



ISSN: 2525-815X

# Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: [www.jeap.ufrpe.br/](http://www.jeap.ufrpe.br/)

10.24221/jeap.7.3.2022.4692.159-168



## Parâmetros bioquímicos, fisiológicos e produtividade de sorgo granífero irrigado com água salina

### Biochemical, physiological, and yield parameters of grain sorghum irrigated with saline water

Miguel Julio Machado Guimarães<sup>a</sup>, Welson Lima Simões<sup>b</sup>, Juliane Rafaela Alves Barros<sup>c</sup>, Keila da Costa Alberto<sup>d</sup>, Lilia Gomes Willadino<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão-IFMA SRM. BR-230, São Raimundo das Mangabeiras, Maranhão, Brasil. CEP: 65840-000. E-mail: [miguel.guimaraes@ifma.edu.br](mailto:miguel.guimaraes@ifma.edu.br).

<sup>b</sup> Embrapa Semiárido. Rodovia BR-428, Km 152, s/n, Zona Rural, Petrolina, Pernambuco, Brasil. CEP: 56302-970. E-mail: [welson.simoese@embrapa.br](mailto:welson.simoese@embrapa.br).

<sup>c</sup> FACEPE/Embrapa Semiárido. Rodovia BR-428, Km 152, s/n, Zona Rural, Petrolina, Pernambuco, Brasil. CEP: 56302-970. E-mail: [juliane-ab@hotmail.com](mailto:juliane-ab@hotmail.com).

<sup>d</sup> Universidade de Pernambuco-UPE. Rodovia BR 203, Km 2, s/n, Vila Eduardo, Petrolina, Pernambuco, Brasil. CEP: 56328-900. E-mail: [keiladacosta@hotmail.com](mailto:keiladacosta@hotmail.com).

<sup>e</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900. E-mail: [willadino.lilia@gmail.com](mailto:willadino.lilia@gmail.com).

#### ARTICLE INFO

Recebido 09 Out 2021

Aceito 06 Set 2022

Publicado 14 Set 2022

#### ABSTRACT

The cultivation of sorghum in saline environments causes important alterations in physiological processes directly related to plant productivity. The study aimed to evaluate the effect of irrigation, using saline water, on productivity, enzyme activity, and gas exchange in grain sorghum varieties. In a subdivided plot design, three sorghum varieties were subjected to leaching fractions with saline water with an electrical conductivity of 4.19 dS m<sup>-1</sup>. The following variables were evaluated: soil salt distribution, photosynthesis, transpiration rate, leaf temperature, stomatal conductance, catalase, ascorbate peroxidase, superoxide dismutase enzyme activity, and aboveground biomass productivity. The application of leaching fractions with saline water provides better distribution of salts in the soil profile. Sorghum plants submitted to irrigation with saline water showed a reduction in gas exchange and the cells' hydric state. The antioxidative defense was activated in sorghum plants cultivated in saline environments to avoid the accumulation of reactive oxygen species. The synchronism between the enzymes reflected a positive response in the productivity of the varieties 1011-IPA and Ponta Negra, with increases of 126% and 54%, respectively, in grain yield with leaching sheets. The use of saline water with an average electrical conductivity of 4.19 dS m<sup>-1</sup> is a viable alternative for irrigating the 1011-IPA and Ponta Negra varieties in Yellow Red Argisol.

**Keywords:** Oxidative stress, *Sorghum bicolor*, salinity.

#### RESUMO

O cultivo do sorgo em ambientes salinos provoca alterações importantes nos processos fisiológicos que são diretamente relacionados com a produtividade das plantas. O estudo objetivou avaliar o efeito da irrigação, com água salina, na produtividade, na atividade enzimática e nas trocas gasosas em variedades de sorgo granífero. Três variedades de sorgo foram submetidas a frações de lixiviação com água salina com condutividade elétrica de 4,19 dS m<sup>-1</sup>, em esquema de parcelas subdivididas. Foram avaliadas as variáveis distribuição de sais no solo, taxa de fotossíntese e transpiração, temperatura foliar, condutância estomática, atividade das enzimas catalase, ascorbato peroxidase e superóxido dismutase, e produtividade de biomassa da parte aérea. A aplicação de frações de lixiviação com água salina

proporciona melhor distribuição dos sais no perfil do solo. Plantas de sorgo submetidas a irrigação com água salina apresentam redução nas trocas gasosas e no estado hídrico das células. A defesa antioxidativa foi ativada em plantas de sorgo cultivadas em ambientes salinos para evitar o acúmulo de espécies reativas de oxigênio, sendo que o sincronismo entre as enzimas refletiu em uma resposta positiva na produtividade das variedades 1011-IPA e Ponta Negra, com aumentos de 126% e 54%, respectivamente, na produtividade de grãos com a aplicação de lâminas de lixiviação. A utilização de água salina com condutividade elétrica média de 4,19 dS m<sup>-1</sup> é uma alternativa viável para o cultivo irrigado das variedades 1011-IPA e Ponta Negra em Argissolo Vermelho Amarelo.

**Palavras-Chave:** Estresse oxidativo, *Sorghum bicolor*, salinidade.

## Introdução

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) é uma cultura típica de clima quente, apresenta características xerófilas, metabolismo C4, e baixa exigência em termos de fertilidade do solo, além de tolerante a diversos fatores abióticos. Em função dessas características, é considerado o quinto cereal mais importante do mundo, adaptando-se às diferentes condições edafoclimáticas encontradas em regiões áridas e semiáridas (Tabatabaei & Anagholi, 2012).

Essas regiões apresentam condições ambientais adversas, potencialmente capazes de causar efeitos negativos no crescimento, desenvolvimento, produção e na qualidade de forragens. Além disso, nestas regiões, a água salina é, muitas vezes, a única fonte hídrica. Sendo assim, a utilização desse recurso necessita de estratégias de curto e longo prazo que garantam a sustentabilidade socioeconômica e ambiental dos sistemas agrícolas, permitindo a obtenção de colheitas rentáveis sem que ocorra degradação do solo (Alves et al., 2022).

A irrigação com água salina requer aplicação extra de água para a lixiviação dos sais contidos na zona radicular, evitando a acumulação excessiva destes sais que limitariam o potencial de rendimento das culturas (Guimarães et al., 2022). A fração de lixiviação constitui-se como uma importante estratégia de manejo em cultivos com águas salinas, pois proporciona uma irrigação segura e sustentável, uma vez que visa obter um equilíbrio entre o sal acumulado na zona radicular e o sal lixiviado para região abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular (Corwin et al., 2007).

A salinidade é um dos estresses ambientais mais severos e diversas são as respostas dadas pelas plantas. Estas se refletem em variáveis fisiológicas (condutância estomática, taxa de transpiração e fotossíntese) (Guimarães et al., 2020), biométricas (altura, área foliar, produção de biomassa) (Guimarães et al., 2019), a bioquímicas (solutos osmorreguladores, enzimas antioxidantes) (Barbosa et al., 2014).

Sob condições salinas, as alterações no metabolismo, frequentemente promovem um estresse secundário, o oxidativo, o qual é resultante do aumento da produção e do acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) no metabolismo celular. As principais espécies produzidas incluem os radicais superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>), peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), radical hidroxila (OH<sup>•</sup>) e oxigênio "singlet" (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>) (Barbosa et al., 2014).

Como mecanismos de defesa aos estresses ambientais, as plantas desenvolveram um complexo de defesa antioxidativo constituído por enzimas e metabólitos antioxidantes. A capacidade de acionar o mecanismo de defesa antioxidativa é fundamental para prevenir os danos causados pelo estresse oxidativo extremo (Barbosa et al., 2014; Gill & Tuteja, 2010). Dentre as diversas enzimas que atuam nesse sistema, destacam-se a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT) e a ascorbato peroxidase (APX). Segundo Gill & Tuteja (2010), a SOD é considerada a primeira linha de defesa contra as EROs, sendo responsável pela dismutação do O<sub>2</sub><sup>-</sup> para formar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e oxigênio molecular (O<sub>2</sub>). A CAT e a APX, por sua vez, catalisam a conversão do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à água e O<sub>2</sub>.

O estudo objetivou avaliar o efeito da irrigação, com água salina, na produtividade, no metabolismo de defesa enzimática e nas trocas gasosas em variedades de sorgo granífero.

## Material e Métodos

O estudo foi conduzido no Campo Experimental Caatinga, pertencente à Embrapa Semiárido, em Petrolina-PE, na região do Submédio do Vale do São Francisco (latitude 9°8'8,9" S, longitude 40°18'33,6" O), no período de abril a outubro de 2016. O clima da região é classificado como semiárido, do tipo BShw' segundo a classificação de Köppen, com período de chuvas bem definidos, compreendendo os meses de novembro a abril (Lopes et al., 2017).

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo (EMBRAPA, 2006) com textura média, apresentando relevo plano. Durante o período do experimento, a umidade relativa e a temperatura

média do ar foram de 55,75% e 26,17°C, respectivamente. A evapotranspiração máxima observada foi de 6,72, tendo uma média de 4,58 mm dia<sup>-1</sup>. Os eventos de precipitação totalizaram 42,9 mm ao final do experimento.

Foi adotado o delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições, em parcelas subdivididas, compostas por três variedades de sorgo forrageiro: 1011-IPA, 2502-IPA e Ponta Negra, nas parcelas e quatro frações de lixiviação (FL): 0; 5; 10 e 15%, nas subparcelas, com água salina proveniente de poço artesiano, as quais foram cultivadas durante um ciclo produtivo. As unidades experimentais (subparcelas) foram

formadas por cinco fileiras de cinco metros de comprimento, perfazendo uma área de cinco fileiras com 5,0 m x 0,50 m = 12,5 m<sup>2</sup>, sendo fixado 10 plantas por metro linear, considerando-se úteis as plantas das fileiras centrais.

A área experimental foi preparada conforme necessidades da cultura, realizando-se uma calagem aos 90 dias antes do plantio. A adubação de fundação foi realizada com base na análise de solo previamente coletado (Tabela 1), sendo aplicados 60 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, 30 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio e 20 kg ha<sup>-1</sup> de potássio. O plantio foi realizado no mês de abril/2016, tendo a emergência ocorrido aos sete dias após o plantio (DAP).

Tabela 1. Parâmetros químicos, físicos e granulometria do solo no Campo Experimental Caatinga da Embrapa Semiárido, em Petrolina-PE, na região do Submédio do Vale do São Francisco. Fonte: Autores (2022).

Camada (cm)	CE dS m <sup>-1</sup>	pH	M.O. g kg <sup>-1</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V %
											cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		
0 – 20	1,33	4,6	4,6	6,14	0,23	0,27	1,6	0,6	0,05	1,5	2,7	4,2	64,0
20 – 40	2,2	5,7	4,1	1,22	0,16	0,68	1,4	0,6	0,00	2,7	2,8	5,6	50,9

Camada (cm)	Densidade (kg dm <sup>-3</sup> )		Porosidade total (%)	Granulometria (g kg <sup>-1</sup> )		
	Solo	Partícula		Areia	Silte	Argila
0 – 20	1,49	2,59	42,40	808,1	116,9	75,0
20 – 40	1,37	2,51	45,41	721,7	195,3	83,0

CE = condutividade elétrica do extrato de saturação; M.O. = matéria orgânica; P = fósforo disponível extraído por Mehlich<sup>-1</sup>; Mg = magnésio trocável; Ca = cálcio trocável; Na = sódio trocável; K = potássio trocável; Al = acidez trocável; CTC = capacidade de troca de cátions à pH 7,0; V = saturação por bases.

As irrigações foram realizadas diariamente por gotejamento superficial, através de tubo gotejador com emissores com vazão de 1,6 L h<sup>-1</sup>, diâmetro nominal de 16 mm e espaçamento de 30 cm entre si. As características químicas da água de

irrigação, proveniente de poço artesiano, foram determinadas em avaliações semanais, antes e durante o experimento, apresentando as médias descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas da água de irrigação proveniente de poço artesiano no município de Petrolina-PE. Fonte: Autores (2022).

Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	pH	C.E. -25 °C	Dureza CaCO <sub>3</sub>	R.A.S.
mmolc L <sup>-1</sup>						dS m <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	
15,83	14,49	14,8	0,52	55,79	7,37	4,19	140,65	3,8

CE = condutividade elétrica; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Na = sódio; K = potássio; Cl<sup>-</sup> = cloreto; RAS = relação de adsorção de sódio.

O volume de água aplicado em cada irrigação foi calculado por meio da Equação 1, de acordo com a evapotranspiração da cultura, aplicando-se a metodologia do Kc dual, usando Kc basais de 0,15; 0,95 e 0,35, respectivamente, para as fases fenológicas inicial, intermediária e para o final do ciclo, a eficiência de aplicação de água do sistema e as frações de lixiviação testadas.

$$Li = \frac{(E_{To} * K_c * K_l) - P}{E_f} * (1 + FL) \quad \text{Eq. (1)}$$

onde: Li = lâmina de irrigação, mm; E<sub>To</sub> = Evapotranspiração medida no período, mm; K<sub>c</sub> = Coeficiente de cultivo da cultura; K<sub>l</sub> = Coeficiente de irrigação localizada; P = Precipitação medida no período, mm; E<sub>f</sub> = Eficiência do sistema de irrigação, 0,9; FL = Fração de lixiviação aplicada, decimal.

As avaliações fisiológicas foram realizadas aos 60 dias após o plantio, entre 09h00min e 11h00min da manhã. Na ocasião foram avaliadas as trocas gasosas utilizando o Analisador Portátil de Gás Infravermelho (IRGA), modelo Li-6400, utilizando luz artificial fixada em  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Foram avaliadas as variáveis: taxa de fotossíntese ( $A$ ), transpiração ( $E$ ), condutância estomática ( $g_s$ ) e temperatura foliar ( $T_f$ ). As leituras foram realizadas na terceira folha completamente expandida, a contar do ápice para o colo da planta. As amostras de tecido foliar foram imediatamente armazenadas em envelopes de papel alumínio e imersas em nitrogênio líquido. Posteriormente, todo o material foi armazenado em freezer a  $-80^\circ\text{C}$  até o momento das análises enzimáticas.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada por meio da metodologia descrita por Havir & Mchale (1987), com modificações, por meio da decomposição do  $\text{H}_2\text{O}_2$  por 60 segundos, monitorada por leituras espectrofotométricas a 240 nm. A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi mensurada conforme descrito por Nakano & Asada (1981). A atividade foi determinada pelo monitoramento da taxa de oxidação do ascorbato utilizando espectrofotômetro com comprimento de onda a 290 nm, a  $30^\circ\text{C}$ , durante 60 segundos. Para a determinação da atividade da superóxido dismutase (SOD) foi utilizado o protocolo de Giannopolitis & Ries (1977). Por esse método, é determinada a inibição da redução do NBT (*nitro blue tetrazolium*) pelo extrato enzimático, evitando a formação do cromóforo. A solução foi adicionada aos tubos de vidro e irradiada com luz branca (lâmpada fluorescente de 15 W) por 15 min. Após esse período de exposição, a solução foi analisada em espectrofotômetro a 560 nm.

A colheita foi realizada quando os grãos da porção central da panícula apresentaram aspecto seco. Após a colheita, foram avaliados os seguintes parâmetros: produtividade de biomassa fresca e seca da parte aérea (folhas + colmo + panícula) e produtividade de grãos.

Para a determinação da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) foram coletadas amostras deformadas de solo nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 m de profundidade. A CEes foi determinada com o auxílio de condutivímetro digital de bancada, utilizando a metodologia proposta por Richards (1954).

Foi realizada a análise de variância (ANAVA), utilizando o programa Sisvar 5.0. Foram avaliados modelos de regressão de primeiro e segundo grau quando significativos ao nível de 1% ou 5% de probabilidade para comparação entre as frações de lixiviação. Para uma comparação entre as variedades avaliadas foi utilizado o Teste de comparação de Médias de Tukey a 0,05 de probabilidade.

### Resultados e Discussão

Pode-se observar uma redução da condutividade elétrica do solo (CEes) com o aumento da fração de lixiviação aplicada em todas as camadas de solo avaliadas. As parcelas que foram irrigadas com uma lâmina de 15% de lixiviação apresentaram menores valores de CEes quando comparadas às parcelas onde não houve lâmina de lixiviação (0%) (Tabela 3). Corroborando Guimarães et al. (2022), os quais verificaram reduções e melhores distribuições da CEes ao utilizarem água salina na irrigação de variedades de sorgo granífero.

Tabela 3. Condutividade elétrica do extrato de saturação ( $\text{dS m}^{-1}$ ) de um solo cultivado com variedades de sorgo granífero submetido a frações de lixiviação de 0, 5, 10 e 15%. Fonte: Autores (2022).

Camada (cm)	Fração de lixiviação (%)			
	0	5	10	15
0 - 10	7,47 a	5,33 b	4,95 b	4,25 b
10 - 20	5,34 a	4,84 a	5,69 a	3,48 b
20 - 30	5,92 a	4,36 b	4,48 b	3,98 b
30 - 40	6,12 a	4,62 b	4,80 b	3,99 b

Médias seguidas de mesma letra nas linhas, dentro de camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Sabendo-se que a retenção máxima de água do solo é dada quando o mesmo atinge a umidade na capacidade de campo, todo o volume de água acima desse valor será drenado, provocando assim a lixiviação dos sais no perfil do solo. Confirmando, assim, os dados apresentados

na Tabela 4 mostram uma redução da CEes do solo com o aumento da FL, o que foi observado por diversos autores em cultivos de sorgo (Guimarães et al., 2016; Guimarães et al., 2022), beterraba (Simões et al., 2016) e milho (Freitas, 2022).

Tabela 4. Taxa fotossintética ( $A$ ), taxa de transpiração ( $E$ ), condutância estomática ( $gs$ ), temperatura foliar ( $Tf$ ), atividade enzimática da ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT) e superóxido dismutase (SOD) em variedades de sorgo granífero irrigadas com água salina. Fonte: Autores (2022).

Variedades	$A$	$gs$	$E$	$Tf$	APX	CAT	SOD
	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{mol AsA gMF}^{-1} \text{min}^{-1}$	$\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{gMF}^{-1} \text{min}^{-1}$	$\text{U gMF}^{-1}$
Ponta Negra	30,48 b	0,14 b	3,43 b	32,65 a	43,76 b	4,15 a	13,12 a
1011-IPA	39,15 a	0,23 a	4,45 a	32,11 b	53,64 a	1,91 b	13,69 a
2502-IPA	38,46 a	0,22 a	4,62 a	32,19 b	49,65 ab	3,34 a	13,04 a
CV (%)	13,38	33,32	22,35	1,2	18,74	37,97	12,39

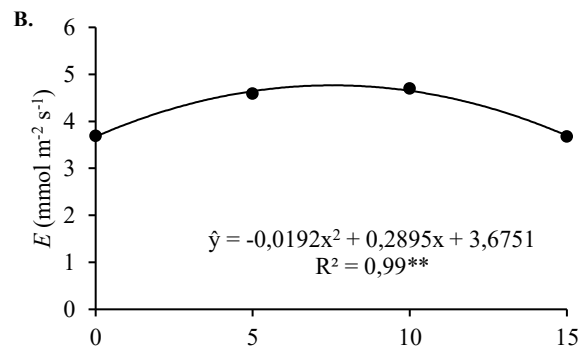
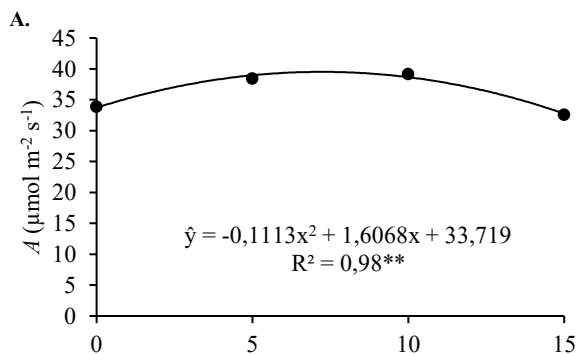
Médias seguidas de mesma letra nas colunas, dentro de cada variável, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pode-se observar comportamentos distintos entre as variáveis fisiológicas para as variedades avaliadas (Tabela 4). As variedades 2502-IPA e 1011-IPA apresentaram as maiores taxas fotossintéticas e de transpiração, bem como uma maior condutância estomática, resultando em menores valores de temperatura foliar, independentemente da fração de lixiviação aplicada. Isso foi observado por outros autores (Guimarães et al., 2020) os quais concluíram que as variáveis fotossintéticas avaliadas se correlacionam, de modo que quanto maiores as taxas fotossintéticas ( $A$ ) e de transpiração ( $E$ ), menor será a temperatura foliar ( $Tf$ ), haja vista que a  $E$  é um dos principais mecanismos de regulação da temperatura das plantas, onde cerca de 95% da água que as plantas absorvem é utilizada na regulação da temperatura através da transpiração (Taiz et al., 2017).

A variedade 1011-IPA apresentou maior atividade enzimática das enzimas APX e CAT, não diferindo estatisticamente das demais variedades na atividade da SOD (Tabela 2). Essas diferenças

de alteração do metabolismo enzimático dentro de uma mesma espécie foram observadas por Guimarães et al. (2020), quando avaliaram o efeito de frações de lixiviação em variedades de sorgo forrageiro, concluindo que este comportamento é o reflexo da alta variabilidade genética do gênero *Sorghum*, o qual possui mais de 30 espécies, se dividindo em três grandes grupos de aptidão agrícola: forrageiro, granífero e sacarino.

Níveis crescentes de fração de lixiviação proporcionaram comportamentos quadráticos nas variáveis do sistema fotossintético avaliadas. As variáveis  $A$ ,  $E$  e  $gs$  apresentaram maiores valores quando submetidas a FL de 7,21%, 7,53% e 7,23%, respectivamente. A  $Tf$  apresentou comportamento inverso, com um menor valor, quando se aplicou uma FL de 5,23% (Figura 1). Sabe-se que cerca de 95% da água que as plantas absorvem é utilizada na regulação da temperatura, por meio da transpiração (Taiz et al., 2017), logo, com a redução da  $gs$ , há uma diminuição da taxa de transpiração e, como consequência, um aumento da  $Tf$ .



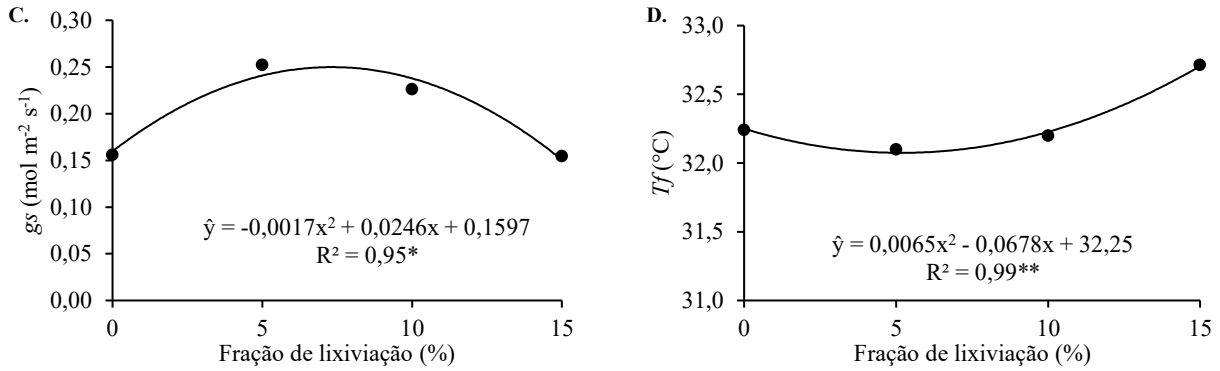


Figura 1. Variáveis fisiológicas em variedades de sorgo forrageiro. A. Taxa fotossintética –  $A$ ; B. taxa de transpiração –  $E$ ; C. condutância estomática –  $g_s$ ; D. temperatura foliar –  $T_f$  em variedades de sorgo granífero, submetidas a diferentes níveis de salinidade. Coeficientes da regressão significativos com  $p < 0,01$  ( $^{**}$ ) e  $p < 0,05$  ( $^*$ ). Fonte: Autores (2022).

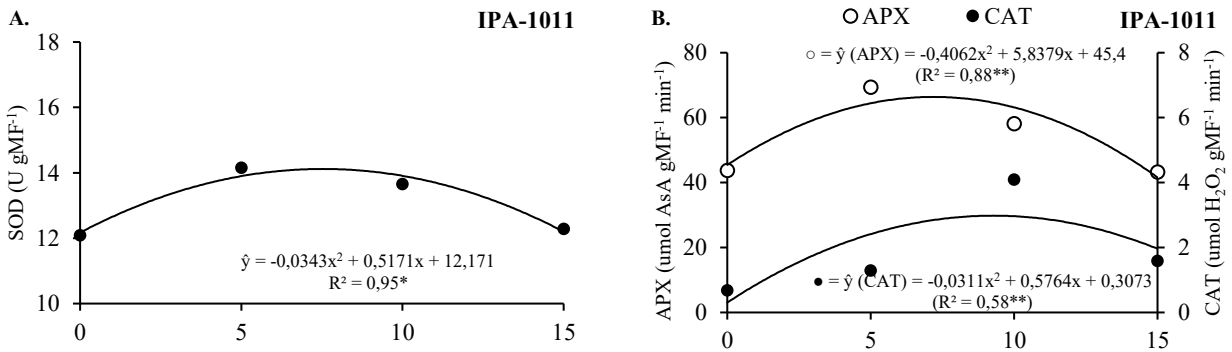
Tais resultados corroboram diversos estudos encontrados na literatura (Simões et al., 2021; Guimarães et al., 2020; Soares et al., 2013). Reduções nas trocas gasosas com o aumento da CEes pode ser utilizado para sinalizar variedades com baixa tolerância à salinidade, haja vista que uma menor eficiência fotossintética pode se refletir na redução do crescimento e da produtividade das plantas, quando não há a presença de mecanismos compensatórios para manter o pleno funcionamento do metabolismo fotossintético (Lacerda et al., 2006).

O aumento da salinidade reduz o potencial osmótico do solo, dificultando a absorção de água pelas raízes. Nessas condições, ocorre redução da concentração intercelular de  $CO_2$ , provocando quedas significativas na taxa fotossintética das plantas (Taiz et al., 2017). Esta redução é regulada pela diminuição da condutância estomática, a qual é um componente de fundamental importância na manutenção da turgescência, em resposta aos

decréscimos no potencial hídrico das plantas (Guimarães, 2020).

As diminuições nas trocas gasosas de vegetais submetidos a ambientes salinos estão diretamente relacionadas ao efeito osmótico sobre o metabolismo da planta (Silva et al., 2013). Outros pesquisadores avaliando acessos do complexo *Saccharum* sob salinidade no Submédio São Francisco concluíram que a irrigação constante com água salina acima do limiar da cultura, diminui a taxa fotossintética líquida em consequência da redução da condutividade estomática (Simões et al., 2021).

Foram observados comportamentos distintos do metabolismo enzimático para as variedades avaliadas. As variedades Ponta Negra e IPA-2502 apresentaram comportamento quadrático da atividade enzimática da SOD com o aumento da fração de lixiviação (FL) aplicada (Figura 2).



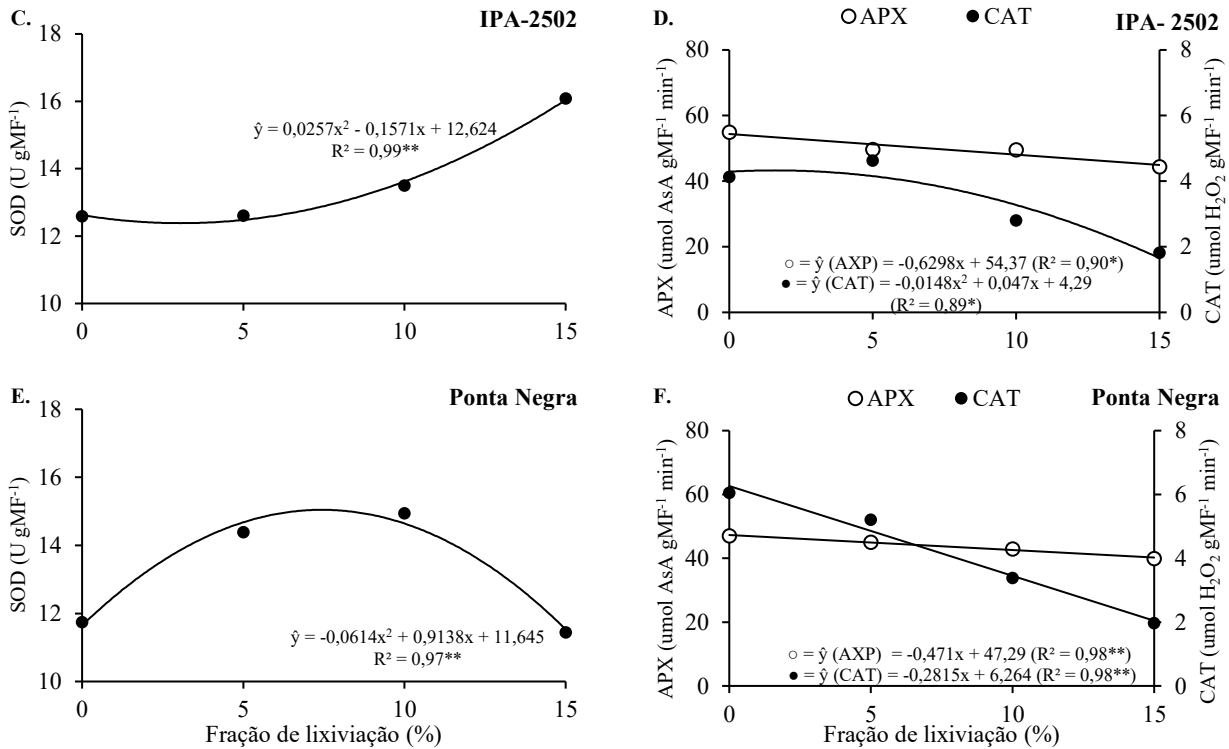
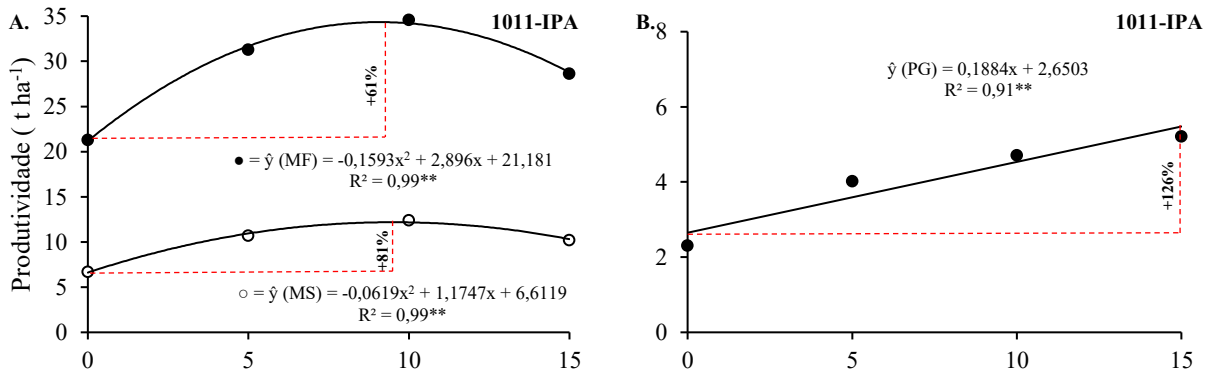


Figura 2. Atividade enzimática da superóxido dismutase (SOD) (A, C e E), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (B, D e F) em variedades de sorgo granífero, submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Coeficientes da regressão significativos com  $p < 0,01$  ( $**$ ) e  $p < 0,05$  ( $*$ ). Fonte: Autores (2022).

As maiores atividades enzimáticas da SOD foram observadas nas FL de 7,44 e 7,53% para as variedades Ponta Negra e IPA-2502, respectivamente. A variedade IPA-1011 apresentou comportamento quadrático crescente, com maior atividade na maior FL avaliada, 15%. Esta enzima é responsável pela primeira linha de defesa contra as EROs, sendo responsável pela dismutação do radical superóxido ( $O_2^{\bullet-}$ ) para formar peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), também uma EROs, e oxigênio molecular ( $O_2$ ) (Gill & Tuteja, 2010). Alguns autores relatam que plantas que apresentam maiores atividades desta enzima

possuem um maior potencial para reduzir os efeitos do ( $O_2^{\bullet-}$ ) no metabolismo.

Quanto à atividade das enzimas CAT e APX, a qual é responsável pela eliminação do  $H_2O_2$  gerado pela SOD ou por outras reações metabólicas (Barbosa, et al., 2014), pode-se observar diferentes comportamentos entre as variedades avaliadas (Figura 3). As variedades Ponta Negra e IPA-2502, apresentaram, no geral, reduções significativas na atividade destas enzimas com o aumento da FL. A variedade IPA-1011, apresentou comportamento quadrático para estas duas enzimas, com atividades máximas da CAT e APX nas FL de 9,26 e 7,18%, respectivamente.



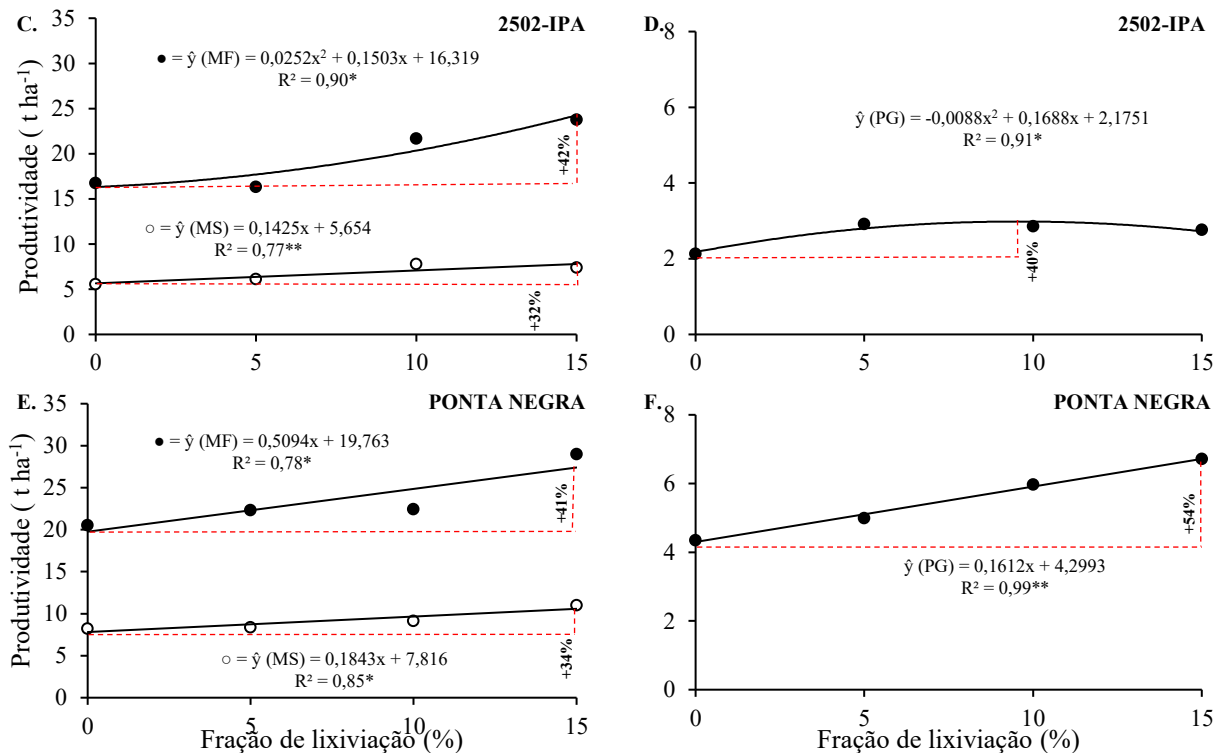


Figura 3. Produtividade de biomassa fresca (MF), seca (MS) (A, C e E) e de grãos (PG) (B, D e F) de sorgo granífero irrigado com água salina, submetidos a diferentes frações de lixiviação. Coeficientes da regressão significativos com  $p < 0,01$  (\*\*) e  $p < 0,05$  (\*). Fonte: Autores (2022).

Os resultados encontrados estão de acordo com diversos estudos encontrados na literatura (Costa et al., 2005; Guimarães et al., 2018; Guimarães et al., 2020). A cultura do sorgo é caracterizada por uma alta variabilidade genética (Igartua et al., 1995), resultando em distintos comportamentos do metabolismo fisiológico para as variedades do gênero. A relação entre a atividade da SOD e a eliminação do  $H_2O_2$  pela APX e CAT no sorgo é um importante marcador bioquímico para determinar a tolerância dessa espécie à salinidade (Costa et al., 2005).

Vários estudos têm comprovado o papel das enzimas antioxidantes nos mecanismos de proteção contra o estresse oxidativo induzido pela salinidade. Em culturas como o cana-de-açúcar (Morais et al., 2020), tomate (Raziq et al., 2022), arroz (Abdelaziz et al., 2018) e feijão-de-corda (Lima et al., 2021), a manutenção da atividade de enzimas como SOD, APX, e CAT está diretamente relacionada com o aumento dos níveis dos danos fisiológicos em plantas sob estresse salino.

Alguns autores associam as alterações observadas neste estudo à adaptabilidade das espécies vegetais quando submetidos ao estresse salino pois, é reconhecido que níveis salinos muito elevados provocam a redução da atividade enzimática de diversas enzimas (Guimarães et al., 2020; Morais et al., 2020). Sendo assim, variedades que conseguem manter a atividade enzimática em ambientes com altas concentrações de sais podem

ser sinalizadas como tolerantes ao estresse aplicado.

As alterações observadas no metabolismo das plantas refletem na produtividade de biomassa das variedades avaliadas (Figura 3). Pode-se observar, de forma geral, que a aplicação de frações de lixiviação de até 15% resultam em aumentos na produtividade de biomassa da parte aérea de todas as variedades avaliadas.

O maior acréscimo na produtividade de biomassa fresca foi observado na variedade 1011-IPA (+61%), seguida das variedades 2502-IPA (42%) e Ponta Negra (41%). Considerando a produtividade de biomassa seca, o maior acréscimo foi observado na variedade 1011-IPA (81%), Ponta Negra (34%) e 2502-IPA (32%). Quanto à produtividade de grãos, os maiores acréscimos foram observados nas variedades 1011-IPA e Ponta Negra, com 126% e 54%, respectivamente, de aumento na produtividade com a aplicação de 15% de fração de lixiviação

Resultados semelhantes foram observados por Guimarães et al. (2022) ao avaliarem a aplicação de frações de lixiviação na cultura do sorgo em condições climáticas semelhantes a este estudo. Entretanto, frações de lixiviação elevadas podem causar redução no rendimento das culturas, devido à redução da disponibilidade de íons indispensáveis para a nutrição mineral das plantas, conforme observado por Carvalho et al. (2012), na produtividade de milho irrigado com água salina



com 20 % de FL, e na produtividade da variedade 1011-IPA avaliada neste estudo (Figura 3).

Tão importante quanto à manutenção da atividade enzimática, o sincronismo do padrão de comportamento entre estas enzimas é fundamental para a defesa contra as EROs produzidas na célula vegetal (Barros et al., 2021), e refletirá diretamente na produtividade da planta. A primeira defesa contra as EROs é a SOD. O H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gerado pela atividade da SOD também é tóxico a célula, sendo capaz de facilmente permear através das membranas, devendo ser detoxificado (Barbosa et al., 2014). Estas moléculas são eliminadas pela APX e/ou CAT, as quais pertencem a duas diferentes classes de enzimas de limpeza devido as suas diferenças na afinidade pelo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, com a APX na ordem de µM e a CAT em mM. Desta forma, enquanto a APX atua na modulação refinada das EROs para a sinalização, a CAT seria responsável pela remoção do excesso de EROs produzida durante o estresse (Mittler, 2006).

Desta forma, pode-se observar uma melhor sincronia entre as atividades das enzimas APX, CAT e SOD na variedade Ponta Negra e 1011-IPA, as quais apresentaram, em geral, reduções na atividade das enzimas APX e CAT, associadas a uma redução quadrática da SOD com o aumento da FL aplicada. A variedade IPA-2502 apresentou reduções na atividade das enzimas APX e CAT, e um aumento da atividade da enzima SOD com o aumento da FL aplicada, o que pode provocar um acúmulo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nas células, pois não haverá enzimas de CAT e APX para eliminar esta molécula. Tais resultados são corroborados pelos dados de produtividade apresentados na Figura 3, em que é possível observar aumentos de 126% e 54% na produtividade de grãos destas variedades, 1011-IPA e Ponta Negra, respectivamente.

## Conclusão

Plantas de sorgo submetidas à irrigação com água salina apresentam redução nas trocas gasosas e no estado hídrico das células.

A defesa antioxidativa é ativada em plantas de sorgo cultivadas em ambientes salinos para evitar o acúmulo de espécies reativas de oxigênio. O sincronismo entre as enzimas refletiu em uma resposta positiva na produtividade das variedades 1011-IPA e Ponta Negra, com aumentos de 126% e 54%, respectivamente, na produtividade de grãos com a aplicação de lâminas de lixiviação.

A utilização de água salina com condutividade elétrica média de 4,19 dS m<sup>-1</sup> é uma alternativa viável para o cultivo irrigado das variedades 1011-IPA e Ponta Negra em um Argissolo Vermelho Amarelo, sob condições semiáridas.

## Referências

- Abdelaziz, M. N.; Xuan, T. D.; Mekawy, A. M. M.; Wang, H.; Khanh, T. D. 2018. Relationship of salinity tolerance to Na<sup>+</sup> exclusion, proline accumulation, and antioxidant enzyme activity in rice seedlings. *Agriculture*, 8, 166, 1-12.
- Alves, H.; Jardim, A.; Araújo Júnior, G.; Souza, C.; Leite, R.; Silva, G.; Souza, L.; Silva, T. 2022. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. *Rev. Bras. Geo. Fís.*, 15, 1, 373-392.
- Barbosa, M. R.; Silva, M. M. A.; Willadino, L.; Ulisses, C.; Camara, T. R. 2014. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. *Cienc. Rur.*, 44, 3, 453-460.
- Barros, J. R. A.; Guimarães, M. J. M.; Silva, R. M.; Rêgo, M. T. C.; Melo, N. F.; Chaves, A. R. M.; Angelotti, F. 2021. Selection of cowpea cultivars for high temperature tolerance: physiological, biochemical and yield aspects. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 27, 29-38.
- Carvalho, J. F. de; Tsimpho, C. J.; Silva, E. F. de F.; Medeiros, P. R. F. de; Santos, M. H. V. dos; Santos, A. N. dos. 2012. Produção e biometria do milho verde irrigado com água salina sob frações de lixiviação. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*. 16, 368-374.
- Corwin, D. L.; Rhoades, J. D.; Simunek, J. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agricultural Water Management*, 90, 165-180.
- Costa, P. H. A.; Azevedo Neto, A. D.; Bezerra, M. A.; Prisco, J. T.; Gomes filho, E. 2005. Sistema enzimático antioxidante de dois genótipos de sorgo diferindo na tolerância à salinidade. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17, 4, 353-362.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- Freitas, E. D.; Lacerda, C. F.; Amorim, A. V.; Ferreira, J. F. S.; Costa, C. A. G.; Silva, A. O.; Gheyi, H. R. 2022. Leaching fraction impacts water use efficiency and nutrient losses in maize crop under salt stress. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 26, 11, 797-806.
- Giannopolitis, C. N.; Ries, S. K. 1977. Superoxide Dismutases: I. Occurrence in Higher Plants. *Plant Physiol.*, 59, 2, 309-314.
- Gill, S. S.; Tujeta, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.*, 48, 12, 909-930.

- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Tabosa, J. N.; Santos, J. E.; Willadino, L. 2016. Cultivation of forage sorghum varieties irrigated with saline effluent from fish-farming under semiarid conditions. *Rev. Bras. Eng. Agr. e Ambien.*, 20, 5, 461-465.
- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Camara, T. J. R.; Silva, C. U. C.; Willadino, L. G. 2018. Antioxidant defenses of irrigated forage sorghum with saline aquaculture effluent. *Rev. Caatinga.*, 31, 1, 135-142.
- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Oliveira, A. R.; Araújo, G. G. L.; Silva, E. F. F.; Willadino, L. G. 2019. Biometrics and grain yield of sorghum varieties irrigated with salt water. *Rev. Bras. Eng. Agr. e Ambien.*, 23, 4, 285-290.
- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Tabosa, J. N.; Camara, T. R.; Willadino, L. G. 2020. Gas exchange and enzymatic metabolism in grain sorghum varieties irrigated with saline water. *Rev. Bras. de Milho e Sorgo*, 19, e1188.
- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Salviano, A. M.; Oliveira, A. R.; Silva, J. S.; Barros, J. R. A.; Willadino, L. 2022. Management for grain sorghum cultivation under saline water irrigation. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 26, 11, p.755-762.
- Havir, E. A.; McHale, N. A. 1987. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. *Plant Physiol.*, 84, 2, 450-455.
- Igartua, E.; Gracia, M. P.; Lasa, J. M. 1995. Field responses of grain sorghum to a salinity gradient. *Field Crops Res.*, 42, 15-25.
- Lacerda, C. F.; Morais, H. M. M.; Prisco, J. T.; Gomes Filho, E.; Bezerra, M. A. 2006. Interação entre salinidade e fósforo em plantas de sorgo forrageiro. *Ver. Ciênc. Agron.*, 37, 3, 258-263.
- Lima, E. A.; Saraiva, L. F. M.; Oliveira, M. S. C.; Mendes, L. L. C.; Carneiro, M. T. A.; Andrade, R. D. L.; Paula, F. M. 2021. Atividade das enzimas sod, cat e apx e metabolismo dos lipídeos de membranas em dois cultivares de feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* L. Walp) em condições de estresse salino. *Braz. Jour. Devel.*, 7, 5, 48471-48488.
- Lopes, I.; Guimarães, M. J. M.; Melo, J. M. M.; Ramos, C. M. C. 2017. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. *Irrig.*, 22, 3, 443-457.
- Mittler, R. 2006. Abiotic stress, the field environmental and stress combination. *Trends Plant Sci.*, 11, 1, 15-19.
- Morais, M. B.; Azevedo, R. A.; Camara, T. R.; Ulisses, C.; Albuquerque, C. C.; Willadino, L. 2020. Antioxidative metabolism in sugarcane (Poaceae) varieties subjected to water and saline stress. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 24, 11, 776-782.
- Nakano, Y.; Asada, K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplast. *Plant Cell Physiol.*, 22, 5, 867-880.
- Raziq, A.; Wang, Y.; Mohi Ud Din, A.; Sun, J.; Shu, S.; Guo, S. A. 2022. Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance in Tomato (Var. Ailsa Craig): Responses of Physiological and Transcriptional Changes in RBOH's and ABA Biosynthesis and Signalling Genes. *Int. J. Mol. Sci.*, 23, 1603.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: U. S. Government Printing, Office, D. C. Department of Agriculture. USDA Handbook 60. 160p.
- Silva, F. L. B.; Lacerda, C. F.; Neves, A. L. R.; Sousa, G. G.; Sousa, C. H. C.; Ferreira, F. J. 2013. Irrigação com águas salinas e uso de biofertilizante bovino nas trocas gasosas e produtividade de feijão-de-corda. *Irrig.*, 18, 2, 304-317.
- Simões, W. L.; Yuri, J. E.; Guimarães, M. J. M.; Santos, J. E.; Araújo, E. F. J. 2016. Beet cultivation with saline effluent from fish farming. *Rev Bras. Eng. Agríc. e Amb.*, 20, 1, 62-66.
- Simões, W. L.; Oliveira, A. R.; Silva, J. S.; Torres Junior, V. G.; Silva, W. O.; Morais, L. K. 2021. Characterization and gas exchange in accessions of *Saccharum* complex under salinity in the Sub-middle São Francisco, Brazil. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 25, 3, 163-167.
- Soares, L. A. A.; Furtado, G. F.; Andrade, E. M. G.; Sousa, J. R. M.; Guerra, H. O. C.; Nascimento, R. 2013. Troca de CO<sub>2</sub> do feijão-caupi irrigado com água salina e fertilização nitrogenada. *ACSA-Agrop. Cient. no Semi-Árido*, 9, 3, 30-37.
- Tabatabaei, S. A.; Anaghali, A. 2012. Effects of salinity on some characteristics of forage sorghum genotypes at germination stage. *Inter. J. Agric. Crop Sci.*, 4, 14, 979-983.
- Taiz, L.; Moller, E. Z. I. M.; Murphy, A. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6 ed., Porto Alegre: Artmed. 888p.