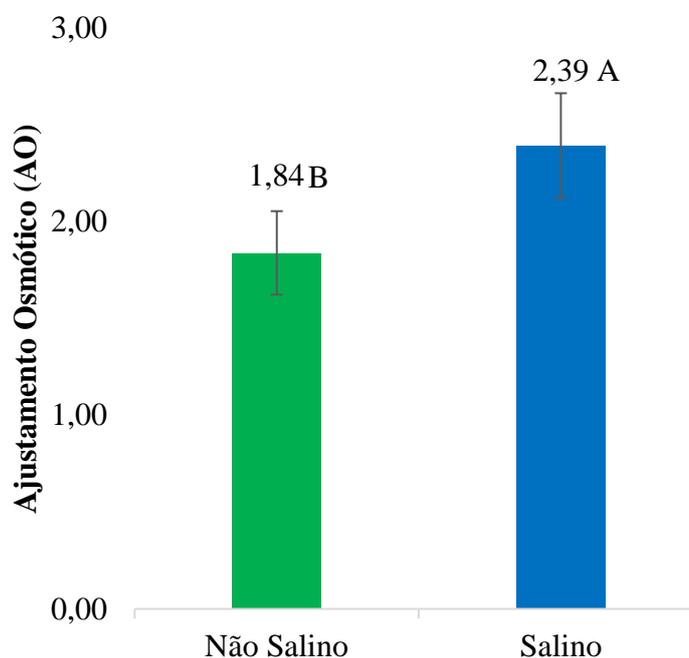
Esse fenômeno pode ser compreendido como um mecanismo adaptativo, no qual as plantas em solo salino procuram mitigar os efeitos prejudiciais do cádmio, mantendo uma regulação hídrica mais eficiente. A preservação do turgor nas plantas de *A. nummularia* também está associada a modificações na anatomia celular (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Em estudo semelhante, De Souza *et al.* (2012) observaram uma diminuição no diâmetro e no volume das células vesiculares por unidade de área, correlacionadas à redução no conteúdo de água no solo e ao aumento do estresse salino. Essas modificações possibilitam a manutenção de um elevado turgor celular. No solo salino, a interação desses fatores pode contribuir para um maior potencial de pressão em comparação com o solo não salino, o que, por sua vez, pode ter implicações relevantes na resposta das plantas a doses variadas de cádmio.

4.2.4 Ajustamento osmótico (AO)

O ajustamento osmótico foi 29,79% maior para o solo salino em comparação ao não salino (Figura 11).

Figura 11—Ajustamento osmótico (AO) de folhas de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade.



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

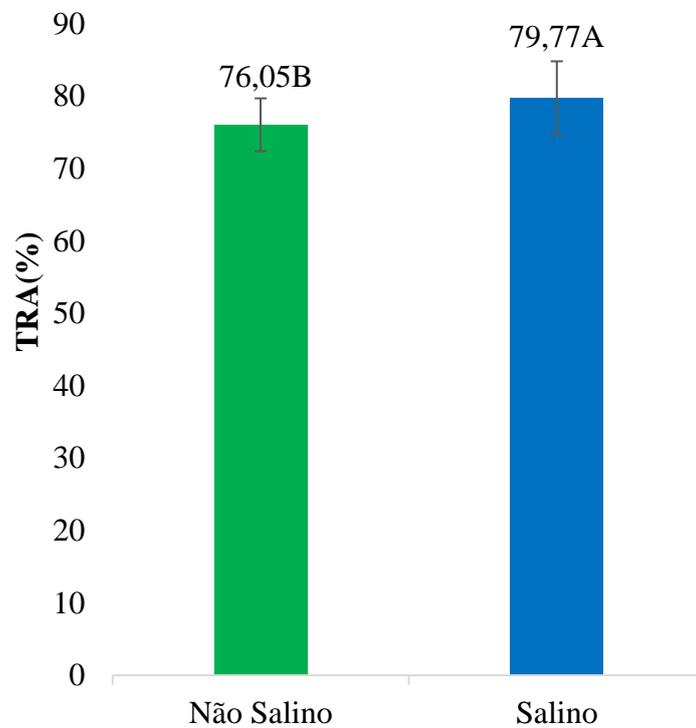
Esse mecanismo adaptativo de ajuste osmótico em *A. nummularia* se revela crucial para a sobrevivência da planta em condições de salinidade, demonstrando uma capacidade intrínseca de adaptação a ambientes adverso (BELKHEIRIS, 2013). O ajuste envolve um aumento líquido do conteúdo de solutos por célula, que independe das mudanças de volume resultantes da perda de água (TAIZ; LEIGER.,2013)

Nessas condições, os sais acumulados nos vacúolos podem ser utilizados para promover a redução do potencial osmótico foliar necessário para manter o turgor e a expansão celular (ÁLVAREZ *et al.*,2012; HASSINE;LUTTS, 2010; MELO *et al.*, 2018).

4.2.5 Teor Relativo de Água (TRA)

Para os valores de TRA, observaram-se percentuais de 79,77% para o solo salino e 76,05% para o solo não salino, uma diferença de 4,88% (Figura 12).

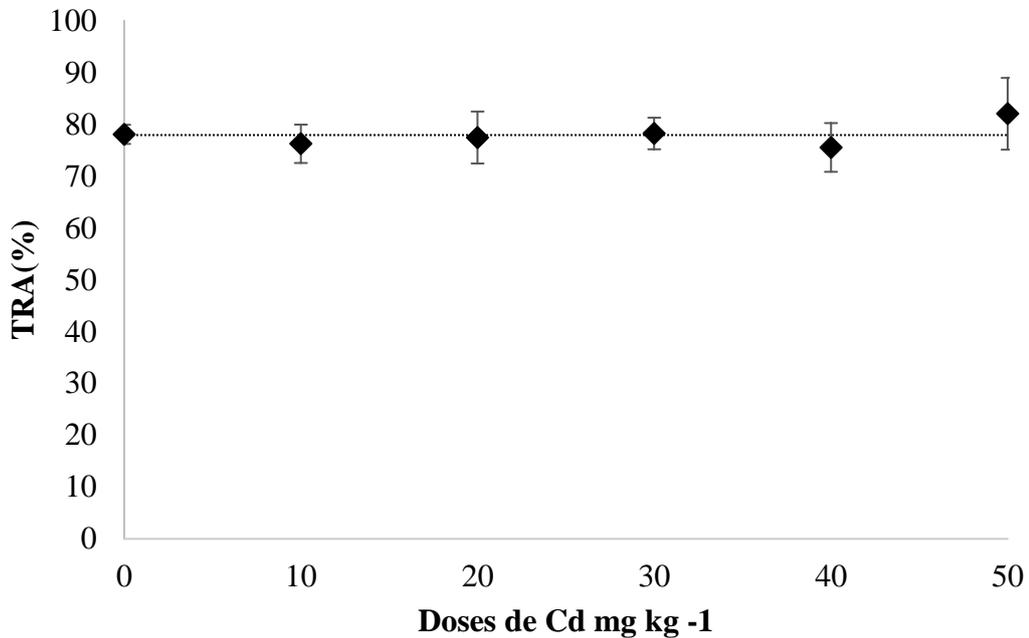
Figura 12—Teor Relativo de Água (TRA) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

Em relação às doses crescentes de cádmio, o TRA teve uma média de 77,91% entre os tratamentos, sendo o maior no valor de 82% nas plantas submetidas ao tratamento com a dose de 50mg kg⁻¹ de cádmio (Figura 13)

Figura 13 — Teor Relativo de Água (TRA) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio



A preservação da hidratação nos tecidos foliares sob a influência do estresse de cádmio pode ser atribuída por uma redução significativa na taxa de transpiração, mediada pelo fechamento estomático. corroborando o estudo de Rucińska-Sobkowiak (2016), onde o autor infere que o excesso de metais pesados influencia a eficiência do fluxo de água, diminuindo a taxa de transpiração e/ou através de alterações na resistência estomática nas folhas.

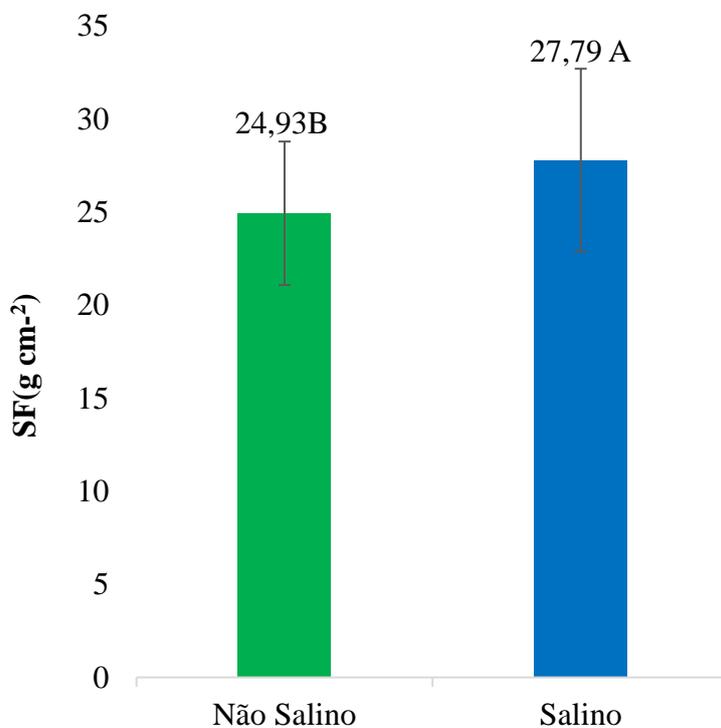
Em comparação com outra espécie de *Atriplex*, Vromman *et al.* (2011) evidenciaram que mudas de *Atriplex atacamensis*, quando expostas ao estresse, eficazmente fecham os estômatos foliares e realizam osmorregulação como estratégia para evitar a perda de água.

Estudos anteriores corroboram essa adaptação da *A. nummularia* a condições salinas, destacando as estratégias fisiológicas que possibilitam seu desenvolvimento bem-sucedido nesses ambientes desafiadores (MELO *et al.*, 2018; PAULINO *et al.* 2020;). Essas adaptações, incluindo mecanismos de ajuste osmótico e tolerância a sais, conferem à *A. nummularia* uma vantagem competitiva em solos salinos, o que pode ser refletido nos resultados diferenciados dos TRA entre os solos considerados neste estudo.

4.2.6 Suculência foliar (SF)

A suculência foliar nas plantas cultivadas no solo salino foram cerca de 11,47% superiores em relação ao solo não salino (Figura 14).

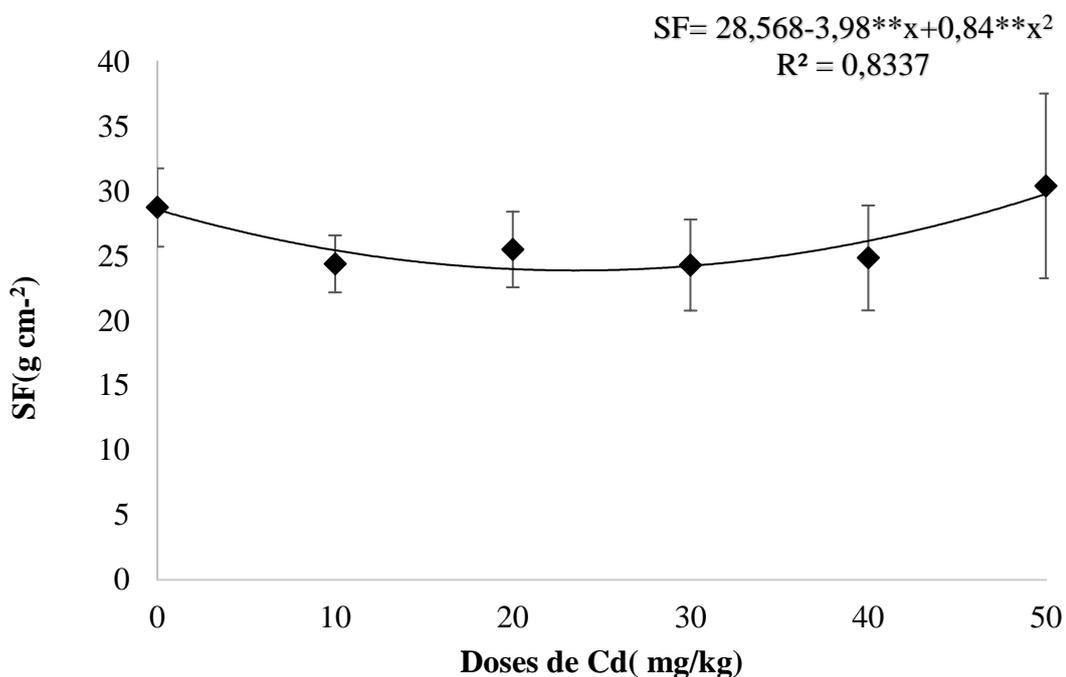
Figura 14 — Suculência foliar (SF) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

Os valores de suculência foliar encontrados para as diferentes doses obteve aumento significativo (Figura 15). O maior valor foi observado para plantas na dose de 50mg kg⁻¹ (5%).

Figura 15 — Suculência foliar (SF) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



Mecanismos como compartimentação de sal e ajuste osmótico são vitais para que as plantas tolerantes ao sal continuem a crescer na presença de alta salinidade (VOLKMAR *et al.*, 1998)

Esses resultados são importantes para entender quais fatores estão influenciando a suculência foliar e, conseqüentemente, o crescimento das plantas. A suculência foliar é uma característica morfofisiológica importante que pode ser afetada pela disponibilidade de água no solo. Em suas observações, Silveira *et al.* (2009) identificaram incrementos na suculência em torno de 45% e no conteúdo relativo de água das folhas de *A. nummularia* à medida que a concentração externa de NaCl aumentava de 0 a 300 mM, estabilizando-se em seguida.

O desenvolvimento de suculência em resposta à salinidade pode fornecer um meio de regular as concentrações de sal apoplástico e, portanto, manter o turgor celular. (BELKHEIRI, 2013). Em espécies halófitas, a suculência e a osmorregulação têm sido demonstradas como dois fatores essenciais para o crescimento sob estresse abiótico (MISHRA; TANNA, 2017). A suculência é uma adaptação anatômica que, ao aumentar a capacidade vacuolar, permite o acúmulo de grande quantidade de água e íons dissolvidos nos tecidos vegetais (MUNNS, 2002).

4.3 Performance fotossintética

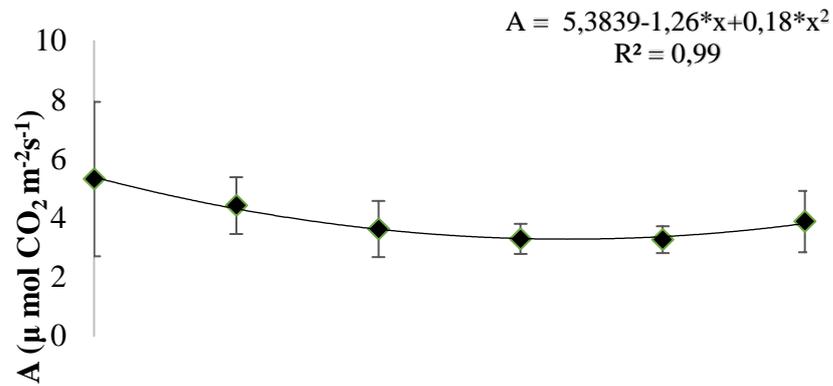
Nas avaliações realizadas referentes à performance fotossintética observou-se efeito significativo ($P < 0,05$) para o fator salinidade do solo para as variáveis fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v) e eficiência intrínseca do uso da água (E_iUA). Para o fator doses de cádmio, observou-se efeito significativo ($P < 0,05$) para as variáveis carotenoides, fluorescência inicial (F_0), condutância estomática (g_s), transpiração (E), e fotossíntese líquida (A). Considerando a interação, foi constatado um efeito significativo para eficiência do uso da água (EUA). Não foram identificados efeitos das doses de cádmio nas variáveis de rendimento quântico (F_v/F_m) e clorofila a ($chl\ a$) e b ($chl\ b$).

4.3.1 Trocas gasosas foliares

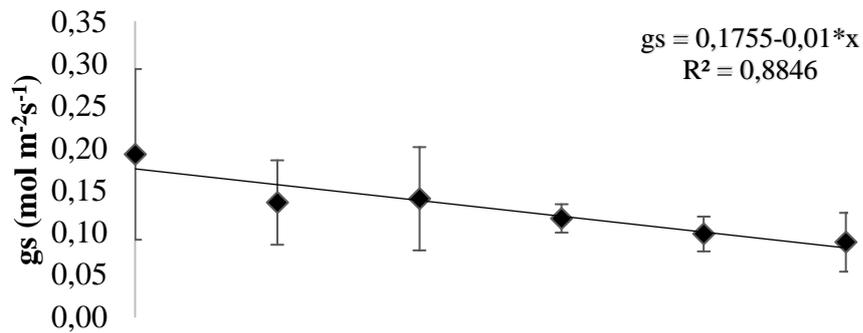
Os resultados demonstraram uma diminuição significativa nos valores de fotossíntese líquida (A) (Figura 16 A), com uma redução aproximada de 38% em resposta ao aumento das doses de cádmio, até a dose de $30\ mg\ kg^{-1}$, se mantendo estável até a dose $50\ mg\ kg^{-1}$. Em relação à condutância estomática (G_s) (Figura 16 B), observou-se uma diminuição de cerca de 54% na abertura dos estômatos nas plantas submetidas à dosagem de $50\ mg\ kg^{-1}$ de cádmio. Quanto à transpiração (E), verificou-se uma redução de aproximadamente 37% nas plantas cultivadas na dosagem de $50\ mg\ kg^{-1}$ de cádmio (Figura 16 C). Esses resultados indicam uma clara influência negativa do cádmio nos processos fisiológicos das plantas, evidenciando os efeitos adversos desse metal nas atividades fotossintéticas e na regulação estomática.

Figura 16 -- A-Fotossíntese líquida(A); B - Condutância estomática(g_s) e C- Transpiração (E)de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)

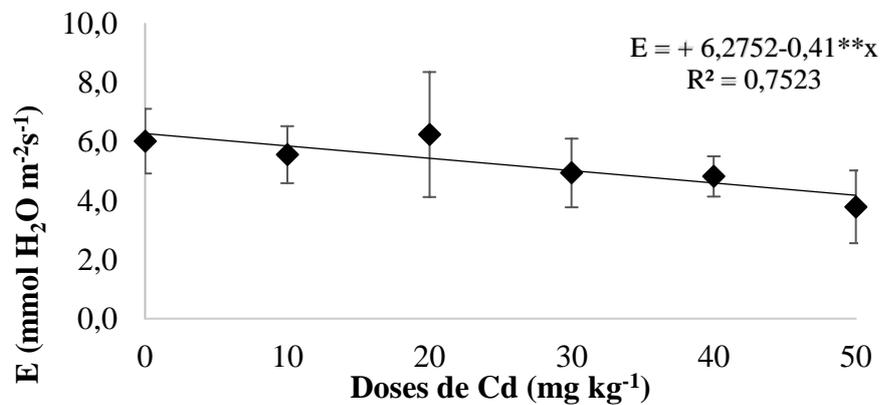
A)



B)

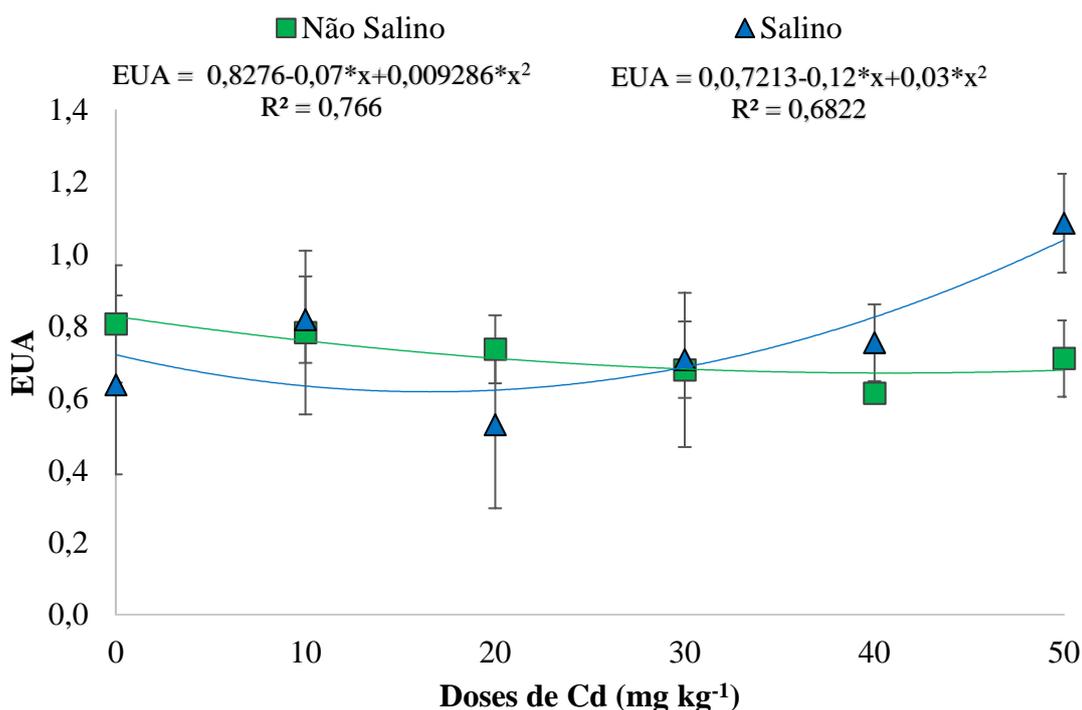


C)



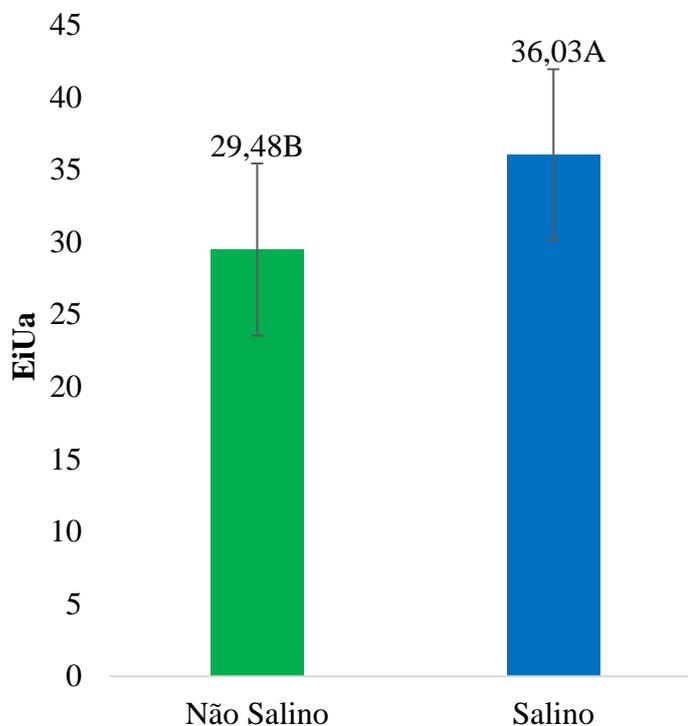
Quanto à eficiência do uso da água (EUA), foi observada que solo salino demonstrou uma melhor EUA em comparação com o solo não salino, e houve um aumento associado às doses de cádmio (Figura 17).

Figura 17--Eficiência do Uso da Água (EUA) da *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



Para a eficiência intrínseca do uso da água (*EiUa*), os valores foram 23% superiores solo salino em comparação ao solo não salino (Figura 18). Essa observação sugere que a eficiência intrínseca no uso da água por *A. nummularia* é influenciada pela natureza do solo, sendo mais pronunciada em ambientes salinos. A superioridade da eficiência no uso da água em solos salinos pode indicar uma adaptação específica da planta a condições de estresse salino, onde ela otimiza a utilização da água disponível.

Figura 18-- Eficiência Intrínseca do Uso da Água (EiUa) da *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

O Cd é um dos metais pesados mais tóxicos para o aparelho fotossintético (HAIDER *et al.*, 2021). A resposta hídrica da planta sob estresse causado pelo cádmio está vinculada ao equilíbrio entre a hidratação da água e a taxa de transpiração. A toxicidade do cádmio interfere no teor de água da planta, resultando na redução da área superficial das folhas, dos principais tecidos transpirantes e/ou na deterioração da condutância estomática (AMARI *et al.*, 2017). O cádmio induz uma disfunção na transpiração em várias espécies, como *Atriplex halimus* (NEDJIMI; DAOUD, 2009), *Sesuvium portulacastrum* (WALI *et al.*, 2016) e *Suaeda glauca* (ZHANG *et al.*, 2020).

No contexto das plantas do gênero *Atriplex*, que exibem uma taxa de transpiração reduzida e uma elevada eficiência no uso da água, caracterizando-se pelo metabolismo fotossintético C4, classificando-as como plantas halófitas (PORTO *et al.*, 2000). Essas plantas, ao possuírem um metabolismo C4, desenvolvem características que facilitam seu crescimento e desenvolvimento em ambientes secos e com elevadas temperaturas, sem comprometer a eficiência fotossintética (TAIZ; ZEIGER, 2006).

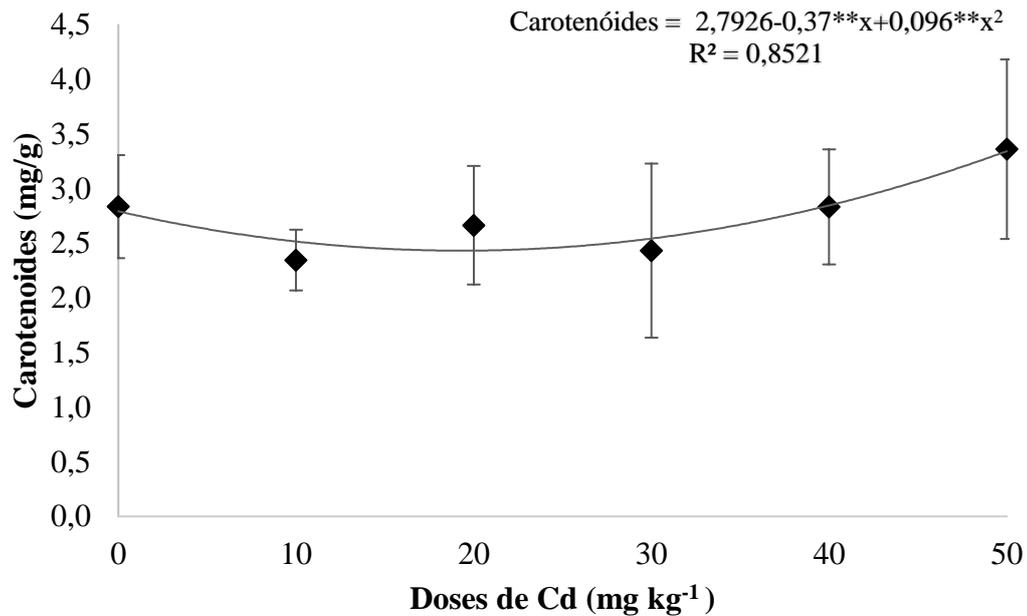
De acordo com Glenn *et al.* (1999), as plantas halófitas têm a capacidade de aprimorar a eficiência do uso da água em resposta à presença de sais, minimizando a quantidade de água necessária para cada unidade de crescimento.

Oliveira *et al.* (2017) afirmam que a redução na transpiração resulta da diminuição da condutância estomática, ocasionando uma menor perda de água pela planta, especialmente quando há dificuldade de absorção devido à redução do potencial hídrico do solo. Importante destacar que esse fenômeno fisiológico é interpretado como um mecanismo adaptativo de tolerância ao excesso de sais, em vez de ser meramente uma consequência negativa da influência desses íons (MEGDICHE *et al.*, 2008). A regulação da taxa de transpiração desempenha um papel crucial no controle da acumulação de íons na parte aérea das plantas, uma vez que o transporte de sais ocorre através do fluxo de transpiração (BENZARTI *et al.*, 2012).

4.3.2 Pigmentos fotossintéticos

Os teores de clorofila A e clorofila B foram constantes entre os diferentes tratamentos, não havendo decréscimo nos teores com o aumento da dose de Cd, mantendo-se o teor de aproximadamente 7 mg/g para clorofila A e 2,5 mg/g para clorofila b. Além disso, os teores de carotenoides apresentaram um expressivo aumento de 18,3%, com o aumento das doses de Cd com relação a dose controle (Figura 19). O aumento de carotenoides pode estar associado a mecanismos de proteção ao complexo antena, uma vez que atuam como agentes redutores e pigmentos protetores de reações oxidativas (MELO, SOUZA, CUNHA.,2017)

Figura 19—Teor de carotenoides em folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



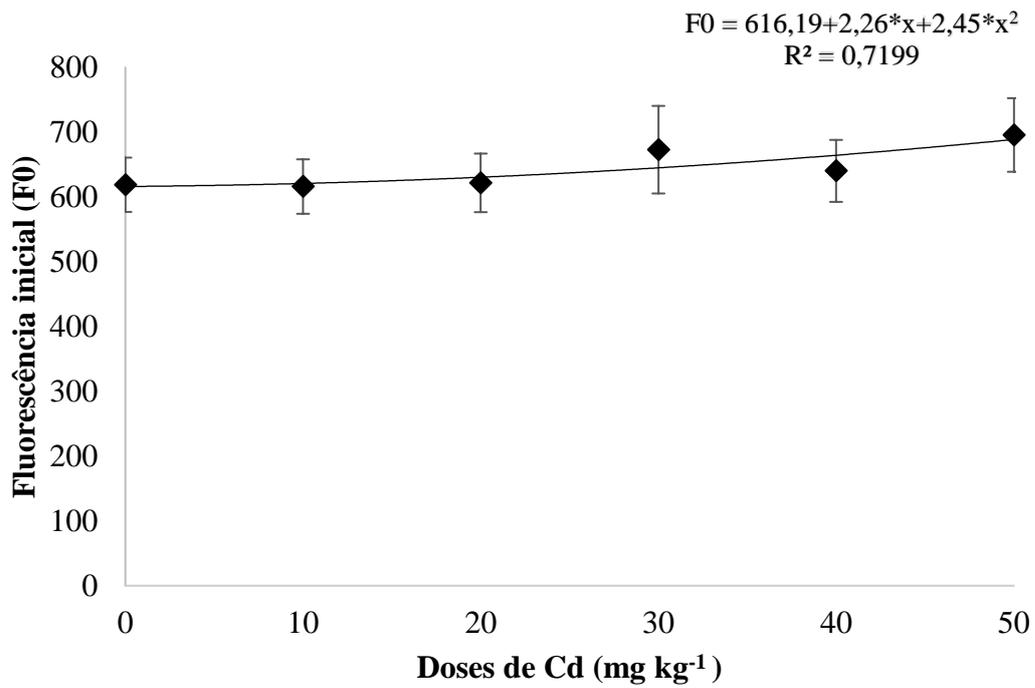
Resultados semelhantes foram observados por Kahli *et al.* (2021), onde, após um mês de estresse por Cd, não foram observadas alterações significativas no teor de clorofila a e b, na ausência e presença de salinidade.

Essa observação reforça a estratégia adaptativa dessas plantas, que mantem o teor de clorofila a e b para otimizar o rendimento energético da fotossíntese, aumentando a absorção de luz como uma compensação eficiente pela perda de clorofila a. Esse mecanismo adaptativo é uma característica das halófitas, conforme previamente documentado em outras plantas desse grupo sob estresse iônico (DUARTE *et al.*, 2013).

4.3.3 Fluorescência da clorofila a

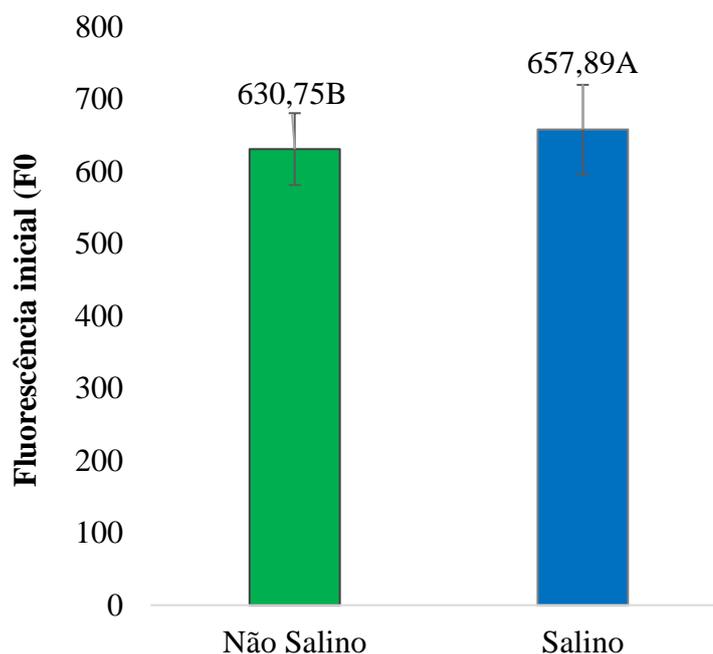
A variável fluorescência inicial (F0) teve um acréscimo de aproximadamente 12% na maior dose de cádmio em comparação com o controle (Figura 20).

Figura 20 — Fluorescência inicial (F0) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



Em contraste, no solo salino, esse aumento foi de 4% em relação às plantas cultivadas no solo não salino (Figura 21).

Figura 21 — Fluorescência inicial (F0) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade

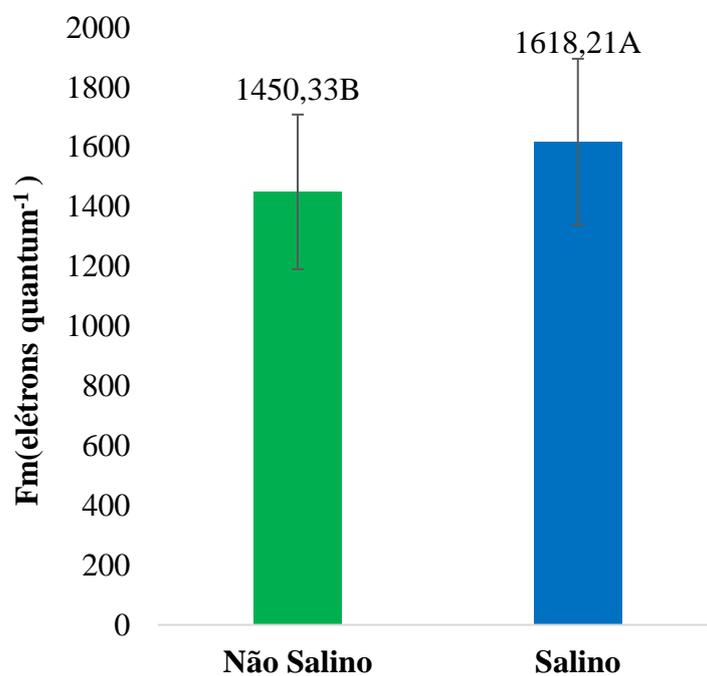


As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

A variável F0, que representa a fluorescência quando QA (quinona receptora primária de elétrons do PS2) está totalmente oxidada e o centro de reação do PS2 está aberto, é considerada uma medida independente dos eventos fotoquímicos. Esse estado é iminente à ativação das reações fotoquímicas (MOUGET; TREMBLIN, 2002). Um aumento em F0 pode indicar danos no centro de reação do PS2 ou uma redução na capacidade de transferência da energia de excitação da antena para o centro de reação (BAKER; ROSENQVST, 2004)

Relacionando esses conceitos com os resultados apresentados, a observação de um aumento significativo em F0, especialmente no solo salino e em doses mais elevadas de cádmio, sugere que o PS2 foi impactado pelas condições experimentais. O Cd, conhecido por induzir estresse oxidativo, pode ter desencadeado danos no centro de reação do PS2, afetando a eficiência do sistema fotossintético. Além disso, a interação com o tipo de solo pode ter modulado a absorção e a distribuição de cádmio nas plantas, contribuindo para as variações observadas em F0. Para os valores de fluorescência máxima, observou-se que as plantas cultivadas no solo salino apresentaram valores de Fm 16% maiores em relação ao solo não salino (Figura 22).

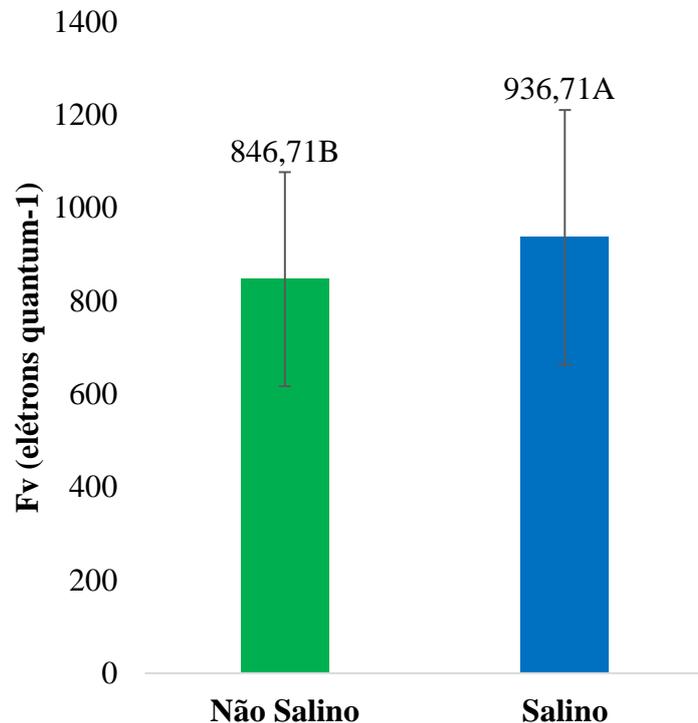
Figura 22— Fluorescência máxima (Fm) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

De mesmo modo da fluorescência máxima, a fluorescência variável (Fv) apresentou diferença estatística ($p < 0,05$) para o tipo de solo, observando maiores valores de Fv para plantas cultivadas no solo salino, cerca de 10% maiores (Figura 23).

Figura 23 — Fluorescência variável (Fv) de folhas *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e ausência de salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

A intensidade máxima da fluorescência, representada por F_m , ocorre quando praticamente toda a quinona está reduzida, e os centros de reação atingem sua capacidade máxima de reações fotoquímicas (BAKER; ROSENQVIST, 2004; SILVA *et al.*, 2015). Nesse contexto, quanto maior a taxa de F_m em relação a F_o , maior é o fluxo de elétrons no PSII até o centro de reação. Essa diferença entre F_m e F_o resulta na Fluorescência Variável (Fv) (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

Com a manutenção dos níveis de clorofila a e o aumento dos demais pigmentos, acredita-se que a eficiência fotossintética tenha sido preservada, especialmente no solo salino, não evidenciando redução em F_m e Fv.

De acordo com Rosenqvist e Kooten (2003), F_m representa a fluorescência máxima, enquanto Fv representa a fluorescência variável, obtida pela diferença entre a fluorescência máxima e a mínima (F_0) ($FV = F_m - F_0$). Conforme indicado por Strasser e Strasser (1995), essa relação reflete a capacidade das moléculas de clorofila em reduzir a quinona A (Qa) quando expostas à luz absorvida. Valores dessa variável na faixa de 0,75 a 0,85 indicam uma probabilidade de 75% a 85% de que um fóton absorvido consiga reduzir Qa, demonstrando assim uma eficiência elevada do aparato fotossintético associado ao PSII.

Esses resultados contrastam com a observação de Melo, Souza e Cunha (2017), que ressaltaram a sensibilidade de Fv e Fm em condições de déficit hídrico, especialmente em ambientes mais salinos, levando à redução desses parâmetros. No entanto, no presente estudo, a ausência de diminuição em Fm e Fv indica uma resposta adaptativa das plantas aos diferentes tipos de solo e doses de cádmio, resultando em um aumento desses indicadores de eficiência fotossintética.

O rendimento quântico máximo (Fv/Fm) permaneceu constante nas plantas em todos os tratamentos, com média de 1,40. Em geral, as reduções no rendimento quântico do PSII, associadas à degradação da clorofila (MELO, SOUZA, CUNHA, 2017), não foram observadas neste estudo, onde não houve diminuição no teor de clorofila. Portanto, o rendimento quântico manteve-se estável entre os tratamentos.

Aumentos nos valores de Fv/Fm indicam uma maior eficiência na conversão fotossintética do PSII (SHU *et al.*, 2013; MEHTA *et al.*, 2011). Os valores de Fv/Fm observados neste estudo (1,45 e 1,57) superam aqueles reportados na literatura para plantas em condições sem estresse (LI *et al.*, 2010; SHU *et al.*, 2013), que geralmente se situam em torno de 0,75.

A degradação da clorofila em plantas sob estresse abiótico pode ser parcialmente atribuída à sensibilidade das membranas ao estresse oxidativo (HASEGAWA *et al.*, 2000). Essas condições ambientais levam ao aumento do nível de espécies reativas de oxigênio, resultando na peroxidação dos lipídios das membranas, desintegração dos tilacoides e redução na concentração de clorofila (PARIDAS; DAS, 2005; MA *et al.*, 2011).

4.4 Teores de Sódio (Na⁺), Cloro (Cl⁻), Potássio (K⁺) e Cádmio (Cd) na Parte Aérea e Raízes

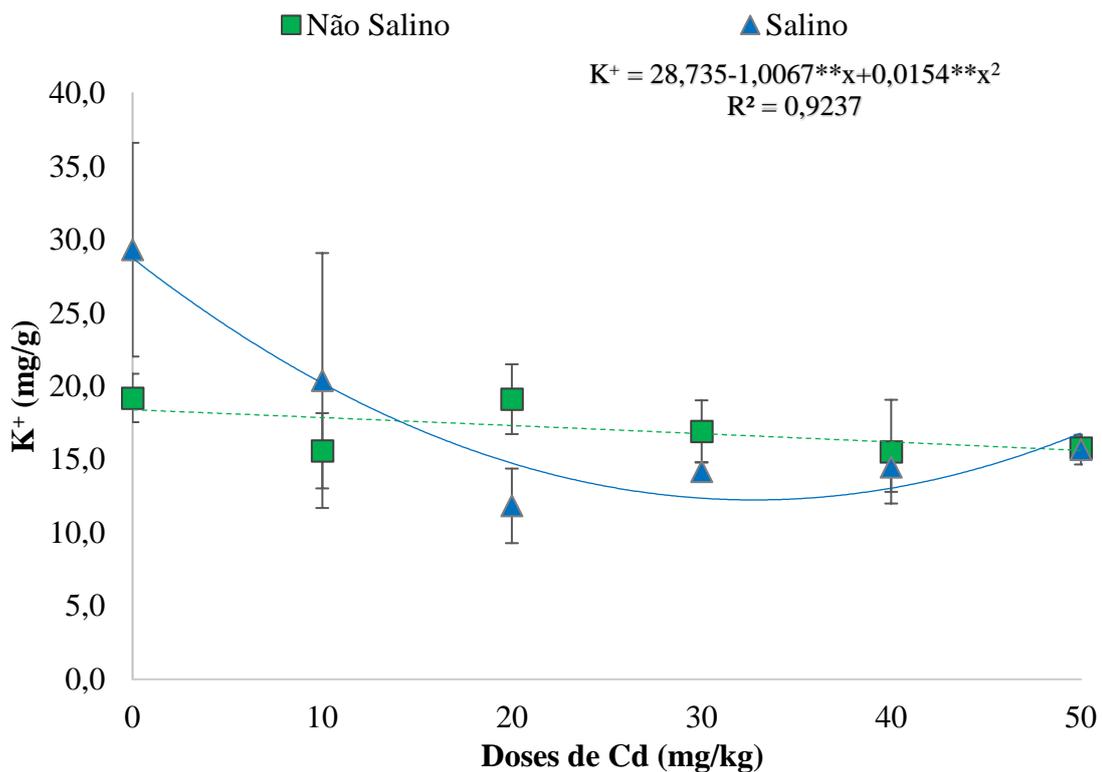
Observou-se efeito significativo ($P < 0,05$) para o fator salinidade do solo para as variáveis teor de Na⁺, Cl⁻ fator de translocação e teor de Cd na parte aérea. Para o fator doses de cádmio, observou-se efeito significativo ($P < 0,05$) para os teores de cádmio na parte aérea. Considerando a interação, foi constatado um efeito significativo para os teores de K⁺ e os teores de Cd nas raízes.

4.4.1 Teores de Sódio (Na⁺), Cloro (Cl⁻), Potássio (K⁺)

Os teores de potássio (K⁺) na parte aérea no solo salino apresentaram uma redução significativa de aproximadamente 60% até atingir a dose de cádmio de 30 mg kg⁻¹. Em contraste, no solo não salino, os teores de potássio se mantiveram constantes com o aumento

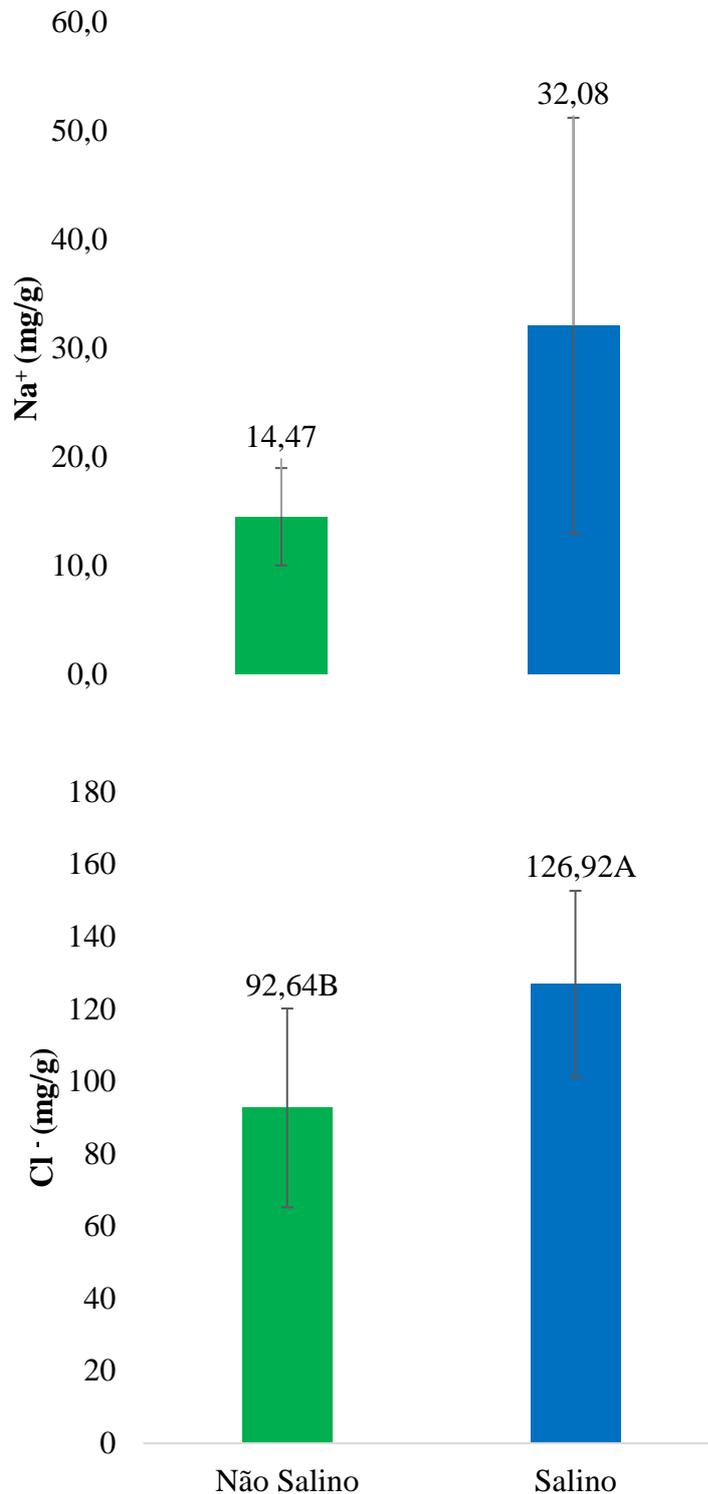
das doses de Cd (Figura 24). Esses resultados evidenciam que tanto a presença de cádmio quanto as características do solo desempenham papéis distintos na absorção e distribuição de elementos pela planta. O Cd pode influenciar a absorção de outros elementos presentes no meio de crescimento (RODECAP et al., 1994), entre eles os elementos minerais essenciais, especialmente cátions como K^+ .

Figura 24 — Teor de potássio (K^+) da parte aérea da *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



Os teores de sódio (Na^+) (Figura 25 A) nas plantas cultivadas no solo salino foram cerca de 100% superiores comparadas às cultivadas no solo não salino. Já os teores de cloro (Cl^-) nas plantas cultivadas em solo salino demonstraram uma notável elevação, apresentando uma diferença expressiva de cerca de 26% em relação às plantas cultivadas em solo não salino (Figura 25)

Figura 25 — Teor de sódio (Na^+) (A) e cloro (Cl^-) (B) da parte aérea da *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

O Na^+ em concentrações elevadas no solo reduz a absorção de K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} disponíveis (CRAMER *et al.*, 1985). Adicionalmente, o Na^+ pode ter efeitos tóxicos diretos,

interferindo na função do potássio como cofator em diversas reações (KHAN *et al.*, 2000). As concentrações de K^+ diminuíram no solo salino, onde houve uma maior concentração de Na^+ , diminuindo em função do aumento da dose de Cd. No solo não salino, observou-se uma tendência estável na concentração de K^+ .

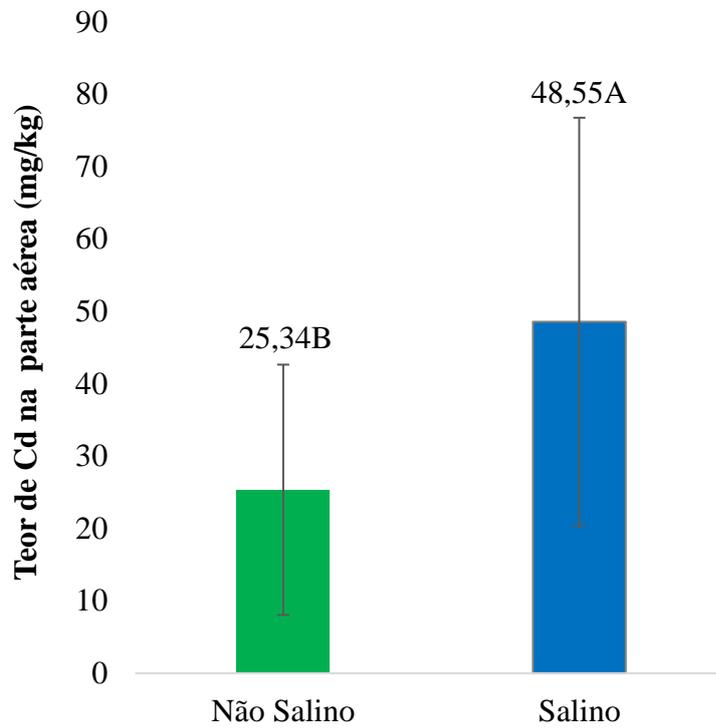
O Na^+ pode substituir o K^+ , especialmente em funções osmóticas no vacúolo. Assim, em condições de privação de K^+ , a adição de Na^+ pode efetivamente promover o crescimento das plantas. A extensão em que o Na^+ pode substituir o K^+ varia entre espécies de plantas, diferentes cultivares da mesma espécie e até mesmo entre diferentes folhas da mesma planta, com folhas mais jovens dependendo mais de K^+ do que folhas mais velhas (LINDHAUER *et al.*, 1990). As halófitas, em comparação com as glicófitas, requerem menos K^+ para crescer, indicando uma relação entre a capacidade de substituir K^+ por Na^+ e a tolerância ao sal.

Em relação ao cloro, observou-se uma tendência semelhante ao comportamento do Na^+ . É aceito que Na^+ e Cl^- são responsáveis pela maior parte da osmolalidade em halófitas (FLOWERS *et al.*, 1977; GLENN; BROWN, 1998). Ademais, o principal gradiente de potencial hídrico entre as regiões de crescimento da parte aérea e do xilema em *A. nummularia* geralmente é alcançado por meio de gradientes osmóticos gerados pelas concentrações de Na^+ e Cl^- ao longo dos tecidos da parte aérea (ARAÚJO *et al.*, 2006).

4.4.2 Teor de cádmio

O teor de Cd foi superior para o solo salino; as plantas cultivadas nessas condições acumularam cerca de 91% a mais de Cd do que aquelas cultivadas no solo não salino (Figura 26).

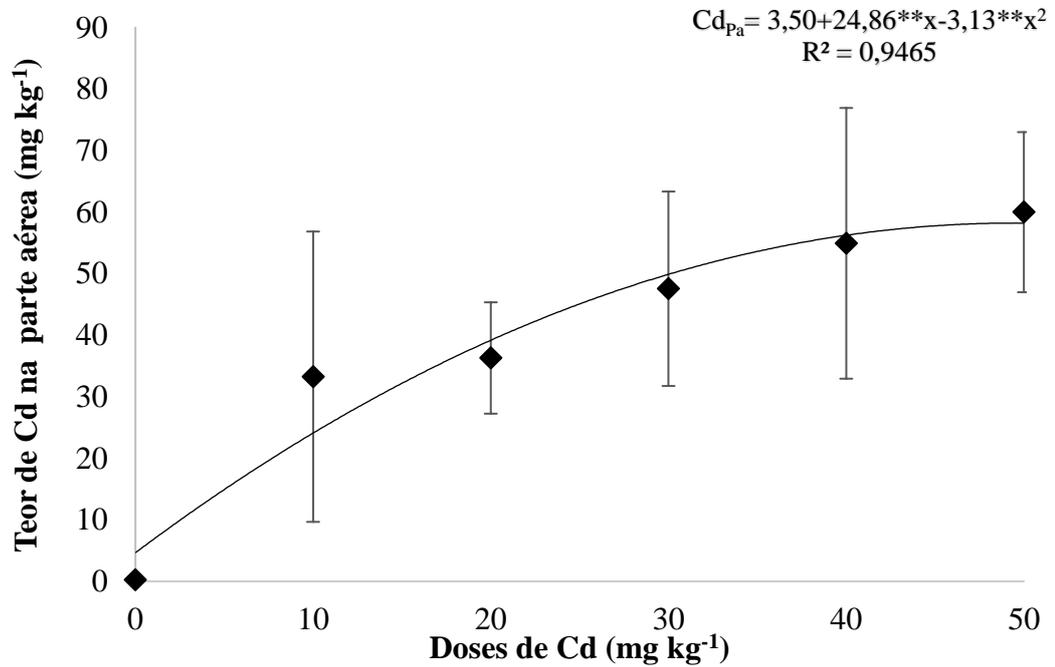
Figura 26 — Teor de cádmio (Cd) da parte aérea da *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescente de cádmio na presença e na ausência da salinidade



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

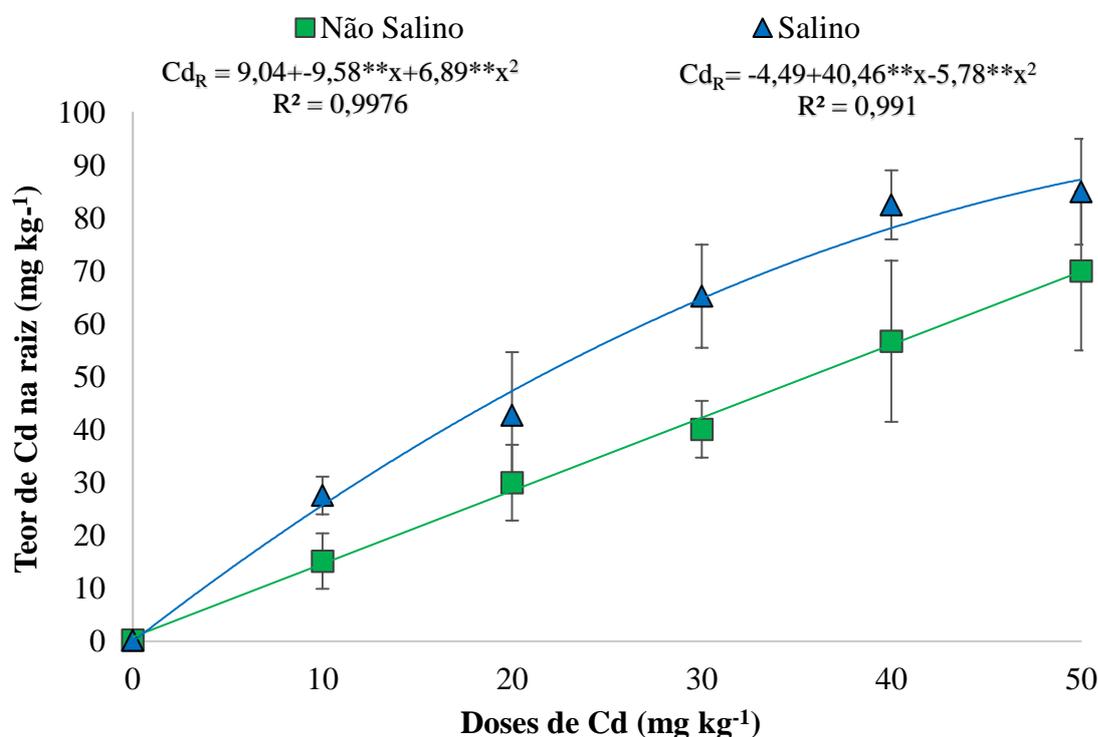
Observou-se aumento dos teores de Cd na parte aérea em função das doses de Cd (Figura 27). O comportamento quadrático indica um possível limite de acumulação de Cd pela *Atriplex*.

Figura 27 — Teor de cádmio (Cd) da parte aérea da *Atriplex nummulária* cultivada em doses crescentes de cádmio. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



Os teores de Cd nas raízes responderam ao incremento das doses de Cd no solo com destaque para o solo salino (Figura 28). Os teores médios de Cd na raiz foram 87 mg kg⁻¹ de Cd e de 70 mg kg⁻¹ para a maior dose de Cd para o solo salino e não salino respectivamente.

Figura 28— Teor de cádmio (Cd) na raiz de *Atriplex nummulária* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade. Coeficientes da regressão significativos com $p \leq 0,01$ (**) e $p \leq 0,05$ (*)



Segundo critérios estabelecidos por Baker et al. (2000), para classificar uma planta como hiperacumuladora de Cd é necessário que os teores na parte aérea excedam 100 mg kg^{-1} em solo não contaminado artificialmente. Neste estudo, os valores observados na parte aérea foram superiores a 50 mg kg^{-1} , para maior dose de Cd, indicando uma concentração significativa desse metal.

Zhang et al. (2016) observaram que a adição de sais promoveu o crescimento da halófito *Carpobrotus rossii*, em solo contaminado com 20 mg kg^{-1} de Cd com aumento significativo de Cd na parte aérea, atingindo até 162 mg kg^{-1} , quase o dobro da concentração observada sem a adição de sal. Isso sugere que a presença de sais influencia os processos de absorção e transporte de Cd em plantas halófitas, resultando em uma maior acumulação do metal na parte aérea.

Eissa et al (2017), avaliando a halófito *Atriplex lentiformes*, cultivadas em solo contaminado por Cd ($50/\text{mg kg}^{-1}$) em diferentes doses de vinhaça e EDTA, observaram um acúmulo de 130 mg kg^{-1} na parte aérea e 230 mg kg^{-1} nas raízes das plantas controles (sem adição de quelantes e similar a nossa condição experimental). A acumulação significativa de Cd nas plantas halófitas, mesmo na ausência de agentes quelantes, sugere que essas plantas possuem mecanismos naturais de tolerância e acumulação de metais pesados, o que as torna candidatas promissoras para a fitoextração de contaminantes do solo.

Em um contexto experimental com meio de cultivo em solução nutritiva, Kahli *et al.* (2021) observaram variações nos teores de Cd, registrando 500 mg kg⁻¹ nas raízes e 1900 mg kg⁻¹ nas folhas de *A. nummulária*. Esses resultados reforçam a alta capacidade da *A. nummulária* em acumular cádmio. É válido destacar que o Cd no sistema hidropônico possivelmente apresenta maior disponibilidade e conseqüente acúmulo quando comparada em cultivo via solo.

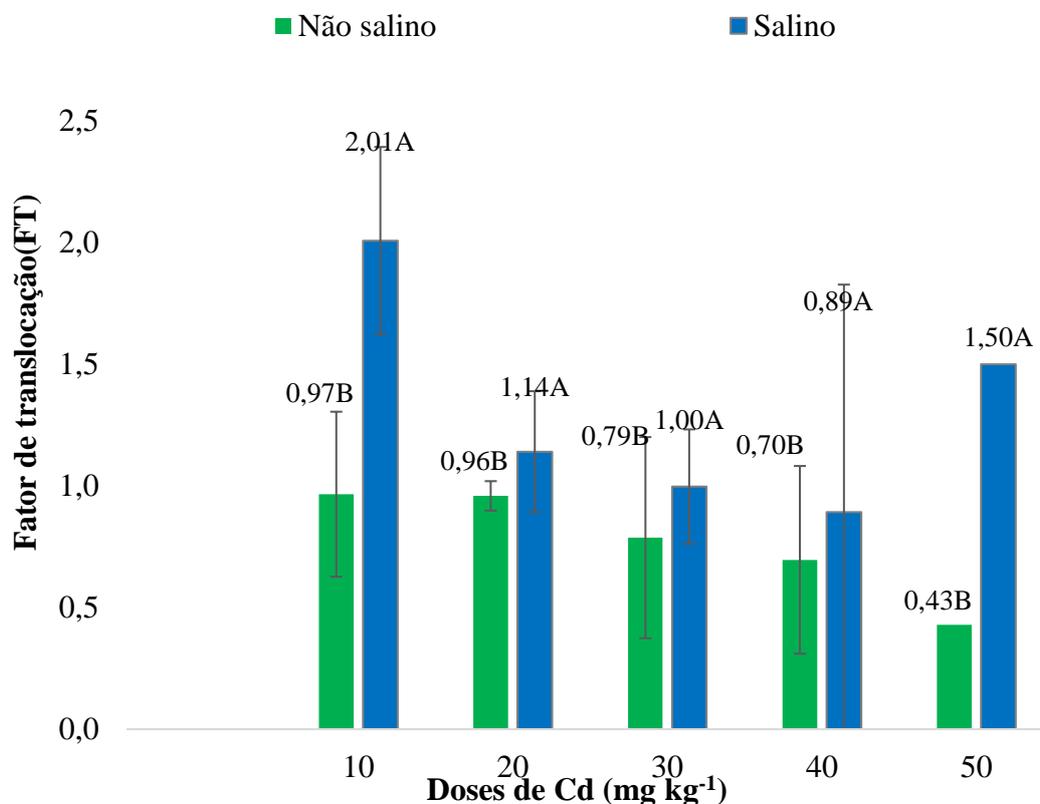
Comparativamente a outras culturas utilizadas na fitoextração quimicamente assistida, como o milho, Silva *et al.* (2020) conduziram um estudo visando melhorar a tolerância ao Cd em plantas de milho através da aplicação de doses de silício (Si) em solo com ou sem correção de pH. Eles observaram que, nos tratamentos sem silício, os teores de Cd na parte aérea foram de 26 mg kg⁻¹ e 15 mg kg⁻¹ para os valores de pH 4,6 e 6,5, respectivamente. Estes valores foram inferiores aos encontrados para *Atriplex nummularia* neste estudo, sugerindo uma alta capacidade natural desta espécie em acumular Cd em sua parte aérea.

4.4.3 Fator de Translocação

As plantas cultivadas no solo salino apresentaram um maior fator de translocação de Cd em comparação com aquelas cultivadas no solo não salino (Figura 29). Observou-se que a salinidade exerceu um efeito benéfico, aumentando a capacidade de translocação das raízes para a parte aérea, resultando em uma maior eficiência fitoextratora. Essa resposta positiva sugere uma adaptação específica das plantas ao ambiente salino, enfatizando a utilidade potencial da salinidade como um fator promotor na eficácia da fitoextração de cádmio.

O resultado revela um impacto significativo da salinidade na translocação de Cd pelas plantas, indicando uma resposta adaptativa notável das plantas cultivadas no solo salino. Esse efeito benéfico se traduziu em uma maior capacidade das plantas em transportar o cádmio das raízes para a parte aérea, resultando em uma eficiência fitoextratora aprimorada.

Figura 29 — Fator de translocação de Cd de *Atriplex nummularia* cultivada em doses crescentes de cádmio na presença e na ausência da salinidade.



As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão

Segundo McGrath e Zhao (2003), plantas com $FT > 1$ são consideradas acumuladoras de metais e adequadas para fitoextração de metais de solos contaminados. Neste estudo, os elevados valores de FT, que ultrapassaram 1,0, demonstraram que a planta possui a capacidade de acumular e translocar cádmio das raízes para a parte aérea, o que sugeriu que *A. nummularia* é uma espécie adequada para a fitoextração de Cd, porém, para validar este fato, seria necessário cultivá-la em solo contaminado não artificialmente.

Resultados semelhantes foram obtidos por Nedjimi *et al* (2022), onde a maior parte da absorção de Cd pela planta foi translocada para a parte aérea (146,59 mg kg⁻¹ de Cd a 34 mg kg⁻¹ de CdCl₂), isto foi confirmado pelo índice de translocação ($FT > 1$), que indicou o potencial de adequação desta halófito para fitoextração de Cd.

No estudo conduzido por Zang *et al.* (2020), que focou nas halófitas *Suaeda glauca* e *Limonium aureum*, foi investigada a influência da salinidade na acumulação e distribuição de Cd. Os resultados revelaram que, em ambas as espécies, a presença de salinidade promoveu um aumento na absorção e translocação do metal. No caso específico de *Limonium aureum*,

observou-se um aumento na quantidade de Cd excretado pelas glândulas salinas na superfície foliar.

Em uma pesquisa sobre a fitoextração de cádmio (Cd), conduzida por Kahli et al. (2021), foram examinadas três espécies halófitas do gênero *Atriplex* (*canescens*, *halimus* e *nummularia*), levando em consideração a presença ou ausência de sal. Os resultados revelaram que a adição de sal teve um impacto positivo no acúmulo de Cd nas três espécies, sendo mais pronunciado na concentração mais baixa de CdCl₂ (2 mg kg⁻¹). Os autores afirmaram que *A. nummularia* acumulou aproximadamente 1900 mg kg⁻¹ de Cd em suas folhas, com os valores mais elevados de fator de translocação medidos em 4, especialmente para o tratamento com 5 mg kg⁻¹ de CdCl₂.

5 CONCLUSÕES

A biomassa seca da parte aérea não foi afetada pelas doses de Cd em solo não salino, o que sugere que a *Atriplex* foi tolerante para esta variável até uma dose de Cd de 50 mg kg⁻¹. Entretanto, quando cultivada em solo salino observaram-se reduções dos rendimentos relativos em função do aumento da dose de Cd. As BR em relação a dose controle foram de 75, 57, 45, 39 e 40% para 10, 20, 30, 40 e 50 mg kg⁻¹ de Cd, respectivamente. A salinidade do solo favoreceu a produção de biomassa seca da parte aérea até 30 mg kg⁻¹ de Cd. Possivelmente houve um efeito aditivo do solo + metal nas doses de 40 e 50 mg kg⁻¹. Quanto as variáveis fisiológicas, não foi observado efeito do Cd para o potencial hídrico foliar, indicando que o turgor não foi o responsável por eventuais reduções de rendimentos. Entretanto, houve reduções da fotossíntese líquida, condutância estomática e na transpiração com o aumento das doses de cádmio. De todo modo, a eficiência do uso da água (EUA) foi maior sob condição de salinidade. Os teores médios de Cd na parte aérea de *Atriplex* foram de 49 e 25 mg kg⁻¹ para o solo salino e não-salino, respectivamente, indicando a influência positiva da salinidade no potencial de acumulação de Cd. A salinidade do solo otimizou o fator de translocação do Cd. Os resultados dessa pesquisa confirmam o efeito potencializador da salinidade no processo de acumulação de Cd pela *Atriplex nummularia* e que a salinidade do solo, bem como a capacidade natural? de tolerância ao Cd da *Atriplex*. Em função da falta de dados fisiológicos que associem salinidade e metal pesado, essa pesquisa será de grande relevância para trabalhos mais específicos de fitoextração de Cd.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, J. A; JANSEN, B; KALBITZ, K; FAZ, A; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. **Chemosphere**, v. 85, n. 8, p. 1318-1324, 2011.
- ALMEIDA, C. MARISA R.; MUCHA, ANA P.; VASCONCELOS, M. TERESA SD. Comparison of the role of the sea club-rush *Scirpus maritimus* and the sea rush *Juncus maritimus* in terms of concentration, speciation and bioaccumulation of metals in the estuarine sediment. **Environmental Pollution**, v. 142, n. 1, p. 151-159, 2006.
- ÁLVAREZ, S; GÓMEZ-BELLOT MJ, CASTILLO, M; BANON, S; SÁNCHEZ-BLANCO, MJ. Osmotic and saline effect on growth, water relations, and ion uptake and translocation in *Phlomis purpurea* plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 78, p. 138-145, 2012.
- AMARI, T.; GHNAYA, T.; ABDELLY, C. Nickel, cadmium and lead phytotoxicity and potential of halophytic plants in heavy metal extraction. **South African Journal of Botany**, v. 111, p. 99-110, 2017.
- AMJAD, M., IQBAL, M.M., ABBAS, G., FAROOQ, A.B.U., NAEEM, M.A., IMRAN, M., MURTAZA, B., NADEEM, M., AND JACOBSEN, S., Assessment of cadmium and lead tolerance potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and its implications for phytoremediation and human health. **Environmental Geochemistry and Health**, p. 1-14, 2022.
- ANDRADE, M.G.; MELO, F.V.; GABARDO, J.; SOUZA, P.L.C.; REISSMANN, C.B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. I – Fitoextração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1879-1888, 2009
- ANJUM, N. A; GILL, S. S; GILL, R; HASANUZZAMAN, M; DUARTE, A. C; PEREIRA; TUTEJA, N. Metal/metalloid stress tolerance in plants: role of ascorbate, its redox couple, and associated enzymes. **Protoplasma**, v. 6, p. 1265-1283, 2014.
- ARAÚJO, S.A.M., SILVEIRA, J.A.G., ALMEIDA, T.D., ROCHA, I.M.A., MORAIS, D.L., VIÉGAS, R.A. Salinity tolerance in the halophyte *Atriplex nummularia* Lind. grown under increasing NaCl levels. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 10, 848–854. 2006
- ASHFAQUE, F; INAM, A; SAHAY, S; IQBAL, S. Influence of heavy metal toxicity on plant growth, metabolism and its alleviation by phytoremediation-a promising technology. **Journal of Agriculture and Ecology Research International**, v. 6(2), p. 1-19, 2016.
- BAI, J.; ZHAO, Q; WANG, W; WANG, X; JIA, J; CUI, B; LIU, X. Arsenic and heavy metals pollution along a salinity gradient in drained coastal wetland soils: Depth distributions, sources and toxic risks. **Ecological indicators**, v. 96, p. 91-98, 2019.
- BAKER, Neil R.; ROSENQVIST, Eva. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of experimental botany**, v. 55, n. 403, p. 1607-1621, 2004.

BATES, L.S.; WALDREN, R.P.; TEARE, J.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.

BAZIHIZINA, NADIA; BARRETT-LENNARD, EDWARD G.; COLMER, TIMOTHY D. Plant growth and physiology under heterogeneous salinity. **Plant and soil**, v. 354, n. 1, p. 1-19, 2012.

BELKHEIRI, Oumelkheir; MULAS, Maurizio. The effects of salt stress on growth, water relations and ion accumulation in two halophyte *Atriplex* species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 86, p. 17-28, 2013.

BENZARTI, M.; REJEB, K. B.; DEBEZ, A.; MESSEDI, D.; ABDELLY, C. Photosynthetic activity and leaf antioxidative responses of *Atriplex portulacoides* subjected to extreme salinity. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 34, p. 1679-1688, 2012.

BILALIS, D. J; ROUSSIS, I; KAKABOUKI, I; KARYDOGIANNI, S. Effects of Salinity and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Root Growth Development and Productivity of Chia (*Salvia hispanica* L.), a Promising Salt-Tolerant Crop, Under Mediterranean Conditions. Handbook of Halophytes: From **Molecules to Ecosystems towards Biosaline Agriculture**, p.1-30, 2020.

BLUM, A. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. **Crop Science**, v. 29, n. 1, p. 230-233, 1989.

BONILLA, O. H. TABOSA, J. N.; GALLINDO, F. A. T.; AZEVEDO NETO, A. D. de. *Atriplex* –Nova forrageira para solos salinizados no semiárido nordestino. **Série documentos**. Recife: IPA, p.25, 2000.

BRIDGES, E M. The soils and their vulnerability to chemical pollution In: **MAPING OF SOIL AND TERRAIN VULNERABILITY TO SPECIFIED CHEMICAL COMPOUNDS IN EUROPE AT SCALE OF 1:5 M**, 1991, Wageningen, Holanda. **Anais**. Wageningen, Holanda, p. 125-135. 1991

CHANEY, R. L; ANGLE, J. S; BROADHURST, C. L; PETERS, C. A; TAPPERO, R. V; SPARKS, D. L. Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. **Journal of Environmental Quality**, v. 36, p. 1429-1443, 2007.

CHEN, L; LONG, C; WANG, D; YANG, J. Phytoremediation of cadmium (Cd) and uranium (U) contaminated soils by *Brassica juncea* L. enhanced with exogenous application of plant growth regulators. **Chemosphere**, v.242,p.125112, 2020.

CHEN, Q., LU, X., GUO, X., PAN, Y., YU, B., TANG, Z., & GUO, Q. Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant *Catharanthus roseus*. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 157, p. 266-275, 2018.

CHOPPALA, G., SAIFULLAH, BOLAN, N., BIBI, S., IQBAL, M., RENGEL, Z., ... & OK, Y. S. Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity. **Critical reviews in plant sciences**, v. 33, n. 5, p. 374-391, 2014.

CHOPPALA, G; SAIFULLAH, BOLAN, N; BIBI, S; IQBAL, M; RENGEL, Z; OK, Y. S. Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity. **Critical reviews in plant sciences**, v. 33, n. 5, p. 374-391, 2014.

CLEMENS, Stephan. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. **Biochimie**, v. 88, n. 11, p. 1707-1719, 2006.

CLEMENTE, R; WALKER, D. J; PARDO, T; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, D; BERNAL, M. P. The use of a halophytic plant species and organic amendments for the remediation of a trace elements- contaminated soil under semi-arid conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 223, p. 63-71, 2012.

CRAMER, Grant R.; LÄUCHLI, André; POLITO, Vito S. Displacement of Ca²⁺ by Na⁺ from the plasmalemma of root cells: a primary response to salt stress?. **Plant physiology**, v. 79, n. 1, p. 207-211, 1985.

DALCORSO, Giovanni; MANARA, Anna; FURINI, Antonella. An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. **Metallomics**, v. 5, n. 9, p. 1117-1132, 2013.

DE SOUZA, ER; DOS SANTOS FREIRE, MBG.; DA CUNHA, KPV; DO NASCIMENTO; CWA, RUIZ, HA.; LINS, CMT. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 82, p. 20-27, 2012.

DELF, E. Marion. Transpiration in succulent plants. **Annals of Botany**, v. 26, n. 102, p. 409-442, 1912.

DU LAING, G; DE VOS, R; VANDECASTEELE, B; LESAGE, E; TACK, F. M; VERLOO, M. G. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 77, n. 4, p. 589-602, 2008.

DUARTE, B; SANTOS, D; MARQUES, J. C; CAÇADOR, I. Ecophysiological adaptations of two halophytes to salt stress: photosynthesis, PS II photochemistry and anti-oxidant feedback—implications for resilience in climate change. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 67, p. 178-188, 2013.

DUFÉY, I; HAKIZIMANA, P; DRAYE, X; LUTTS, S.; BERTIN, P. QTL mapping for biomass and physiological parameters linked to resistance mechanisms to ferrous iron toxicity in rice. **Euphytica**, v. 167, n. 2, p. 143-160, 2009.

EDELSTEIN, M; BEN-HUR, M. Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. **Scientia Horticulturae**, v.234, p.431-444, 2018.

EISSA, Mamdouh A. Phytoextraction mechanism of Cd by *Atriplex lentiformis* using some mobilizing agents. **Ecological Engineering**, v. 108, p. 220-226, 2017.

EISSA, MAMDOUH A.; ABEED, AMANY HA. Growth and biochemical changes in quail bush (*Atriplex lentiformis* (Torr.) S. Wats) under Cd stress. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 628-635, 2019.

FANJUL, L.; BARRADAS, V. Diurnal and Seasonal Variation in the Water Relations of Some Deciduous and Evergreen Trees of a Deciduous Dry Forest of the Western Coast of Mexico. **The Journal of Applied Ecology**, v. 24, n. 1, p. 289, 1987.

FAO - Food and Agriculture Organization (Roma, Itália). Espécies Vegetales para las Zonas Aridas y Semiaridas de Chile y México. Roma, p.146, 1996.

FERRARINI, A; FRACASSO, A; SPINI, G; FORNASIER, F; TASKIN, E; FONTANELLA, M. C; PUGLISI, E. Bioaugmented phytoremediation of metal-contaminated soils and sediments by hemp and giant reed. **Frontiers in microbiology**, v. 12, p.645-893, 2021.

FILIPOVIĆ, L; ROMIĆ, M; ROMIĆ, D; FILIPOVIĆ, V; ONDRAŠEK, G. Organic matter and salinity modify cadmium soil (phyto) availability. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 147, p.824-831, 2018.

FITZGERALD, E. J; CAFFREY, J. M; NESARATNAM, S. T; MCLOUGHLIN, P. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland. **Environmental Pollution**, v.123, p.67-74, 2003.

FLOWERS, T. J.; TROKE, P. F.; YEO, A. R. The mechanism of salt tolerance in halophytes. **Annual review of plant physiology**, v. 28, n. 1, p. 89-121, 1977.

FLOWERS, Timothy J.; COLMER, Timothy D. Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. *Annals of botany*, v. 115, n. 3, p. 327-331, 2015.

FRANCIET, A.; LE HOUÉROU, H. N. **Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord**. Roma:FAO, p. 249, 1971

FREIRE, M. B. G. S; FREIRE, F. J; PESSOA, L. G. M; SOUZA, E. R. D; GHEYI, H. R. Salt Affected Soils in the Brazilian Semiarid and Phytoremediation as a Reclamation Alternative. In: *Saline and Alkaline Soils in Latin America*. **Springer**, Cham., p. 119-139, 2021.

GARCIA-CAPARROS, P; DE FILIPPIS, L; GUL, A; HASANUZZAMAN, M; OZTURK, M., ALTAY, V; LAO, M. T. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. **The Botanical Review**, v.87, p.421-466, 2021.

GHNAYA, T; NOUAIRI, I; SLAMA, I; MESSEDI, D; GRIGNON, C; ABDELLY, C; GHORBEL, M. H. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. **Journal of Plant Physiology**, v.162, p.1133-1140, 2005.

GHORI, N. H; GHORI, T; HAYAT, M. Q; IMADI, S. R; GUL, A.; ALTAY, V; OZTURK, M.. Heavy metal stress and responses in plants. **International journal of environmental science and technology**, v.16, p.1807-1828, 2019.

GILL, S; KHAN, N A.; TUTEJA, N. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). **Plant Science**, v. 182, p. 112-120, 2012.

GILL, SARVAJEET SINGH; KHAN, NAFEES A.; TUTEJA, NARENDRA. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). **Plant Science**, v. 182, p. 112-120, 2012.

GLENN, E.; BROWN, J.; BLUMWALD, E. Salt tolerance and crop potential of halophytes **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 18, n. 2, p. 227-255, 1999.

GLENN, Edward P.; BROWN, J. Jed. Effects of soil salt levels on the growth and water use efficiency of *Atriplex canescens* (Chenopodiaceae) varieties in drying soil. **American Journal of Botany**, v. 85, n. 1, p. 10-16, 1998.

GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. **Scientia horticulturae**, v. 78, n. 1-4, p. 127-157, 1998.

GRIEVE, C.M.; GRATTAN, S. R. Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. **Plant and Soil**. v.70, p. 303-307, 1983.

HAIDER, F. U; LIQUN, C; COULTER, J. A.; CHEEMA, S. A; WU, J; ZHANG, R; FAROOQ, M. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 211, p. 111887, 2021.

HAMED, K. B; ELLOUZI, H; TALBI, O. Z; HESSINI, K; SLAMA, I; GHNAYA, T; ABDELLY, C. Physiological response of halophytes to multiple stresses. **Functional Plant Biology**, v.40, p.883-896, 2013.

HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; ZHU, J. K.; BOHNERT, H. J. Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review of Plant Physiology**, v.51, p.63-99, 2000.

HASSINE, Abir Ben; LUTTS, Stanley. Differential responses of saltbush *Atriplex halimus* L. exposed to salinity and water stress in relation to senescing hormones abscisic acid and ethylene. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, n. 17, p. 1448-1456, 2010.

HUANG, C., ZENG, G., HUANG, D., LAI, C., XU, P., ZHANG, C., ... & ZHANG, Y. Effect of *Phanerochaete chrysosporium* inoculation on bacterial community and metal stabilization in lead-contaminated agricultural waste composting. **Bioresource technology**, v. 243, p. 294-303, 2017.

HUANG, D; GONG, X; LIU, Y; ZENG, G; LAI, C; BASHIR, H; WAN, J. Effects of calcium at toxic concentrations of cadmium in plants. **Planta**, v. 245, n. 5, p. 863-873, 2017.

IVUSHKIN, K; BARTHOLOMEUS, H; BREGT, A. K; PULATOV, A; KEMPEN, B; DE SOUSA, L. Global mapping of soil salinity change. **Remote sensing of environment**, v231, p.111-260, 2019.

KABATA-PENDIAS, Alina. **Trace elements in soils and plants**. CRC press, 2000.

KACHOUT, S. S; LECLERC, J. C; MANSOURA, A. B; REJEB, M. N; OUERGHI, Z. Effects of heavy metals on growth and bioaccumulation of the annual halophytes *Atriplex hortensis* and *A. rosea*. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 5, n. 7, p. 746-756, 2009.

KAHLI, H.; SBARTAI, H; COHEN-BOUHACINA, T; BOURGUIGNON, J. Characterization of cadmium accumulation and phytoextraction in three species of the genus *Atriplex* (*canescens*, *halimus* and *nummularia*) in the presence or absence of salt. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 902-911, 2021.

KAHLI, H; SBARTAI, H; COHEN-BOUHACINA, T; BOURGUIGNON, J. Characterization of cadmium accumulation and phytoextraction in three species of the genus *Atriplex* (*canescens*, *halimus* and *nummularia*) in the presence or absence of salt. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.166, p. 902-911, 2021.

KATAWETEETHAM, L; RONG, G., ZHU, J; CHU, Y; LIU, S. Dendroremediation of metal and metalloid elements with poplar and willow in the floodplain area downstream a mining hill, Tongling, China. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Vol. 453, No. 1, p. 012026, 2020.

KHAN, M. Ajmal; UNGAR, Irwin A.; SHOWALTER, Allan M. Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. *stocksii*. **Annals of Botany**, v. 85, n. 2, p. 225-232, 2000.

KHARE, RIA; JAIN, PRATEEK. Salt Ion and Nutrient Interactions in Crop Plants: Prospective Signaling. **Physiology of Salt Stress in Plants: Perception, Signalling, Omics and Tolerance Mechanism**, p. 74-86, 2021.

L. HEIDA. Coastal conservation Brooke Maslo, L. Julie (Eds.), Mar. Biol. Res., Lockwood Cambridge University Press, **Cambridge**, UK p. 382. 2014.

LEFÈVRE, I; VOGEL-MIKUŠ, K. A. T. A. R. I. N. A; JEROMEL, L; VAVPETIČ, P; PLANCHON, S; ARČON, I; LUTTS, S. Differential cadmium and zinc distribution in relation to their physiological impact in the leaves of the accumulating *Zygophyllum fabago* L. **Plant, cell & environment**, v. 37, n. 6, p. 1299-1320, 2014.

LEITE, M. C. D. B. S; DOS SANTOS FREIRE, M. B. G; DE QUEIROZ, J. V. J; MAIA, L. C., DUDA, G. P; DE MEDEIROS, E. V. Mycorrhizal *Atriplex nummularia* promote revegetation and shifts in microbial properties in saline Brazilian soil. **Applied Soil Ecology**, v. 153, p. 103574, 2020.

LI, G; WAN, S; ZHOU, J; YANG, Z; QIN, P. Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. **Industrial crops and products**, v. 31, n. 1, p. 13-19, 2010.

LI, J. T; GURAJALA, H. K; WU, L. H.; VAN DER ENT, A; QIU, R. L.; BAKER, A. J; SHU, W. S. Hyperaccumulator plants from China: a synthesis of the current state of knowledge. **Environmental science & technology**, v. 52, n. 21, p. 11980-11994, 2018.

LI, S., YANG, W., YANG, T., CHEN, Y., & NI, W. Effects of cadmium stress on leaf chlorophyll fluorescence and photosynthesis of *Elsholtzia argyi*—a cadmium accumulating plant. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17, n. 1, p. 85-92, 2015.

LIANG, L.; LIU, W.; SUN, Y.; HUO, X.; LI, S.; ZHOU, Q. Phytoremediation of heavy metal contaminated saline soils using halophytes: current progress and future perspectives. **Environmental Reviews**, v. 25, n. 3, p. 269-281, 2017.

LICHTENTHALER, Hartmut K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.

LINDHAUER, Meinolf G.; HAEDER, Hans E.; BERINGER, Helmut. Osmotic potentials and solute concentrations in sugar beet plants cultivated with varying potassium/sodium ratios. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 153, n. 1, p. 25-32, 1990.

LINS, C. M. T., DE SOUZA, E. R., DE MELO, H. F., PAULINO, M. K. S. S., DOURADO, P. R. M., DE CARVALHO LEAL, L. Y., SANTOS, H. R. B. Pressure-volume (PV) curves in *Atriplex nummularia* Lindl. for evaluation of osmotic adjustment and water status under saline conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 124, p. 155-159, 2018.

LINS, C. M. T.; DE SOUZA, E. R.; DE MELO, H. F.; PAULINO, M. K. S. S.; DOURADO, P. R. M.; DE CARVALHO LEAL, L. Y.; SANTOS; HRB. Pressure-volume (PV) curves in *Atriplex nummularia* Lindl. for evaluation of osmotic adjustment and water status under saline conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 124, p. 155-159, 2018.

LIPHADZI, M. S.; KIRKHAM, M. B.; MUSIL, C. F. Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals: a technology for rehabilitation of the environment. **South African Journal of Botany**, v. 71, n. 1, p. 24-37, 2005.

LIU, J. J.; DIAO, Z. H.; XU, X. R.; XIE, Q. Effects of dissolved oxygen, salinity, nitrogen and phosphorus on the release of heavy metals from coastal sediments. **Science of the Total Environment**, v. 666, p. 894-901, 2019.

LOKHANDE, VINAYAK H.; SUPRASANNA, PENNA. Prospects of halophytes in understanding and managing abiotic stress tolerance. In: *Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change*. Springer, New York, NY, p. 29-56, 2012

LOKHANDE, Vinayak H.; SUPRASANNA, Penna. Prospects of halophytes in understanding and managing abiotic stress tolerance. **Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change**, p. 29-56, 2012.

LOPEZ-CHUKEN, Ulrico J.; YOUNG, Scott D.; SANCHEZ-GONZALEZ, Monica N. The use of chloro-complexation to enhance cadmium uptake by *Zea mays* and *Brassica juncea*: testing a “free ion activity model” and implications for phytoremediation. **International journal of phytoremediation**, v. 12, n. 7, p. 680-696, 2010.

LU, C., YUAN, F., GUO, J., HAN, G., WANG, C., CHEN, M., & WANG, B. Current understanding of role of vesicular transport in salt secretion by salt glands in cretorehalophytes. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 4, p. 2203, 2021.

LUTTS, S. LEFÈVRE, I. How can we take advantage of halophyte properties to cope with heavy metal toxicity in salt-affected areas?. *Annals of botany*, v. 115, n. 3, p. 509-528, 2015.

MA, Q.; YUE, L. J.; ZHANG, J. L.; WU, G. Q.; BAO, A. K.; WANG, S. M. Sodium chloride improves photosynthesis and water status in the succulent *xerophyte Zygophyte xanthoxylum* **Tree Physiology**, v.32, p.4-13, 2011.

MADANAN, M. T; SHAH, I. K; VARGHESE, G. K; KAUSHAL, R. K.. Application of Aztec Marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, v. 03, p.17-22, 2021.

MALAVOLTA, E; VITTI, G. C; DE OLIVEIRA, S. A. Evaluation of the nutritional state of plants: principles and applications. **Evaluation of the nutritional state of plants: principles and applications.**, 1989.

MANOUSAKI, E; KALOGERAKIS, N. Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush(*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 16, n. 7, p. 844-854, 2009.

MANOUSAKI, ELENI; KALOGERAKIS, NICOLAS. Halophytes—an emerging trend in phytoremediation. **International Journal of Phytoremediation**, v. 13, n. 10, p. 959-969, 2011.

MARCHIOL, L.; ASSOLARI, S.; SACCO, P.; ZERBI, G. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Bassica napus*) and radish (*Raphanus sativas*)grown on multicontaminated soil. *Environ. Pollution* 132:21-27,2004.

MARQUES, B; LILLEBØ, A. I; PEREIRA, E; DUARTE, A. C. Mercury cycling and sequestrationin salt marshes sediments: an ecosystem service provided by *Juncus maritimus* and *Scirpus maritimus*. **Environmental Pollution**, v. 159, p.1869-1876, 2011.

MAXWELL, Kate; JOHNSON, Giles N. Chlorophyll fluorescence a practical guide. **Journal of experimental botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000.

MCGRATH, Steve P.; ZHAO, Fang-Jie. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. **Current opinion in biotechnology**, v. 14, n. 3, p. 277-282, 2003.

MCLAUGHLIN, Michael J.; TILLER, K. G.; SMART, M. K. Speciation of cadmium in soil solutionsof saline/sodic soils and relationship with cadmium concentrations in potato tubers (*Solanumtuberosum* L.). **Soil Research**, v. 35, n. 1, p. 183-198, 1997.

MEGDICHE, W.; HESSINI, K.; GHARBI, F.; JALEEL, C. A.; KSOURI, R.; ABDELLY, C. Photosynthesis and photosystem 2 efficiency of two salt-adapted halophytic seashore *Cakile maritima* ecotypes. **Photosynthetica**, v. 46, p. 410-419, 2008.

MEHTA, P; KRASLAVSKY, V; BHARTI, S; ALLAKHVERDIEV, S. I; JAJOO, A. Analysis of salt stress induced changes in Photosystem II heterogeneity by prompt fluorescence and delayed fluorescence in wheat (*Triticum aestivum*) leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 104, n. 1-2, p. 308-313, 2011.

MELO, H. F. de; SOUZA, E. R. de; CUNHA, J.C. Fluorescence of chlorophyll a and photosynthetic pigments in *Atriplex nummularia* under abiotic stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 232-237, 2017.

MELO, H. F.; DE SOUZA, E. R.; DE ALMEIDA, B. G.; MULAS, M. Water potential in soil and *Atriplex nummularia* (phytoremediator halophyte) under drought and salt stresses. **International journal of phytoremediation**, v. 20, n. 3, p. 249-255, 2018

MESNOUA, M., MATEOS-NARANJO, E., BARCIA-PIEDRAS, J. M., PÉREZ-ROMERO, J. A., LOTMANI, B., & REDONDO-GÓMEZ, S. Physiological and biochemical mechanisms preventing Cd-toxicity in the hyperaccumulator *Atriplex halimus* L. **Plant physiology and biochemistry**, v. 106, p. 30-38, 2016.

MESNOUA, M., MATEOS-NARANJO, E., BARCIA-PIEDRAS, J. M., PÉREZ-ROMERO, J. A., LOTMANI, B., & REDONDO-GÓMEZ, S. Physiological and biochemical mechanisms preventing Cd-toxicity in the hyperaccumulator *Atriplex halimus* L. **Plant physiology and biochemistry**, v. 106, p. 30-38, 2016.

MESNOUA, M.; MATEOS-NARANJO, E.; BARCIA-PIEDRAS, J. M.; PÉREZ-ROMERO, J. A.; LOTMANI, B.; REDONDO-GÓMEZ, S. Physiological and biochemical mechanisms preventing Cd-toxicity in the hyperaccumulator *Atriplex halimus* L. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 30-38, 2016.

MIRANDA, M. F. A., FREIRE, M. B. G. D. S., ALMEIDA, B. G., FREIRE, A. G., FREIRE, F. J., & PESSOA, L. G. M. Improvement of degraded physical attributes of a saline-sodic soil as influenced by phytoremediation and soil conditioners. **Archives of agronomy and soil science**, v. 64, n. 9, p. 1207-1221, 2018.

MISHRA, Avinash; TANNA, Bhakti. Halophytes: potential resources for salt stress tolerance genes and promoters. **Frontiers in plant Science**, v. 8, p. 829, 2017.

MOMIROVIĆ, N; KADOVIĆ, R; PEROVIĆ, V; MARJANOVIĆ, M; BAUMGERTEL, A. Spatial assessment of the areas sensitive to degradation in the rural area of the municipality Čukarica. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 07, p.71-80, 2019.

MOUGET, Jean-Luc; TREMBLIN, Gérard. Suitability of the fluorescence monitoring system (FMS, Hansatech) for measurement of photosynthetic characteristics in algae. **Aquatic Botany**, v. 74, n. 3, p. 219-231, 2002.

MUJEEB, A; AZIZ, I; AHMED, M. Z; ALVI, S. K; SHAFIQ, S. Comparative assessment of heavy metal accumulation and bio-indication in coastal dune halophytes. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 195, p. 110486, 2020.

MUNNS, Rana. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 239-250, 2002.

NASCIMENTO, C. W. A. D., BIONDI, C. M., SILVA, F. B. V. D., & LIMA, L. H. V. Using plants to remediate or manage metal-polluted soils: an overview on the current state of phytotechnologies. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, 2021.

NASCIMENTO, C. W. A; AMARASIRIWARDENA, D; XING, B. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. **Environmental Pollution**, v.140, p.114-123, 2006.

NEDJIMI, B; GUIT, B; KACIMI, M. E; DAOUD, Y. Cd-Phytoextraction Potential of *Atriplex nummularia* Lindl. **Biology Bulletin**, v. 49, n. 5, p. 466-475, 2022.

NEDJIMI, Bouzid; DAOUD, Youcef. Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 204, n. 4, p. 316-324, 2009.

NIKALJE, G.C.; SUPRASANNA, P. Coping with metal toxicity—cues from halophytes. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 777, 2018.

NIKALJE, Ganesh C.; SUPRASANNA, Penna. Coping with metal toxicity—cues from halophytes. **Frontiers in plant science**, v.9, p.777, 2018.

NKOMO, M; GOKUL, A; KEYSTER, M; KLEIN, A. O ácido p-cumárico exógeno melhora o crescimento de brotos de plântulas de *Salvia hispanica* L. **Plants**, v.8, p.546, 2019.

NOOR, I.; SOHAIL, H; SUN, J; NAWAZ, M. A.; LI, G., HASANUZZAMAN, M; LIU, J. Heavy metal and metalloid toxicity in horticultural plants: Tolerance mechanism and remediation strategies. **Chemosphere**, p. 135-190, 2022.

OKON, Okon Godwin. Effect of salinity on physiological processes in plants. In: *Microorganisms in saline environments: strategies and functions*. Springer, Cham, p. 237-262, 2019

OLIVARES, A. Los arbustos del género *Atriplex* y su importancia como especies forrageras. In: *Actas del encuentro del estado de las investigaciones sobre manejo silvopastoral en Chile. Proyecto CONAF/PNUD/FAO*. Talca, Universidad de Talca, Dpt°. Ing. Florestal. P. 5-13, 1983.

OLIVEIRA, W. J.; SOUZA, E. R.; CUNHA, J. C.; SILVA, E. F. F.; VELOSO, V. L. Leaf gas exchange in cowpea and CO₂ efflux in soil irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 32-37, 2017.

PAGE, VALÉRIE; FELLER, URS. HEAVY. Metals in crop plants: transport and redistribution processes on the whole plant level. **Agronomy**, v. 5, n. 3, p. 447-463, 2015.

PARIDAS, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.60, p.324-349, 2005

PARVEZ, S., ABBAS, G., SHAHID, M., AMJAD, M., HUSSAIN, M., ASAD, S. A., ... NAEEM, M. A., Effect of salinity on physiological, biochemical and photostabilizing attributes of two genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) exposed to arsenic stress. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 187, p. 109814, 2020.

PAULINO, M. K. S. S; DE SOUZA, E. R; LINS, C. M. T; DOURADO, P. R. M; DE CARVALHO LEAL, L. Y; MONTEIRO, D. R; DE CARVALHO SILVA, C. U. Influence of vesicular trichomes of *Atriplex nummularia* on photosynthesis, osmotic adjustment, cell wall elasticity and enzymatic activity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 177-186, 2020

PEREIRA, M. E; LILLEBØ, A. I; PATO, P; VÁLEGA, M; COELHO, J. P., LOPES, C. B; DUARTE, A. C. Mercury pollution in Ria de Aveiro (Portugal): a review of the system assessment. **Environmental monitoring and assessment**, v.155, p. 39-49, 2009.

REBOREDA, ROSA; CAÇADOR, ISABEL. Halophyte vegetation influences in salt marsh retention capacity for heavy metals. **Environmental Pollution**, v. 146, n. 1, p. 147-154, 2007.

REDONDO-GÓMEZ, Susana; MATEOS-NARANJO, Enrique; ANDRADES-MORENO, Luis. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a halophytic Cd-hyperaccumulator, *Arthrocnemum macrostachyum*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 184, n. 1-3, p. 299-307, 2010.

RIAZ, M; YAN, L; WU, X; HUSSAIN, S; AZIZ, O; JIANG, C. Mechanisms of organic acids and boron induced tolerance of aluminum toxicity: a review. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 165, p. 25-35, 2018.

RODECAP, K.D.; DAVID, T.T.; LEE, E.H. Iron nutrition influence on cadmium accumulation by *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. **Journal of Environmental Quality, Madison**, v.23, p.239-246, 1994

ROSENQVIST, E.; KOOTEN, O. V. Chlorophyll fluorescence: a general description and nomenclature. In: DeEll, J. R.; Toivonen, P. M. A. (Ed.). Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology. **Dordrecht: Kluwer Academic Publisher**, 2003. p. 31 - 77.

RUBIO, M; MERA, M. F; CAZÓN, S; RUBIO, M. E; PÉREZ, C. A. (2020). SR micro-XRF to study Pb diffusion using a one-dimensional geometric model in leaves of *Brassica napus* for phytoremediation. **Radiation Physics and Chemistry**, v.167, p. 108-291, 2020.

SACHDEV, S; ANSARI, S. A; ANSARI, M. I; FUJITA, M; HASANUZZAMAN, M. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, v. 10, p. 277, 2021

SARRY, J. E., KUHN, L., DUCRUIX, C., LAFAYE, A., JUNOT, C., HUGOUVIEUX, V & BOURGUIGNON, J. The early responses of *Arabidopsis thaliana* cells to cadmium exposure explored by protein and metabolite profiling analyses. **Proteomics**, v. 6, n. 7, p. 2180-2198, 2006.

SARWAR, N; SAIFULLAH, MALHI, S. S; ZIA, M. H; NAEEM, A; BIBI, S; FARID, G. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 90, n. 6, p. 925-937, 2010.

SBARTAI S; RACHID, R., IBTISSEM, S., HOURIA, B., & MOHAMMED-RÉDA, D. Induction of anti-oxidative enzymes by cadmium stress in tomato (*Lycopersicon esculentum*). **Afr J Plant Sci**, v. 2, p. 072-076, 2008.

SBARTAI, H., DJEBAR, M. R., SBARTAI, I., & BERRABBAH, H. Bioaccumulation du Cd et du Zn chez les plants de tomates (*Lycopersicon esculentum* L.). **Comptes Rendus Biologies**, v. 335, n. 9, p. 585-593, 2012.

SCHOLANDER, P. *et al.* Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured. **Plants Science**, v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965.

SCHULTE, P. J.; HINCKLEY, T. M. A comparison of pressure-volume curve data analysis techniques. **Journal of Experimental Botany**, v. 36, n. 10, p. 1590-1602, 1985.

SEREGIN, I. V.; IVANOV, V. B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. **Russian journal of plant physiology**, v. 48, p. 523-544, 2001.

SHAH, VIJENDRA; DAVEREY, ACHLESH. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 18, p. 100774, 2020.

SHAHID, S. A; ZAMAN, M; HENG, L. Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. In *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques* Springer, p. 43-50, 2018.

SHAHZAD, B; TANVEER, M; CHE, Z; REHMAN, A; CHEEMA, S. A; SHARMA, A; ZHAORONG, D. Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: a review. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 147, p. 935-944, 2018.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A. S.; POONIA, P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 168-214, 2010.

SHRIVASTAVA, POOJA; KUMAR, RAJESH. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. **Saudi journal of biological sciences**, v. 22, n. 2, p. 123-131, 2015.

SHRUTI, M., DUBEY, Heavy metal uptake and detoxification mechanisms in plants. **International Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 7, p. 482-501, 2010.

SHU, S., YUAN, L. Y., GUO, S. R., SUN, J., & YUAN, Y. H. Effects of exogenous spermine on chlorophyll fluorescence, antioxidant system and ultrastructure of chloroplasts in *Cucumis sativus* L. under salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 63, p. 209-216, 2013.

SILVA, J. R., VELOSO, V. D. L., SILVA, F. B. V. D., & NASCIMENTO, C. W. A. D. Cadmium, silicon and nutrient accumulation by maize plants grown on a contaminated soil amended with a diatomaceous Earth fertilizer. **Ciência Rural**, v. 51, 2020.

SILVEIRA, J. A. G.; VIÉGAS, R. A.; ROCHA, I. M. A.; MOREIRA, A. C. D. M.; OLIVEIRA, J. T. A. Proline accumulation and glutamine synthetase activity are increased by salt-induced proteolysis in cashew leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, p. 115-123, 2003.

SILVEIRA, J. A. G; ARAÚJO, S. A. M; LIMA, J. P. M. S; VIÉGAS, R. A. Roots and leaves display contrasting osmotic adjustment mechanisms in response to NaCl-salinity in *Atriplex nummularia*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 66, n. 1, p. 1-8, 2009.

SINGH, M; SINGH, A; PRASAD, S. M; SINGH, R. K. Regulation of plants metabolism in responseto salt stress: an omics approach. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, n. 2, p. 1-17, 2017.

SINGH, P. K.; TEWARI, R. K. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. **Journal of Environmental Biology**, v. 24, n. 1, p. 107-112, 2003.

SOUZA, E. R., DOS SANTOS FREIRE, M. B. G., DE MELO, D. V. M., & DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO, A. A. Management of *Atriplex nummularia* Lindl. in a salt affected soil in a semiarid region of Brazil. **International Journal of Phytoremediation**, v. 16, n. 1, p. 73-85, 2014.

SOUZA, E. R; DOS SANTOS FREIRE, M. B. G; DA CUNHA, K. P. V; DO NASCIMENTO, C. W. A; RUIZ, H. A; LINS, C. M. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 82, p. 20-27, 2012.

SRUTHI, PALLIYATH; SHACKIRA, ABDUL MAJEED; PUTHUR, JOS T. Heavy metal detoxification mechanisms in halophytes: an overview. **Wetlands ecology and management**, v. 25,n. 2, p. 129-148, 2016

STRASSER, B. J.; STRASSER, R. J. Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: The JIP-test. In: Mathis, P. (Ed.). *Photosynthesis: from light to biosphere*. Dordrecht: **Kluwer Academic Publisher**, 1995. p. 977- 980.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal** . 5. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, p. 954,

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 722 p

TAIZ, Lincoln *et al.* **Plant physiology and development**. Sinauer Associates Incorporated, 2015.

TANDON, K; JOHN, M; HEUSS-ABBICHLER, S; SCHALLER, V. Influence of Salinity and Pb onthe Precipitation of Zn in a Model System. **Minerals**, v. 8, n. 2, p. 43, 2018.

TAUQEER, H. M; ALI, S; RIZWAN, M; ALI, Q; SAEED, R; IFTIKHAR, U; ABBASI, G. H.. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: growth and physiological response. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 126, p. 138-146, 2016.

TIWARI, S.; LATA, C. Heavy metal stress, signaling, and tolerance due to plant associated microbes: na overview. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 452, 2018.

TÜRKAN, Ismail; DEMIRAL, Tijen. Desenvolvimentos recentes na compreensão da tolerância àsalinidade. **Botânica Ambiental e Experimental** , v. 67, n. 1, pág. 2-9, 2009.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (1996). **Method 3050B**: Acid Digestion of Sludges, Sediments, and Soils, Revision 2. Washington DC.

VACHERON, J; DESBROSSES, G; BOUFFAUD, M. L; TOURAINE, B; MOËNNE-LOCCOZ, Y; MULLER, D; PRIGENT-COMBARET, C. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in plant science**, v.4, p. 356, 2013.

VAN OOSTEN, MICHAEL JAMES; MAGGIO, ALBINO. Functional biology of halophytes in the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **Environmental and experimental botany**, v.111, p. 135-146, 2015.

VERBRUGGEN, NATHALIE; HERMANS, CHRISTIAN; SCHAT, Henk. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. **Current opinion in plant biology**, v. 12, n. 3, p. 364-372, 2009.

VOLKMAR, K. M.; HU, Y.; STEPPUHN, H. Physiological responses of plants to salinity: a review. **Canadian journal of plant science**, v. 78, n. 1, p. 19-27, 1998.

X. YANG; YONG YANG; YONGYONG WAN; RUOJING WU; DEKUN FENG; KE LI. Source identification and comprehensive apportionment of the accumulation of soil heavy metals by integrating pollution landscapes, pathways, and receptors Sci. **Total Environ**, 2021

WALI, M., GUNSE, B., LLUGANY, M., CORRALES, I., ABDELLY, C., POSCHENRIEDER, C., & GHNAYA, T. High salinity helps the halophyte *Sesuvium portulacastrum* in defense against Cd toxicity by maintaining redox balance and photosynthesis. **Planta**, v. 244, n. 2, p. 333-346, 2016.

WALI, M; GUNSE, B; LLUGANY, M; CORRALES, I; ABDELLY, C; POSCHENRIEDER, C; GHNAYA, T. High salinity helps the halophyte *Sesuvium portulacastrum* in defense against Cd toxicity by maintaining redox balance and photosynthesis. **Planta**, v. 244, p. 333-346, 2016.

WAN, X; LEI, M; YANG, J; CHEN, T. Three-year field experiment on the risk reduction, environmental merit, and cost assessment of four in situ remediation technologies for metal (loid)- contaminated agricultural soil. **Environmental Pollution**, 266, 115193, 2020

WANG, H. L., TIAN, C. Y., JIANG, L., WANG, L. Remediation of heavy metals contaminated saline soils: a halophyte choice?. **Environ. Science Technology**. 2014.

WANG, H. L; TIAN, C. Y; JIANG, L; WANG, L. Remediation of heavy metals contaminated saline soils: a halophyte choice?, 2014;

WANG, L; JI, B; HU, Y; LIU, R; SUN, W. A review on in situ phytoremediation of metal tailings. **Chemosphere**, v.184, p. 594-600, 2017.

WANG, M; ZHENG, Q; SHEN, Q; GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. **International journal of molecular sciences**, v. 14, n. 4, p. 7370-7390, 2013.

WANG, M; ZHENG, Q; SHEN, Q; GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. **International journal of molecular sciences**, v. 14, n. 4, p. 7370-7390, 2013.

WANG, S. L; XU, X. R; SUN, Y. X; LIU, J. L; LI, H. B. Heavy metal pollution in coastal areas of SouthChina: a review. **Marine pollution bulletin**, v. 76, n. 1-2, p. 7-15, 2013.

WANG, Y; JIANG, X; LI, K; WU, M., ZHANG, R.; ZHANG, L; CHEN, G. Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses. **Biometals**, v. 27, n. 2, p. 389-401, 2014.

WEN, X; LU, J; WU, J; LIN, Y; LUO, Y. Influence of coastal groundwater salinization on the distribution and risks of heavy metals. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 267-277, 2019.

WENZEL, Walter W. Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation(phytoremediation) of soils. **Plant and Soil**, v. 321, n. 1, p. 385-408, 2009.

YAÑEZ-YAZLLE, M. F; ROMANO-ARMADA, N; ACRECHE, M. M; RAJAL, V. B; IRAZUSTA, V. P. Halotolerant bacteria isolated from extreme environments induce seed germination and growth of chia (*Salvia hispanica* L.) and quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under saline stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 218, p. 112273, 2021.

YANG, Q; LI, Z; LU, X; DUAN, Q; HUANG, L; BI, J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. **Science of the total environment**, v. 642, p. 690-700, 2018.

YU, F; LIU, K; YE, P; ZHOU, Z; CHEN, C; LI, Y. Manganese tolerance and accumulation characteristics of a woody accumulator *Camellia oleifera*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 21329-21339, 2019.

ZALEWSKA, TAMARA; DANOWSKA, BEATA. MARINE. Environment status assessment based on macrophytobenthic plants as bio-indicators of heavy metals pollution. **Marine Pollution Bulletin**, v. 118, n. 1-2, p. 281-288, 2017.

ZEMANOVÁ, V., PAVLÍK, M., PAVLÍKOVÁ, D., HNILIČKA, F., & VONDRÁČKOVÁ, S. Responses to Cd stress in two *Noccaea* species (*Noccaea praecox* and *Noccaea caerulescens*) originating from two contaminated sites in Mežica, Slovenia and Redlschlag, Austria. **Archives of environmental contamination and toxicology**, v. 70, p. 464-474, 2016.

ZHANG CHENGJUN, Zhang ChengJun; SALE, P. W. G.; TANG CAIXIAN, Tang CaiXian. Cadmium uptake by *Carpobrotus rossii* (Haw.) Schwantes under different saline conditions. 2016.

ZHANG, S; NI, X; ARIF, M; ZHENG, J; STUBBS, A; LI, C. NaCl improved Cd tolerance of the euhalophyte *Suaeda glauca* but not the recretohalophyte *Limonium aureum*. **Plant and Soil**, v. 449, p. 303-318, 2020.

ZHAO, S; FENG, C; WANG, D; LIU, Y; SHEN, Z. Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: relative role of sediments' properties and metal speciation. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 977-984, 2013.

ZHOU, WENBIN; QIU, BAOSHENG. Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedum alfredii* Hance (Crassulaceae). **Plant Science**, v. 169, n. 4, p. 737-745, 2005.