



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Seleção e avaliação multivariada de genótipos de linho (*Linum usitatissimum*) quanto à germinação e desenvolvimento inicial sob estresse salino por cloreto de potássio

Felipe Rosauro de Matheus Bustamante

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no formato de Artigo de Pesquisa ao curso de Graduação em Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Tiago Olivoto

Florianópolis – SC

Novembro/2025

Seleção e avaliação multivariada de genótipos de linho (*Linum usitatissimum*) quanto à germinação e desenvolvimento inicial sob estresse salino por cloreto de potássio

Felipe Rosauero de Matheus Bustamante^{(1)*}, Tiago Olivoto⁽²⁾

⁽¹⁾ Acadêmico do curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Admar Gonzaga,1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 8840-900, Florianópolis-SC, Brasil.

⁽²⁾ Professor(a), Depto. De Fitotecnia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Admar Gonzaga,1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 8840-900, Florianópolis-SC, Brasil.

*Autor Correspondente- E-mail: feliperbustamante@gmail.com

Resumo

Este estudo avaliou os efeitos do estresse salino induzido por doses crescentes de cloreto de potássio (KCl, 0, 50, 100, 150 e 200 mM) sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de cinco genótipos de linho (*Linum usitatissimum* L.) em condições controladas. Curvas de germinação foram ajustadas por modelos não lineares, quais possibilitaram a obtenção de parâmetros e estatísticas de germinação que foram posteriormente avaliados utilizando análise de variância, regressão linear e análise de trilha. Os parâmetros germinativos e morfológicos revelaram efeitos significativos de genótipo, dose e interação, evidenciando a influência da salinidade no desempenho inicial das plântulas. Os genótipos G148, G51 e G218 apresentaram maior estabilidade fisiológica até 100 mM, enquanto G141 mostrou sensibilidade acentuada a partir dessa dose. O genótipo G23 exibiu desempenho inferior em todos os parâmetros, mesmo sem estresse, sugerindo baixa viabilidade fisiológica. A análise de trilha indicou que a porcentagem final de germinação e a área sob a curva foram os principais preditores da massa seca, variável integradora do desempenho. Já o tempo para 50% de germinação e o comprimento de plântulas foram influenciados apenas por efeitos aditivos, reforçando seu papel como descritores universais de resposta ao estresse. A abordagem estatística aplicada permitiu agregar informações de diversas variáveis associadas ao estudo de germinação, facilitando a comparação entre tratamentos e subsidiando a seleção de genótipos de linho mais tolerantes à salinidade potássica.

Palavras-chave: Salinidade, vigor, multivariáveis, germinação, melhoramento vegetal.

Selection and multivariate evaluation of flax (*Linum usitatissimum*) genotypes for germination and early development under potassium chloride-induced salt stress

Abstract

This study evaluated the effects of salt stress induced by increasing concentrations of potassium chloride (KCl, 0, 50, 100, 150, and 200 mM) on the germination and early development of five flax (*Linum usitatissimum* L.) genotypes under controlled conditions. Germination curves were fitted using nonlinear models, which enabled the estimation of germination parameters and statistics that were subsequently analyzed through analysis of variance, linear regression, and path analysis. Germinative and morphological parameters revealed significant effects of genotype, salt concentration, and their interaction, demonstrating the influence of salinity on seedling performance. Genotypes G148, G51, and G218 exhibited greater physiological stability up to 100 mM, whereas G141 showed marked sensitivity beyond this level. Genotype G23 displayed inferior performance in all parameters, even in the absence of stress, suggesting low physiological viability. Path analysis indicated that final germination percentage and area under the curve were the main predictors of dry mass, an integrative variable of performance. In contrast, time to 50% germination and seedling length were influenced only by additive effects, reinforcing their role as universal descriptors of stress response. The applied statistical approach enabled the integration of information from multiple variables related to germination studies, facilitating comparisons among treatments and supporting the selection of flax genotypes with greater tolerance to potassium-induced salinity.

Keywords: Salinity, vigor, multivariate, germination, plant breeding.

Introdução

O linho (*Linum usitatissimum* L.) é uma espécie de reconhecido valor agrônomo e histórico, cultivada desde a antiguidade por seu duplo propósito: produção de fibras têxteis e de grãos ricos em óleo. A relevância cultural e simbólica do linho remonta a diferentes civilizações, sendo amplamente referenciado em contextos religiosos.

Registros arqueológicos indicam que o uso do linho remonta a aproximadamente 32 mil anos, com evidências de fibras tingidas encontradas em cavernas da atual Geórgia (Kvavadze *et al.*, 2009), o que reforça sua importância entre os vegetais domesticados nas primeiras sociedades humanas. Adaptado a regiões de clima temperado, o linho expandiu-se ao longo da história por diversos territórios da Eurásia, sendo cultivado atualmente em países como Rússia, Cazaquistão e China, que figuram entre os maiores produtores globais (FAO, 2023).

No Brasil, o cultivo da linhaça (denominação mais comum da cultura quando voltada para a produção de grãos) concentrou-se historicamente no Sul, com destaque para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. No entanto, ao longo das últimas décadas, a área cultivada sofreu significativa redução, sobretudo diante da competição

com outras culturas de inverno de maior viabilidade econômica (Lúcio *et al.*, 2021) . Ainda assim, estudos recentes apontam para uma retomada do interesse pelo cultivo do linho no país, tanto em função do potencial produtivo de suas sementes quanto das qualidades de sua fibra (Bustamante, F.R.M *et al.*, 2024). Diante desse cenário, torna-se pertinente o desenvolvimento de novos experimentos agronômicos que contribuam para a reintrodução e a consolidação da cultura em sistemas produtivos do Sul do Brasil, considerando-se aspectos como nutrição mineral, desempenho fisiológico e manejo agronômico.

Quanto à nutrição, a adubação potássica constitui uma prática agronômica amplamente recomendada para culturas anuais, especialmente quando realizada na ocasião da semeadura. Entretanto, a aplicação excessiva de fontes salinas de potássio, como o cloreto de potássio (KCl), pode gerar efeitos adversos sobre o estabelecimento inicial das plantas (SBCS, 2016). A salinidade resultante da aplicação elevada desse insumo é conhecida por causar toxicidade às sementes e plântulas, comprometendo a germinação e o desenvolvimento inicial devido à osmose inversa e ao acúmulo de íons tóxicos no ambiente radicular (Akbarimoghaddam, H. *et al.*, 2011).

Paralelamente, o melhoramento genético de plantas fundamenta-se em estratégias de seleção sob pressão ambiental, com o objetivo de identificar e propagar genótipos mais adaptados às condições específicas do ambiente de cultivo. O sucesso desse processo depende da variabilidade genética existente (que pode ser natural ou introduzida artificialmente por meio de cruzamentos direcionados) e da avaliação criteriosa de características agronômicas e fisiológicas sob diferentes estresses, permitindo selecionar materiais superiores em termos de desempenho, sanidade e eficiência adaptativa.

Em programas de melhoramento, cruzamentos são realizados entre genótipos previamente identificados como promissores, guiando o progresso genético em direção à maior estabilidade e produtividade sob determinadas condições ambientais (Bos; Caligari, 1995), é plausível supor que em um banco de germoplasma com variabilidade genética, diferentes genótipos de linho apresentem respostas distintas às doses de KCl aplicadas na semeadura, tanto em relação à tolerância ao estresse salino quanto ao desempenho fisiológico inicial. Identificar possíveis fontes de tolerância à esse estresse abiótico é fundamental para a caracterização do germoplasma, que pode ser explorado posteriormente em cruzamentos artificiais. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de doses crescentes de cloreto de potássio sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de sementes de diferentes genótipos de *L.usitatissimum*, em

condições controladas, com a finalidade de identificar materiais mais resilientes e, com isso, subsidiar programas de melhoramento genético voltados à tolerância ao estresse salino em estágios iniciais de crescimento.

Material e métodos

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido entre os dias 25 de abril e 23 de junho de 2025, nas instalações do Laboratório de Sementes do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), *campus* Reitor João David Ferreira Lima, localizado em Florianópolis, SC.

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições temporais. Foram avaliados cinco genótipos de linho, oriundos do banco de sementes do Núcleo de Estudos e Pesquisas em Experimentação e Melhoramento Vegetal (NEPEM): G23, G51, G141, G148 e G218. Cada genótipo foi submetido a cinco doses de cloreto de potássio (KCl) em solução aquosa destilada (0, 50, 100, 150 e 200 mM), as quais correspondem aproximadamente a 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de KCl aplicado como fertilizante, totalizando 25 combinações genótipo × dose. Para cada repetição, 24 sementes foram dispostas sobre três folhas de papel Germitest, duas na base e uma na cobertura, posteriormente umedecidas com solução correspondente a 2,5 vezes o peso seco do papel. Após a montagem, cada conjunto de genótipo e dose foi cuidadosamente enrolado, acondicionado em sacola plástica para manter a umidade interna e armazenado em estufa a 25 °C, sob umidade constante, até a finalização dos 7 dias de período de germinação, conforme as instruções das Regras para Análises de Sementes (RAS, 2009).

Foram avaliadas diariamente as sementes germinadas, além de variáveis fisiológicas ao final do experimento: porcentagem de germinação final, massa fresca (mg), massa seca (mg) e comprimento de plântulas (mm). A massa fresca foi determinada logo após a retirada das plântulas da câmara, com pesagem em balança analítica. Em seguida, as plântulas foram secas em estufa a 65 °C por 24 horas para determinação da massa seca. O comprimento foi medido com régua milimetrada, da extremidade da raiz ao ápice da parte aérea.

Modelagem e seleção de variáveis

A modelagem das curvas de germinação acumulada foi realizada para cada unidade experimental utilizando o modelo de Hill de quatro parâmetros. O ajuste foi feito

com a função `FourPHFfit()` do pacote `germinationmetrics` (Aravind et al., 2023) no ambiente R (R Core Team, 2025). O modelo empregado foi expresso pela equação:

$$y = y_0 + \frac{ax^b}{c^b + x^b}$$

Na qual y representa a germinação acumulada, y_0 o valor inicial, a a amplitude da curva, c o ponto de inflexão e b o parâmetro relacionado à inclinação. A partir dos ajustes, foram extraídos diversos parâmetros descritivos, à saber: porcentagem final de germinação (a), índice de inclinação da curva de germinação (b), tempo para 50% de germinação (t_{50} e t_{50germ} , relativa e total), tempos para 10% e 70% de germinação (relativa e total), tempo médio de germinação (MGT), tempo médio na taxa máxima (TMGR), área sob a curva (AUC), índice de velocidade de germinação (IVG), índice de Timson, sincronização (Sync), tempo médio de germinação (MeanGermTime) e coeficiente de uniformidade da germinação (CUGerm).

Os dados derivados foram organizados e submetidos a uma análise de correlação linear para explorar a relação entre as variáveis, com o auxílio da função `corr_coef()` do pacote `metan` (Olivoto; Lúcio, 2020). A análise de correlação forneceu subsídios para identificar colinearidades e selecionar um conjunto de variáveis preditoras representativas para análises subsequentes. Em seguida, foi realizada uma análise de trilha (*path analysis*), por meio da função `path_coeff()` do pacote `metan`, para identificar o efeito direto e indireto dos parâmetros fisiológicos sobre a variável massa seca, considerada a variável resposta agronomicamente mais relevante.

Análises de variância

As análises de variância (ANOVA) foram conduzidas para os parâmetros selecionados, considerando os efeitos principais de genótipos, doses de KCl e suas interações. Quando significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey com auxílio da função `emmeans()`. Para a variável germinação, tratada como a proporção de sementes germinadas em relação ao total, ajustou-se um modelo linear generalizado (GLM) com distribuição binomial, considerando a natureza de Bernoulli do evento de germinação. Além disso, para cada variável de interesse, foi ajustado um modelo de regressão linear por genótipo em função das doses de KCl, possibilitando a visualização e interpretação das respostas fisiológicas em relação à salinidade potássica.

As representações gráficas foram elaboradas com o pacote ggplot2 (Wickham, H., 2016), com auxílio do pacote patchwork (Pedersen, 2019) para montagem das figuras e visualização da dinâmica de germinação ao longo dos dias.

Resultados

Visão geral dos dados

A análise exploratória da germinação ao longo do tempo (Figura 1) evidenciou contrastes significativos entre os genótipos de linho e as diferentes doses de cloreto de potássio (KCl). Na ausência de KCl (0 mM), todos os genótipos, com exceção do G23, apresentaram desempenho germinativo elevado e rápido, atingindo percentuais superiores a 75% ao sétimo dia, com curvas sigmóides bem definidas, indicando boa uniformidade e velocidade de germinação.

Com a aplicação de 50 mM, observou-se leve redução tanto na velocidade quanto na taxa final de germinação para alguns genótipos. Ainda assim, a maioria manteve desempenho satisfatório, com destaque para G141, G148 e G51, que conservaram padrões similares ao controle. Por outro lado, o genótipo G23 revelou sensibilidade precoce, com menor percentual acumulado e atraso na curva germinativa em comparação aos demais.

Na concentração de 100 mM, os efeitos negativos do estresse salino tornaram-se mais pronunciados. Todos os genótipos apresentaram declínio na germinação, porém de forma desigual, indicando uma possível interação entre genótipos e níveis de salinidade. Notavelmente, o genótipo G141, que até então havia mantido desempenho robusto, sofreu uma queda abrupta, com acentuada redução na taxa de germinação acumulada em relação aos demais, indicando possível limiar de tolerância superado. Em contrapartida, G148 e G218 mantiveram germinação superior a 40%, demonstrando maior resiliência a essa concentração.

A 150 mM, a germinação foi drasticamente comprometida para todos os genótipos. As curvas perderam seu padrão sigmoide, com valores finais frequentemente abaixo de 30% e início de germinação postergado. Em 200 mM, praticamente não houve germinação significativa até o sétimo dia, com os cinco genótipos apresentando valores inferiores a 10%, refletindo forte inibição fisiológica.

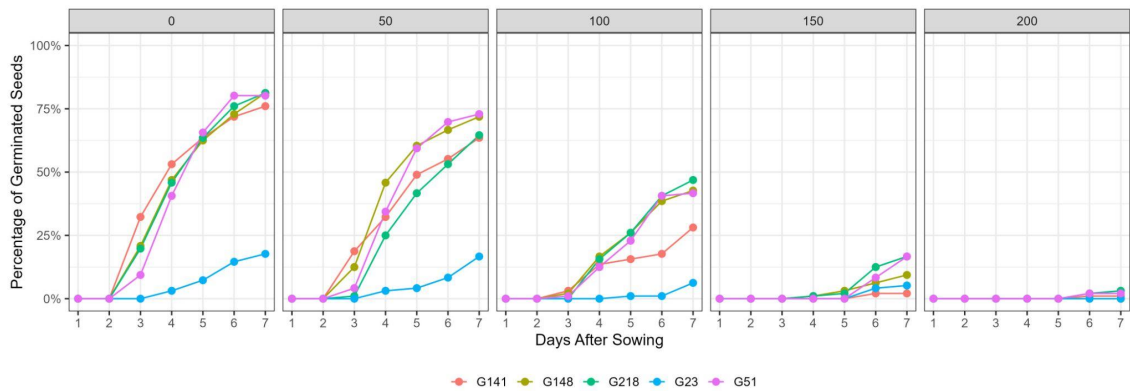


Figura 1. Tendências de germinação dos genótipos sob diferentes concentrações de KCl ao longo dos dias.

Correlação dos dados e análise de trilha

A matriz de correlação de Pearson (Figura 2) revelou associações consistentes entre as variáveis germinativas, morfológicas e fisiológicas avaliadas, permitindo a identificação de redundâncias informacionais e subsidiando a escolha de um conjunto mínimo de descritores para análises posteriores. Observou-se forte correlação positiva e altamente significativa ($p < 0,001$) entre a porcentagem final de germinação (a), massa verde, massa seca, AUC e índice de Timson, com coeficientes superiores a 0,90, refletindo interdependência entre essas variáveis fisiológicas. Por outro lado, variáveis como meangermtime, tmgr e t50germ apresentaram correlações fracas ou não significativas com a maioria dos descritores morfofisiológicos, sugerindo menor relevância no contexto das respostas à salinidade potássica.

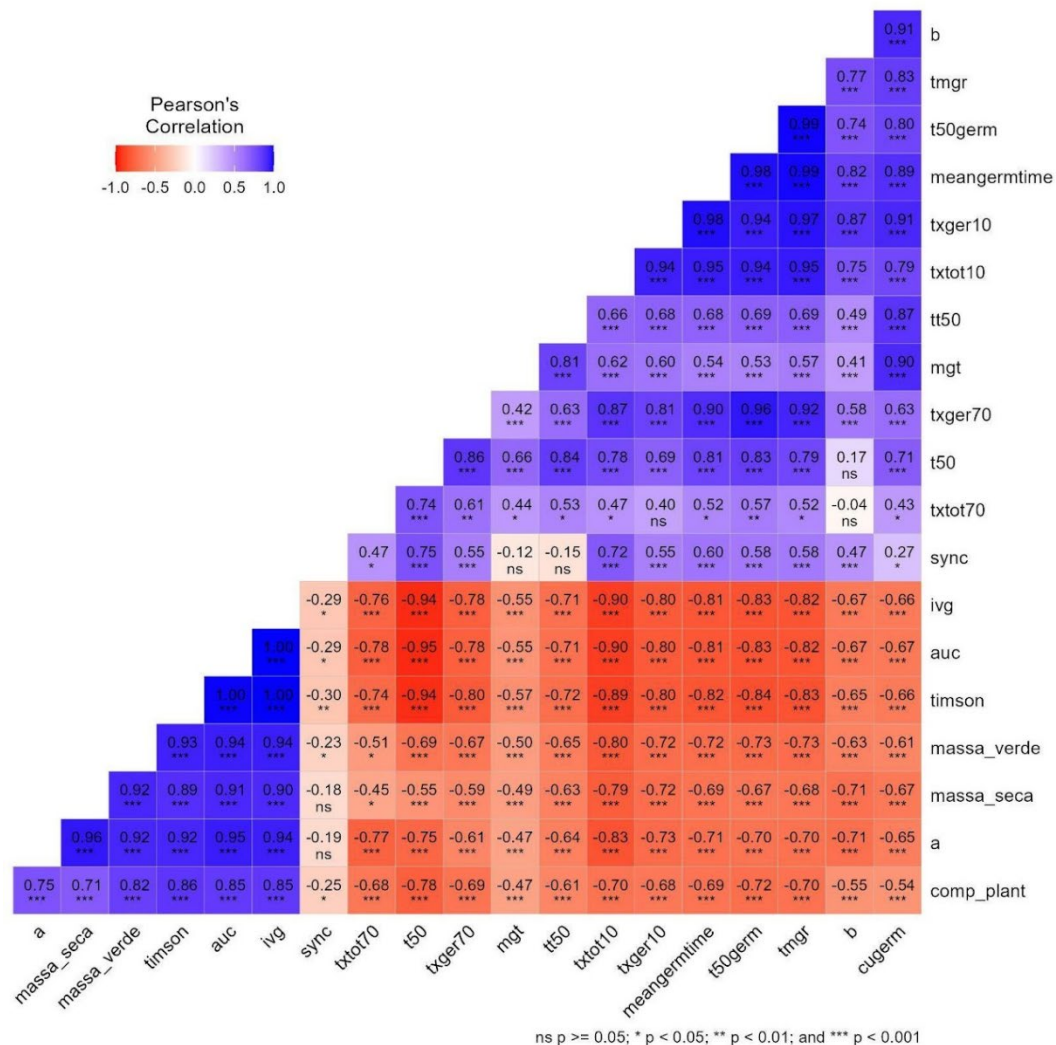


Figura 2. Matriz de correlação de Pearson das variáveis Analisadas.

A matriz de correlação de Pearson (Figura 2) revelou elevada redundância entre variáveis predictoras, indicando potencial risco de multicolinearidade que poderia comprometer a estabilidade e a interpretabilidade dos coeficientes no modelo de trilha. Para aumentar a parcimônia e a robustez do ajuste, foi efetuada uma revisão do conjunto de preditores com exclusão das variáveis mais redundantes, preservando-se as medidas que melhor representam os mecanismos fisiológicos em estudo.

Após essa reestruturação, os diagnósticos de multicolinearidade apresentaram melhoria substancial. Persistiu uma multicolinearidade moderada (CN = 197,168), porém o determinante da matriz (0,0062) afastou-se de valores próximos a zero e o número de

variáveis com VIF > 10 reduziu-se consideravelmente. A maior associação remanescente passou a ocorrer entre duas medidas germinativas ($r = 0,946$), o que sinaliza que, embora interdependências ainda existam, a nova configuração proporciona estimativas mais estáveis e uma interpretação dos coeficientes de trilha mais confiável.

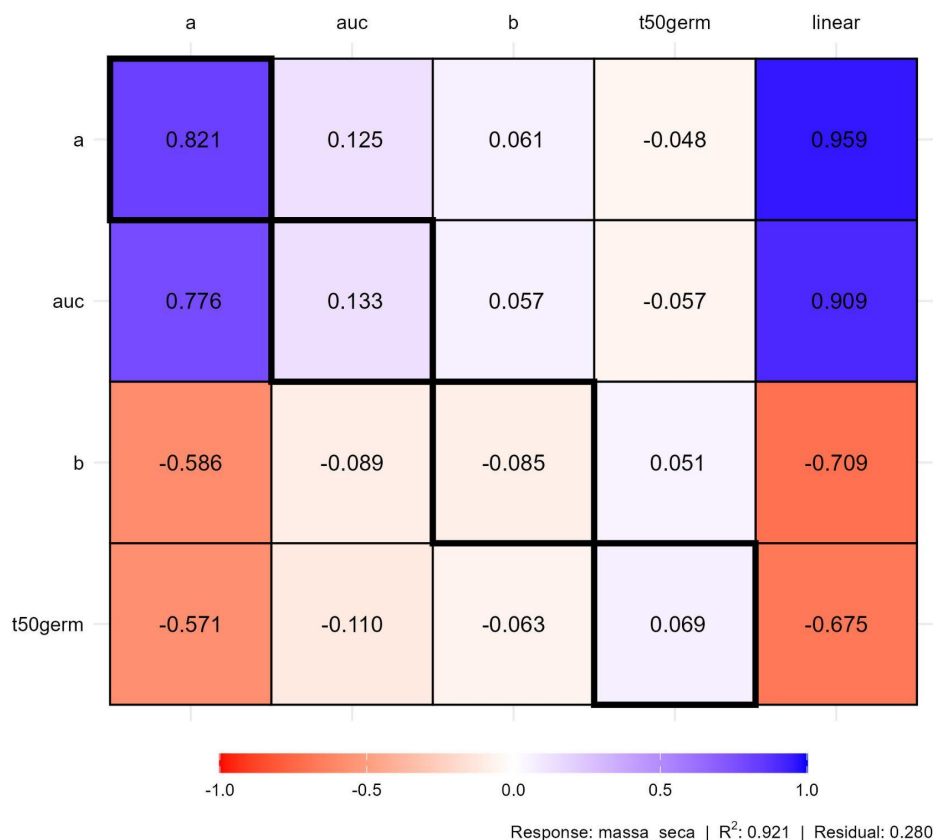


Figura 3. Análise de trilha da matéria seca.

Entre os parâmetros analisados no modelo de trilha ajustado, o principal fator associado ao desempenho fisiológico foi a eficiência germinativa final, que apresentou o efeito direto positivo mais expressivo sobre a massa seca. Esse resultado evidencia que a capacidade de germinação efetiva é o componente de maior influência direta sobre o acúmulo de biomassa, consolidando-se como o preditor central do vigor e do estabelecimento das plântulas.

As demais variáveis exibiram efeitos diretos de menor magnitude, indicando influência limitada sobre a massa seca quando avaliadas de forma isolada. A análise demonstrou ainda que as relações mais fortes entre os parâmetros germinativos e o desempenho final das plântulas ocorreram de forma indireta, mediadas pela eficiência

germinativa. Isso significa que tanto o atraso na germinação quanto a velocidade de emergência afetam o crescimento principalmente por sua interferência na proporção de sementes que completam o processo germinativo com sucesso.

Considerando esses resultados e as evidências da matriz de correlação de Pearson, optou-se por conduzir as análises de variância (ANOVA) com um conjunto reduzido de variáveis representativas, de modo a evitar redundâncias e aprimorar a interpretação dos efeitos. O novo conjunto foi composto por indicadores fisiológicos e biométricos capazes de expressar, de maneira integrada, o vigor germinativo e o desenvolvimento inicial das plântulas, permitindo avaliar o comportamento geral do sistema com maior robustez estatística.

Análises de variância

A análise de variância (Tabela 1) revelou efeitos altamente significativos ($p < 0,001$) de genótipo, dose e da interação genótipo \times dose sobre a maioria das variáveis fisiológicas avaliadas. A germinação final (a), a área sob a curva de germinação (AUC) e a massa seca exibiram resposta fortemente dependente tanto do genótipo quanto da dose, enquanto parâmetros como T50 de germinação e o comprimento de plântula não apresentaram diferenças significativas entre genótipos. Com base nesses resultados, procedeu-se à análise detalhada dos efeitos de interação, apresentada nas seções subsequentes.

Tabela 1. Resumo da análise de variância com os P-valores das variáveis a (germinação final), AUC (área sob a curva), b (índice de inclinação), CP (Comprimento de plântula), MS (Massa seca), MV (Massa verde) e T50 (Tempo para germinação de 50% das sementes).

FV	GL	a	AUC	B	CP	MS	MV	T50
Dose (KCl)	3	3.44E-19	4.21E-18	9.63E-9	1.32E-20	1.15E-24	9.06E-20	6.31E-8
Genótipo	4	2.88E-17	2.30E-14	6.20E-9	6.19E-3	2.58E-15	9.22E-10	2.24E-5
Gen \times Dose	12	2.38E-4	2.42E-5	4.09E-2	7.65E-2	3.23E-6	1.45E-4	6.58E-1

FV: Fonte de Variação; GL = graus de liberdade

Parâmetros com interação significativa

Esta seção compreende as variáveis cujos comportamentos foram significativamente influenciados pela combinação entre os fatores genótipo e dose de KCl. Esta abordagem se aplica a cinco parâmetros centrais: germinação final, índice de inclinação da curva de germinação (*b*), área sob a curva de germinação (AUC), massa verde e massa seca, conforme evidenciado pelos modelos estatísticos que apontaram efeitos significativos da interação genótipo \times dose.

A germinação final apresentou diferenças estatísticas altamente significativas tanto entre genótipos quanto entre doses salinas ($p < 0,001$), com interação significativa entre os fatores ($p = 0,013$). O genótipo G23 manteve os menores índices de germinação em todas as concentrações testadas, sugerindo limitação fisiológica independente do nível de salinidade (Figura 4). Entre os demais, observou-se uma queda mais acentuada a partir de 100 mM, especialmente em G141, cuja redução foi abrupta. A análise de regressão linear permitiu quantificar essas diferenças: G141 foi o mais sensível, com declínio médio de $-0,0337\%$ de germinação por mM de KCl ($R^2 = 0,91$; $p = 0,045$), seguido por G148 ($-0,0255\%$; $R^2 = 0,94$; $p = 0,032$), G51 ($-0,0213\%$; $R^2 = 0,96$; $p = 0,021$) e G218 ($-0,0205\%$; $R^2 = 0,97$; $p = 0,014$). Apesar de G23 ter apresentado a menor taxa de declínio ($-0,0105\%$; $R^2 = 0,88$; $p = 0,064$), sua baixa germinação desde o controle, que pode ser explorada pelo intercepto da regressão, sugere limitação basal que reduziu a sensibilidade à variação entre doses. Tais padrões, apresentados na figura 4, evidenciam diferentes graus de resiliência, com destaque positivo para G218 e G51, pela menor taxa de perda germinativa frente ao estresse.

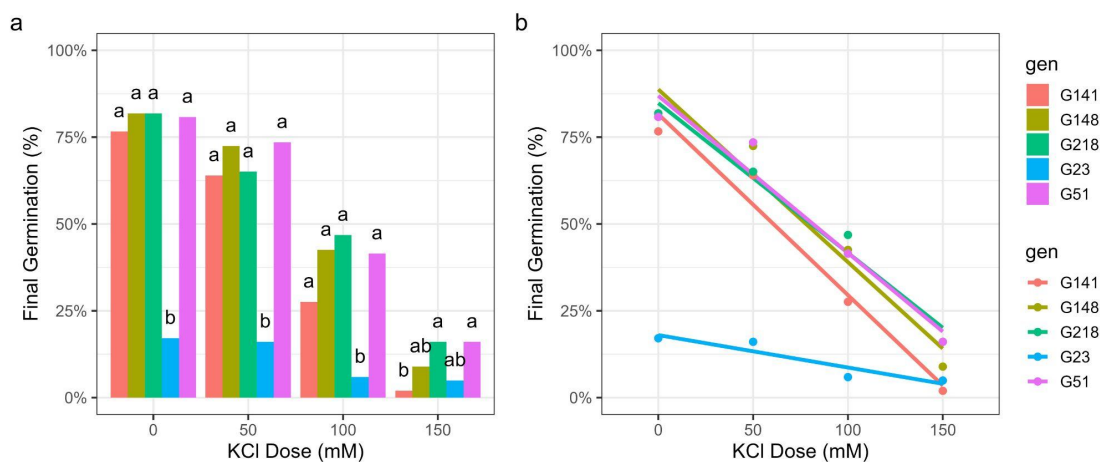


Figura 4. Porcentagem final de germinação de cinco genótipos de linho sob diferentes concentrações de KCl.

O índice de inclinação da curva de germinação (b), que reflete a sincronia e a velocidade acumulada da germinação, também foi afetado de forma significativa pela interação entre genótipos e doses ($p = 0,040$) (Figura 5). G141 exibiu o maior coeficiente angular (0,974 por mM de KCl; $R^2 = 0,74$), seguido por G51 (0,867; $R^2 = 0,74$), embora ambos sem significância estatística ($p = 0,138$), sugerindo tendências de resposta abrupta, mas com elevada variabilidade entre repetições. G23 (0,704; $R^2 = 0,88$; $p = 0,064$) e G218 (0,658; $R^2 = 0,61$; $p = 0,217$) apresentaram comportamento intermediário, enquanto G148 foi o único a demonstrar aumento significativo e consistente do índice b com a salinidade (coeficiente angular = 0,044; $R^2 = 0,91$; $p = 0,048$). Esses resultados indicam estratégias fisiológicas distintas entre os genótipos: enquanto G141 parece acionar respostas germinativas mais tardias e abruptas sob estresse, G148 revela um padrão mais estável e adaptativo.

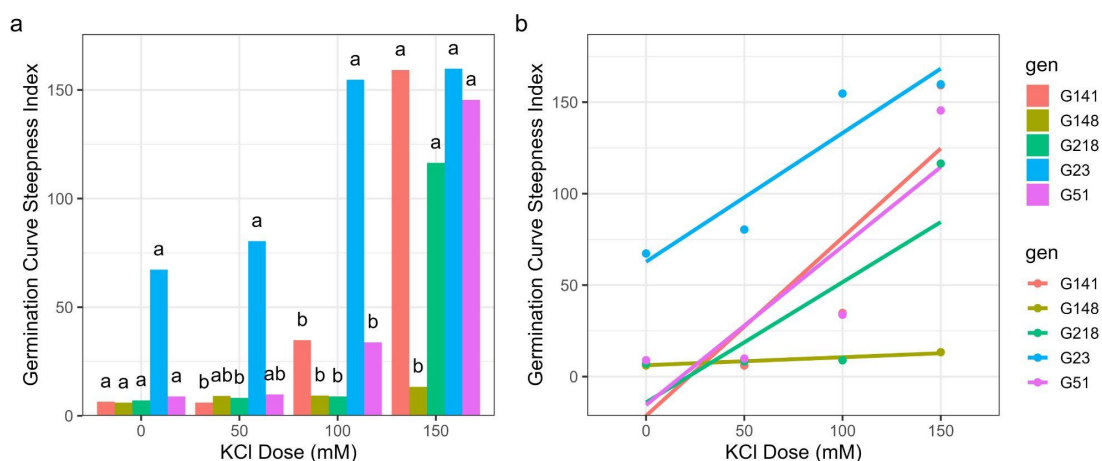


Figura 5. Variação do índice de inclinação (b) da curva de germinação de genótipos de linho sob diferentes doses de KCl.

A área sob a curva de germinação (AUC) foi outro parâmetro que revelou interação altamente significativa ($p < 0,001$), refletindo diferenças substanciais no desempenho germinativo acumulado. G23 novamente apresentou os menores valores em todas as condições, indicando limitação basal de desempenho (Figura 6). Em contraste, os demais genótipos mantiveram AUC elevada até 50 mM, com quedas mais expressivas a partir de 100 mM. G141, por exemplo, reduziu de 263 no controle para 66,9 em 100 mM e apenas 2,4 em 150 mM. As regressões ajustadas evidenciam isso: G141 apresentou o maior coeficiente de declínio ($-1,80/\text{mM}$ de KCl; $R^2 = 0,99$; $p = 0,0065$), seguido por

G148 ($-1,66$; $R^2 = 0,94$; $p = 0,028$), G218 ($-1,51$; $R^2 = 0,99$; $p = 0,0067$) e G51 ($-1,45$; $R^2 = 0,96$; $p = 0,018$). Apesar de G23 apresentar significância estatística ($-0,15$; $R^2 = 0,98$; $p = 0,0087$), a magnitude de sua perda foi reduzida pela baixa AUC inicial.

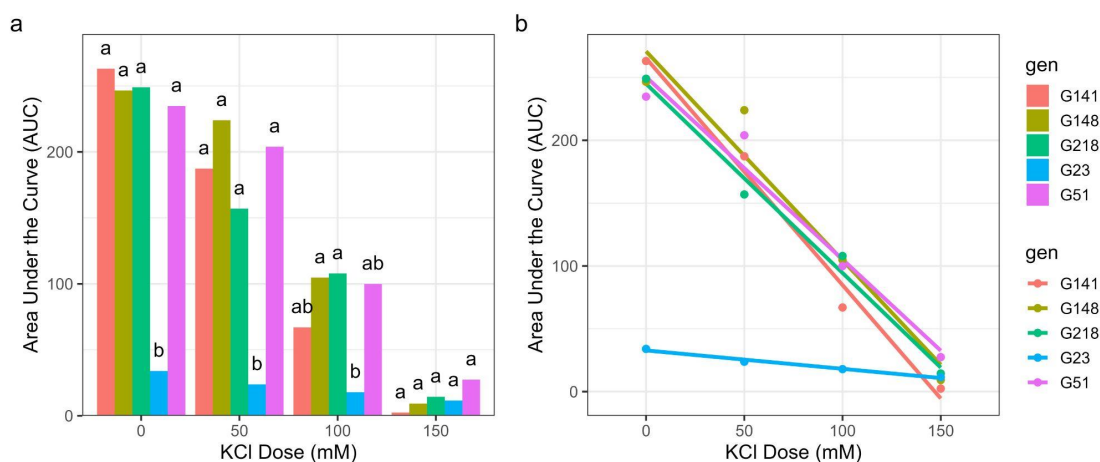


Figura 6. Área sob a curva de germinação (AUC) de cinco genótipos de linho em resposta a doses crescentes de KCl.

Nas variáveis relacionadas à biomassa (massa verde e massa seca) a interação genótipo \times dose também foi altamente significativa ($p < 0,001$), apontando que a salinidade afeta tanto o acúmulo de matéria fresca quanto a alocação de biomassa seca de maneira genótipo-dependente. A massa verde apresentou quedas marcantes a partir de 100 mM, sendo G148 e G218 os mais eficientes na manutenção da biomassa em níveis elevados sob estresse moderado. G141, por outro lado, perdeu rapidamente sua capacidade de produção (Figura 7, a). A regressão para massa verde mostrou coeficiente angular mais negativo em G141 ($-6,24$ mg/mM de KCl; $R^2 = 0,96$; $p = 0,020$), seguido por G148 ($-5,54$; $R^2 = 0,97$; $p = 0,016$), G218 ($-5,22$; $R^2 = 0,98$; $p = 0,011$) e G51 ($-4,06$; $R^2 = 0,91$; $p = 0,044$) (Figura 7, b). G23 exibiu uma queda menos pronunciada ($-0,84$; $R^2 = 0,81$; $p = 0,101$), mas devido à baixa massa inicial.

Padrões similares foram observados na massa seca, com reduções consistentes à medida que a concentração salina aumentou (Figura 7, c). G141 apresentou novamente o pior desempenho ($-0,38$ mg/mM de massa seca; $R^2 = 0,92$; $p = 0,043$), seguido de G148 ($-0,36$; $R^2 = 0,91$; $p = 0,047$), G51 ($-0,34$; $R^2 = 0,95$; $p = 0,026$) e G218 ($-0,32$; $R^2 = 0,97$; $p = 0,014$). Apesar da tendência de queda, G218 manteve valores superiores sob todas as doses. G23, por sua vez, teve a menor variação ($-0,065$; $R^2 = 0,83$; $p = 0,093$), o que reflete seu fraco desempenho fisiológico desde o início, independentemente da presença de estresse.

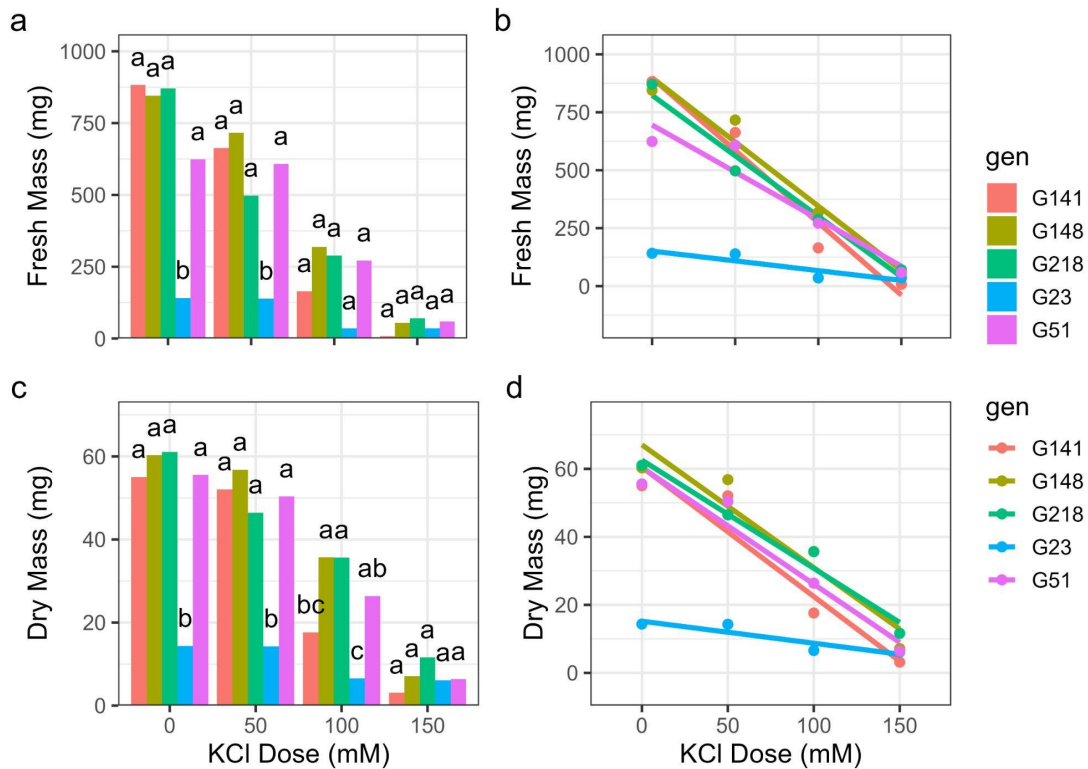


Figura 7. Biomassa fresca e seca de plântulas de linho em função de doses crescentes de KCl.

Parâmetros sem interação significativa com efeito aditivo de KCl

As variáveis analisadas que apresentaram efeito aditivo de dose sem interação significativa foram o tempo para 50% de germinação das sementes (t_{50germ}) e o comprimento de plântulas. Ambas responderam estatisticamente de forma independente à variação dos fatores genótipo e dose de KCl, conforme evidenciado pelos modelos de análise de variância, mas sem interação significativa entre esses fatores. Essa ausência de interação sugere que a resposta média dos genótipos ao gradiente salino foi paralela, ou seja, a ordem de desempenho dos genótipos permaneceu relativamente constante independentemente da dose. Os resultados médios e os ajustes de regressão associados a essas variáveis encontram-se ilustrados nas Figuras 8 e 9.

Para o tempo necessário para que 50% das sementes germinassem (t_{50germ}), os efeitos principais foram significativos ($p < 0,001$ para genótipo e para dose), enquanto a interação genótipo \times dose não foi significativa ($p = 0,658$). A análise revelou que o aumento progressivo na concentração de KCl levou a um atraso linear na germinação das sementes (Figura 8, b). A média de t_{50germ} variou de 3,99 dias em 0 mM para 5,73 dias em 150 mM, indicando que o estresse salino impôs lentidão na emergência. A regressão

linear ajustada apresentou coeficiente angular negativo (0,0113 dias/mM), com intercepto de 3,87, representando o tempo estimado em ausência de estresse. Além disso, o modelo apresentou alto poder explicativo, com $R^2 = 0,945$, reforçando a previsibilidade da resposta ao estresse salino. Em relação aos genótipos, G23 apresentou o maior valor médio de T50 (5,41 dias), sugerindo maior lentidão fisiológica de resposta germinativa, mesmo em condições menos adversas, enquanto os demais oscilaram entre 4,4 e 4,75 dias.

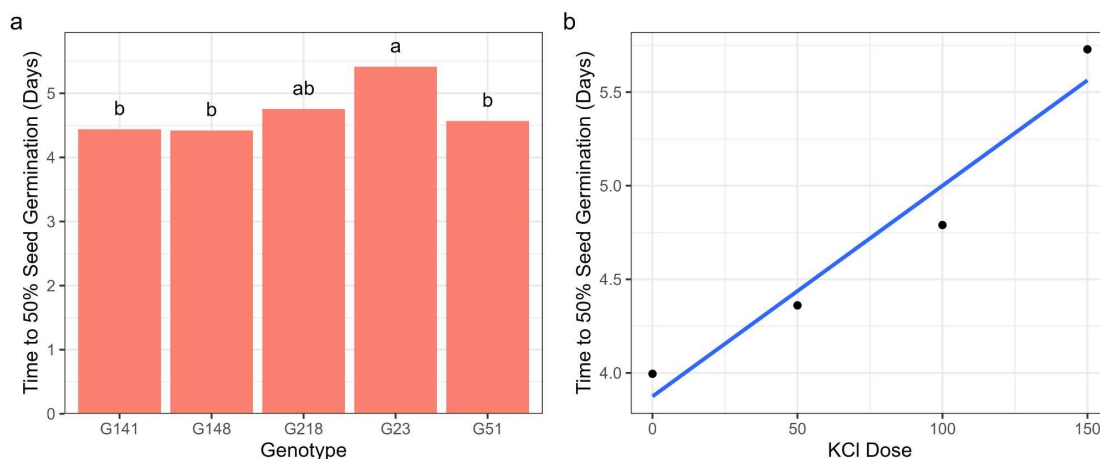


Figura 8. Tempo médio para 50% de germinação (t50) de cinco genótipos de linho sob diferentes concentrações de KCl.

De forma semelhante, o comprimento de plântulas foi influenciado de forma significativa por ambos os fatores principais ($p = 0,006$ para genótipo e $p < 0,001$ para dose), mas sem interação significativa entre eles ($p = 0,076$). Houve uma queda sistemática no comprimento médio das plântulas com o aumento da concentração salina: de 78,7 mm em 0 mM para apenas 6,4 mm em 150 mM (Figura 9). A regressão linear ajustada revelou um coeficiente angular de $-0,486$ e intercepto de 73,41 mm, o que indica uma perda média de 0,49 mm de crescimento por cada mM adicional de KCl aplicado. O alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,959$) confirma que a salinidade explica de forma robusta a variação observada nessa variável, caracterizando-a como um indicador sensível e confiável do impacto osmótico nas fases iniciais do desenvolvimento da planta.

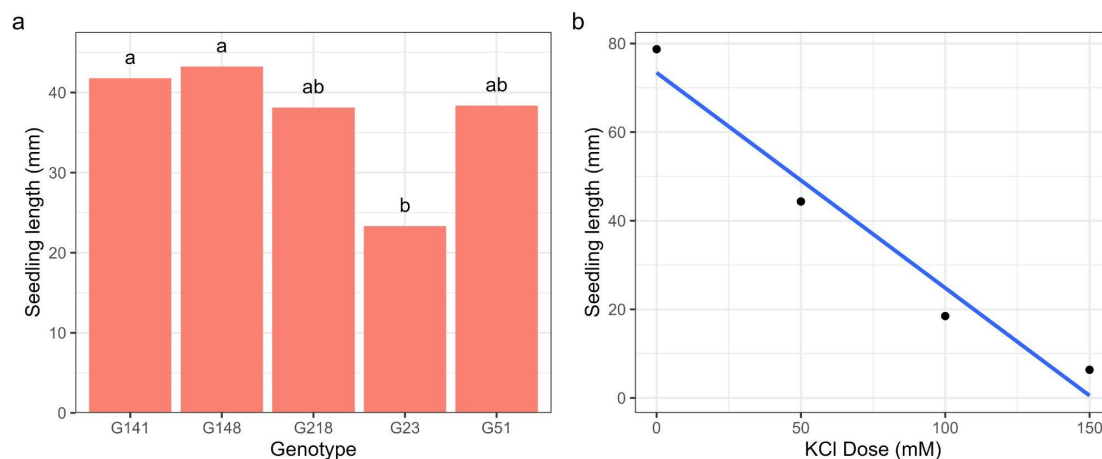


Figura 9. Comprimento médio de plântulas de linho em resposta a diferentes concentrações de KCl.

Discussões

O conjunto de variáveis avaliadas demonstrou que a salinidade crescente compromete progressivamente o processo germinativo e o desenvolvimento inicial das plântulas de linho. Esses achados corroboram a literatura, como demonstrado por Akbarimoghaddam *et al.* (2011), que atribuíram os prejuízos fisiológicos sob estresse salino tanto à toxicidade iônica quanto à limitação osmótica imposta pelo acúmulo de sais no substrato.

A análise de correlação e de trilha permitiu estabelecer a hierarquia das variáveis quanto à sua contribuição explicativa sobre a massa seca, considerada o principal indicador do desempenho fisiológico inicial das plântulas. Após a reestruturação do conjunto de preditores para reduzir a multicolinearidade, observou-se que a eficiência germinativa final exerceu o efeito direto positivo mais expressivo sobre a massa seca, confirmando seu papel central como preditor fisiológico do vigor e do estabelecimento.

As demais variáveis apresentaram efeitos diretos de menor magnitude, mas contribuíram de forma indireta, sobretudo por meio da eficiência germinativa, evidenciando a existência de um encadeamento fisiológico entre o processo germinativo e o acúmulo de biomassa. Esse padrão indica que o retardo germinativo e as diferenças na velocidade de emergência afetam o crescimento principalmente por reduzirem a proporção de sementes que completam o processo germinativo com sucesso.

Entre os genótipos testados, o G23 destacou-se negativamente, apresentando desempenho inferior em todas as variáveis, desde a germinação final até a biomassa

acumulada. Essa limitação persistente mesmo na ausência de salinidade (0 mM) indica que o problema não está exclusivamente relacionado ao estresse, mas pode envolver fatores como baixa qualidade fisiológica do lote, má conservação ou comprometimento da viabilidade inicial, conforme sugere Marcos Filho (2015). Esse comportamento reiterado inviabiliza sua recomendação para cultivo ou melhoramento em qualquer ambiente, salino ou não.

Por outro lado, o genótipo G141 apresentou desempenho vigoroso nas doses mais baixas, mas sofreu queda acentuada nos parâmetros a partir de 100 mM, sobretudo em área sob a curva (AUC) e massa seca, sugerindo que esse material possui um limiar fisiológico bem definido de tolerância, além do qual ocorre colapso germinativo. Esse comportamento pode refletir um possível trade-off associado à domesticação, em que o ganho em desempenho produtivo sob condições ideais é acompanhado pela perda de rusticidade e de mecanismos de tolerância ao estresse, padrão amplamente descrito em espécies cultivadas (Rosenthal and Dirzo, 1997; Franks et al., 2008; Mayrose et al., 2011). Um indício dessa vulnerabilidade é o aumento drástico no índice de inclinação da curva de germinação ($b = 159,2$ em 150 mM), que reflete atraso e desuniformidade no processo germinativo. Tal padrão é compatível com estratégias de “escape germinativo” observadas em ambientes salinizados (Munns & Tester, 2008), nas quais a germinação torna-se errática como tentativa de evasão fisiológica ao estresse osmótico.

Em contraste, os genótipos G148, G51 e G218 demonstraram estabilidade fisiológica frente à salinidade, mantendo altos valores de germinação, AUC e acúmulo de biomassa até 100 mM, o que denota maior robustez fisiológica em condições adversas. Esse comportamento pode estar relacionado à capacidade de manutenção da absorção hídrica e à regulação osmótica, mecanismos clássicos de tolerância à salinidade em sementes (Kaya *et al.*, 2006). O genótipo G51 apresentou desempenho intermediário, porém consistente, com bom acúmulo de massa seca, sugerindo potencial adaptativo e valor em cruzamentos futuros.

As ANOVAs indicaram significância para os efeitos principais de genótipo e dose em todas as variáveis, mas apenas algumas apresentaram interação significativa entre esses fatores, especificamente germinação final, índice b , AUC, massa verde e massa seca. Nesses casos, a resposta germinativa foi claramente dependente da combinação específica entre genótipo e dose de KCl, o que evidencia a complexidade fisiológica da adaptação à salinidade.

Em contrapartida, as variáveis tempo para 50% de germinação (t50germ) e comprimento de plântulas apresentaram apenas efeitos aditivos, sem interação significativa, sugerindo que todos os genótipos responderam paralelamente ao aumento da salinidade. O t50germ aumentou de forma linear com o estresse, revelando atraso germinativo típico de ambientes salinos. O comprimento das plântulas, por sua vez, apresentou decréscimo de 49 mm por unidade de concentração, reforçando o efeito inibidor da salinidade sobre o crescimento inicial, comportamento amplamente descrito por Shahid *et al* (2020).

Assim, os dados aqui apresentados demonstram que a resposta do linho à salinidade potássica resulta da interação entre fatores genéticos e intensidade do estresse, sendo modulada por mecanismos fisiológicos específicos de cada genótipo. A distinção entre materiais resilientes (G148, G51 e G218), sensíveis (G141) e inaptos (G23) fornece informações valiosas para programas de melhoramento e para o manejo inicial da cultura em solos muito adubados com KCl. Além de contribuir metodologicamente com o uso de análises multivariadas em estudos de estresse abiótico, este trabalho estabelece bases práticas para a seleção de genótipos adaptados a ambientes salinizados, permitindo recomendar o uso de G148, G51 e G218 em áreas agrícolas sujeitas à salinidade potássica, especialmente em regiões litorâneas ou sob influência de sais no solo. Essa recomendação amplia as possibilidades de cultivo do linho em condições marginais, conciliando produtividade, sustentabilidade e aproveitamento de recursos genéticos adaptativos.

Conclusões

Com base nos resultados, conclui-se que a salinidade induzida por diferentes doses de KCl compromete a germinação e o desenvolvimento inicial de plântulas de linho, com intensidade variável entre genótipos. G148, G51 e G218 apresentaram maior estabilidade fisiológica frente ao estresse, configurando-se como materiais indicados para solos com alta concentração de potássio, enquanto G141 mostrou tolerância intermediária e G23 desempenho inferior, mesmo sem salinidade. A aplicação de modelos estatísticos multivariados aprimorou a interpretação dos efeitos de genótipo e dose, subsidiando a seleção de materiais mais tolerantes. A utilização desses genótipos em cruzamentos direcionados pode viabilizar o desenvolvimento de cultivares adaptadas a ambientes salinizados, especialmente em regiões costeiras como Florianópolis, onde a influência marinha afeta a germinação e o vigor das plântulas.

Referências

AKBARIMOGHADDAM, H. *et al.* Salinity effects on seed germination and seedling growth of bread wheat cultivars. **Trakia Journal of Sciences**, v. 9, n. 1, 2011.

ARAVIND, J. *et al.* germinationmetrics: Seed Germination Indices and Curve Fitting, 2023. Disponível em: <<https://github.com/aravind-j/germinationmetrics><https://cran.r-project.org/package=germinationmetrics>>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes – RAS**. Brasília: MAPA/ACS, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/ras-2020.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.

BOS, Izak; CALIGARI, Peter. **Selection Methods in Plant Breeding**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995.

BUSTAMANTE, F.R.M *et al.* Análise de Componentes Principais para Caracterização e Priorização de Variáveis em Genótipos de Linho (*Linum usitatissimum*, L.). In: 68ª REUNIAO ANUAL DA RBRAS. **68ª Reunião Anual da Rbras**. Piracicaba, SP: 2024.

FAO. FAOSTAT. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity>. Acesso em: 9 jul. 2025.

FRANKS, S. J.; PRATT, P. D.; DRAY, F. A.; SIMMS, E. L. Selection on herbivory resistance and growth rate in an invasive plant. **The American Naturalist**, v. 171, p. 678–691, 2008. DOI: 10.1086/587078.

KAYA, Mehmet Demir *et al.* Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **European Journal of Agronomy**, v. 24, p. 291–295, 1 jan. 2006.

KVAVADZE, Eliso *et al.* 30,000-Year-Old Wild Flax Fibers. **Science**, v. 325, n. 5946, p. 1359–1359, 11 set. 2009.

Lúcio, Alessandro & Follmann, Diego & Emanuelli, Tatiana & Marchioro, Volmir & Velho, João. (2021). **HISTÓRICO, USOS E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA LINHAÇA**. 10.22533/at.ed.0572121061.

MARCOS FILHO, Julio. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 363–374, ago. 2015.

MAYROSE, M.; KANE, N. C.; MAYROSE, I.; DLUGOSCH, K. M.; RIESEBERG, L. H. Increased growth in sunflower correlates with reduced defences and altered gene expression in response to biotic and abiotic stress. **Molecular Ecology**, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2011.05301.x.

MUNNS, Rana; TESTER, Mark. Mechanisms of Salinity Tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 651–681, 1 jun. 2008.

OLIVOTO, Tiago; LÚCIO, Alessandro Dal'Col. metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, n. 6, p. 783–789, jun. 2020.

PEDERSEN, Thomas Lin. **patchwork: The Composer of Plots.** : CRAN: Contributed Packages. The R Foundation, 1 dez. 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=patchwork>>. Acesso em: 17 jul. 2025

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**, 2025. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>

ROSENTHAL, J.; DIRZO, R. Effects of life history, domestication and agronomic selection on plant defence against insects: evidence from maizes and wild relatives. **Evolutionary Ecology**, v. 11, p. 337–355, 1997.

SHAHID, Muhammad Adnan *et al.* Insights into the Physiological and Biochemical Impacts of Salt Stress on Plant Growth and Development. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 938, jul. 2020.

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina /2016.** 376 p. : il. ISBN: 978-85-66301-80-9

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.** Springer-Verlag New York, 2016.