

Efeito do estresse hídrico nas trocas gasosas foliares, *quenching* não-fotoquímico e no rendimento quântico do PSII de diferentes genótipos de milho-pipoca inoculado com *Bacillus cereus*

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.946112621014>

Monique de Souza Santos

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Antônio Teixeira do Amaral Junior

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Gabriella Rodrigues Gonçalves

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Uéliton Alves de Oliveira

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Valter Jário de Lima

Centro de Ciências Agrárias e Biológicas, Universidade Estadual
Vale do Acaraú – Campus Ibiapaba, São Benedito, Brazil

Talles de Oliveira Santos

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Flávia Nicácio Viana

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Danielle Leal Lamêgo

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e
Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Samuel Pereira da Silva

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e
Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Jardel da Silva Figueiredo

Laboratório de Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e
Tecnologias Agrárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

RESUMO: O estresse hídrico é o principal fator limitante para a produtividade no mundo, causando enormes perdas na produção agrícola. A seca afeta o potencial hídrico e o turgor da planta, interferindo nas funções e alterando suas características fisiológicas. Nesse sentido, torna-se de suma importância a busca de tecnologias que auxiliem a adaptação e resiliência das plantas. Diante desse cenário, estudos envolvendo bactérias promotoras de crescimento vegetal tem ganhado grande destaque, visto que, é uma prática sustentável e responsável por gerar múltiplos benefícios as plantas. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi analisar os potenciais efeitos benéficos na fisiologia de diferentes genótipos de milho-pipoca, decorrentes da interação com a bactéria *Bacillus cereus*, em condição de estresse hídrico. Os genótipos foram cultivados em casa de vegetação e inoculados com a rizobactéria *B. cereus* sob déficit hídrico (WS), com imposição do estresse 24 dias após a emergência até que as plantas atingissem 40% da capacidade de campo (CC). Foram analisadas duas linhagens de milho-pipoca (L61 e L76) e seu híbrido (UENF WS01). O experimento seguiu um delineamento de blocos completos casualizados, arranjado em fatorial triplo, combinando condições hídricas, genótipos e tipo de inoculação (controle e inoculado), com três repetições. Os tratamentos foram conduzidos em tubos de PVC contendo 70% de basaplant e 30% de perlita como substrato, e os tratamentos inoculados receberam 1 mL de *B. cereus*. Os resultados mostraram que no híbrido UENF WS01, a inoculação melhorou diversos parâmetros fisiológicos, incluindo a taxa de transpiração, a concentração interna de CO₂ e a condutância estomática. A conclusão foi que o uso de híbrido associado com a inoculação com *B. cereus* tem potencial para mitigar os efeitos de estresse hídrico por seca.

PALAVRAS-CHAVE: déficit hídrico, trocas gasosas, rizobactérias, *Zea mays* L. var. *everta*

Effect of water stress on leaf gas exchange, non-photochemical quenching, and PSII quantum yield of different popcorn genotypes inoculated with *Bacillus cereus*

ABSTRACT: Water stress is the main limiting factor for crop productivity worldwide, causing substantial losses in agricultural production. Drought affects plant water potential and turgor, interfering with physiological processes and altering plant functional traits. In this context, the search for technologies that enhance plant adaptation and resilience has become critically important. Given this scenario, studies involving plant growth-promoting bacteria have gained considerable attention, as they represent a sustainable practice capable of providing multiple benefits to plants. Therefore, the objective of this study was to analyze the potential beneficial effects on the physiology of different popcorn maize genotypes resulting from their interaction with the bacterium *Bacillus cereus* under water stress conditions. The genotypes were grown under greenhouse conditions and inoculated with the rhizobacterium *B. cereus* under water deficit (WS), with stress imposed 24 days after emergence until plants reached 40% of field capacity (FC). Two popcorn maize inbred lines (L61 and L76) and their hybrid (UENF WS01) were evaluated. The experiment followed a randomized complete block design arranged in a triple factorial scheme, combining water conditions, genotypes, and inoculation type (control and inoculated), with three replications. Treatments were conducted in PVC tubes containing a substrate composed of 70% Basaplant and 30% perlite, and inoculated treatments received 1 mL of *B. cereus*. The results showed that, in the hybrid UENF WS01, inoculation improved several physiological parameters, including transpiration rate, internal CO₂ concentration, and stomatal conductance. In conclusion, the use of hybrids associated with *Bacillus cereus* inoculation has the potential to mitigate the effects of drought-induced water stress.

KEYWORDS: water deficit, gas exchange, rhizobacteria, *Zea mays* L. var. *everta*

INTRODUÇÃO

A seca, dentro do contexto das mudanças climáticas, é a ameaça mais premente para a segurança alimentar e à saúde humana (SAMANTA, SETH E ROYCHOUDHURY, 2024). Esse estresse abiótico exerce um impacto negativo abrangente nas culturas, uma série de aspectos, desde o funcionamento bioquímico, morfológico, molecular e fisiológico das plantas, desencadeando estresses oxidativos, osmóticos e iônicos (AZEEM *et al.*, 2022; CHIEB *et al.*, 2023).

Tais alterações impactam na atividade fotossintética, produção de hormônios, estabilidade da membrana, absorção de nutrientes e no acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), resultando em alterações no crescimento, desenvolvimento e

produtividade (MAHREEN *et al.*, 2023; PRAVEEN *et al.*, 2023). Na cultura do milho-pipoca, estudos têm enfatizado os impactos substanciais do estresse hídrico no rendimento e na capacidade fotossintética como alterações no status fotossintético e na condutância estomática (KAMPHORST *et al.*, 2019; KAMPHORST *et al.*, 2020).

Devido ao efeito severo causado pelo déficit hídrico no crescimento e no desenvolvimento vegetal, o melhoramento genético apresenta-se como uma ferramenta eficaz para reduzir a vulnerabilidade das culturas agrícolas (CHALLINOR *et al.*, 2016). Aprimorar a adaptabilidade das plantas à seca é essencial, com isso, uma alternativa é utilizar microrganismos como rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), que são reconhecidas por fortalecer a produtividade e resistência ao estresse abiótico nas culturas (LIU *et al.*, 2023; MEDDICH *et al.*, 2023). Entre os endófitos identificados, o gênero *Bacillus* emergiu como um dos principais protagonistas, demonstrando ampla distribuição em diversas espécies vegetais e destacando-se por suas capacidades de promoção do crescimento e biocontrole (ZOU *et al.*, 2023).

Cepas não patogênicas de *B. cereus* apresentam diversas aplicações promissoras na agricultura, estudos recentes têm enfatizado sua eficácia em diversas áreas, incluindo o controle de doenças fitopatogênicas, biorremediação de solos contaminados e desenvolvimento de biofertilizantes (ZHANG *et al.*, 2024). A capacidade dessas cepas em induzir tolerância ao estresse abiótico em plantas é mediada por mecanismos multifacetados, englobando atividade de fitohormônios, defesa antioxidante, acúmulo de osmólitos, produção de compostos voláteis (VOCs) e biorremediação de metais pesados, incluindo a produção de exopolissacarídeos (EPS) e a alteração da morfologia da raiz (MEENAKSHI *et al.*, 2019; MUKHTAR *et al.*, 2020; AZEEM *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2022; ANDY *et al.*, 2023; WRÓBEL *et al.*, 2023).

A avaliação da cultura inoculada com bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) pode fornecer informações valiosas para identificar estratégias que possam beneficiar o cultivo e a produção, e além de contribuir para o desenvolvimento de bioinoculantes (MOTURU *et al.*, 2023). Para avaliar a eficácia dessas cepas na promoção do crescimento das plantas, com parâmetros fisiológicos utilizados, incluindo o teor de clorofila (KULKOVA *et al.*, 2023).

Neste sentido, a inoculação de *B. cereus*, surge como uma estratégia para aprimorar características fisiológicas durante períodos de escassez de água. Isso se torna particularmente relevante, uma vez que o déficit hídrico causa grandes perdas na produtividade (PRAVEEN *et al.*, 2023). Nesse contexto, este estudo visa analisar os potenciais efeitos benéficos na fisiologia de diferentes genótipos de milho-pipoca, decorrentes da interação com a bactéria *Bacillus cereus*, em condição de estresse hídrico.

MATERIAL E MÉTODOS

Material vegetal

Duas linhagens (S_7) de milho-pipoca L61 e L76 e seu híbrido simples UENF WS01 foram cultivados em casa de vegetação. As linhagens foram avaliadas anteriormente por KAMPHORST *et al.* (2018) e cada uma foi classificada como susceptível ou tolerante ao déficit hídrico. Já o híbrido simples foi obtido através do estudo de LIMA *et al.* (2019) e é classificado como tolerante ao déficit hídrico, tendo sido registrado no Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), nº de registro 46965, com denominação de “UENF WS01” (LIMA *et al.*, 2021).

Seleção da bactéria e preparação do inóculo

A cepa bacteriana UENF LMS 71 é proveniente do Laboratório de Biologia Celular e Tecidual da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Para a obtenção do inóculo da bactéria *B. cereus*, a cepa bacteriana foi inoculada através de plaqueamento, em placas de Petri, com meio sólido DYGS (Dextrose Yeast Glucose Sucrose), utilizando uma alça de platina calibrada. Após o plaqueamento, as placas foram incubadas por três dias na estufa a uma temperatura de 30°C, conforme a metodologia de DOBEREINER *et al.* (1995) e AMARAL *et al.* (2022).

O pré-inóculo foi obtido em meio líquido DYGS, com o auxílio de uma alça bacteriológica foi transferido uma colônia de bactéria da Placa de Petri para um tubo de ensaio. A bactéria foi agitada por 24 horas a 30°C em 180 rpm em um agitador orbital. O inóculo foi preparado com 150 μ L do pré-inóculo em 100 mL de DYGS, mantido nas mesmas condições. Após 24 horas, a leitura de densidade óptica foi realizada a 600 nm, em espectrofotômetro, para alcançar uma concentração de $1,8 \times 10^9$ unidades formadoras de colônia (UFC mL⁻¹).

Preparo das sementes

As sementes das linhagens L76, L61 e seu híbrido UENF WS01 foram desinfestadas com hipoclorito de sódio (NaOCl) a 3% durante 3 minutos, depois foram imersas em álcool 70% durante 2 minutos. Após serem lavadas com água destilada e desinfestadas, as sementes foram embebidas em água destilada por 5 horas. Na pré-germinação, as sementes foram colocadas sobre papéis germitest (CIENLAB, Campinas, São Paulo, Brasil) umedecidos e levadas à câmara de germinação BOD a 30°C por 24 horas. Após a germinadas, as sementes foram semeadas, e 1 mL da bactéria UENF LMS 71 foi aplicado em cada semente que seria inoculada.

Condições de crescimento e experimentais

O experimento foi realizado em casa de vegetação na UENF, situada na Unidade de Apoio Experimental, em Campos dos Goytacazes – RJ (Latitude: 21° 45' 16" S, Longitude: 41° 19' 28" O, 17 m acima do nível do mar). O delineamento experimental foi em blocos completos casualizados em fatorial simples, combinando genótipos (L61, L76 e UENF WS01) e tipo de inoculação (com e sem), com três repetições. Foram utilizados tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e 1,50 m com substrato, no qual foram 70% de substrato comercial Basaplant e 30% de perlita. Foi aplicado 1 mL do inóculo com a bactéria LMS 71 sobre as sementes dos tubos com bactéria (tratamento), enquanto os tubos sem bactérias (controle) receberam 1 mL do meio branco (não inoculado).

Foi utilizada solução nutritiva de HOAGLAND e ARNON (1950), meia força, via irrigação, todos os dias até o final do experimento (69 dias após o plantio), de acordo com a demanda da planta e a capacidade de água no substrato do tubo. Os genótipos inoculados e não inoculados foram expostos a condição de déficit hídrico do solo (WS) que foi imposto por meio da suspensão da irrigação, aos 24 dias após o plantio (DAP). Após 15 dias da suspensão da irrigação, os tubos foram baixando o potencial hídrico aos poucos e chegaram a 40% da sua capacidade de retenção de água no substrato, e permaneceram nessa condição por mais 29 dias.

Para estimar a capacidade de campo, o substrato de cada tubo foi regado com água em abundância e deixado por 72 horas sob percolação para que fosse drenado o excesso. No mesmo tempo, amostras do substrato foram secas em estufa a 70°C por 72 horas. A capacidade de cada tubo foi estimada pela diferença entre o peso molhado (após drenagem do excesso) e o substrato seco (antes da saturação). Os tubos foram pesados e irrigados em intervalos de 2 dias para manter a respectiva capacidade. O peso das plantas foi desconsiderado do cálculo da capacidade de água dos tubos.

Ao longo do experimento, foram medidos a temperatura, a umidade relativa do ambiente e a radiação fotossintética ativa, com o auxílio da miniestação experimental WatchDog (A-Series Loggers, Spectrum Technologies Inc., Aurora, EUA).

Durante o experimento, a temperatura (°C) média por dia variou de 23,76 a 31,97 e a umidade relativa do ar (%) de 46,60 a 93,80 e radiação fotossintética ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) teve uma máxima de 423,08 e mínima de 71 (Figura 1).

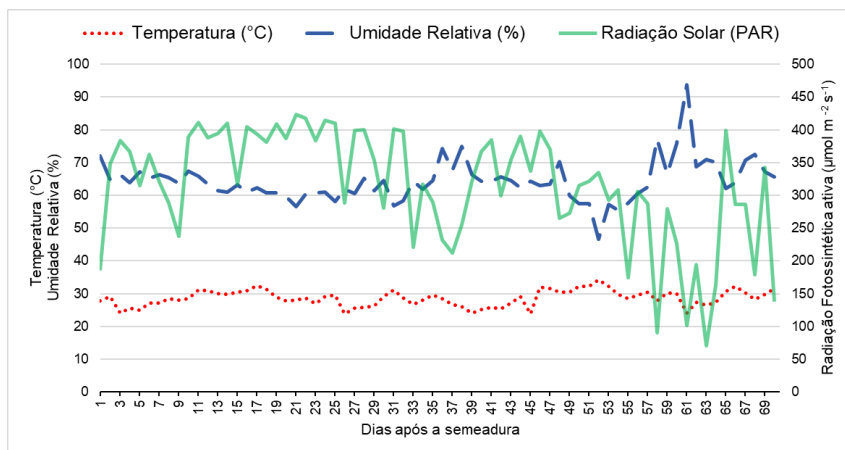


Figura 1. Gráfico de temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar. Condições experimentais entre 1 e 69 dias após a semeadura de três genótipos de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (L61 e L76), e seu híbrido (UENF WS01) submetidos à duas condições de inoculação da bactéria *B. cereus* (controle e inoculado). No gráfico médias de temperaturas (°C), umidade relativa (%) e radiação fotossintética ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) são mostradas ao longo dos dias após semeadura.

Durante as avaliações, a radiação fotossinteticamente ativa foi fixada em $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a umidade relativa esteve entre 55% e 60% e a temperatura foi de 25°C , a concentração de CO_2 foi de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

CARACTERÍSTICAS AVALIADAS

Trocas gasosas foliares, *quenching* não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII

Aos 69 dias após a emergência, antes da colheita do experimento foram realizadas as medidas das trocas gasosas foliares, da transpiração cumulativa bem como a densidade estomática das plantas. A taxa fotossintética líquida ($A - \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa de transpiração ($E - \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a condutância estomática ($g_s - \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a concentração interna de CO_2 ($C_i - \mu\text{mol mol}^{-1}$) foram obtidas utilizando um analisador de gás infravermelho de sistema aberto (IRGA, Infrared Gas Analyser, LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE, USA), equipado com uma fonte de luz (6400-40 LCF, LI-COR) entre as 10h00min e 14h00min, no terço médio da última folha completamente desenvolvida. O *quenching* não-fotoquímico NPQt (-) foi medido com auxílio do MultispeQ v1.0 (Fotosynq Inc., East Lansing, Michigan, EUA) não adaptado e o

rendimento quântico do PSII Fv/Fm (-) foi medido com o auxílio do FluorPen FP 110 (FluorPen, Drasóv, República Theca) adaptado à noite 4 horas após o pôr do sol.

CÁLCULOS DAS DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE CONDIÇÕES

As diferenças percentuais (%) de cada característica, considerando a comparação entre os tipos de inoculação (tratamento e controle) foram definidas utilizando a seguinte fórmula: $100 - (Y_{in}/Y_{con}) * 100$ em que: Y_{in} representa a média geral da característica na condição de inoculação com *B. cereus*; e Y_{con} a média geral da característica na condição de controle (sem inoculação).

ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram realizadas análises de variância de fatorial simples e testes de médias Tukey 5%. As fontes de variação de genótipo (G) e tipo de inoculação (T) (com ou sem bactéria) e suas interações foram analisadas por meio de análise de variância fatorial.

As análises de variância fatorial foram calculadas pela seguinte fórmula: $Y_{ijk} = \mu + G_i + B/A_{ij} + A_i + G_{Ai} + \epsilon_{ik}$. Sendo: Y_{ijk} = à observação do i -ésimo genótipo, no j -ésimo tipo de inoculação e no k -ésimo bloco; μ = constante geral; G_i : efeito fixo do i -ésimo genótipo; B/A_{ij} = é o efeito do k -ésimo bloco na j -ésima condição de inoculação; A_i = o efeito fixo da j -ésima condição de inoculação; G_{Ai} = o efeito fixo da interação entre o i -ésimo genótipo com a j -ésima condição de inoculação; e ϵ_{ik} = erro aleatório experimental médio associado à observação Y_{ijk} , sendo NID (0, σ^2).

O teste de média Tukey 5% foi realizado para cada uma das características dos genótipos de milho-pipoca.

O Prism GraphPad (versão 9.0.0, Insightful Science, Califórnia, EUA) foi usado para conduzir análises estatísticas e criar os gráficos. Em todos os casos, as barras significam as médias, os desvios padrão são apresentados e as letras indicam diferenças significativas (teste de Tukey, $P < 0,05$). A significância estatística é denotada por asteriscos (teste t de Student onde *, $P < 0,05$; **, $P < 0,002$; ***, $P < 0,0002$ e ****, $P < 0,0001$, entretanto a não significância é denominada pela sigla (^{ns}).

RESULTADOS

Modificações causadas por *B. cereus* sobre as trocas gasosas foliares, quenching não-fotoquímico e no rendimento quântico do PSII

Na análise de variância conjunta, observou-se um efeito de genótipo com diferenças significativas para todas as características. O efeito da inoculação foi

significativo para todas as características exceto rendimento quântico do PSII (Fv/Fm). A interação genótipos $\times$ tipo de inoculação ($G \times T$) apresentou significância para taxa de transpiração, condutância estomática e *quenching* não fotoquímico nas características avaliadas (Figura 2).

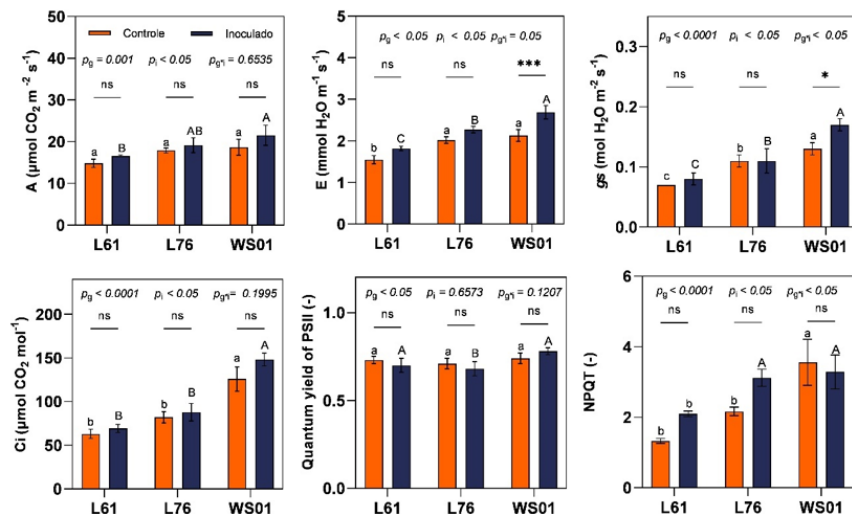


Figura 2. Médias e desvio-padrão de trocas gasosas, *quenching* não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico. Características relacionadas às medidas de trocas gasosas foliares, *quenching* não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII avaliados nas folhas de duas linhagens de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (sendo L61 sensível e L76, tolerante) e seu híbrido (UENF WS01), submetidas ao estresse hídrico em duas condições de inoculação da bactéria *B. cereus*, no estágio de florescimento (R1), em casa de vegetação. Genótipos seguidos de letra maiúscula correspondem aos tratamentos inoculados, e genótipos seguidos de letras minúsculas correspondem aos tratamentos controle. Genótipos seguidos por letras iguais não diferem para as condições e genótipos seguidos por letras diferentes diferem para as condições. A: taxa fotossintética líquida, E: taxa de transpiração, gs: condutância estomática, Ci: Concentração interna de CO_2 , Fv/Fm: rendimento quântico do PSII e NPQt: *quenching* não-fotoquímico. Os p valores são referentes a análise de variância conjunta, considerando os fatores genótipos (p_g), inoculação (p_i) e sua interação (p_{gi}). Significância $a < 0,0001\%$ (****), $0,0002\%$ (***), $0,002\%$ (**), $0,03\%$ (*) e não significativo (ns) correspondem a significância de cada genótipo na comparação entre as duas condições de inoculação avaliadas. As letras são referentes ao teste de média para genótipos dentro de cada condição de inóculo, genótipos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na análise de variância individual, todas as características apresentaram diferenças significativas em ambas as condições, exceto a taxa fotossintética líquida (A) e o rendimento quântico do PSII (Fv/Fm) na condição controle (Figura 2). Ao comparar os genótipos dentro das condições avaliadas, o híbrido apresentou as melhores

médias para todas as características. Além disso, o híbrido não diferiu estatisticamente da linhagem L76 na taxa fotossintética líquida (A) em ambas condições, da taxa de transpiração (E) e rendimento quântico do PSII (Fv/Fm) na condição controle e do *quenching* não-fotoquímico (NPQt) na condição inoculada (Figura 2). Também não diferiu estatisticamente da L61 no rendimento quântico do PSII (Fv/Fm) em ambas condições, e da taxa fotossintética líquida (A) na condição controle (Figura 2).

Avaliando as diferenças entre condições de inoculação, foram identificadas alterações significativas no híbrido UENF WS01 para a taxa de transpiração (E) e condutância estomática (*gs*), com aumentos de 20,8% e 27,9%, devido à inoculação (Tabela 1).

Características fisiológicas									
NPQt (-)	1,33	2,17	3,56	2,1	3,12	2,93	36,54	30,3	-8,23
Fv/Fm (-)	0,73	0,71	0,74	0,7	0,68	0,71	-3,97	-4,41	4,06
A (mol m ⁻² s ⁻¹)	14,8	17,9	18,7	16,6	19,1	18,1	10,7	6,34	13,1
gs (mol m ⁻² s ⁻¹)	0,07	0,11	0,13	0,08	0,11	0,11	17,5	3,96	27,9
Ci (μmmol mol ⁻¹)	62,9	82,0	125	69,2	87,9	94,3	9,12	6,61	15,1
E (mmol m ⁻² s ⁻¹)	1,55	2,02	2,13	1,82	2,27	2,07	14,7	10,9	20,8

Redução/Aumentos%: diferenças percentuais do ambiente controle e inoculado, WSC: estresse hídrico controle, WSI: estresse hídrico inoculado, NPQt: *quenching*-não fotoquímico (-), MSR: massa seca da raiz (g), Chl: clorofila (ug cm⁻²), Flav: flavonoides (ug cm⁻²), Anth: antocianinas (ug cm⁻²), NBI: balanço de nitrogênio (ug cm⁻²), Fv/Fm: rendimento quântico do fotossistema II (-), A: taxa fotossintética líquida (mol m⁻² s⁻¹), *gs*: condutância estomática (mol m⁻² s⁻¹), Ci: concentração interna de CO₂ (μmmol mol⁻¹), E: taxa de transpiração (mmol m⁻² s⁻¹).

Tabela 1: Estimativas de médias e reduções/aumentos dos genótipos de milho-pipoca L61, L76 e seu híbrido UENF WS01 em estresse hídrico na condição controle, sem *Bacillus cereus* e na condição inoculada, com *Bacillus cereus* medida aos 69 dias após o plantio.

DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a inoculação com *B. cereus* pode influenciar de forma diferenciada as trocas gasosas foliares em genótipos de milho-pipoca sob estresse hídrico. A análise de variância conjunta revelou que o genótipo teve um efeito significativo sobre todas as características avaliadas, sugerindo que as diferenças intrínsecas entre os genótipos desempenham um papel importante na resposta ao estresse hídrico e a inoculação com *B. cereus*.

O efeito da inoculação foi significativo para taxa fotossintética líquida (A), taxa de transpiração (E), condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (Ci), e

quenching não-fotoquímico (NPQt), a interação entre genótipos e tipo de inoculação (G*T) mostrou significância para a taxa de transpiração (E), condutância estomática (gs) e *quenching* não-fotoquímico (NPQt). Esses resultados sugerem que a resposta dos genótipos à inoculação com *B. cereus* é complexa e dependente da interação específica entre o genótipo e o tratamento.

Na análise individual, o híbrido UENF WS01 destacou-se com as melhores médias para todas as características, exceto em alguns casos específicos, onde não diferiu estatisticamente de uma ou outra linhagem. Este resultado pode ser atribuído à maior capacidade do híbrido em lidar com condições adversas, possivelmente devido a uma combinação de vigor híbrido e melhor eficiência no uso de recursos, como evidenciado por (ARAUS *et al.*, 2010).

Estudos anteriores têm mostrado que a inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCV), como *B. cereus*, pode melhorar a tolerância ao estresse hídrico ao influenciar as trocas gasosas e a eficiência do uso da água (OLIVEIRA *et al.*, 2024 e LAMÊGO, 2024). Os aumentos observados nas taxas de transpiração (E) e condutância estomática (gs) no híbrido UENF WS01 devido à inoculação sugerem que *B. cereus* pode ajudar a manter a atividade fotossintética e a eficiência do uso da água sob estresse hídrico.

Além disso, os genótipos mantiveram estáveis as taxas do *quenching* não-fotoquímico (NPQt), que pode ser um mecanismo importante para a dissociação de energia excessiva, prevenindo danos ao aparato fotossintético (LAUTERBERG, 2024), indicando que a maquinaria fotossintética conseguiu operar de forma eficiente mesmo sob condições de estresse. Em outros estudos a inoculação não só manteve como aumentou o *quenching* não-fotoquímico em várias culturas, e pode representar uma estratégia promissora para o manejo do estresse hídrico em sistemas agrícolas (BATOOL *et al.*, 2020; LUCAS *et al.*, 2023).

Sobre os parâmetros de heterose e heterobeltiose, apenas a relação Fv/Fm, que reflete a eficiência máxima do fotossistema II, apresentou maior expressão da heterobeltiose tanto na condição controle quanto na inoculada. Esse resultado destaca que a superioridade dos híbridos sobre os genitores em termos de eficiência fotossintética é consistente e não dependente do ambiente. Esses resultados estão em consonância com KULMUNI *et al.* (2024) que demonstraram a capacidade dos híbridos de se adaptarem a diferentes condições ambientais. A estabilidade desse indicador em diferentes condições pode indicar uma adaptação fotossintética intrínseca nos híbridos, promovendo maior resiliência ao estresse ambiental.

Em resumo, os resultados deste estudo ressaltam a importância das interações genótipo x ambiente x microrganismo na modulação da resposta ao estresse hídrico. A inoculação com *B. cereus* mostrou potencial para melhorar a eficiência do uso da

água e a proteção contra danos foto-oxidativos em genótipos de milho-pipoca, com variações significativas entre os genótipos. Estes achados podem contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de manejo do estresse hídrico, integrando o uso de BPCV em programas de melhoramento de plantas, para seleção de genótipos de milho-pipoca mais resilientes ao estresse hídrico. A utilização de *B. cereus* como inoculante pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho de cultivares de milho-pipoca sob condições de déficit hídrico.

CONCLUSÃO

Conclui-se que o híbrido se destacou em todas as características fisiológicas avaliadas, a interação com a bactéria *Bacillus cereus* provocou o aumento da taxa de transpiração e da condutância estomática, o que refletiu potencial para mitigação dos efeitos do déficit hídrico. Além disso, a integração desta abordagem no melhoramento genético pode levar ao desenvolvimento de cultivares de milho-pipoca com maior tolerância ao estresse hídrico, beneficiando agricultores e melhorando a segurança alimentar.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. B.; RIBEIRO, T. G.; ALVES, G. C.; COELHO, M. R. R.; MATTA, F. de P.; BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D. The occurrence of rhizobacteria from Paspalum genotypes and their effects on plant growth. **Scientia Agricola**, 79. Piracicaba, Braz.v.79, n.2, 2022.
- ANDY, A. K., RAJPUT, D.V., BURACHEVSKAYA, M., GOUR, S.V. Exploring the Identity and Properties of Two Bacilli Strains and Their Potential to Alleviate Drought and Heavy Metal Stress. **Horticulturae**, v. 9, n. 1, p. 46, 2023.
- ARAUS, J. L.; SÁNCHEZ, C.; CABRERA-BOSQUET, L. Is heterosis in maize mediated through better water use? **New Phytologist**, v. 187, n. 2, p. 392–406, jul. 2010.
- BATOOL, T.; ALI, S.; SELEIMAN, M.; NAVEED, H.N.; ALI, A.; AHMED, K.; ABID, M.; RIZWAN, M.; SHAHID, R.M.; ALOTAIBI, M.; AL-ASHKAR.; MUBUSHAR, M. Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities, **Scientific reports**, v.10, n.1, 22442, out. 2020.
- AZEEM, M., HAIDER, Z.M., JAVED, S., SALEEM, H.M., ALATAWI, A. Drought Stress Amelioration in Maize (*Zea mays L.*) by Inoculation of *Bacillus spp.* Strains under Sterile Soil Conditions. **Agriculture**, v.12, n. 50, 2022.

CAMPOS, M.J.A.; SANTOS, M.S.; NACARATH, F.F.R.I. Water stress in plants: a review. **Research, Society and Development**, v.10, n.15, 2021.

CHALLINOR, A.J.; KOEHLER, K.A.; VILLEGAS, R.J.; WHITFIELD, S.; DAS, B. Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. **Nature Climate Change**, v.6, n.10, p.954-958, 2016.

CHIEB, M., GACHOMO, E.W. The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. **BMC Plant Biology**, v.23, n.407, 2023.

DIAS, K.O.D.G.; GEZAN, S.A.; GUIMARÃES, C.T.; PARENTONI, S.N.; GUIMARÃES, P.E. O.; CARNEIRO, N.P.; PORTUGAL, A.F.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; ANONI, C.O.; MAGALHÃES, J.V.; SOUZA, J.C.; GUIMARÃES, L.J.M.; PASTINA, M.M. Estimating Genotype × Environment Interaction for and Genetic Correlations among Drought Tolerance Traits in Maize via Factor Analytic Multiplicative Mixed Models. **Crop Science**, v.58, n.1, p.72, 2018.

DOBEREINER, J.; BALDANI, V.L.D.; BALDANI, J.I. **Como isolar e identificar bactérias diazotróficas de plantas não-leguminosas**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Itaguaí: EMBRAPA-CNPAB, p.60, 1995.

EHLING-SCHULZ, M. L. D., LERECLUS, D., KOELER, M.T. The *Bacillus cereus* Group: *Bacillus* Species with Pathogenic Potential. **Microbiol Spectr**. v.7, p.3, p. 7–3, 2019.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.L. **The water culture method for growing plants without soils**, 1950.

KAMPHORST, H. S., JÚNIOR, A. T. A., VERGARA-DIAZ, O., GRACIA-ROMERO, A., FERNANDEZ-GALLEGO, A. J., CHANG-ESPINO, C. M., BUCHAILOT, L. M., REZZOUK, Z. F., LIMA, J. V., SERRET, D. M., ORTEGA, A. L. J. Heterosis and reciprocal effects for physiological traits of popcorn plants under different water conditions. **Agricultural Water Management**, v.261, 107259, 2022.

KAMPHORST, S. H., JÚNIOR, A. T. A., LIMA, V. J., GUIMARÃES, M.J.L., SCHIMITT, M.F.K., LEITE, J. T., SANTOS, D.A.H.P., CHAVES, M.M., MAFRA, S.G., JÚNIOR, S.R.D., CRUS, D.C., CAMPOSTRINI, E. Can genetic progress for drought tolerance in popcorn be achieved by indirect selection? **Agronomy**, n.9, v.12, p.792, 2019.

KAMPHORST, S. H., JÚNIOR, A. T. A., LIMA, V. J., SANTOS, D.A.H.P., RODRIGUES, P.W., VIVAS, S.M.J., GONÇALVES, B.M.G., SCHIMITT, M.F.K., LEITE, J. T., VIVAS, M., MORA-POBLETE, F., VERGARA-DIAZ, O., ORTEGA, A.L.J., RAMALHO, C.J., CAMPOSTRINI, E. Comparison of selection traits for effective popcorn (*Zea mays* L. var. *Everta*) breeding under water limiting conditions. **Frontiers in Plant Science**, v.11, p.1289, 2020.

KAMPHORST, S. H., LIMA, V. J., LEITE, J. T., CARVALHO, C. M., XAVIER, K. B., CAMPOSTRINI, E. Popcorn breeding for water-stress tolerance or for agronomic water-use efficiency? **Genetics and Molecular Research**, v.17, n.4, p. 1–18, 2018.

KULKOVA, I., DOBRYNSKI, J., KOWALCZYK, P., BELZEKI, G., KRAMKOWSKI, K. Plant Growth Promotion Using *Bacillus cereus*. **International Journal of Molecular Sciences**, v.24, n.11, p. 9759, 2023.

KULMUNI, J., WILEY, B., OTTO, P. S. On the fast track: hybrids adapt more rapidly than parental populations in a novel environment. **Evolution Letters**, v.8, n. 1, p. 128-136, 2024.

KUMAR, K. GAMBHIR, G., DASS, A., TRIPATHI, K. A., SINGH, A., JHA, K. A., YADAVA, P., CHOUDHARY, M., RAKSHIT, S. Genetically modified crops: current status and future prospects. **Plants**, v.251, n.91, p. 20, 2020.

LAMEGO, L. D., JUNIOR, A. T. A., KAMPHORST, H. S., LIMA, J. V., SILVA, P. S., FIGUEIREDO, S. J., OLIVEIRA, A. U., VIANA, N. F., SANTOS, O. T., GONÇALVES, R. G., SOUZA, R. A. G., CAMPOSTRINI, E., VIANA, P. A., FREITAS, M. S. M., RAMOS, C. C. H., FILHO, S. A. G., REZENDE, E. C. Gene Effect of Morphophysiological Traits in Popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*) Grown Under Contrasting Water Regimes. **Agriculture**, v.14, n.12, p. 2157, 2024.

LAUTERBERG, M., TSCHIRSCH, H., ZHAO, Y., KUHLMAN, M., MUCKE, I., PAPA, R., BITOCCHI, E. Neumann K. Implementation of theoretical non-photochemical quenching (NPQ_q) to investigate NPQ of chickpea under drought stress with high-throughput phenotyping. **Scientific Reports**, v.14, n.13970, 2024.

LEITE, J.T.; JUNIOR, A.T.A.; KAMPHORST, S.H.; LIMA, V.J de.; SANTOS, JÚNIOR, D.R.; SCHMITT, K.F.M.; SOUZA, Y.P.; SANTOS, T. O.; BISPO, R.B.; MAFRA, G.S.; CAMPOSTRINI, E.; RODRIGUES, W.P, Water Use Efficiency in Popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*): Which Physiological Characteristics Would Be Useful for Breeding? **Plants**, 10,7, 1450, 2021.

LIMA, V. J, JÚNIOR, A. T. A., KAMPHORST, H. S., SANTOS, A., SCHMIDT, M. F. K., AZEREDO, C. V., LEITE, T. J., JUNIOR, S. R. D., SANTOS, O. T., BISPO, B. R., CARVALHO, M. C., SOUZA, P. Y., OLIVEIRA, T. F., CHAVES, M. M., OLIVEIRA, A. U., MAFRA, S. G., SANTOS, D. A. H. P. UENF WS01: popcorn hybrid with water use efficiency for the State of Rio de Janeiro. **Crop breeding and applied biotechnology**, v.21, n.04, e375821411, 2021.

LIMA, V.J.D.; AMARAL JÚNIOR, A.T.D.; KAMPHORST, S.H.; BISPO, R.B.; LEITE, J. T.; SANTOS, T.D.O.; GONÇALVES, G.M.B. Combined Dominance and Additive Gene Effects in Trait Inheritance of Drought Stressed and Full Irrigated Popcorn. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 782, 2019.

LIU, F., MA, H., LIU, B., DU, Z., MA, B., JING, D. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the physioecological characteristics and growth of walnut seedlings under drought stress. **Agronomy**, v.13, n.2, p.290, 2023.

LUCAS, J.A.; GARCIA-VILLARACO, A.; MONTERO-PALMERO, M.B.; MONTALBAN, B.; RAMOS, S.B.; GUTIERREZ-MANERO, F.J. Physiological and Genetic Modifications Induced by Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Tomato Plants under Moderate Water Stress. **Biology**, v.12, n.7, p.901, junh, 2023.

LUNDUKA, R. W.; MATEVA, K. I.; MAGOROKOSHO, C.; MANJERU, P. Impact of adoption of drought-tolerant maize varieties on total maize production in south Eastern Zimbabwe. **Climate and development**, v. 11, n. 1, p. 35-46, 2019.

MAHREEN, N., YASMIN, S., ASIF, M., YAHYA, M., EJAZ, K., RAHMAN, U.M., YOUSAF, S., AMIN, I., ZULFIQAR, S., IMRAN, A., KHALIQ, S., ARIF, M. Mitigation of water scarcity with sustained growth of Rice by plant growth promoting bacteria. **Frontiers in Plant Science**, v.14,1081537, 2023.

MALHI, G.S.; KAUR, M.; KAUSKI, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v.13, n.3, p.1318, 2021.

MEDDICH, A. Biostimulants for resilient agriculture - improving plant tolerance to abiotic stress: a concise review. **Gesunde Pflanzen**, v.75, n.4, p.709-727, 2023.

MEENAKSHI, ANNAPURNA, K., GOVINDASAMY, D., AJIT, V., CHOUDHARY, D. Mitigation of Drought Stress in Wheat Crop by Drought Tolerant Endophytic Bacterial Isolates. **Vegetos**, v. 32, p. 486–493, 2019.

MOTURU, U. S., NUNNA, T., AVULA, G.V., JAGARLAMUDI, R.V., GUTHA, R.R., TAMMINANA, S. Investigating the diversity of bacterial endophytes in maize and their plant growth-promoting attributes. **Folia Microbiologica**, v.68, n.3, p. 369-379, 2023.

MUKHTAR, T., REHMAN, S., SMITH, D., SULTAN, T., SELEIMAN, F.M., ALSADON, A.A., AMNA, ALI, S., CHAUDARY, J.H., SOLIEMAN, H.T., IBRAHIM, A.A., SAAD, A.M. Mitigation of heat stress in *Solanum lycopersicum* L. by ACC- deaminase and exopolysaccharide producing *Bacillus cereus*: effects on biochemical profiling. **Sustainability**, v.12, n.6, p.2159, 2020.

OLIVEIRA, A. U., JUNIOR, A. T. A., LEITE, T. J., KAMPHORST, H. S., LIMA, J. V., BISPO, B. R., RIBEIRO, M. R., VIANA, N. F., LAMEGO, L. D., CARVALHO, M. C., SIMÃO, R. B., SANTOS, O. T., GONÇALVES, R. G., CAMPOSTRINI, E. Unveiling Drought-Resilient Latin American Popcorn Lines through Agronomic and Physiological Evaluation. **Life**, v.14, n.6, p. 743, 2024.

OMM. Organización Meteorológica Mundial. Estado del clima en América Latina y el Caribe 2021. Ginebra, 2022. 44p. (OMM-Nº1295). Disponível em: < <https://library.wmo.int/idurl/4/28347>>

PRAVEEN, A., DUBEY, S., SINGH, S., SHARMA, K.V. Abiotic stress tolerance in plants: a fascinating action of defense mechanisms. **Biotech**, v.13, n.3, p. 102, 2023.

ROCKENBACH, M. F.; CORREA, G.C.C.; HERINGER, S.A.; FREITAS, J.L.I.; SANTA-CATARINA, C.; JÚNIOR, A.T.A.; SILVEIRA, V. Differentially abundant proteins associated with heterosis in the primary roots of popcorn. **PLOS ONE**, v. 13, n. 5, p. e0197114, maio 2018.

SAMANTA, S., SETH, S.C., ROYCHOUDHURY, A. The molecular paradigm of reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS) with different phytohormone signaling pathways during drought stress in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.206, n.1, p. 08259-108259, 2024.

SILVA, S.; SOUSA, P.C.A.; ARAÚJO, R.E.; SOARES, S.A.M.; TEODORO, I. **Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro**. Irriga, Bocatú, Edição Especial – Nordeste, v.1, n.1, p.30-41, maio, 2021.

TOLLENAAR, M.; LEE, E. A. Physiological dissection of grain yield in maize by examining genetic improvement and heterosis, **Maydica**, v. 51, n. 2, p. 399–408, 2006.

VIANA, N.F., CHAVES, M. M, KAMPHORST, H. S., JUNIOR, A. T. A., LIMA, J. V., LEITE, T. J., SCHMIDT, M. F. K., OLIVEIRA, A. U., LAMEGO, L. D., PEREIRA, L. J., PENA, F. G., VIEIRA, D. H., OLIVEIRA, G. J., DAHER, F. R., CAMPOSTRINI, E., BRESSAN-SMITH. Heritability of Morphophysiological Traits in Popcorn for Drought Tolerance and Their Use as Breeding Indicators of Superior Genotypes. **Agronomy**, v.12, n.7, p. 1517, 2022.

WALNE, H. C., THENVEETIL, N., RAMAMOORTHY, P., BHEEMANAHALLI R., Reddy, N. K., REDDY, R. K. Unveiling drought-tolerant corn hybrids for early-season drought resilience using morpho-physiological traits. **Agriculture**, v.14, n.3, p. 425, 2024.

WRÓBEL, M., SLIWAKOWSKI, W., KOWALCZYK, P., KRAMKOWSKI, K., DOBRZYNSKI, J. Bioremediation of Heavy Metals by the Genus *Bacillus*. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n.6, p.4964, 2023.

ZHANG, S., YU, J., CHEN, J., JUNHO, S., YUAN, Y., DAI, X., WANGB, F., MA, Y. The biological control effect of *Bacillus cereus* on strawberry leaf spot disease caused by *Neopestalotiopsis clavispora*. **Scientia Horticulturae**, v.327, p.112841, 2024.

ZHANG, Y. D.; XINGMING, V.; YAO, W.; PIEPHO, P.H.; KANG, S.M. Diallel analysis of four maize traits and a modified Heterosis hypothesis. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1115–1126, 2016.

ZHANG, Y.; TIAN, Z.; XI, Y.; WANG, X.; SHEN, S.; GUO, Y. Improvement of Salt Tolerance of *Arabidopsis Thaliana* Seedlings Inoculated with Endophytic *Bacillus cereus* KPI20. **Journal of Plant Interact**, v.17, n.1, p. 884-893, aug. 2022.

ZOU, L., WANG, Q., WU, R., ZHANG, Y., WU, Q., LI, M., YE, K., DAI, W., HUANG, J. Biocontrol and plant growth promotion potential of endophytic *Bacillus subtilis* JY-7-2L on *Aconitum carmichaelii* Debx. **Frontiers in Microbiology**, 13:1059549, 2023.