



Efeitos da salinidade na germinação e no crescimento de plântulas de cacauero

Effects of salinity on germination and growth of cocoa seedlings

I. N. Jardim^{1*}; K. M. Machado²

¹Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Pará, 68372-040, Altamira-Pará, Brasil

²Faculdade de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal do Pará, 68372-040, Altamira-Pará, Brasil

*jardim@ufpa.br

(Recebido em 08 de julho de 2025; aceito em 21 de julho de 2026)

Theobroma cacao L., pertencente à família Malvaceae, é uma espécie de grande importância econômica e social, porém sensível à disponibilidade hídrica e a condições abióticas desfavoráveis, como a salinidade do solo. Apesar da expansão do cultivo de *T. cacao* no Brasil, ainda são escassas as informações sobre os efeitos da salinidade na germinação e no desenvolvimento inicial da espécie. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes níveis de salinidade sobre a germinação e o crescimento inicial de *T. cacao*. No experimento de germinação, sementes da espécie foram submetidas a diferentes concentrações de cloreto de sódio (17, 34, 51, 68, 85 e 102 mM de NaCl), constituindo os tratamentos. Para a avaliação do crescimento inicial das plântulas, utilizaram-se as sementes germinadas, as quais foram semeadas em tubetes contendo fibra de coco como substrato e mantidas em viveiro. Nesse experimento, foram testadas as concentrações de 17, 34 e 51 mM de NaCl; a água destilada foi utilizada como controle em ambos os experimentos. Foram avaliados parâmetros fisiológicos, morfológicos e nutricionais das plântulas. A salinidade afetou negativamente a germinação, o índice de velocidade de germinação, a matéria seca da parte aérea e o comprimento da raiz principal, além de reduzir os teores de macronutrientes (K, Ca e Mg). A partir de 34 mM de NaCl, observou-se redução significativa no desenvolvimento das plântulas, indicando baixa tolerância da espécie à salinidade.

Palavras-chave: cacau, estresse salino, *Theobroma cacao*.

Theobroma cacao L., belonging to the Malvaceae Family, is a species of great economic and social importance, but it is sensitive to water availability and to unfavorable abiotic conditions, such as soil salinity. Despite the expansion of *T. cacao* cultivation in Brazil, information on the effects of salinity on seed germination and early seedling development remains scarce. This study aimed to evaluate the influence of different salinity levels on the germination and initial growth of *T. cacao*. In the germination experiment, seeds were subjected to different concentrations of sodium chloride (17, 34, 51, 68, 85, and 102 mM NaCl), which constituted the treatments. For the assessment of initial seedling growth, germinated seeds were sown in tubes filled with coconut fiber substrate and maintained in a nursery. In this experiment, the concentrations of 17, 34, and 51 mM NaCl were tested; distilled water was used as the control in both experiments. Physiological, morphological, and nutritional parameters of the seedlings were evaluated. Salinity negatively affected germination, germination speed index, shoot dry mass, and primary root length, in addition to reducing macronutrient contents (K, Ca, and Mg). From 34 mM NaCl onwards, a significant reduction in seedling development was observed, indicating low salinity tolerance of the species.

Keywords: cocoa, saline stress, *Theobroma cacao*.

1. INTRODUÇÃO

O cacauero (*Theobroma cacao* L.), pertencente à família Malvaceae, destaca-se como uma cultura de expressiva relevância econômica e social, constituindo uma fonte essencial de renda para milhões de agricultores em regiões tropicais e desempenhando papel fundamental na cadeia produtiva que atende à demanda global por seus derivados [1]. Os cacaueiros são predominantemente encontrados na região Amazônica, sugerindo que esta área constitui o centro de origem do *T. cacao* [2].

O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de *T. cacao*, com 633.699 hectares de área colhida, produção de 287.784 toneladas de amêndoas e rendimento médio de 455 kg/ha conforme Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [3]. Os estados do Pará e da Bahia concentram cerca

de 95% da produção nacional. O Pará destaca-se com 162.803 hectares de área colhida, produção de 153.988 toneladas e rendimento médio de 946 kg/ha, superior à média nacional [3]. Todavia, a produção cacaueira na Amazônia enfrenta diversos desafios que comprometem sua sustentabilidade e produtividade. Entre os principais entraves estão a incidência de doenças e pragas [4], a baixa tecnificação das lavouras cacaueiras, a escassez de mão de obra qualificada e a baixa fertilidade dos solos amazônicos, predominantemente ácidos e pobres em nutrientes.

Além desses fatores elencados, a salinização do solo, embora ainda pouco estudada na região Norte do Brasil, emerge como uma preocupação crescente, especialmente em decorrência das mudanças climáticas. O aumento das temperaturas e a redução das precipitações podem intensificar a evaporação e a ascensão capilar de sais, levando à acumulação de sais nas camadas superficiais do solo [5]. Tais condições comprometem a absorção de água e nutrientes pelas plantas, afetando o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Entre os diversos fatores ambientais que limitam a produtividade agrícola, a salinidade destaca-se por reduzir a disponibilidade de água para as plantas, afetar a absorção de nutrientes e, em alguns casos, provocar toxicidade iônica. Ambientes salinos promovem desequilíbrios osmóticos e nutricionais, favorecendo o acúmulo de íons potencialmente tóxicos, como Na^+ e Cl^- , e comprometendo o balanço mineral das plantas. Além disso, o excesso de sais no solo pode dificultar a absorção de macronutrientes essenciais ao metabolismo vegetal, como nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio [6]. Tais alterações podem limitar a germinação e o desenvolvimento das plantas. Contudo, as espécies vegetais desenvolveram diferentes mecanismos de tolerância ao estresse salino, incluindo a restrição da absorção de Na^+ , a exclusão desse íon ou sua compartimentalização nos vacúolos celulares [7].

Diante dos efeitos deletérios da salinidade sobre o crescimento e o metabolismo vegetal, torna-se fundamental compreender como espécies de interesse econômico respondem a essa condição de estresse. Embora existam estudos sobre o efeito do estresse salino na germinação e no vigor de sementes de espécies florestais, como *Cedrela odorata* L. [8], ainda há escassez de informações específicas para *T. cacao*. Pesquisas recentes têm simulado o impacto do estresse salino na germinação e no vigor de sementes de diversas espécies florestais, buscando compreender os mecanismos envolvidos na tolerância a essa condição adversa [9]. Além disso, compreender o comportamento das espécies vegetais em diferentes níveis de salinidade e nas distintas fases de desenvolvimento é crucial para o sucesso dos plantios em áreas afetadas pela salinização. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes níveis de salinidade sobre a germinação e o crescimento inicial de *T. cacao*.

Considerando a escassez de informações sobre a resposta de *T. cacao* à salinidade, este estudo foi conduzido para responder à seguinte questão: em que medida diferentes níveis de NaCl afetam a germinação e o desenvolvimento inicial de plântulas de *T. cacao*? Partiu-se da hipótese de que o aumento da salinidade reduz a germinação, compromete o crescimento inicial e promove alterações no equilíbrio mineral das plântulas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local da pesquisa e preparo das sementes

O estudo foi conduzido na Universidade Federal do Pará, em Altamira, Estado do Pará. Os frutos de *T. cacao* foram coletados de plantas matrizes localizadas em uma propriedade rural no travessão Assurini sob as coordenadas 3°45'27.80" S e 52°13'28.18" W, no município de Altamira. Após a coleta as sementes foram extraídas manualmente dos frutos sadios e visualmente isentos de doenças. Em seguida, foram imersas em água para facilitar a remoção parcial da mucilagem que recobre externamente as sementes.

2.2. Germinação sob estresse salino

O experimento foi conduzido sob condições controladas de laboratório para avaliar os efeitos do estresse salino sobre a germinação. As sementes foram submetidas a seis concentrações de

cloreto de sódio (NaCl): 17, 34, 51, 68, 85 e 102 mM, além de um tratamento controle contendo apenas água destilada. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições de 25 sementes, totalizando 100 sementes por tratamento.

As soluções salinas foram preparadas pela diluição de NaCl em água destilada e tiveram sua condutividade elétrica (CE) determinada com auxílio de um condutivímetro portátil (Instrutherm®, modelo CD 880). Os valores de CE obtidos foram 3,04; 6,07; 9,10; 12,14; 15,20 e 18,20 dS m⁻¹, respectivamente. A classificação dos níveis de salinidade foi baseada nos critérios propostos por Carvalho et al. (2012) [10], segundo os quais soluções com condutividade elétrica entre 4 e 7 dS m⁻¹ são classificadas como salinas, enquanto aquelas com CE ≥ 7 dS m⁻¹ são consideradas sálicas.

A semeadura foi realizada em caixas plásticas tipo gerbox, forradas com duas folhas de papel mata-borrão, previamente umedecidas com as respectivas soluções salinas, em volume equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. As unidades experimentais foram mantidas em germinador do tipo BOD, sob temperatura constante de 25 °C e 12 horas de fotoperíodo. A germinação foi avaliada diariamente até o quinto dia após a semeadura, período em que ocorreu a estabilização da emissão da radícula em todos os tratamentos. Foram consideradas germinadas as sementes que apresentaram protrusão radicular ≥ 2 mm.

As variáveis analisadas foram a porcentagem de germinação (%G) e o índice de velocidade de germinação (IVG), calculado segundo Maguire (1962) [11], conforme a equação:

$$IVG = \Sigma(G_i/N_i)$$

em que G_i corresponde ao número de sementes germinadas em cada contagem e N_i ao número de dias decorridos da semeadura.

2.3. Crescimento inicial de plântulas sob estresse salino

Após a germinação, as sementes provenientes dos tratamentos selecionados foram transferidas para tubetes contendo substrato comercial à base de fibra de coco. Durante 20 dias, as plântulas foram irrigadas diariamente com soluções salinas preparadas nas mesmas concentrações utilizadas na fase de germinação (17, 34 e 51 mM de NaCl), sendo utilizada água destilada no tratamento controle.

Após 20 dias, foram avaliadas as seguintes variáveis morfológicas: altura da parte aérea (cm), número de folhas, comprimento da raiz principal (cm) e área foliar total (cm²). A área foliar foi determinada por análise de imagem, utilizando o software ImageJ (<https://imagej.net/ij/index.html>), considerando todas as folhas por plântula, independentemente do estágio de desenvolvimento.

As plântulas foram então separadas em parte aérea (folhas + caule) e sistema radicular, secas em estufa a 65 °C até a obtenção de massa constante, para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR), expressas em gramas. Os teores de clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) e clorofila total (Chl t) foram estimados por meio de leituras com clorofilômetro portátil (ClorofiLOG CFL 1030, Falker®), com base em medições realizadas em folhas completamente expandidas.

2.4. Análise de nutrientes em tecidos vegetais

Para análise da concentração de nutrientes e acúmulo de sódio (Na⁺) nos tecidos vegetais, procedeu-se à digestão seca das folhas, conforme descrito por Meneghetti (2018) [12]. As amostras foram incineradas em mufla e as cinzas resultantes foram solubilizadas em solução de HNO₃ (1 mol L⁻¹). As concentrações de potássio (K⁺) e sódio (Na⁺) foram determinadas por fotometria de chama, enquanto cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) foram quantificados por espectrometria de absorção atômica. Os resultados das análises químicas foram expressos em g kg⁻¹ de matéria seca, sendo os valores originalmente obtidos em mg kg⁻¹ convertidos para essa unidade quando necessário, a fim de padronizar a apresentação dos resultados.

2.5. Análise estatística

Inicialmente, verificou-se a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Atendidas essas pressuposições, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para as variáveis de germinação, também foi realizada análise de regressão em função dos níveis de salinidade. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SISVAR, versão 5.7 [13].

3. RESULTADOS

Foi observado escurecimento da radícula das sementes submetidas às concentrações mais elevadas de NaCl. A severidade desse sintoma foi mais evidente nas concentrações de 68, 85 e 102 mM, comprometendo a continuidade do desenvolvimento das plântulas. Por essa razão, apenas as concentrações de 17, 34 e 51 mM foram utilizadas na etapa subsequente de avaliação do crescimento inicial.

3.1. Germinação e Índice de Velocidade de Germinação (IVG)

O aumento da concentração de NaCl promoveu redução progressiva na porcentagem de germinação e no índice de velocidade de germinação das sementes de *T. cacao* (Figuras 1A-B). Os maiores valores foram observados no tratamento controle, enquanto as concentrações mais elevadas (85 e 102 mM) apresentaram os menores valores para ambas as variáveis.

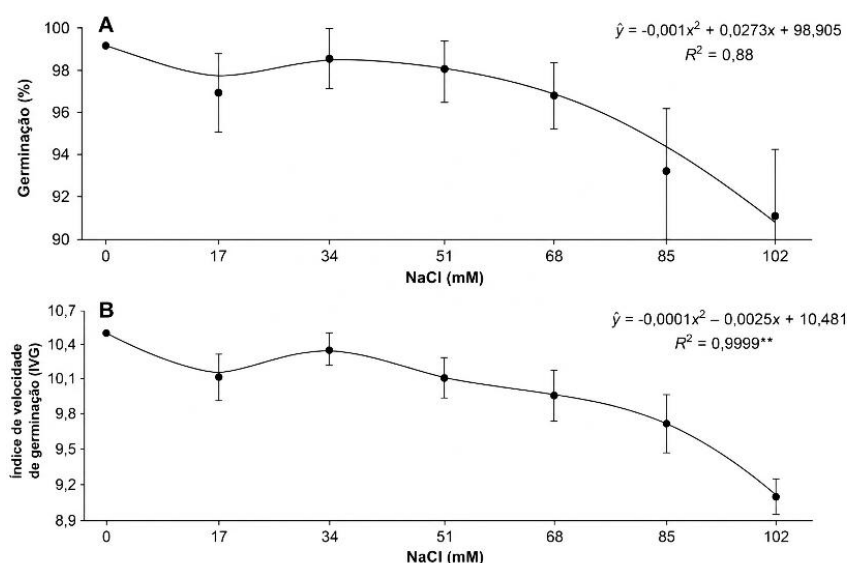


Figura 1. Efeito de diferentes concentrações de NaCl sobre a porcentagem de germinação (%G) (A) e o índice de velocidade de germinação (IVG) (B) de sementes de *Theobroma cacao*. Os pontos representam as médias observadas $\pm$ desvio-padrão ($n = 4$), e as linhas representam os modelos de regressão ajustados. ******Significativo a 1% pelo teste F.

3.2. Parâmetros morfofisiológicos

A salinidade reduziu significativamente ($p \leq 0,05$) a altura da parte aérea, o número de folhas e a área foliar das plântulas de *T. cacao* (Figuras 2A-C). Os efeitos tornaram-se mais evidentes a partir de 34 mM de NaCl, quando foram observadas reduções de aproximadamente 17%, 15% e 48%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Na maior concentração avaliada

(51 mM), as reduções atingiram 36%, 38% e 67%, evidenciando o comprometimento do crescimento vegetativo das plântulas.

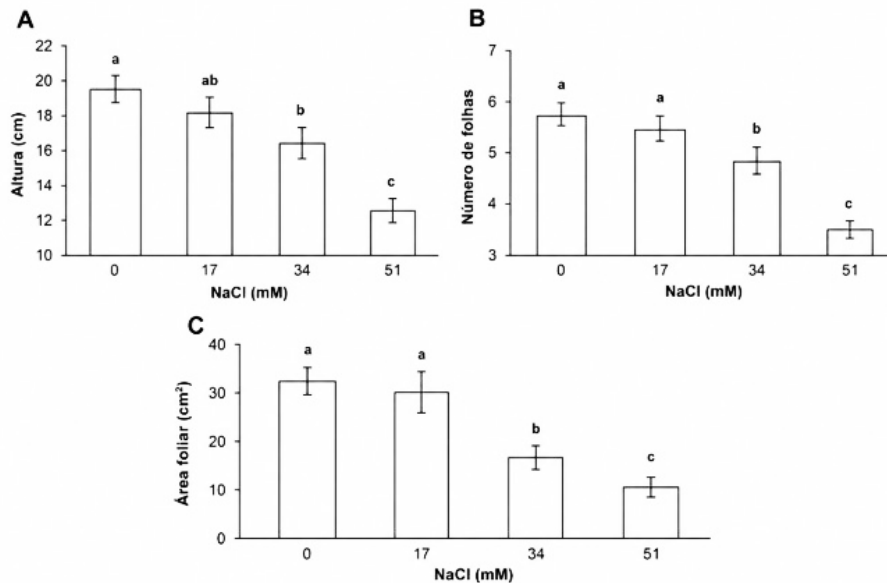


Figura 2. Efeito de diferentes concentrações de NaCl sobre a altura da parte aérea (A), número de folhas (B) e área foliar (C) de plântulas de *Theobroma cacao*. As barras representam as médias $\pm$ desvio-padrão ($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A massa seca da parte aérea (MSPA) e o comprimento da raiz principal das plântulas de *T. cacao* foram significativamente afetados pelo aumento da salinidade (Figuras 3A-B). A redução foi mais pronunciada para a MSPA, que apresentou decréscimos de aproximadamente 13% e 30% nas concentrações de 34 e 51 mM de NaCl, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Em contrapartida, o comprimento da raiz principal foi menos sensível ao estresse salino, sendo observada redução de apenas 5,4% na concentração de 51 mM de NaCl em relação às plântulas controle, indicando menor comprometimento do crescimento radicular nas condições avaliadas.

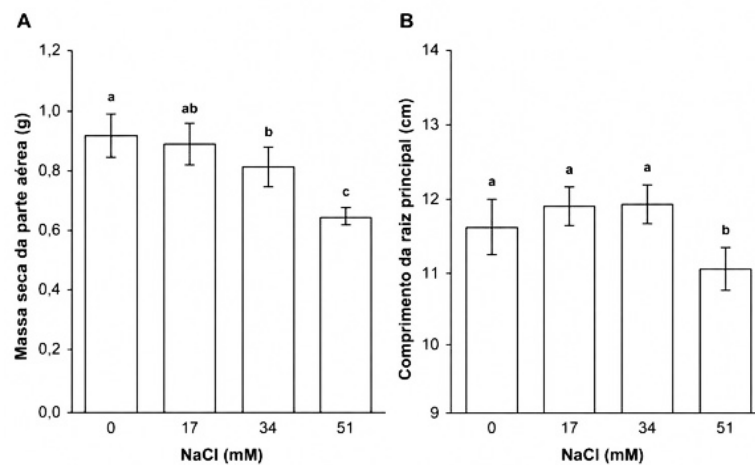


Figura 3. Efeito de diferentes concentrações de NaCl sobre a massa seca da parte aérea (A) e o comprimento da raiz principal (B) de plântulas de *Theobroma cacao*. As barras representam as médias $\pm$ desvio-padrão ($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os teores de clorofila a, clorofila b e clorofila total foram significativamente reduzidos com o aumento da salinidade (Figuras 4A-B-C). Na concentração de 34 mM de NaCl, observaram-se reduções de 36,2%, 47,0% e 38,5% nos teores de clorofila a, clorofila b e clorofila total, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Na maior concentração avaliada (51 mM), as reduções atingiram 71%, 75% e 72%, respectivamente, evidenciando um comprometimento acentuado do aparato fotossintético das plântulas de *T. cacao* sob condições de maior estresse salino.

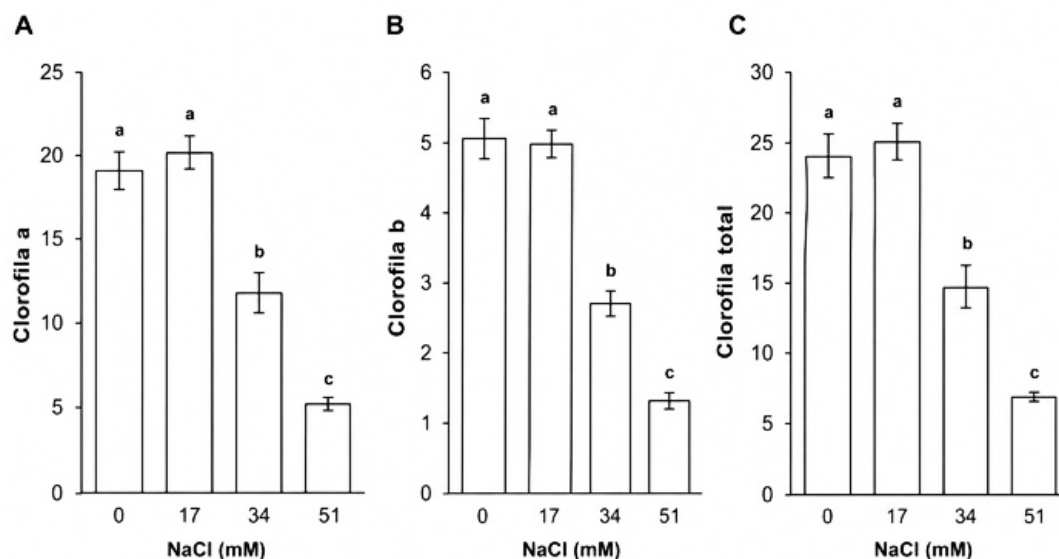


Figura 4. Efeito de diferentes concentrações de NaCl sobre os teores de clorofila a (A), clorofila b (B) e clorofila total (C) em plântulas de *Theobroma cacao*. As barras representam as médias $\pm$ desvio-padrão ($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.3. Avaliação do teor mineral nas folhas de *T. cacao* sob estresse salino

Na análise de variância, observaram-se diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os níveis de salinidade para todos os minerais avaliados (Figura 5). O aumento da concentração de NaCl promoveu elevação significativa dos teores foliares de Na^+ em *T. cacao* (Figura 5A). Os maiores valores foram observados nas concentrações mais elevadas de salinidade, atingindo $9,78 \text{ g kg}^{-1}$ na concentração de 51 mM de NaCl, em contraste com o valor de $1,26 \text{ g kg}^{-1}$ observado nas plântulas controle.

O aumento da concentração de NaCl promoveu alterações nos teores foliares dos macronutrientes K, Ca e Mg (Figura 5B-D). O teor de K^+ foi reduzido progressivamente com o aumento da salinidade, atingindo seu menor valor na concentração de 51 mM de NaCl ($29,31 \text{ g kg}^{-1}$), o que representa uma redução de aproximadamente 33% em relação ao tratamento controle. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentaram incrementos nas concentrações intermediárias, alcançando valores máximos de $6,4$ e $6,2 \text{ g kg}^{-1}$ nas concentrações de 17 e 34 mM de NaCl, respectivamente. Entretanto, em concentrações salinas mais elevadas, observou-se redução dos teores desses nutrientes, sendo os menores valores de Ca^{2+} registrados na concentração de 51 mM de NaCl.

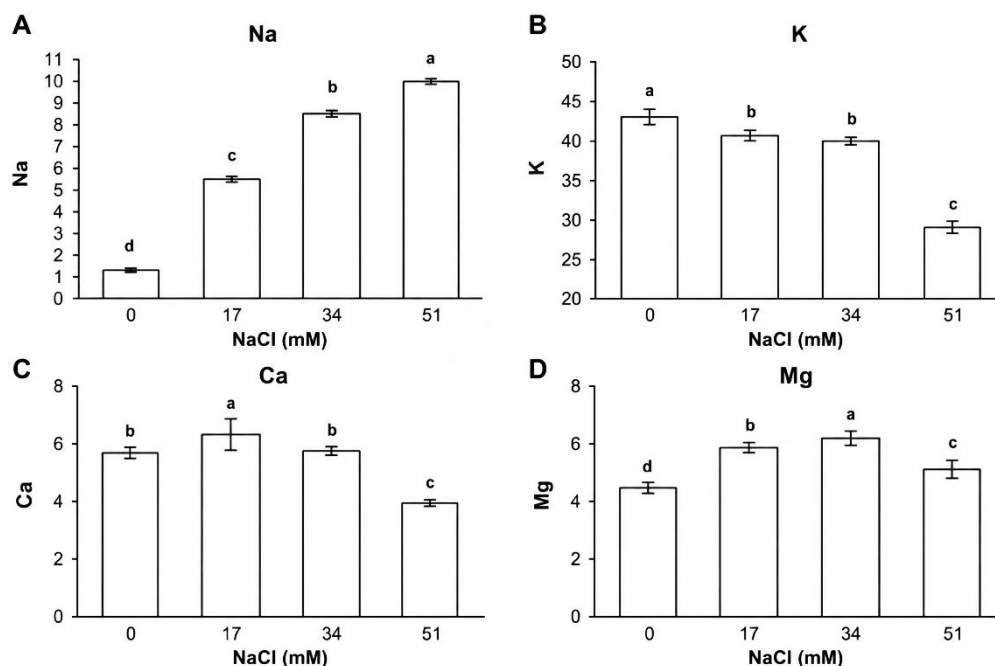


Figura 5. Efeito de diferentes concentrações de NaCl sobre os teores de Na (A), K (B), Ca (C) e Mg (D) em plântulas de *Theobroma cacao*. As barras representam as médias $\pm$ desvio-padrão ($n = 3$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O aumento da salinidade resultou em elevações significativas das relações Na/K, Na/Ca e Na/Mg nas folhas de *T. cacao* (Tabela 1). Os menores valores dessas relações foram observados no tratamento controle, enquanto a concentração de 51 mM de NaCl promoveu os maiores valores para todas as proporções avaliadas, evidenciando um aumento progressivo do desequilíbrio iônico com a elevação da salinidade.

Tabela 1: Valores médios para as relações Na/K, Na/Ca e Na/Mg obtidas em diferentes níveis de salinidade.

Tratamento	Relações		
	Na/K	Na/Ca	Na/Mg
0 (controle)	0,03d	0,23d	0,28d
17	0,14c	0,88c	0,95c
34	0,21b	1,50b	1,37b
51	0,33a	2,51a	1,88a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4. DISCUSSÃO

4.1. Germinação e Índice de Velocidade de Germinação (IVG)

A redução da porcentagem de germinação e do índice de velocidade de germinação observada neste estudo indica que o aumento da concentração de NaCl compromete os processos fisiológicos envolvidos na germinação das sementes de *T. cacao*. Esses resultados são consistentes com os relatados por Avrella et al. (2017) [14], que também verificaram redução significativa da germinação e do vigor em espécies arbóreas submetidas ao estresse salino. Tal resposta pode estar associada tanto ao efeito osmótico, que restringe a absorção de água pelas sementes, quanto à toxicidade iônica provocada pelo acúmulo excessivo de Na^+ e Cl^- , comprometendo a atividade metabólica necessária à protrusão da radícula e ao estabelecimento inicial das plântulas [15].

Além da redução na germinação, foi observado escurecimento da radícula, sobretudo nas concentrações mais elevadas de NaCl, indicando que a salinidade afetou negativamente o desenvolvimento inicial das sementes. A coloração escura da radícula é frequentemente associada a danos celulares decorrentes de condições ambientais adversas [16], sugerindo que o excesso de sais comprometeu a continuidade do processo germinativo. A severidade desse sintoma nas concentrações de 68, 85 e 102 mM de NaCl inviabilizou o desenvolvimento subsequente das plântulas, razão pela qual essas concentrações não foram utilizadas na etapa de crescimento inicial.

4.2. Parâmetros morfofisiológicos

A redução da altura da parte aérea, do número de folhas e da área foliar observada nas plântulas de *T. cacao* evidencia que o estresse salino compromete significativamente o crescimento vegetativo da espécie. Esses efeitos podem estar associados à menor absorção de água e nutrientes, em decorrência do efeito osmótico da salinidade, bem como à toxicidade causada pelo acúmulo excessivo de Na^+ e Cl^- , que afeta processos relacionados à divisão e à expansão celular [17]. Resultados semelhantes foram observados por Cha-um et al. (2013) [18] em genótipos de *Eucalyptus* spp. submetidos ao estresse salino, nos quais a redução da área foliar foi atribuída à menor expansão celular. Segundo Lacerda et al. (2001) [19], a diminuição da área foliar em condições salinas pode representar um importante mecanismo adaptativo, uma vez que a redução da superfície transpiratória contribui para minimizar as perdas de água e atenuar os efeitos do estresse osmótico.

A redução da massa seca da parte aérea e, em menor intensidade, do comprimento da raiz principal das plântulas de *T. cacao* indica que o estresse salino compromete o acúmulo de biomassa e o crescimento da espécie. A menor produção de matéria seca da parte aérea pode estar associada à redução da atividade fotossintética e ao redirecionamento do metabolismo para mecanismos de manutenção e sobrevivência em detrimento do crescimento [20]. Em contrapartida, o crescimento radicular foi relativamente menos afetado, o que pode estar relacionado à capacidade das raízes de manterem o crescimento mesmo sob condições de restrição osmótica. Segundo Munns (2002) [21], em condições salinas, as limitações ao crescimento vegetal decorrem inicialmente do efeito osmótico induzido pelo excesso de sais e, posteriormente, da toxicidade iônica. De forma semelhante, Luyckx et al. (2023) [22] observaram menor impacto da salinidade sobre o sistema radicular em comparação à parte aérea em cultivares de *Amaranthus cruentus* L., sugerindo respostas diferenciadas entre os órgãos vegetais frente ao estresse salino.

A redução dos teores de clorofila a, clorofila b e clorofila total observada nas plântulas de *T. cacao* indica que o estresse salino compromete o aparato fotossintético da espécie. Essa resposta pode estar associada tanto à inibição da biossíntese dos pigmentos fotossintéticos quanto ao aumento da sua degradação, em decorrência do acúmulo de íons tóxicos, do desequilíbrio nutricional e do estresse oxidativo induzidos pela salinidade. Resultados semelhantes foram relatados por Turan e Tripathy (2015) [23] em plântulas de arroz e por Lu et al. (2023) [24] em *Robinia pseudoacacia*, nos quais a redução dos teores de clorofila foi associada a alterações estruturais nos cloroplastos e ao comprometimento do metabolismo fotossintético. Dessa forma, a expressiva redução das clorofilas observada na concentração de 51 mM de NaCl sugere uma limitação importante da capacidade fotossintética das plântulas de *T. cacao* sob condições de maior estresse salino.

De modo geral, os resultados obtidos evidenciam a elevada sensibilidade de *T. cacao* ao estresse salino, uma vez que reduções expressivas em variáveis morfológicas, biomassa e teores de clorofila foram observadas principalmente a partir da concentração de 34 mM de NaCl. Resultados semelhantes têm sido relatados em outras espécies arbóreas submetidas à salinidade, como *Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore [20] e *Mimosa scabrella* Benth. [14], reforçando que o comprometimento do crescimento e da capacidade fotossintética constitui uma resposta comum de espécies sensíveis expostas ao excesso de sais.

4.3. Avaliação do teor mineral nas folhas de *T. cacao* sob estresse salino

O aumento progressivo dos teores foliares de Na^+ observado nas plântulas de *T. cacao* indica que a espécie apresenta limitada capacidade de restringir a absorção e o acúmulo desse íon em condições salinas. Embora o sódio possa desempenhar funções benéficas em determinadas situações, especialmente em condições de deficiência de potássio, concentrações elevadas desse elemento tendem a provocar toxicidade iônica e comprometer processos fisiológicos essenciais [25]. Resultados semelhantes foram observados por Valleser e Valleser (2018) [26], que verificaram aumento da concentração foliar de Na^+ em diferentes clones de *T. cacao* submetidos à aplicação de NaCl, evidenciando que a salinidade altera significativamente a composição mineral dos tecidos vegetais.

A redução progressiva dos teores foliares de K^+ com o aumento da salinidade sugere que o acúmulo de Na^+ compromete a absorção e a manutenção desse nutriente nos tecidos vegetais de *T. cacao*. Essa resposta é frequentemente atribuída às semelhanças nas propriedades físico-químicas entre Na^+ e K^+ , que favorecem a competição entre esses íons pelos sítios de transporte na membrana plasmática, resultando em deficiência de potássio sob condições salinas [7]. Considerando o papel fundamental do K^+ na osmorregulação, na ativação enzimática e na manutenção da atividade fotossintética, a redução observada neste estudo indica que o desequilíbrio iônico induzido pelo excesso de Na^+ pode ter contribuído para o comprometimento do crescimento das plântulas. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da manutenção de concentrações adequadas de potássio para aumentar a tolerância das plantas ao estresse salino [7].

Os teores foliares de Ca^{2+} e Mg^{2+} também foram influenciados pelo aumento da salinidade, apresentando incrementos nas concentrações intermediárias de NaCl e redução da magnitude desse efeito nas concentrações mais elevadas. Embora os teores desses nutrientes tenham permanecido, em geral, dentro das faixas consideradas adequadas para *T. cacao* [27], observou-se tendência de redução dos teores de Ca^{2+} na concentração de 51 mM de NaCl, sugerindo que o excesso de Na^+ pode comprometer a absorção e o equilíbrio desses cátions divalentes. Resultados semelhantes foram observados por Luyckx et al. (2023) [22], que verificaram diminuição dos teores foliares de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ em cultivares de *Amaranthus cruentus* submetidos ao estresse salino. Segundo Fernandes et al. (2002) [28] e Cruz et al. (2006) [29], a competição iônica promovida pelo excesso de Na^+ constitui um dos principais fatores responsáveis pelas alterações no estado nutricional das plantas sob condições salinas, podendo intensificar os distúrbios nutricionais e comprometer o crescimento vegetal.

O aumento progressivo das relações Na/K, Na/Ca e Na/Mg observado nas plântulas de *T. cacao* evidencia que o incremento dos teores de Na^+ foi acompanhado por um desequilíbrio crescente entre esse íon e os macronutrientes essenciais. Segundo Fernandes et al. (2002) [28], a manutenção de baixas relações entre Na^+ e nutrientes como K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} constitui um importante indicador da tolerância das plantas ao estresse salino. Dessa forma, os elevados valores dessas relações na concentração de 51 mM de NaCl sugerem maior comprometimento das funções fisiológicas desempenhadas por esses nutrientes, especialmente em virtude da competição iônica promovida pelo excesso de Na^+ [7]. Em conjunto, os resultados demonstram que mesmo níveis moderados de salinidade foram suficientes para alterar significativamente o equilíbrio mineral das plântulas de *T. cacao*, reforçando a elevada sensibilidade da espécie ao estresse salino.

5. CONCLUSÃO

A salinidade afetou negativamente a germinação e o desenvolvimento inicial de plântulas de *Theobroma cacao*, promovendo reduções na porcentagem e velocidade de germinação, no crescimento vegetativo, na produção de biomassa e nos teores de clorofilas. O aumento das concentrações de NaCl também alterou significativamente o equilíbrio mineral das plântulas, caracterizado pelo acúmulo de Na^+ , redução dos teores de K^+ e elevação das relações Na/K, Na/Ca e Na/Mg. Os efeitos mais severos foram observados a partir da concentração de 34 mM de NaCl, evidenciando a elevada sensibilidade de *T. cacao* ao estresse salino durante a fase inicial de

desenvolvimento. Estudos futuros são necessários para ampliar o entendimento dos mecanismos fisiológicos e moleculares envolvidos na resposta da espécie à salinidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hernandez GMC, Efraim P, Silva ARA, Queiroz GC. Carbon footprint of Brazilian cocoa produced in Pará State. BJFT. 2022;25:e2020263. doi: 10.1590/19816723.26320
2. Zarrillo S, Gaikwad N, Lanaud C, Powis T, Viot C, Lesur I, et al. The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. Nat Ecol Evol. 2018;2(12):1879-88. doi: 10.1038/s41559-018-0697-x
3. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção de cacau: Safra 2024 [Internet]; [Acesso em 8 jul 2025]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cacau/br>.
4. Holanda MES, Costa EM, Oliveira DKL, Lima PVC, Santo ETE, Ramos LHD, et al. Aplicação de aprendizado de máquina profundo para detecção por imagens de doenças em frutos do cacauzeiro. IJDR. 2021;11(5):47378-84. doi: 10.37118/ijdr.22009.05.2021
5. Scherger LE, Lexow C, Zanello V, Castoldi MC. Salinización de suelos de textura fina por ascenso capilar a partir del acuífero freático hipersalino somero (Bahía Blanca, Argentina). Águas Subterr. 2019;33(2):159-70. doi: 10.14295/ras.v33i2.29265
6. Roy S, Chowdhury N. Salt stress in plants and amelioration strategies: A Critical review. In: Fahad S, Saud S, Chen Y, Wu C, Wang D, editors. Abiotic stress in plants. IntechOpen [Internet]; 2020. doi: 10.5772/intechopen.93552
7. Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. The Critical role of potassium in plant stress response. Int J Mol Sci. 2013;14:7370-90. doi: 10.3390/ijms14047370
8. Ferreira EGBS, Matos VP, Sena LHM, Oliveira RG, Sales AGFA. Processo germinativo e vigor de sementes de *Cedrela odorata* L. sob estresse salino. Cienc Florest. 2013;23(1):99-105. doi: 10.5902/198050988444
9. Pereira DP, Sousa Filho PH, Carminati MTC. Efeito do estresse salino na germinação de sementes de mulungú e jatobá. ACSA. 2022;18(1):17-21. doi: 10.30969/acsa.v18i1.1312
10. Carvalho TC, Silva SS, Silva RC, Panobianco M. Germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de soja convencional e sua derivada transgênica RR em condições de estresse salino. Cienc Rural. 2012;42(8):1366-71. doi: 10.1590/S0103-84782012000800006
11. Maguire JD. Speed of germination-aid in selection and evaluation of seedling emergence and vigour. Crop Sci. 1962;2(1):176-7.
12. Meneghetti AD. Manual de procedimentos de amostragem e análise química de plantas, solo e fertilizantes. Curitiba (PR): EDUTFPR; 2018.
13. Ferreira DF. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. Rev Bras Biom. 2019;37(4):529-35. doi: 10.28951/rbb.v37i4.450
14. Avrella ED, Baratto B, Lucchese JR, Navroski MC, Fior CS. Estresse hídrico e salinidade na germinação de sementes de *Mimosa scabrella* Benth. Rev Espacios. 2017;38(47):24.
15. Ramoliya PJ, Pandley AN. Effect of salinization of soil on emergence, growth and survival of seedlings of *Cordia rothii*. For Ecol Manag. 2003;176:185-94. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00271-2
16. Rasera GB, Castro RJS. Germinação de grãos: Uma revisão sistemática de como os processos bioquímicos envolvidos afetam o conteúdo e o perfil de compostos fenólicos e suas propriedades antioxidantes. Braz J Nat Sci. 2020;3(1):287-300. doi: 10.31415/bjns.v3i1.90
17. Marques EC, Freitas VS, Bezerra MA, Prisco JT, Gomes-Filho E. Efeitos do estresse salino na germinação, emergência e estabelecimento da plântula de cajueiro anão precoce. Rev Ciênc Agron. 2011;42(4):993-99. doi: 10.1590/S1806-66902011000400023
18. Cha-um S, Somsueb S, Samphumphuang T, Kirdmanee C. Salt tolerant screening in Eucalyptus genotypes (*Eucalyptus* spp.) using photosynthetic abilities, proline accumulation, and growth characteristics as effective indices. In Vitro Cell Dev Biol-Plant. 2013;49:611-9. doi: 10.1007/s11627-013-9537-5
19. Lacerda CF, Cambraia J, Cano MAO, Ruiz HA. Plant growth and solute accumulation and distribution in two sorghum genotypes, under NaCl stress. Rev Bras Fisiol Veg. 2001;13(3):270-84. doi: 10.1590/S0103-31312001000300003
20. Freire AL, Gomes DV. Effects of salinity on growth and organic solutes accumulation of *Tabebuia aurea* Manso (Benth and Hook). Afr J Biotechnol. 2013;12(13):1490-4.
21. Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ. 2002;25:239-50. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x

22. Luyckx A, Lutts S, Quinet M. Comparison of salt stress tolerance among two leaf and six grain cultivars of *Amaranthus cruentus* L. *Plants*. 2023;12:3310. doi: 10.3390/plants12183310
23. Turan S, Tripathy BC. Salt-stress induced modulation of chlorophyll biosynthesis during de-etiolation of rice seedlings. *Physiol Plant*. 2015;153(3):477-91. doi: 10.1111/pp1.12250
24. Lu C, LI L, Liu X, Chen M, Wan S, Li G. Salt stress inhibits photosynthesis and destroys chloroplast structure by downregulating chloroplast development-related genes in *Robinia pseudoacacia* Seedlings. *Plants*. 2023;12:1283. doi: 10.3390/plants12061283
25. Gattward JN, Almeida A-A F, Souza Jr JO, Gomes FP, Kronzuckerc HJ. Sodium-potassium synergism in *Theobroma cacao*: stimulation of photosynthesis, water-use efficiency and mineral nutrition. *Physiol Plant*. 2012;146:350-62. doi: 10.1111/j.1399-3054.2012.01621.x
26. Valleser VC, Valleser JL. Growth performance of different cacao clones at varying rates of sodium chloride fertilization. *IJSRP*. 2018;8(7):16-21. doi: 10.29322/IJSRP.8.7.2018.p7905
27. Malavolta E. Nutrição mineral do cacauzeiro e cafeeiro. Brasília (DF): ABEAS; 1997.
28. Fernandes AR, Carvalho JG, Curi N, Pinto JEBP, Guimarães PTG. Nutrição mineral de mudas de pupunheira sob diferentes níveis de salinidade. *Pesqui Agropecu Bras*. 2002;37(11):1613-9.
29. Cruz JL, Pelacani CR, Coelho EF, Caldas RC, Almeida AQ, Queiroz JR. Influência da salinidade sobre o crescimento, absorção e distribuição de sódio, cloro e macronutrientes em plântulas de maracujazeiro-amarelo. *Bragantia*. 2006;65(2):275-84. doi: 10.1590/S0006-87052006000200009