RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 25/01/2027

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

O USO DE *AZOSPIRILLUM* EM FORRAGEIRA AO MODULAR A ABSORÇÃO DE N, P, K E SI MITIGA OS EFEITOS DO AQUECIMENTO DO AR PROLONGADO EM SISTEMA T-FACE EM CONDIÇÕES TROPICAIS

João Vitor Silva e Silva
Engenheiro Agrônomo

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

O USO DE *AZOSPIRILLUM* EM FORRAGEIRA AO MODULAR A ABSORÇÃO DE N, P, K E SI MITIGA OS EFEITOS DO AQUECIMENTO DO AR PROLONGADO EM SISTEMA T-FACE EM CONDIÇÕES TROPICAIS

João Vitor Silva e Silva

Orientador(a): Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador(a): Prof. Dra. Kamilla Silva Oliveira

Coorientador(a): Prof. Dr. Carlos Alberto Martinez Huaman

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2025

S586u

Silva, João Vitor Silva e

O uso de Azospirillum em forrageira ao modular a absorção de N, P, K e Si mitiga os efeitos do aquecimento do ar prolongado em sistema T-Face em condições tropicais / João Vitor Silva e Silva. -- Jaboticabal, 2025

81 p. : tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientadora: Kamilla Silva Oliveira

1. Urochloa brizantha; Urochloa ruziziensis. 2. Forrageira tropical. 3. Mudanças Climáticas. 4. Temperatura elevada. 5. Nutrição de plantas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: O USO DE Azospirillum EM FORRAGEIRA AO MODULAR A ABSORÇÃO DE N, P, K E SI MITIGA OS EFEITOS DO AQUECIMENTO DO AR PROLONGADO EM SISTEMA T-FACE EM CONDIÇÕES TROPICAIS

AUTOR: JOÃO VITOR SILVA E SILVA
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO
COORIENTADORA: KAMILLA SILVA OLIVEIRA
COORIENTADOR: CARLOS ALBERTO MARTINEZ Y HUAMAN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 25/07/2025 18:10:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciencia do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal

Profa. Dra. GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA (Participaçao Virtual)
Universidade Federal de Lavras (UFLA) / Lavras/MG

gov.br Documento assinado digitalmente
GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA
Data: 28/07/2025 09:32:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR (Participaçao Virtual)
University of Florida (UFL) - Citrus Research and Education Center / Gainesville/Flórida/EUA

gov.br Documento assinado digitalmente
JONAS PEREIRA DE SOUZA JUNIOR
Data: 25/07/2025 21:45:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Jaboticabal, 25 de julho de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

JOÃO VITOR SILVA E SILVA - Filho de Maria Alda de Jesus Silva, nasceu em São Miguel do Guamá, Pará, Brasil, fez faculdade de Agronomia ingressando em 2018 na Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Capitão Poço, formou-se em 2023. Durante a graduação conciliou estudos com trabalho e teve dois anos de iniciação científica voluntaria no laboratório de Fisiologia Vegetal no mesmo campus. Em agosto de 2023 entrou no Programa de pós graduação em Agronomia Ciência do Solo da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus Jaboticabal sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado com coorientação da Dra. Kamilla Silva Oliveira e também do Prof. Dr. Carlos Alberto Martinez Y Huaman.

A Deus toda honra e glória, a minha família, tias e tios que são exemplos e me inspiram a ser melhor e acreditam em mim, sempre lembrarei de todos que me apoiaram.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Unesp, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade de realizar o Mestrado e pela infraestrutura oferecida, e aos professores, por contribuírem com excelência para minha formação acadêmica. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento da bolsa de estudos durante todo o curso de Mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado, e a minha coorientadora Dra. Kamilla Silva Oliveira ao Prof. Dr. Carlos Alberto Martinez Y Huaman por aceitarem me orientar e por guiar-me nesse período, pelos conhecimentos e contribuições transmitidos durante a pós-graduação, por todo o apoio e ensinamentos acadêmicos e profissionais que me foram passados.

A Deus por tudo e tanto, a minha mãe Maria Alda de Jesus Silva ao meu padrasto Francisco Sales de Hora Costa que sempre me apoiram a seguir em frente e realizar os sonhos.

Agradeço ao meu amigo de longa carreira Jairo Neves de Oliveira, que me deu teto quando cheguei na cidade. Aos amigos da UNESP, que fiz ao longo dessa caminhada, como a Deisy, Daniel, Nilton, Patricia, Eduardo, Jovêncio, Edilaine, Carlos, Paulo, Angel, João Victor, Kamilla, Eduarda, Tatiana, Tiago, que de forma direta ou indireta, me ajudaram durante esta fase.

Agradeço a todos os colegas de laboratório, em especial ao Milton e Cláudia que em diversos momentos me auxiliaram de maneira importante na fase dos experimentos do mestrado e nas atividades do PAADES sempre dispostos a ensinar. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2023/09992-8. Além do apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

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

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....

ABSTRACT.....

1.INTRODUÇÃO 1

2.REVISÃO DE LITERATURA 5
2.1. Impacto das altas temperaturas e o papel de bactérias promotoras de crescimento (PBPBs) como *Azospirillum brasilense* no seu combate 5
2.2. Utilização do sistema T-Face para o avanço do conhecimento das altas temperaturas nas culturas 9
2.3. Benefícios às plantas: Principais mecanismos 10
2.3.1. *Azospirillum* na produção de hormônios vegetais 10
2.3.2. Impacto das altas temperaturas e uso do *Azospirillum* na nutrição de gramíneas forrageiras 13
2.4. *Azospirillum* na disponibilidade de nutrientes sob altas temperaturas 18

3.MATERIAL E MÉTODOS 22
3.1. Local e condições de estudos 22
3.2. Caracterização do solo e manejo 22
3.3. Inoculação e semeadura 23
3.4. Imposição de temperatura elevada 23
3.5. Obtenção de dados meteorológicos e estado hídrico foliar 24
3.6. Estações de crescimento 26
3.7. Variáveis analisadas 27
3.7.1. Produção de massa seca 27
3.7.2. Acúmulo e eficiência de uso de N, P e K 27
3.7.3. Acúmulo e eficiência de uso de Si 28
3.7.4. Determinação de compostos nitrogenados nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) 28
3.7.5. Determinação de carbono associado a fração ácidos húmicos (CAH) e carbono associado a fração humina (CHum) no solo 29
3.7.6. Análises estatísticas 29

4.RESULTADOS.....30

4.1. Absorção de N, P, K e Si 30
4.2. Eficiência de uso de N, P, K e Si 33
4.3. Absorção de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) 35
4.4. Substâncias húmicas 36
4.5. Produção de massa seca 37

5.DISCUSSÃO 38
5.1. Efeito do aumento da temperatura em plantas sem inoculação 38
5.2. Contribuição da inoculação em plantas sob temperatura ambiente 40
5.3. Contribuição da inoculação em plantas cultivadas em temperaturas elevadas 44

6.CONCLUSÕES 46

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

O USO DE *Azospirillum* EM FORRAGEIRA AO MODULAR A ABSORÇÃO DE N, P, K E SI MITIGA OS EFEITOS DO AQUECIMENTO DO AR PROLONGADO EM SISTEMA T-FACE EM CONDIÇÕES TROPICAIS

RESUMO – Nas regiões tropicais, o cultivo de gramíneas forrageiras ocorre principalmente em condições de sequeiro (dependência de chuvas). Altas temperaturas podem reduzir a produção de biomassa, mas esse problema pode ser mitigado pela coinoculação de *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*. No entanto, os impactos nutricionais do aquecimento prolongado nas plantas e a eficácia da coinoculação na nutrição das forrageiras ainda não são bem compreendidos. Para preencher essas lacunas, foi realizado no Brasil um experimento de campo com o híbrido *Urochloa brizantha* × *Urochloa ruziziensis*, cv. Mavuno, utilizando um delineamento fatorial 2×2. Este delineamento incluiu duas condições de temperatura do ar: temperatura ambiente (Ambient) e temperatura elevada (Elevated, +2 °C acima da Ambient), controladas por um sistema automatizado de aquecimento em campo aberto (T-FACE). O estudo também envolveu dois tratamentos de inoculação: com inoculação e sem inoculação de *A. brasilense* e *P. fluorescens*. Parâmetros nutricionais e a produção de matéria seca foram avaliados ao longo de quatro ciclos de crescimento: outono, inverno e primavera de 2023 (primeiro, segundo e terceiro ciclos, respectivamente) e verão de 2024 (quarto ciclo). Os resultados mostraram que a temperatura elevada sem inoculação prejudicou principalmente a eficiência do uso de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A forrageira demonstrou tolerância ao aquecimento durante os três primeiros ciclos, sem redução significativa na produtividade. No entanto, no quarto ciclo (verão) ocorreram perdas de produtividade. A coinoculação de *A. brasilense* e *P. fluorescens*, independentemente da temperatura, levou a um maior acúmulo de N, P, K e silício (Si), principalmente nos dois últimos ciclos, resultando em maior produção de biomassa. Além disso, o tratamento de temperatura elevada afetou o carbono (C) do solo, mas a inoculação aumentou o C na fração humina e restaurou o C na fração ácido húmico. A redução na eficiência do uso de N, P e K, especialmente no verão, levou à queda na produtividade. No entanto, esse efeito foi revertido pela coinoculação, que promoveu a absorção de N, P, K e Si. Conclui-se que a coinoculação pode melhorar a nutrição e

a produtividade de pastagens tropicais de sequeiro em cenários futuros de aquecimento prolongado.

Palavras-chave: *Urochloa brizantha*; *Urochloa ruziziensis*; Forrageira Tropical; Mudanças Climáticas; Temperatura elevada; Nutrição de plantas

THE USE OF *Azospirillum* IN FORAGE GRASSES MODULATING THE ABSORPTION OF N, P, K AND SI MITIGATES THE EFFECTS OF PROLONGED AIR WARMING IN A T-FACE SYSTEM UNDER TROPICAL CONDITIONS

ABSTRACT – In tropical regions, the cultivation of forage grass primarily takes place under rainfed conditions. High temperatures can reduce biomass production, but this issue can be mitigated through the co-inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens*. However, the nutritional impacts of prolonged warming on plants and the effectiveness of co-inoculation on forage nutrition are not well understood. To address these gaps, a field experiment with the hybrid *Urochloa brizantha* x *Urochloa ruziziensis* named Mavuno was conducted in Brazil using a 2×2 factorial design. This design included two air temperature conditions: ambient temperature (Ambient) and elevated temperature (Elevated, +2°C above Ambient), controlled by an automated open-field warming system (T-FACE). The study also involved two inoculation treatments: with inoculation and without inoculation of *A. brasilense* and *P. fluorescens*. Nutritional parameters and dry matter production were evaluated across four growth cycles: autumn, winter, and spring of 2023 (first, second, and third cycles, respectively) and summer of 2024 (fourth cycle). The results showed that elevated temperature without inoculation primarily impaired the efficiency of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) use. Forage grass demonstrated tolerance to warming during the first three cycles, showing no significant yield reduction. However, the fourth cycle (summer) experienced yield losses. The co-inoculation of *A. brasilense* and *P. fluorescens*, regardless of temperature, led to enhanced uptake of N, P, K, and silicon (Si), particularly in the last two cycles, which resulted in higher biomass production. Additionally, the elevated temperature treatment affected soil carbon (C), but inoculation increased C in the humin fraction and restored C in the humic acid fraction. The decreased efficiency of N, P, and K use, especially in summer, led to reduced productivity. Nonetheless, this effect was reversed by co-inoculation, which promoted the uptake of N, P, K, and Si. In conclusion, co-inoculation can enhance the nutrition and productivity of tropical rainfed pastures under future prolonged warming scenarios.

Keywords: *Urochloa brizantha*; *Urochloa ruziziensis*; Tropical forage; Climate change; Elevated temperature; Plant nutrition

1. INTRODUÇÃO

A preocupação a respeito dos impactos das mudanças climáticas sobre os cultivos agrícolas tem crescido nos últimos anos. A temperatura média terrestre aumentou aproximadamente 1,5 ºC em comparação à temperatura média do período pré-industrial (WMO, 2025). Esse aumento da temperatura tem relevância econômica na cadeia de produção agropecuária, pois temperaturas elevadas podem impactar negativamente a absorção de nutrientes pelas culturas, na sua qualidade nutricional e na produtividade. Além disso, no mundo, a área coberta por pastagens ultrapassa 40% da superfície terrestre (Piao et al., 2019), trazendo riscos para a produção de alimentos e para a segurança alimentar mundial. Dessa forma, estudos que avaliem os impactos do aumento previsto da temperatura em pastagens se tornam cruciais para o desenvolvimento de cultivares mais resistentes e de novas estratégias de manejo.

Os impactos do aumento da temperatura nas plantas dependem de sua intensidade, duração, frequência e da interação com outros fatores bióticos e abióticos. Quando o aumento da temperatura ocorre abaixo do ótimo térmico são observados impactos positivos na fisiologia e crescimento das plantas. No entanto, quando este ultrapassa o ótimo térmico, efeitos negativos são verificados, como redução da atividade fotossintética, fechamento estomático, estresse oxidativo, danos às proteínas e membranas e redução da biomassa aérea (Zahra et al., 2023; Approbato et al., 2023). Na maioria das espécies estes impactos são minimizados por uma adequada disponibilidade de água no solo (Hoover et al., 2014) e de nutrientes (Olivera-Viciedo, et al. 2021), mitigando perdas de produção (Ma et al., 2017). Contudo, a alternância entre períodos secos mais frequentes e úmidos de menor ocorrência coloca em questão a tolerância e a recuperação das espécies (Boeck et al., 2016). Curtas épocas chuvosas ao longo das estações do ano contribuem para que eventos de secas e altas temperaturas sejam cada vez mais frequentes e simultâneos (Reynaert et al., 2021). Apesar da combinação de ambas as condições causarem prejuízos, os efeitos do aquecimento prolongado em condições de campo no sistema solo-planta têm recebido pouca atenção na literatura científica.

Essa abordagem possibilita investigar a persistência dos efeitos do aquecimento, incluindo impactos residuais em ciclos subsequentes. Considerando que os efeitos do aumento da temperatura podem ser intensificados ou atenuados conforme a estação do ano, essa estratégia experimental é essencial para compreender como as plantas forrageiras tropicais, com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV) como *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*, respondem ao aquecimento de longo prazo e sob condições reais de campo, fornecendo subsídios para a adoção de práticas agrícolas mais resilientes.

Além de seu impacto na fisiologia e produtividade vegetal, o aumento da temperatura pode levar a alterações significativas na dinâmica de absorção, assimilação e acúmulo de nutrientes minerais. Dessa forma, compreender os impactos do aquecimento na nutrição de forragens se torna crucial para o manejo da fertilização de pastagens em regimes de sequeiro. De forma geral, o aumento da temperatura sob adequada disponibilidade de água no solo causa um aumento na abertura estomática e taxa transpiratória com o objetivo de esfriamento foliar (Chaplin et al., 2025). Como consequência, o fluxo transpiratório é intensificado, aumentando o fluxo de massa entre o solo e a planta e a absorção de nutrientes. No estudo conduzido por Olivera-Viciedo et al. (2021) foi observado um aumento nas concentrações de C, N e P em diferentes órgãos de *Panicum maximum* sob aquecimento de 2ºC durante o verão, acompanhado pelo incremento do crescimento devido à disponibilidade de água no solo. Já no estudo de Carvalho et al. (2020a), os autores observaram que o incremento de 2ºC na temperatura em uma pastagem de *P. maximum* durante a primavera e sob sistema de irrigação e sequeiro, beneficiou a absorção de nutrientes e a eficiência no uso de N, favorecendo o crescimento da forrageira. No entanto, sob condições de seca severa, o efeito do aumento da temperatura pode exercer efeito contrário ao intensificar o fechamento estomático induzido pela disponibilidade de água e diminuir a absorção e o fluxo de massa de nutrientes no sistema solo-planta.

Alguns macronutrientes, como o K, exercem papel crucial na regulação estomática e balanço hídrico das plantas. Dessa forma, reduções na sua eficiência de uso sob condições de temperatura elevada podem prejudicar o status hídrico, ao

impactar diretamente a tolerância térmica por vias hidráulicas e de trocas gasosas (Olivera-Viciedo et al., 2021). Em gramíneas tropicais, a adição de silício (Si) mitiga os efeitos do estresse térmico, melhorando a conversão de nutrientes em biomassa e aumentando a resistência a danos foliares. Portanto, o Si pode reduzir a perda de eficiência de uso de outros nutrientes sob aquecimento (Barreto et al., 2020; Prado, 2023). Esse papel mitigador do Si ocorre devido ao fato de que esse elemento possui papel estrutural e protetor na melhoria da rigidez da parede celular, diminuição da perda de água, e aumento da atividade antioxidante (Prado, 2021). Considerando o fato de que a maioria das pastagens mundiais são cultivadas em regime de sequeiro, com apenas 7% da área sob irrigação (FAO, 2014; Allen e MacAdam, 2020), evidencia-se a importância de estudos direcionados a pastagens aquecidas em condições de campo, considerando as variações sazonais de temperatura e disponibilidade de água.

Nas regiões tropicais, espécies pertencentes ao gênero *Urochloa* são amplamente cultivadas por longos períodos, dependendo fortemente da ciclagem de nutrientes mediada pela matéria orgânica do solo (MOS) para sustentar seus ciclos de crescimento (Dubeux et al., 2007). Frações estáveis da MOS, como huminas e ácidos húmicos, além de reterem nutrientes essenciais, atuam como importantes reservatórios de C, contribuindo para o sequestro de C no solo (Horwath, 2007). No entanto, o aquecimento acelera a decomposição microbiana desses compostos recalcitrantes, promovendo sua mineralização e reduzindo os estoques de C (Fierer et al., 2003; Davidson e Janssens, 2006), processo associado à menor eficiência metabólica microbiana sob altas temperaturas (Conant et al., 2011). A perda de MOS compromete a disponibilidade de nutrientes (N, P, K e micronutrientes), necessários para o crescimento vegetal (Gerke, 2022), agravando-se em solos tropicais onde a pecuária depende extensamente de pastagens (Souza et al., 2023). Estudos demonstram que a instabilidade da MOS combinada ao estresse térmico reduz a eficiência no uso de nutrientes e a produtividade de pastagens do gênero *Urochloa* (Olivera-Viciedo et al., 2021; Moreno et al., 2014). Dessa forma, estudos que investiguem os impactos do aumento da temperatura no acúmulo e na eficiência do uso de nutrientes, além dos impactos na dinâmica da MOS,se tornam cruciais para futuras recomendações de fertilização e para a segurança alimentar.

Nas últimas décadas, o uso de BPCVs, como o *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*, tem se demonstrado uma estratégia sustentável e de baixo custo no aumento da resiliência das plantas frente a diversos estresses abióticos. Recentemente, Habermann et al. (2025a) demonstraram que a inoculação de *A. brasilense* e *P. fluorescens* é capaz de mitigar completamente os efeitos deletérios do aumento da temperatura de 2°C na fisiologia, na qualidade e na produtividade do Capim-Mavuno. Esse efeito está relacionado a uma série de benefícios causados por esses microrganismos (Hungria et al., 2021a) como a fixação de N (Pedreira et al., 2017; Hungria et al., 2016b), e a solubilização de P inorgânico devido a produção de ácidos orgânicos e fosfatases (Sharma et al., 2013). Além disso, essas bactérias produzem hormônios e substâncias promotoras do crescimento que induzem um maior desenvolvimento radicular, aumentando a absorção de água e a disponibilidade de nutrientes (Vassilev et al., 2012). No entanto, nestes estudos não foram analisados os efeitos destes estresses em processos nutricionais e na eficiência nutricional da planta além do N, de elementos responsivos para a produtividade como P, K e Si o que é preocupante, pois permitiria maior compreensão dos benefícios destes micro-organismos nas forrageiras cultivadas em ambientes desafiadores.

Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar como a inoculação de bactérias promotoras do crescimento vegetal mitiga os impactos do aquecimento de longo prazo na absorção e eficiência do uso de N, P, K e Si e no estoque de C do solo no híbrido *Urochloa brizantha* x *Urochloa ruziziensis* denominado Mavuno que é capaz de desenvolver um sistema radicular profundo e robusto conferindo resistência a estresses abióticos e maior absorção de água e nutrientes, crucias em regimes de pastagem em sequeiro.

As hipóteses do presente estudo são: i) Sob condições de aquecimento prolongado, o híbrido Mavuno manterá relativa tolerância ao aquecimento do dossel pela estabilidade na produção de massa seca em determinadas estações do ano. Entretanto, os efeitos negativos do aumento da temperatura serão mais pronunciados na eficiência de utilização de N, P, K e Si para a conversão em biomassa do que nos processos de absorção desses nutrientes. ii) A inoculação com ambas BPCV, *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens* sob temperatura ambiente ou elevada, pode promover melhorias na performance desse cultivar na maior parte das

estações do ano ou ciclos de crescimento, principalmente naquelas com menor restrição hídrica e pode favorecer a produtividade nas estações mais críticas devido aos maiores benefícios no processo de absorção e/ou na eficiência de uso de N e elementos-chave como P, K e Si.

6. CONCLUSÕES

Em estações do ano com adequada disponibilidade hídrica, o capim Mavuno manteve a produção de massa seca mesmo sob aquecimento, preservando também a absorção e a eficiência de uso dos nutrientes, mesmo sem inoculação. No entanto, o aquecimento prolongado comprometeu a resiliência nutricional com significativa redução na absorção de N, P, K e Si. A inoculação conjunta mitigou efeitos do aquecimento e também contribuiu para a manutenção do C no solo. Esse efeito é relevante para a sustentabilidade dos sistemas de produção reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e na conservação do estoque de C no solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, S. Z., Sandhya, V., & Rao, L. V. (2014). Effect of inoculation with a thermotolerant plant growth promoting *Pseudomonas putida* strain (AKMP7) on growth of wheat under heat stress. **Journal of Plant Interactions,** 9(1), 771–782. https://doi.org/10.1080/17429145.2014.931522

Allen, L. N., & MacAdam, J. W. (2020). Irrigation and Water Management. **Forages**, 497–513. https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch27

Approbato, A. U., Contin, D. R., Dias de Oliveira, E. A., Habermann, E., Cela, J., Pintó-Marijuan, M., Munné-Bosch, S., & Martinez, C. A. (2023). Adjustments in photosynthetic pigments, PS II photochemistry and photoprotection in a tropical C4 forage plant exposed to warming and elevated [CO2]. **Plant Physiology and Biochemistry**, 194, 345–360. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.11.033

Araújo, E. A. de, Ker, J. C., Mendonça, E. de S., Silva, I. R. da, & Oliveira, E. K. (2011). Impact of forest-pasture conversion on the stocks and dynamics of soil carbon and humic substances in the Amazon biome. **Acta Amazonica**, 41(1), 103-114. https://doi.org/10.1590/s0044-59672011000100012

Baba, Z, A., Hamid, B., Tahir Ahmad Sheikh, Alotaibi, S. H., El, A., Mohammad Javed Ansari, Tan, A., & Sayyed, R. Z. (2021). Psychrotolerant Mesorhizobium sp. Isolated from Temperate and Cold Desert Regions Solubilizes Potassium and Produces Multiple Plant Growth Promoting Metabolites. **Online/Molecules Annual**, 26 (19), 5758–5758. https://doi.org/10.3390/molecules26195758

Barreto, R. F., Renato, Habermann, E., Dilier Olivera Viciedo, & Martinez, C. A. (2020). Warming Change Nutritional Status and Improve Stylosanthes capitata Vogel Growth Only Under Well-Watered Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20 (4), 1838–1847. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00255-5

Bashan, Y., Holguin, G., & de-Bashan, L. E. (2004). Azospirillum-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**, 50(8), 521–577. https://doi.org/10.1139/w04-035

Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. 0., & Gallo, J. R. (1983). Métodos de análise química de plantas. Boletim Técnico-Instituto Agronômico (Brasil). nº 78.

Benites, V. D. M., Madari, B. E., & Machado, P. D. A. (2003). Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo.

Bisht, R., Mishra, S., Joshi, S., & Rani, A. (2013). Biotic and abiotic stress tolerance in plant growth-promoting rhizobacteria. In D. K. Maheshwari (Ed.), Bacteria in agrobiology: Stress management (pp. 197–218). **Springer**. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36562-1_9

Bita, C. E., & Gerats, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. **Frontiers in Plant Science,** 4, 273. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273

Boeck, H. J., Bassin, S., Verlinden, M., Zeiter, M., & Hiltbrunner, E. (2016). Simulated heat waves affected alpine grassland only in combination with drought. **The New Phytologist**, 209(2), 531–541. https://doi.org/10.1111/nph.13601

Carvalho J, M, Barreto, R, F, Prado, R, M, Habermann, E., Botelho, R., & Carlos Alberto Martinez. (2020). Elevated CO2 and warming change the nutrient status and use efficiency of Panicum maximum Jacq. **PLoS ONE**, 15(3), e0223937–e0223937. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223937

Chaplin, E., Merchant, A., & Salter, W. (2025). Smarter stomata: emergent technologies unlocking yield potential in a changing climate. **In AoB PLANTS** (Vol. 17, Issue 5). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/aobpla/plaf048

Chen, L., Dodd, I. C., Theobald, J. C., Belimov, A. A., & Davies, W. J. (2014). The rhizobacterium *Variovorax paradoxus* 5C-2 alleviates salt stress by influencing the hormone status of *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, 65(17), 4813–4826. https://doi.org/10.1093/jxb/eru229

Choi, J. H., Lee, Y. K., Seo, Y. S., Kim, S. H., & Kim, J. G. (2022). Effects of temperature stress on plant–microbe interactions and the potential for alleviation by beneficial microbes. **Journal of Plant Interactions**, 17(1), 1–10. https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2034603

Churchill, A. C., Zhang, H., Fuller, K. J., Amiji, B., Anderson, I. C., Barton, C. V. M., Carrillo, Y., Catunda, K. L. M., Chandregowda, M. H., Igwenagu, C., Jacob, V., Kim, G. W., Macdonald, C. A., Medlyn, B. E., Moore, B. D., Pendall, E., Plett, J. M., Post, A. K., Powell, J. R., & Tissue, D. T. (2022). Pastures and Climate Extremes: Impacts of Cool Season Warming and Drought on the Productivity of Key Pasture Species in a Field Experiment. **Frontiers in Plant Science**, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.836968

Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., ... & Kirschbaum, M. U. F. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates–synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology,** 17(11), 3392-3404. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x

Consentino, B. B., Aprile, S., Rouphael, Y., Ntatsi, G., De Pasquale, C., Iapichino, G., Alibrandi, P., & Sabatino, L. (2022). Application of PGPB Combined with Variable N Doses Affects Growth, Yield-Related Traits, N-Fertilizer Efficiency and Nutritional Status of Lettuce Grown under Controlled Condition. **Agronomy**, 12(2), 236. https://doi.org/10.3390/agronomy12020236

Cui, L., Cao, R., Li, J. et al. High temperature effects on ammonium assimilation in leaves of two Festuca arundinacea cultivars with different heat susceptibility. **Plant Growth Regul** 49, 127–136 (2006). https://doi.org/10.1007/s10725-006-9002-0

D'Angioli, A.M., Viani, R.A.G., Lambers, H. et al. Inoculation with Azospirillum brasilense (Ab-V4, Ab-V5) increases Zea mays root carboxylate-exudation rates, dependent on soil phosphorus supply**. Plant Soil** 410, 499–507 (2017). https://doi.org/10.1007/s11104-016-3044-5

Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature***,* 440(7081), 165-173. https://doi.org/10.1038/nature04514

Davies, M., Ecroyd, H., Robinson, S. A., & French, K. (2018). Stress in native grasses under ecologically relevant heat waves. **PLoS ONE**, 13(10), e0204906. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204906

Dubeux, J. C. B., Sollenberger, L. E., Mathews, B. W., Scholberg, J. M., & Santos, H. Q. (2007). Nutrient Cycling in Warm-Climate Grasslands. **Crop Science**, 47(3), 915–928. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.09.0581

Egli, M., Mastrolonardo, G., Seiler, R., Raimondi, S., Filippo Favilli, Crimi, V., Krebs, R., Cherubini, P., & Giacomo Certini. (2012). Charcoal and stable soil organic matter as indicators of fire frequency, climate and past vegetation in volcanic soils of Mt. Etna, Sicily. **Catena**, 88(1), 14–26. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.08.006

Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 156, 225–246. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013

FAO (2014). Irrigated crops. Aquastat, FAO's global water information system, **FAO**, Rome. http://www .fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index3.stm. Acesso em 03/03/2025.

Fierer, N., Allen, A. S., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2003). Controls on microbial CO2 production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. **Global Change Biology**, 9(9), 1322–1332. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00663.x

Fortunato, S., Nigro, D., Lasorella, C., Marcotuli, I., Gadaleta, A., & de Pinto, M. C. (2023). The Role of Glutamine Synthetase (GS) and Glutamate Synthase (GOGAT) in the Improvement of Nitrogen Use Efficiency in Cereals. Biomolecules, 13(12), 1771. https://doi.org/10.3390/biom13121771

Galindo F. S., Pagliari PH, Buzetti S, Rodrigues WL, Santini JMK, Boleta EHM, et al. (2020a) Can silicon applied to correct soil acidity in combination with *Azospirillum brasilense* inoculation improve nitrogen use efficiency in maize? **PLoS ONE** 15(4): e0230954. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230954

Galindo, F. S., Carvalho, M., Salatiér Buzetti, Mateus, J., Henrique, E., & Rodrigues, W. L. (2020b). Macronutrient accumulation in wheat crop (*Triticum aestivum* L.) with *Azospirillum brasilense* associated with nitrogen doses and sources. **Journal of Plant Nutrition**, 43(8), 1057–1069. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727511

Galindo, F. S., Pagliari, P., Fernandes G, C, Rodrigues W, L, Henrique, E., Jalal, A., Garcia, E., Horschut, B., José Lavres, & Carvalho, M. (2022). Improving Sustainable Field-Grown Wheat Production With *Azospirillum brasilense* Under Tropical Conditions: A Potential Tool for Improving Nitrogen Management. **Frontiers in Environmental Science**, 10. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.821628

Geange, S. R., Arnold, P. A., Catling, A. A., Coast, O., Cook, A. M., Gowland, K. M., Leigh, A., Notarnicola, R. F., Posch, B. C., Venn, S. E., Zhu, L., & Nicotra, A. B. (2020). The thermal tolerance of photosynthetic tissues: a global systematic review and agenda for future research. **New Phytologist**, 229(5), 2497–2513. https://doi.org/10.1111/nph.17052

Giri, B., & Mukerji, K. G. (2004). Mycorrhizal inoculants alleviates salt stress in *Sesbania aegyptiaca* and *Sesbania grandiflora* under field conditions: Evidence for

reduced sodium and improved magnesium uptake. **Mycorrhiza,** 14(5), 307–312. https://doi.org/10.1007/s00572-003-0270-3

Guan, L.-L., & Wen, D.-Z. (2011). More nitrogen partition in structural proteins and decreased photosynthetic nitrogen-use efficiency of *Pinus massoniana* under in situ polluted stress. **Journal of Plant Research**, 124(6), 663–673. https://doi.org/10.1007/s10265-011-0405-2

Habermann, E., de Oliveira, E. A. D., Barreto, R. F., e Martinez, C. A. (2021). Low soil nutrient availability does not decrease post-drought recovery of *Brachiaria Mavuno*. **Brazilian Journal of Botany**, 44(4), 849–858. https://doi.org/10.1007/s40415-021-00762-4

Habermann, E., Riul, B. N., Henrique, F., Santana, R. M., Oliveira, K. S., Bruno, Augusto, E., Botelho, R., de, A., Hungria, M., Nogueira, M. A., & Martinez, C. A. (2025). Inoculation with plant growth-promoting bacteria mitigates the negative impacts of 2 °C warming on the photosynthesis, growth, and nutritional value of a tropical C4 grassland under field conditions. **The Science of the Total Environment**, 967, 178769–178769. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178769

Habermann, E., San Martin, J. A. B., Contin, D. R., Bossan, V. P., Barboza, A., Braga, M. R., Groppo, M., & Martinez, C. A. (2019). Increasing atmospheric CO2 and canopy temperature induces anatomical and physiological changes in leaves of the C4 forage species *Panicum maximum*. **PLOS ONE**, 14(2), e0212506. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212506

Haroon, U., Khizar, M., Liaquat, F., Ali, M., & Akhtar, M. F. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A sustainable solution for climate-resilient agriculture. **Plants**, 11(7), 924. DOI: 10.3390/plants11070924

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Nahar, K., Hossain, Md., Mahmud, J., Hossen, Md., Masud, A., Moumita, & Fujita, M. (2018). Potassium: a Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. **Agronomy**, 8(3), 31. https://doi.org/10.3390/agronomy8030031

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, Md., Roychowdhury, R., & Fujita, M. (2013). Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms of Heat Stress Tolerance in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, 14(5), 9643–9684.

He, Y., Liu, X., & Huang, B. (2005). Protein Changes in Response to Heat Stress in Acclimated and Nonacclimated Creeping Bentgrass. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 130(4), 521–526. https://doi.org/10.21273/jashs.130.4.521

Heckathorn, S. A., Giri, A., Mishra, S., & Bista, D. (2013). Heat Stress and Roots. Climate Change and Plant Abiotic Stress Tolerance, **Wiley online library** 109–136. https://doi.org/10.1002/9783527675265.ch05

Henrique, E., Fernando Shintate Galindo, Jalal, A., Mateus, J., William Lima Rodrigues, Horschut, B., Orivaldo Arf, Rinaldi, M., Salatiér Buzetti, & Carvalho, M. (2020). Inoculation With Growth-Promoting Bacteria *Azospirillum brasilense* and Its Effects on Productivity and Nutritional Accumulation of Wheat Cultivars. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, 4. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.607262

Hoover, D. L., Knapp, A. K., & Smith, M. D. (2014). Contrasting sensitivities of two dominant C4 grasses to heat waves and drought. **Plant Ecology**, 215(7), 721–731. https://doi.org/10.1007/s11258-014-0345-8

Horwath, W. R. (2007). Carbon Cycling And Formation Of Soil Organic Matter. 303–339. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-047514-1.50016-0

Hossain, M. A., Kamiya, T., Burritt, D., Tran, L. S. P., & Fujiwara, T. (Eds.). (2017). Plant macronutrient use efficiency: molecular and genomic perspectives in crop plants. **Academic Press**. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-10635-9

Hungria, M., Campo, R. J., Souza, E. M., & Pedrosa, F. O. (2010). Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant and Soil**, 331(1-2), 413–425. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0

Hungria, M., Lirio, B., Letícia, A., Ricardo Azevedo Araujo, & Marco Antonio Nogueira. (2021). Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa* spp.) as an

economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. **Plant and Soil** 463(1-2), 171–186. https://doi.org/10.1007/s11104-021-04908-x

Hungria, M., Nogueira, M. A., & Araujo, R. S. (2016). Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 221, 125–131. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.024

Hungria, M.; Kaschuk, G. Regulation of N2 fixation and NO_3^-/NH_4^+ assimilation in nodulated and N-fertilized *Phaseolus vulgaris* L. exposed to high temperature stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 98, p. 32–39, fev. 2014. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.010

Ibrahim, M., Iqbal, M., Tang, Y.-T., Khan, S., Guan, D.-X., & Li, G. (2022). Phosphorus Mobilization in Plant–Soil Environments and Inspired Strategies for Managing Phosphorus: A Review. **Agronomy,** 12(10), 2539. https://doi.org/10.3390/agronomy12102539

Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). Dados meteorológicos e climatológicos do Brasil. **INMET**. https://www.inmet.gov.br/

IPCC. (2023). Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the **Intergovernmental Panel on Climate Change**, 3–32. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

Jagadish, S. V. K., Way, D. A., & Sharkey, T. D. (2021). Plant heat stress: Concepts directing future research. **Plant, Cell & Environment**, 44(7), 1992–2005. https://doi.org/10.1111/pce.14050

Jian, H., Gao, Z., Guo, Y., Xu, X., Li, X., Yu, M., Liu, G., Bian, D., Cui, Y., & Du, X. (2024). Supplemental irrigation mitigates yield loss of maize through reducing canopy temperature under heat stress. **Agricultural Water Management**, 299, 108888–108888. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108888

Jiang, L., Wang, S., Zhe, P. *et al.* Plant organic N uptake maintains species dominance under long-term warming. **Plant Soil 433**, 243–255 (2018). https://doi.org/10.1007/s11104-018-3836-x

Johnson, R., Vishwakarma, K., Hossen, Md. S., Kumar, V., Shackira, A. M., Puthur, J. T., Abdi, G., Sarraf, M., & Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, 172, 56–69. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001

Kaiser, W. M., Weiner, H., & Huber, S. C. (1999). Nitrate reductase in higher plants: A case study for transduction of environmental stimuli into control of catalytic activity. **Physiologia Plantarum**, 105(2), 384–389. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105225.x

Kaiser, W. M., Weiner, H., & Huber, S. C. (1999). Nitrate reductase in higher plants: A case study for transduction of environmental stimuli into control of catalytic activity. **Physiologia Plantarum**, 105(2), 384–389. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105225.x

Kaushal, M., & Wani, S. P. (2016). Plant-growth-promoting rhizobacteria: drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands. **Annals of Microbiology**, 66(1), 35–42. https://doi.org/10.1007/s13213-015-1112-3

Khan, A. L., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., Al-Farsi, Z., Al-Mamari, A., & Lee, I. J. (2020). Endophytic fungi: Resource for gibberellins and crop abiotic stress resistance. **Critical Reviews in Biotechnology,** 40(1), 24–35. https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1682967

Khan, M. A., Asaf, S., Khan, A. L., Jan, R., Kang, S.-M., Kim, K.-M., & Lee, I.-J. (2020). Extending thermotolerance to tomato seedlings by inoculation with SA1 isolate of *Bacillus cereus* and comparison with exogenous humic acid application. **PLOS ONE**, 15(4), e0232228. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232228

Khanzada, A., Feng, K., Wang, X., Cai, J., Malko, M. M., Samo, A., Hossain, M. N., & Jiang, D. (2022). Comprehensive evaluation of high-temperature tolerance induced by heat priming at early growth stages in winter wheat. **Physiologia Plantarum**, 174(4). https://doi.org/10.1111/ppl.13759

Kiba, T., Inaba, J., Kudo, T., Ueda, N., Konishi, M., Mitsuda, N., Takiguchi, Y., Kondou, Y., Yoshizumi, T., Ohme-Takagi, M., Matsui, M., Yano, K., Yanagisawa, S., & Sakakibara, H. (2018). Repression of Nitrogen Starvation Responses by Members of the *Arabidopsis* GARP-Type Transcription Factor NIGT1/HRS1 Subfamily. **The Plant Cell**, 30(4), 925–945. https://doi.org/10.1105/tpc.17.00810

Kimball, B. A., Conley, M. M., Wang, S., Lin, X., Luo, C., Morgan, J., & Smith, D. (2007). Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. **Global Change Biology**, 14(2), 309–320. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x

Korndörfer, G.H.; Pereira, H.S. & Camargo, M.S. Methods for analyzing silicon in soil and plants. Uberlândia, GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 24p. (Technical Bulletin, 1).

Kraska, J. E., & Breitenbeck, G. A. (2010). Simple, Robust Method for Quantifying Silicon in Plant Tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 41(17), 2075–2085. https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537

Kuster, T. M., Wilkinson, A., Hill, P. W., Jones, D. L., & Bardgett, R. D. (2016). Warming alters competition for organic and inorganic nitrogen between co-existing grassland plant species. **Plant and Soil**, 406(1-2), 117–129. https://doi.org/10.1007/s11104-016-2856-7

Landa, B. B., Mitter, B., Compant, S., Mathieu, F., & Sessitsch, A. (2013). Root-associated bacterial endophytes as biocontrol agents against soil-borne pathogens. In B. Lugtenberg (Ed.), Principles of plant-microbe interactions (pp. 139–150). **Springer**. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_15

Li, N., Euring, D., Cha, J. Y., Lin, Z., Lu, M., Huang, L.-J., & Kim, W. Y. (2021). Plant hormone-mediated regulation of heat tolerance in response to global climate change. **Frontiers in Plant Science**, 11, 627969. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627969

Li, S., Barreiro, A., Almeida, J. P., Prade, T., & Linda-Maria Dimitrova Mårtensson. (2024). Perennial crops shape the soil microbial community and increase the soil carbon in the upper soil layer. **Soil Biology and Biochemistry**, 109621–109621. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109621

Li, S.-X., Wang, Z.-H., & Stewart, B. A. (2013). Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. In **Advances in Agronomy** (pp. 205–397). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00005-0

Liang, T., Yuan, Z., Fu, L., Zhu, M., Luo, X., Xu, W., Yuan, H., Zhu, R., Hu, Z., & Wu, X. (2021). Integrative transcriptomic and proteomic analysis reveals an alternative molecular network of glutamine synthetase 2 corresponding to nitrogen deficiency in rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Molecular Sciences, 22**(14), 7674. https://doi.org/10.3390/ijms22147674

Lin, B. B., Macfadyen, S., & Gibson, R. H. (2020). Managing ecosystem services in tropical pastures – Challenges and opportunities. **Agricultural Systems**, 182, 102848. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102848

Lin, Y., Zhang, W., Qi, F., Cui, W., Xie, Y., & Shen, W. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria mitigate drought stress in plants. **Plant Physiology and Biochemistry,** 154, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.033

Lopes, M. J. S., Dias-Filho, M. B., & Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: Inoculation methods and abiotic factors. **Frontiers in Sustainable Food Systems,** 5, 606454. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454

Ma, X., Huete, A., Moran, S., Ponce-Campos, G., & Eamus, D. (2015). Abrupt shifts in phenology and vegetation productivity under climate extremes. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,** 120(10), 2036–2052. https://doi.org/10.1002/2015jg003144

Maheshwari, D. K., Dubey, R. C., Aeron, A., Kumar, B., Kumar, S., Tewari, S., & Arora, N. K. (2012). Integrated approach for disease management and growth enhancement of *Sesamum indicum* L. utilizing *Azotobacter chroococcum* TRA2 and chemical fertilizer. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 28(10), 3015–3024. https://doi.org/10.1007/s11274-012-1112-4

Marmagne, A., Coste, M., Bataille, M. P., & Gallardo, K. (2020). Nitrogen remobilization during leaf senescence: Lessons from *Arabidopsis* to crops. **Journal of Experimental Botany,** 71(3), 826–838. https://doi.org/10.1093/jxb/erz484

Mengutay, M., Ceylan, Y., Kutman, U. B., & Cakmak, I. (2013). Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant and Soil**, 368(1–2), 57–72. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1761-6

Miller, R. M., & Wood, C. W. (1996). Influence of environmental stress on rhizosphere microbial communities. **Agronomy Journal**, 88(4), 511–517. https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040002x

Mishra, J., Singh, R., & Arora, N. K. (2017). Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms. **Frontiers in Microbiology**, 8, 1706. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706

Mishra, P. K., Bisht, S. C., Ruwari, P., Joshi, G. K., Singh, G., Bisht, J. K., & Bhatt, J. C. (2016). Bioassociative effect of cold-tolerant *Pseudomonas* spp. and *Rhizobium leguminosarum* on growth and nutrient uptake of lentil (*Lens culinaris* L.). **European Journal of Soil Biology**, 75, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.04.001

Mishra, P. K., Bisht, S. C., Ruwari, P., Selvakumar, G., Joshi, G. K., Bisht, J. K., Bhatt, J. C., & Gupta, H. S. (2011). Alleviation of cold stress in inoculated wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings with psychrotolerant Pseudomonads from NW Himalayas. **Archives of Microbiology**, 193(7), 497–513. https://doi.org/10.1007/s00203-011-0693-x

Mishra, S., Spaccarotella, K., Gido, J., Samanta, I., & Chowdhary, G. (2023). Effects of heat stress on plant-nutrient relations: An update on nutrient uptake, transport, and assimilation. **International Journal of Molecular Sciences, 24**(21), 15670. https://doi.org/10.3390/ijms242115670

Mitra, D., Díaz Rodríguez, A. M., Parra Cota, F. I., Khoshru, B., Panneerselvam, P., Moradi, S., Sagarika, M. S., Anđelković, S., Santos-Villalobos, S. de los, & Das Mohapatra, P. K. (2021). Amelioration of thermal stress in crops by plant growth-promoting rhizobacteria. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, 115, 101679. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101679

Moraes, G. M. D., Xavier, F. A. D. S., Mendonça, E. D. S., Araújo Filho, J. A. D., & Oliveira, T. S. D. (2011). Chemical and structural characterization of soil humic

substances under agroforestry and conventional systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, 1597–1608.

Morales, J. P., & Vázquez, M. M. (2020). Plant responses to heat stress: a review. **Agronomy**, 10(6), 779. https://doi.org/10.3390/agronomy10060779

Moreno, L. S. B., Pedreira, C. G. S., Boote, K. J., & Alves, R. R. (2014). Base temperature determination of tropical *Panicum* spp. grasses and its effects on degree-day-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, 186, 26–33. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.013

Nijabat, A., Bolton, A., Mahmood-ur-Rehman, M., Shah, A. I., Hussain, R., Naveed, N. H., Ali, A., & Simon, P. (2020). Cell Membrane Stability and Relative Cell Injury in Response to Heat Stress during Early and Late Seedling Stages of Diverse Carrot (*Daucus carota* L.) Germplasm. **HortScience**, 55(9), 1446–1452. https://doi.org/10.21273/HORTSCI15058-20

Olivera-Viciedo, D, Renato, Martinez, C. A., Habermann, E., Marisa, Calero-Hurtado, A., Barreto, R. F., & Kolima Peña. (2021). Are the interaction effects of warming and drought on nutritional status and biomass production in a tropical forage legume greater than their individual effects? **Plant**, 254(5). https://doi.org/10.1007/s00425-021-03758-2

Olivera-Viciedo, D., Oliveira, K, S., Prado, M, R., Habermann, E., Martínez, C, A, e Anderson. (2024). Silicon uptake and utilization on *Panicum maximum* grass modifies C:N:P stoichiometry under warming and soil water deficit. **Soil and Tillage Research,** 235, 105884–105884. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105884

Olivera-Viciedo, D., Oliveira, K. S., Prado, M. R., Habermann, E., Martínez, C. A., & Anderson. (2024). Silicon uptake and utilization on *Panicum maximum* grass modifies C:N:P stoichiometry under warming and soil water deficit. **Soil and Tillage Research**, 235, 105884–105884. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105884

Olivera-Viciedo, D., Prado, M. R., Martinez, C. A., Habermann, E., de Cássia Piccolo, M., Calero Hurtado, A., Barreto, R. F., & Peña Calzada, K. (2021). Changes in soil water availability and air-temperature impact biomass allocation and C:N:P stoichiometry in different organs of *Stylosanthes capitata* Vogel. **Journal of**

Environmental Management, 278, 111540. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111540

Olivera-Viciedo, D**.**, Prado, R. M., Rodrigues, M., Habermann, E., Fernandes, A. M., & Crusciol, C. A. C. (2021). High temperature and water deficit impact nutrient use efficiency in *Urochloa* grasses. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 207(3), 437-448.

Pavinato, P. S., Gotz, L. F., Paula, A., Arruda, B., Herrera, W. B., Chadwick, D. R., Jones, D. L., & Withers, P. J. A. (2024). Legacy soil phosphorus bioavailability in tropical and temperate soils: Implications for sustainable crop production. **Soil and Tillage Research**, 244, 106228–106228. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106228

Pedreira, B. C., Barbosa, P. L., Pereira, T., Mombach, M. A., Domiciano, L. F., Pereira, D. H., & Ferreira, A. (2017). Tiller density and tillering on *Brachiaria brizantha* cv. Marandu pastures inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 69(4), 1039–1046. https://doi.org/10.1590/1678-4162-9034

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 11(5), 1633–1644. https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007

Piao, S., Zhang, X., Chen, A., Liu, Q., Lian, X., Wang, X., Peng, S., & Wu, X. (2019). The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review. **Science China Earth Sciences**, 62(10), 1551–1563. https://doi.org/10.1007/s11430-018-9363-5

Pii, Y., Mimmo, T., Tomasi, N., et al. (2015). Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review. **Biology and Fertility of Soils**, 51, 403–415. https://doi.org/10.1007/s00374-015-0996-1

Prado, M. R. (2021). Nutrição de plantas. Editora Unesp.

Prado, M. R. (2023). Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants. In Springer eBooks. **Springer Nature**. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7

Prasad, P. V. V., Pisipati, S. R., Momčilović, I., & Ristic, Z. (2008). Independent and combined effects of high temperature and drought stress during grain filling on plant yield and chloroplast EF-Tu expression in spring wheat. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 194(6), 398-406. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00338.x

Prinsen, E., Costacurta, A., Michiels, K., Vanderleyden, J., & Van Onckelen, H. (1993). *Azospirillum brasilense* indole-3-acetic acid biosynthesis: evidence for a non-tryptophan-dependent pathway. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, 6(5), 609–615. https://doi.org/10.1094/MPMI-6-609APS

Quaggio, J. A., Alcântara, P. B., Cantarella, H., Paulino, V. T., & Villa, M. R. (2022). Forrageiras. In Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: **IAC**.

Quaggiotti, S. (2004). Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, 55(398), 803–813. https://doi.org/10.1093/jxb/erh085

Ramakrishna, W., Yadav, R., & Li, K. (2019). Plant growth promoting bacteria in agriculture: two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, 138, 10-18. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.019

Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., et al. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. **Biotech**, 9, 90. https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. **Plants,** 8(2), 34. https://doi.org/10.3390/plants8020034

Ren, H.-L., Bao, J., Gao, Z., Sun, D.-Y., Zheng, S., & Bai, J. (2023). How rice adapts to high temperatures. **Frontiers in Plant Science**, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1137923

Reynaert, S., De Boeck, H. J., Verbruggen, E., Verlinden, M., Flowers, N., & Nijs, I. (2021). Risk of short-term biodiversity loss under more persistent precipitation regimes. **Global Change Biology**, 27(8), 1614–1626. https://doi.org/10.1111/gcb.15501

Rouphael, Y., Kyriacou, M. C., & Colla, G. (2018). Vegetable Grafting: A Toolbox for Securing Yield Stability under Multiple Stress Conditions. **Frontiers in Plant Science**, 8. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02255

Ru, C., Hu, X., Chen, D., Song, T., Wang, W., Lv, M., & Hansen, N. C. (2022). Nitrogen Modulates the Effects of Short-Term Heat, Drought and Combined Stresses after Anthesis on Photosynthesis, Nitrogen Metabolism, Yield, and Water and Nitrogen Use Efficiency of Wheat. **Water**, 14(9), 1407. https://doi.org/10.3390/w14091407

Sandhya, V., Ali, S. Z., Grover, M., Reddy, G., & Venkateswarlu, B. (2009). Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45. **Biology and Fertility of Soils**, 46(1), 17–26. https://doi.org/10.1007/s00374-009-0401-z

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. Á., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (6ª ed., rev. ampl.). Brasília, DF: **Embrapa**.

Santos, J. H. da S., Bona, F. D. D., & Monteiro, F. A. (2013). Growth and productive responses of tropical grass *Panicum maximum* to nitrate and ammonium supply. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 42(9), 622–628. https://doi.org/10.1590/s1516-35982013000900003

Santos, M. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2021). Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 45. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200128

Santoyo, G., Rojas-Sánchez, B., Hernández-Salmerón, J., Hernández-León, R., Rojas-Solis, D., Moreno-Hagelsieb, G., & Orozco-Mosqueda, M. del C. (2025). Outstanding biocontrol and plant growth promotion traits of Pseudomonas fluorescens UM270 and other plant-associated Pseudomonas. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, 138, 102672. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102672

Sardans, J., & Peñuelas, J. (2012). The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. **Plant Physiology**, 160(4), 1741–1761. https://doi.org/10.1104/pp.112.208785

Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. **Plants**, 10(2), 419. https://doi.org/10.3390/plants10020419

Sarkar, J., Chakraborty, B., & Chakraborty, U. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria protect wheat plants against temperature stress through antioxidant signalling and reducing chloroplast and membrane injury. **Journal of Plant Growth Regulation**, 37(4), 1396–1412. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9789-8

Sashidhar, B., Podile, A.R. (2010). Mineral phosphate solubilization by rhizosphere bacteria and scope for manipulation of the direct oxidation pathway involving glucose dehydrogenase. **Journal of Applied Microbiology**, 109(1), 1–12. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04654.x

Sehgal, A., Sita, K., Kumar, J., Kumar, S., Singh, S., Siddique, K. H. M., & Nayyar, H. (2018). Effects of drought, heat and their interaction on the growth, yield and photosynthetic function of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes varying in heat and drought sensitivity. **Frontiers in Plant Science**, 8, 1776. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01776

Shahid, M., Saleem, M. F., Saleem, A., et al. (2019). Exogenous potassium–instigated biochemical regulations confer terminal heat tolerance in wheat. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 19, 137–147. https://doi.org/10.1007/s42729-019-00020-3

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, 2, 587. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587

Sharma, V., Pramanik, A., Chandra, S., & Raj, A. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology,** 18(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/s43141-020-00085-2

Shekhawat, K., Almeida-Trapp, M., García-Ramírez, G. X., & Hirt, H. (2022). Beat the heat: plant- and microbe-mediated strategies for crop thermotolerance. **Trends in Plant Science**, 27(8), 802–813. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.02.008

Siddiqi, M. Y., & Anthony. (1981). Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 4(3), 289–302. https://doi.org/10.1080/01904168109362919

Silva, J. M. B. Vendramini, Fabio, Cecilio, Kaneko, M., Silveira, M. L., Sanchez, D., & Yarborough, J. K. (2020). Harvest frequency effects on herbage characteristics of "Mavuno" brachiaria grass. **Crop Science**, 60(2), 1113–1122. https://doi.org/10.1002/csc2.20046

Singh, G., Biswas, D. R., & Marwaha, T. S. (2010). Mobilization of potassium from waste mica by plant growth promoting rhizobacteria and its assimilation by maize (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivuml.*): A hydroponics study under phytotron growth chamber. **Journal of Plant Nutrition**, 33(8), 1236–1251. https://doi.org/10.1080/01904161003765760

Singh, S., Pranaw, K., Prasanna, R., Kumar, P., & Poria, V. (2023). Microbial inoculants in the climate change scenario: An overview. In S. Singh, R. Prasanna, & K. Pranaw (Eds.), Bioinoculants: Biological option for mitigating global climate change (pp. 1–xx). **Springer**, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2973-3_1

Slot, M., & Winter, K. (2016). In situ temperature response of photosynthesis of 42 tree and liana species in the canopy of two Panamanian lowland tropical forests. **Journal of Experimental Botany**, 67(8), 2427–2439. https://doi.org/10.1093/jxb/erw036

Somers, E., Ptacek, D., Gysegom, P., Srinivasan, M., & Vanderleyden, J. (2005). *Azospirillum brasilense* produces the auxin-like phenylacetic acid by using the key enzyme for indole-3-acetic acid biosynthesis. **Applied and Environmental Microbiology**, 71(4), 1803–1810. https://doi.org/10.1128/AEM.71.4.1803-1810.2005

Somers, E., Vanderleyden, J., & Srinivasan, M. (2004). Rhizosphere bacterial signalling: A love parade beneath our feet. **Critical Reviews in Microbiology**, 30(4), 205–240. https://doi.org/10.1080/10408410490468786

Souza, W. L. de, Romanzini, E. P., Delevatti, L. M., Leite, R. G., Bernardes, P. A., Cardoso, A. S., Reis, R. A., & Malheiros, E. B. (2023). Economic evaluation of nitrogen fertilization levels in beef cattle production: Implications for sustainable tropical pasture management. **Agriculture**, 13(12), 2233. https://doi.org/10.3390/agriculture13122233

Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Soleymani, A. (2024). The roles of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR)-based biostimulants for agricultural production systems. **Plants**, 13(5), 613. https://doi.org/10.3390/plants13050613

Theocharis, A., Clément, C., & Barka, E. A. (2012). Physiological and molecular changes in plants grown at low temperatures. **Plants**, 235(6), 1091–1105. https://doi.org/10.1007/s00425-012-1641-y

Thirunavukkarasu, N., Mishra, M. N., Spaepen, S., Vanderleyden, J., Gross, C. A., & Tripathi, A. K. (2008). An extra-cytoplasmic function sigma factor and anti-sigma factor control carotenoid biosynthesis in *Azospirillum brasilense*. **Microbiology**, 154(7), 2096–2105. https://doi.org/10.1099/mic.0.2008/016428-0

Thuler, D. S., Floh, E. I. S., Handro, W., & Barbosa, H. R. (2003). Plant growth regulators and amino acids released by *Azospirillum* sp. in chemically defined media. **Letters in Applied Microbiology**, 37(2), 174–178. https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2003.01370.x

Tiwari, J., Ramanathan, A., Bauddh, K., & Korstad, J. (2022). Humic substances: Structure, function and benefits for agro-ecosystem: A review. **Pedosphere**. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.008

Tiwari, P., Bajpai, M., Singh, L. K., Mishra, S., & Yadav, A. N. (2020). Phytohormones producing fungal communities: Metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crops. In A. Yadav, S. Mishra, D. Kour, N. Yadav, & A. Kumar (Eds.), Agriculturally important fungi for sustainable agriculture (pp. 171–197). **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45971-0_8

Trabelsi, D., Mengoni, A., Ben Ammar, H., & Mhamdi, R. (2013). Effect of inoculation with *Rhizobium* and *Pseudomonas* on growth and nitrogen uptake by faba bean. **Journal of Agricultural Science**, 5(12), 1–8. https://doi.org/10.5539/jas.v5n12p1

Ueda, Y., Kiba, T., & Yanagisawa, S. (2019). Nitrate-inducible NIGT1 proteins modulate phosphate uptake and starvation signalling via transcriptional regulation of SPX genes. **The Plant Journal**, 102(3), 448–466. https://doi.org/10.1111/tpj.14637

Urban, J., Ingwers, M., McGuire, M. A., & Teskey, R. O. (2017). Stomatal conductance increases with rising temperature. **Plant Signaling & Behavior,** 12(8), e1356534. https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1356534

Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moënne-Loccoz, Y., Muller, D., ... & Prigent-Combaret, C. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in Plant Science**, 4, 356. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356

Vaishnav, A., Varma, A., Tuteja, N., & Choudhary, D. K. (2016). PGPR-mediated amelioration of crops under salt stress. In D. Choudhary, A. Varma, & N. Tuteja (Eds.), Plant-microbe interaction: An approach to sustainable agriculture (pp. 205–226). **Springer**, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2854-0_10

Vassilev, N., Eichler-Löbermann, B. & Vassileva, M. Stress-tolerant P-solubilizing microorganisms. **Appl Microbiol Biotechnol** 95, 851–859 (2012). https://doi.org/10.1007/s00253-012-4224-8

Verma, K. K., Singh, P., Song, X.-P., Malviya, M. K., Singh, R. K., Chen, G.-L., Solomon, S., & Li, Y.-R. (2020). Mitigating Climate Change for Sugarcane Improvement: Role of Silicon in Alleviating Abiotic Stresses. **Sugar Tech**, 22(5), 741–749. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00831-0

Verma, K. K., Song, X.-P., Li, D., Singh, M., Wu, J., Singh, R., Sharma, A., Zhang, B., & Li, Y.-R. (2022). Silicon and soil microorganisms improve rhizospheric soil health with bacterial community, plant growth, performance and yield. **Plant Signaling & Behavior**, 17(1). https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2104004

Vignjevic, M., Wang, X., Olesen, J. E., & Wollenweber, B. (2015). Traits in spring wheat cultivars associated with yield loss caused by a heat stress episode after anthesis. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 201(1), 32–48. https://doi.org/10.1111/jac.12085

Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. **Microbiological Research**, 184, 13–24. https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, 61(3), 199–223. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011

Wang, K., Zhang, X., & Ervin, E. (2013). Effects of nitrate and cytokinin on creeping bentgrass under supraoptimal temperatures. **Journal of Plant Nutrition**, 36(10), 1549–1564. https://doi.org/10.1080/01904167.2013.799184

Warren, C. R. (2009). Why does temperature affect relative uptake rates of nitrate, ammonium and glycine: A test with *Eucalyptus pauciflora*. **Soil Biology and Biochemistry**, 41(4), 778–784. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.012

Wilcox, K. R., Blair, J. M., Smith, M. D., & Knapp, A. K. (2020). Pasture resilience to drought in managed and natural grasslands. **Nature Ecology & Evolution**, 4(5), 752–760. https://doi.org/10.1038/s41559-020-1167-1

Xu, G., Fan, X., & Miller, A. J. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, 63(1), 153–182. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532

Xu, Z. Z., & Zhou, G. S. (2005). Effects of water stress on photosynthesis and nitrogen metabolism in vegetative and reproductive shoots of *Leymus chinensis*. **Photosynthetica**, 43(1), 29–35. https://doi.org/10.1007/s11099-005-5062-z

Xu, Z. Z., & Zhou, G. S. (2006). Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass *Leymus chinensis*. **Plants,** 224(5), 1080–1090. https://doi.org/10.1007/s00425-006-0281-5

Yadav, N., Tripathi, D., & Singh, A. K. (2023). Modulating effect of PGRs on growth and biochemical traits in rice (*Oryza sativa* L.) under salt stress. **International Journal of Plant & Soil Science**, 35(19), 1280–1290. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193668

Yakhin, O. I., Lubyanov, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. **Frontiers in Plant Science**, 7. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049

Yamori, W., Hikosaka, K., & Way, D. A. (2014). Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynthesis Research**, 119(1–2), 101–117. https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6

Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19(13), 1467–1476. https://doi.org/10.1080/00103628809368027

Zahra, N., Hafeez, M. B., Ghaffar, A., Kausar, A., Zeidi, M. A., Siddique, K. H. M., & Farooq, M. (2023). Plant photosynthesis under heat stress: Effects and management. **Environmental and Experimental Botany**, 206, 105178. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105178

Zaidi, A., Khan, M., Ahemad, M., & Oves, M. (2009). Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. **Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica**, 56(3), 263–284. https://doi.org/10.1556/amicr.56.2009.3.6

Zakharova, E. A., Iosipenko, A. D., & Ignatov, V. V. (2000). Effect of water-soluble vitamins on the production of indole-3-acetic acid by *Azospirillum brasilense*. **Microbiological Research**, 155(3), 209–214. https://doi.org/10.1016/S0944-5013(00)80003-2

Zeng, Q., Ding, X., Wang, J. *et al.* Insight into soil nitrogen and phosphorus availability and agricultural sustainability by plant growth-promoting rhizobacteria. **Environ Sci Pollut Res** 29, 45089–45106 (2022). https://doi.org/10.1007/s11356-022-20399-4

Zhang, G.-B., Meng, S., & Gong, J.-M. (2016). The Expected and Unexpected Roles of Nitrate Transporters in Plant Abiotic Stress Resistance and Their Regulation. **International Journal of Molecular Sciences**, 19(11), 3535. https://doi.org/10.3390/ijms19113535

Zhang, J., Li, X.-M., Lin, H.-X., & Chong, K. (2019). Crop Improvement Through Temperature Resilience. **Annual Review of Plant Biology,** 70(1), 753–780. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100016

Zhang, X., Wollenweber, B., Jiang, D., Liu, F., & Zhao, J. (2008). Water deficits and heat shock effects on photosynthesis of a transgenic *Arabidopsis thaliana* constitutively expressing ABP9, a bZIP transcription factor. **Journal of Experimental Botany**, 59(4), 839-848. https://doi.org/10.1093/jxb/erm364

Zhao, X., Yuan, X., Xing, Y., Dao, J., Zhao, D., Li, Y., Li, W., & Wang, Z. (2022). A meta-analysis on morphological, physiological and biochemical responses of plants with PGPR inoculation under drought stress. **Plant Cell and Environment,** 46(1), 199–214. https://doi.org/10.1111/pce.14466

Zhao, Y., Wang, Q., Gu, D., Huang, F., Liu, J., Yu, L., & Yu, X. (2023). Melatonin, a phytohormone for enhancing the accumulation of high-value metabolites and stress tolerance in microalgae: Applications, mechanisms, and challenges. **Bioresource Technology**, 393, 130093–130093. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130093

Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C.-O., Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., ... & Wu, Z. (2017). Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. **BMC Plant Biology**, 17(1), 24. https://doi.org/10.1186/s12870-017-0974-x