

TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA: O USO DE BIOFERTILIZANTES EM PASTAGENS TROPICAIS

Cleyton de Souza Batista¹, Raylon Pereira Maciel², Kaliandra Souza Alves³, Ricardo Shigueru Okumura⁴, Gabriela de Jesus Coelho⁵, Perlton Maia dos Santos⁶

RESUMO:

O uso de biofertilizantes vem numa crescente nos últimos anos, pois proporcionam uma diminuição na utilização de fertilizantes químicos, bem como promovem o crescimento da planta, a fixação biológica de nitrogênio e a solubilização de fósforo, desencadeando em uma maior produtividade das culturas e impactando na saúde do solo. As bactérias simbióticas podem ser divididas em associativas (formando nódulos, por exemplo) ou de vida livre. Toda bactéria fixadora de nitrogênio é diazotrófica, podendo ser simbióticas ou não. Dentre as diversas bactérias, as do gênero *Azospirillum*, *Pseudomonas* e *Bacillus*, tem proporcionado diversos ganhos para as gramíneas forrageiras. Os benefícios provenientes do uso das bactérias promotoras de crescimento de plantas podem ser diversos, podendo contribuir com o crescimento da forrageira, possibilitando a melhoria na aquisição de nutrientes por meio da solubilização de fósforo, fixação biológica de nitrogênio, síntese de fitohormônios e produção de sideróforos. A utilização dessas bactérias promovem o crescimento das plantas, além de colaborar para um sistema agropecuário sustentável, melhorando a produtividade e eficiência produtiva. No entanto, é de extrema importância avançar em pesquisas relacionadas ao uso de biofertilizantes em pastagens tropicais.

Palavras-Chaves: Gramíneas, Microrganismos, Sustentabilidade.

SUSTAINABLE TECHNOLOGIES IN BRAZILIAN AGRICULTURAL FARMING: THE USE OF BIOFERTILIZERS IN TROPICAL PASTURES

ABSTRACT:

The use of biofertilizers has been increasing in recent years, as they provide a reduction in the use of chemical fertilizers, as well as promoting plant growth, biological nitrogen fixation and phosphorus solubilization, triggering greater crop productivity and impacting the soil health. Symbiotic bacteria can be further divided into associative (forming nodules, for example) or free-living. All nitrogen-fixing bacteria are diazotrophic and may or may not be symbiotic. Among the various bacteria, those of the genus *Azospirillum*, *Pseudomonas* and *Bacillus*, have provided several benefits for forage grasses. The benefits arising from the use of plant growth-promoting bacteria can be diverse and can contribute to forage growth, enabling improved nutrient acquisition through phosphorus solubilization, biological nitrogen fixation, synthesis of phytohormones and production of siderophores. The use of these bacteria promotes plant growth, in addition to contributing to a sustainable agricultural system, improving productivity and production efficiency. However, it is extremely important to advance research related to the use of biofertilizers in tropical pastures.

¹Doutorando pelo Programa de Pós Graduação Integrado em Zootecnia nos Trópicos da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA. Parauapebas- Pará. cleytondeusebom@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-8126-4088>. ² Professor Adjunto IV da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA. Parauapebas - Pará. raylonmaciel@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5097-2797>. ³ Professora Titular da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA. Parauapebas - Pará, kaliandra.alves@ufra.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-8964-9345>. ⁴ Professor Associado III da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA. Parauapebas – Pará, ricardo.okumura@ufra.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-5079-3980>. ⁵ Professora substituta da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA. Parauapebas – Pará, gabrielajcoelho@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5831-397X>. ⁶ Professor Adjunto IV da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA. Parauapebas – Pará, perlton@ufra.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-7592-342X>.

Keywords: Grasses, Microorganisms, Sustainability.

INTRODUÇÃO

Na atualidade, a agricultura usa fertilizantes químicos advindos de recursos não renováveis, no qual a produção requer muita energia. No entanto, os macronutrientes e micronutrientes disponibilizados por esses fertilizantes são indispensáveis para o crescimento e desenvolvimento das plantas, cultivadas para produção de alimentos (Izydorczyk et al., 2022).

Diante disso, o uso de biofertilizantes vem sendo incorporado rapidamente, pois possibilitam uma redução na utilização de fertilizantes químicos, promovem o crescimento da planta, a fixação de nitrogênio, solubilização de fósforo, conseqüentemente, resulta em um maior rendimento das culturas e diminuindo os danos às condições do solo, despertando atualmente grande interesse (Ansari et al., 2015).

Os biofertilizantes são produtos que possuem microrganismos vivos ou compostos naturais advindos de organismos como bactérias e fungos que possibilitam a melhoria das propriedades químicas e biológicas do solo, bem como promovem o crescimento das plantas e beneficiam a fertilidade do solo (Pirttila et al., 2021).

Em diversos países os biofertilizantes vêm sendo utilizados com estimativa de receita de U\$6,83 bilhões até 2032, com crescimento de 12,3% no período entre 2023 e 2032 (Mordor intelligence, 2022). A expectativa de aumento está ligada à possibilidade do seu uso em substituir parcialmente os fertilizantes químicos, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa (Schmidt et al., 2018).

Nota-se que a comercialização de inoculantes microbianos no Brasil teve um aumento considerável nos últimos anos, no entanto, a utilização em pastagens ainda é reduzida, com menos de 0,1%. Isso demonstra a importância de potencializar o uso dessa tecnologia nas gramíneas forrageiras, visto que pode contribuir para o aumento da produtividade e sustentabilidade (Guimarães et al., 2022).

Portanto, os esforços para aumentar o uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB) em pastagens podem ter grandes impactos positivos globais, ambientais, econômicos e sociais (Guimarães et al., 2023). Objetivou-se com esta revisão bibliográfica destacar as potencialidades do uso de biofertilizantes nas pastagens tropicais.

FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO

O nitrogênio é um dos nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, pois está ligado ao aumento da produtividade. Embora 78% do N_2 esteja na atmosfera, as plantas não são capazes de absorvê-lo diretamente, sendo necessária sua conversão em amônia (NH_3). A adubação nitrogenada é indispensável para a produtividade das pastagens, entretanto resulta em um aumento considerável do custo de produção. A obtenção desses fertilizantes ocorre por meio de combustíveis fósseis, sendo grande parte do nitrogênio utilizado no Brasil provenientes de importação (Hungria et al., 2016).

Sabe-se que os fertilizantes sintéticos são a forma mais utilizada para fornecer nitrogênio às plantas, embora tenha um alto custo. Além disso, sua produção é proveniente do processo denominado Haber-Bosch, emitindo 1,2% do CO_2 antropogênico (Smith et al., 2020). O processo de Haber-Bosch utiliza uma elevada temperatura e pressão para a produção industrial de N. Estima-se que até 2050, a produção de amônia industrial será responsável por cerca de 2% do consumo global de energia. (Ladha et al., 2022).

A fixação biológica de N é uma alternativa que possibilita o aumento da produtividade das forrageiras e leguminosas através da ação de bactérias promotoras de crescimento de plantas, viabilizando práticas sustentáveis (Sá et al., 2019). A fixação biológica de nitrogênio é capaz de converter o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pela planta (Ahmed et al., 2023).

O nitrogênio advindo da atmosfera através da fixação biológica apresenta em sua estrutura ligação tripla que sofre uma conversão biológica, por meio do complexo enzimático nitrogenase, composto por duas proteínas: a proteína Fe redutase e a proteína MoFe, conseqüentemente resulta na produção de amônia (NH_3) disponível para a planta (Warmack et al., 2024).

A nitrogenase é considerada uma enzima complexa e que as proteínas que a compõe passam por ciclos de formação que necessitam de ATP. O modelo de Thorneley-Lowe é estruturado em volta desses dois ciclos que estão interconectados, ou seja, os ciclos da proteína MoFe e da proteína Fe, mas que se separam logo após a transferência de elétrons (Hageman et al., 1978 - 207).

A Fe-proteína é responsável em transferir elétrons para a proteína MoFe para que aconteça a

redução do nitrogênio, processo esse que necessita de ATP, sendo que a cada elétron transportado a proteína Fe passa por um ciclo em que ocorre a troca de nucleotídeos, bem como a redução por flavodoxina ou ferredoxina. Posteriormente, a proteína MoFe é responsável em catalisar a redução do N₂ em amônia (NH₃), processo esse que ocorre de forma cíclica, no qual a enzima passa por uma série de reações de redução, isso ocorre porque cada molécula de N₂ precisa de 8 elétrons e 16 moléculas de ATP para ser completamente reduzida a duas moléculas de amônia (Einsle e Rees, 2020).

Os inoculantes microbianos, vêm sendo utilizados no Brasil desde a década de 1950, sendo compostos por rizobactérias capazes de promoverem o crescimento dos vegetais (Santos et al., 2019). Destaca-se que a fixação biológica de nitrogênio compõe um dos objetivos assumidos pelo Brasil em acordos internacionais para mitigação dos gases de efeito estufa voltados para a agricultura, denominado Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC), potencializando o uso dessa tecnologia nas lavouras e pastagens brasileiras (Mapa, 2021).

BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL (BPCV)

As bactérias promotoras de crescimento vegetal são capazes de promover um efeito positivo na planta por meio de mecanismos diretos e indiretos, como por exemplo a fixação biológica de nitrogênio, solubilização de nutrientes e controle de doenças (Grover et al., 2021). Os inoculantes microbianos são caracterizados como um produto que apresenta em sua constituição microrganismos que beneficiam o crescimento das plantas, por meio de diversos mecanismos, como por exemplo bactérias diazotróficas que fixam o nitrogênio atmosférico, (Bomfim et al., 2021).

O uso das bactérias promotoras de crescimento nas forrageiras é uma inovação, isso porque corrobora para a redução da degradação das pastagens, bem como porque contribui para o sequestro de carbono e diminuição na emissão de gases de efeito estufa (Hungria et al., 2016). Os benefícios advindos do uso das bactérias promotoras de crescimento são importantes no contexto da produção de alimentos, isso porque estão envolvidas na fertilidade do solo, bem como na ciclagem de nutrientes, possibilitando o crescimento das gramíneas (Ramakrishna et al., 2019).

O processo de colonização das rizobactérias promotoras de crescimento de plantas podem acontecer pela rizosfera, na superfície das raízes, denominado rizoplane, como também pela filosfera (superfície das folhas) e a parte interna dos tecidos das plantas (Fukami et al., 2018). De acordo com Vaishnav et al. (2018) a utilização do PGPB é uma estratégia economicamente viável e ecologicamente sustentável, pois a presença dessas bactérias contribui para uma melhor adaptação das plantas as diferentes condições edafoclimáticas, disponibilizando uma maior oferta de nutrientes.

O crescimento das plantas com a utilização das PGPBs acontece por meio de dois mecanismos diretos, pela disponibilidade de nutrientes (fixação biológica de nutrientes, solubilização de fósforo), e síntese de fitohormônios, e indiretos, impedindo a presença de patógenos (Glick e Gamalero, 2021).

Assim, as interações planta-hospedeiro podem aumentar a produtividade por meio de mecanismos microbianos, como a fixação biológica de nitrogênio, produção de fitohormônios, podendo regular os níveis na planta (auxinas, citocininas e giberilinas), indução a resistência sistêmica e solubilização de fósforo (Orozco-Mosqueda et al., 2018; Basu et al., 2021).

BENEFÍCIOS DO USO DAS BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL

Os benefícios provenientes do uso das bactérias promotoras de crescimento de plantas podem ser diversos, podendo contribuir com o crescimento da forrageira. Possibilitam melhoria na aquisição de nutrientes por meio da solubilização de fósforo e fixação biológica de nitrogênio, influenciam na síntese de reguladores de crescimento que atuam diretamente nas raízes, viabilizando um aumento na absorção de água e nutrientes, bem como agentes indiretos e no controle de patógenos (Rosier et al., 2018).

Dentre os processos microbianos envolvendo o crescimento vegetal por meio das BPCV destaca-se, a síntese de fitohormônios, redução dos níveis de etileno nas plantas (pela produção da enzima ACC), a fixação biológica de nitrogênio, mobilização de nutrientes insolúveis (P, Zn e Fe), solubilização de ferro, fósforo, potássio e resistência sistêmica da planta a fatores abióticos (Naseem et al., 2018).

A síntese de fitohormônios pelas BPCV exerce um papel importante no crescimento e no desenvolvimento das plantas. A síntese de hormônios vegetais é uma ação benéfica desses microrganismos, que desencadeiam a produção de ácidos indol-3-acéticos, citocininas, giberilinas, etileno e ácido abscísico, impactando na fisiologia, morfologia e reações bioquímicas da planta (Usman et al., 2022).

As auxinas atuam no desenvolvimento de raízes laterais e pelos radiculares (JIA et al., 2023). Sabe-se que dentre os tipos de auxina a mais abundante é o ácido indol-3-acético (AIA), que promove o crescimento dos tecidos radiculares, aumentando o desenvolvimento das raízes e consequentemente favorecendo a absorção de água e nutrientes do solo (Numan et al., 2018).

As giberelinas participam de diversos processos fisiológicos e atuam no desenvolvimento da planta, promovendo a quebra da dormência das sementes, possibilitando sua germinação, bem como o alongamento do caule, e a expansão de folhas (Fukami et al., 2018). As citocininas influenciam na embriogênese, estimulam a divisão celular mitótica nas raízes e brotos, retardam o envelhecimento das folhas e atuam no aumento dos pelos radiculares, afetando a absorção de nutrientes e água pelas raízes (Hungria et al., 2010).

Os fitohormônios podem atuar de forma sinérgica ou antagônica como por exemplo, o etileno que auxilia no crescimento radicular e no aumento dos pelos radiculares. No entanto, algumas bactérias promotoras de crescimento têm a habilidade de reduzir as concentrações de etileno na planta quando em situações de estresse, visto que elevados níveis desse fitormônio impedem o crescimento, ocasionando indução da senescência (Gouda et al., 2018).

Além disso, as bactérias promotoras de crescimento proporcionam à planta uma resistência sistêmica pela produção do ácido abscísico (ABA), também conhecido como hormônio do estresse hídrico, possibilitando uma maior tolerância em condições de seca, ocasionando o fechamento dos estômatos, impedindo a perda de água (Selim et al., 2019).

O fósforo (P) é um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento da planta, no entanto boa parte do P do solo está presente em formas insolúveis, estando indisponível na solução do solo, principalmente devido a adsorção pelos óxidos de ferro e alumínio nos minerais da fração argila do

solo. Como consequência, somente uma baixa quantidade do P total do solo é utilizado pelas culturas, sendo insuficiente para seu desenvolvimento (Alori et al., 2017). Foi evidenciado que as bactérias promotoras de crescimento atuam na solubilização de P, desorvendo os minerais da fração argila do solo, tornando-o disponível para a planta (Parnell et al., 2016).

Outro mecanismo realizado pelas PGPB é a produção de sideróforos, que são moléculas de baixo peso molecular encarregadas de realizar a quelatagem de ferro presente no solo, tornando-o disponível para as plantas e indisponível para os patógenos, impedindo o desenvolvimento dos mesmos, comprovando assim o papel de controle biológico (Sarwar et al., 2020). É importante ressaltar que as bactérias promotoras de crescimento podem utilizar diversos mecanismos para o desenvolvimento das plantas, pois o estímulo do crescimento é desencadeado por muitos mecanismos ativados conjuntamente (Bishnoi et al., 2015).

Contudo, as bactérias promotoras de crescimento têm sido utilizadas tanto em espécies de cereais como em pastagens, apontando avanços no uso das PGPBs, como *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Azospirillum*, em gramíneas forrageiras, (Garcia et al., 2016).

RESULTADOS DO USO DE BIOFERTILIZANTES NAS PASTAGENS TROPICAIS

De acordo com Hungria et al. (2016), a inoculação com *Azospirillum brasilense* combinada com a fertilização de nitrogênio na *Urochloa brizantha* aumentou a produção de biomassa forrageira em 24,7% quando comparada somente com a fertilização utilizando N. Em uma comparação, a inoculação com *Azospirillum brasilense* neste estudo equivale a uma adubação adicional de 40 kg de N ha⁻¹, demonstrando o efeito satisfatório da inoculação nas pastagens tropicais, por meio da fixação biológica de nitrogênio (Hungria et al., 2016).

Em estudo realizado por Freitas et al. (2023), avaliando o rendimento de massa seca da parte aérea e das raízes de *Megathyrsus maximus* BRS Zuri, inoculado por pulverização foliar com as bactérias promotoras de crescimento, os autores observaram ganhos no crescimento vegetativo das plantas. Durante o período chuvoso, a aplicação de 40 kg N ha⁻¹ associado a inoculação separadamente de

Azospirillum brasilense e *Pseudomonas* aumentaram o número de perfilhos em 33% e 25%, respectivamente. Além disso, houve um aumento de 61% e 30% do sistema radicular quando inoculado com *Azospirillum* e *Pseudomonas* por meio da pulverização foliar e aplicação de 80 kg N ha⁻¹ (Freitas et al., 2023).

Uma pesquisa com objetivo de avaliar as características morfogênicas e estruturais de três cultivares do gênero *Urochloa*, inoculadas com *Pseudomonas*, demonstrou que para o capim Paiaguás houve aumento na taxa de alongamento foliar e no número de perfilhos basais quando comparado ao tratamento controle (Duarte et al., 2020). Esses mesmos autores identificaram que para o capim Xaraés, na ausência de adubação

nitrogenada, a *Pseudomonas* aumentou em 51% a taxa de alongamento foliar em relação ao tratamento não inoculado.

No experimento avaliando a inoculação com *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescense* em cultivares do gênero *Urochloa* via pulverização foliar Hungria et al. (2021) observaram aumento no rendimento de biomassa da parte aérea quando inoculada individualmente com ambas as bactérias 12,7% e 14,0%, respectivamente. Além disso, esses autores verificaram que a *P. fluorescense* contribuiu para a solubilização do fósforo e o *Azospirillum brasilense* com fixação biológica de nitrogênio. Estudos apontam os benefícios da utilização das bactérias promotoras de crescimento (PGPB) nas pastagens (Tabela 1).

Tabela 1 – Estudos sobre o efeito do uso de inoculantes com bactérias promotoras de crescimento em gramíneas forrageiras.

Espécies forrageiras	Microrganismo Gênero	Variáveis	Referência
<i>Urochloa Brizantha</i> cv. Marandu	<i>Azospirillum brasilense</i>	Aumento da produção de massa seca de raízes e parte aérea. Alterações nos teores de N, Mg, P, Fe, Mn, Zn e Cu na massa seca da parte aérea	Heinrichs et al. (2020)
<i>Urochloa Brizantha</i> cv. Marandu	<i>Azospirillum brasilense</i>	Aumento no acúmulo diário de forragem (kg/ha/dia); densidade de perfilhos; altura no período da seca, transição e chuva.	Leite et al. (2018)
<i>Urochloa Brizantha</i> cv. Marandu	<i>Bacillus subtilis</i>	Aumento na produção de massa seca da parte aérea e aumento na massa do sistema radicular.	Manrique et al. (2019)
<i>Megathyrsus máximus</i> cv. Mombaça	<i>Azospirillum brasilense</i>	Houve interação entre fatores de inoculação e doses de nitrogênio com aumento no número de perfilhos, acúmulo diário de forragem, massa de forragem e massa de raízes.	Leite et al. (2019)
<i>Megathyrsus máximus</i> cv. BRS Zuri	<i>Azospirillum brasilense</i> <i>Pseudomonas fluorescense</i>	As bactérias promotoras de crescimento da planta e a adubação nitrogenada promoveram aumentos na massa seca da parte aérea, massa seca de raízes, densidade de perfilhos, índice relativo de clorofila e absorção de nutrientes na parte aérea	Sá et al. (2019)
<i>Megathyrsus máximus</i> cv. BRS Zuri; Massai; Tanzânia; Mombaça; BRS Tamani; BRS Quênia	<i>Azospirillum brasilense</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Pseudomonas fluorescense</i>	Houve aumento nas características radiculares, bem como biomassa da parte aérea e acúmulo de nutrientes na parte aérea.	Guimarães et al. (2023)

UTILIZAÇÃO DA BPCV EM OUTRAS CULTURAS

De acordo com Galindo et al. (2022), testando a eficiência agrônômica e a recuperação aparente de fertilizante nitrogenado no trigo através da inoculação com *Azospirillum brasilense* verificaram que houve aumento da biomassa radicular para as parcelas inoculadas. Estes autores identificaram que a

biomassa da parte aérea foi 5,9% maior nas parcelas inoculadas quando comparadas às parcelas que não receberam inoculação.

Barbosa et al. (2023), em um experimento com coinoculação de bactérias do gênero *Bradyrhizobium japonicum* associado com *Azospirillum brasilense*, observaram aumento no rendimento de grãos 20% maior quando comparado ao tratamento com N sem inoculação. Estes autores concluíram que a

coinoculação juntamente com a oferta de cobalto e molibdênio via foliar, proporcionou incrementos no número de vagens por planta, número de grãos por vagem e peso de 100 grãos, consequentemente afetando positivamente a produtividade da soja.

Em estudo de longa duração, avaliando os efeitos da inoculação com as cepas Ab-V5 e Ab-V6 de *Azospirillum brasilense* nas características da raiz do milho, Hungria et al. (2022) observaram aumento do volume do sistema radicular, comprimento total da raiz, comprimento dos pêlos da raiz e diâmetro de raiz quando inoculado.

Costa et al. (2023) avaliando a inoculação de *Bacillus subtilis* no feijão e no milho com o intuito de controlar a população de nematoides e aumento da produtividade, concluíram que além de promover um maior comprimento e biomassa de raízes do milho e feijão com 35% e 50%, respectivamente, o uso desta bactéria controlou o *Pratylenchus nas raízes das culturas avaliadas*.

Sandini et al. (2019) identificaram que a inoculação via semente de *Pseudomonas fluorescense* na cultura do milho, proporcionou um aumento na biomassa vegetal, no rendimento de grãos e acúmulo de N. Além disso, a utilização dessa tecnologia representa uma redução em 25% da quantidade de adubação nitrogenada sem comprometer o rendimento da cultura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de biofertilizantes nas pastagens tropicais demonstram ser uma alternativa favorável e sustentável em substituição ou associação às práticas agrícolas convencionais, que dependem amplamente de fertilizantes químicos. A utilização dessas bactérias promove o crescimento das plantas, além de colaborar para um sistema agropecuário sustentável, melhorando a produtividade e eficiência. No entanto, é de extrema importância avançar em pesquisas relacionadas ao uso de biofertilizantes em pastagens tropicais, visto que ainda há poucos trabalhos sobre a utilização e benefícios dessas bactérias nas forrageiras tropicais, visando uma maior produtividade e consequentemente uma maior eficiência no uso da adubação nitrogenada, contribuindo também na redução de emissão dos gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, N.; Ishfaq, M.; Ali, G. 2023. Genetic engineering for enhanced biological nitrogen fixation in cereal crops. **Trends in Biotechnology**, vol. 41, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.10.006>.
- Alori, E. T.; Glick, B. R.; Babalola, O. O. 2017. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in Microbiology**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>.
- Ansari, M. F.; Tipre, D. R.; Dave, S. R. 2015. Efficiency evaluation of comercial liquid biofertilizers for growth of cicer aeritinum (chickpea) in pot and field study. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 4, 17-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bac.2014.09.010>.
- Barbosa, H. M.; Alvarez, R. C. F.; Lima, S. F.; Cordeiro, M. A. S.; Zanella, M. S.; Bernardo, V. F. 2023. *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* coinoculation associated with cobalto and molybdenum Application in the soybean Crop. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.53:7, e20210871. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210871>.
- Basu, A.; Prasad, P.; Das, S. N.; Kalam, S.; Sayyed, R. Z.; Reddy, M. S.; El enshay, H. 2021. Plant growth promoting rhizobacteria (PGR) as green bionoculants: recente developments, constraints, and prospects. **Sustainability**, 13, 1140. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031140>.
- Bomfim, C. A.; Coelho, L. G. F.; Vale, H. M. M.; Mendes, I. C.; Megías, M.; Ollero, F. J.; Reis junior, F. B. 2021. Brief history of biofertilizers in Brazil: from conventional approaches to new biotechnological solutions. **Brazilian Journal of Microbiology**, 52:2215-2232. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00618-9>.
- Costa, M. K. L.; Carvalho Júnior, G. M.; Silva, J. M.; Filho, C. H. A.; Puerari, H. H.; Bonifácio, A.; Lopes, A. C. A.; Neto, F. A.; Araujo, F. F.; Araujo, A. S. F. 2023. A *Bacillus subtilis* strain mitigates the root-lesion nematode *Pratylenchus* in a field study with maize and lima bean. **Rhizosphere**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisp.2023.100766>.

- Duarte, C. F. D.; Cecato, U.; Hungria, M.; Fernandes, H. J.; Biserra, T. T.; Galbeiro, S.; Toniato, A. K. B.; Silva, D. R. 2020. Morphogenetic and structural characteristics of *Urochloa* species under inoculation with plant-growth-promoting bacteria and nitrogen fertilisation. **Crop & Pasture Science**. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP18455>.
- Einsle, O.; Rees, D. 2020. Structural Enzymology of Nitrogenase Enzymes. **Chemical Reviews**. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00067>.
- Freitas, G. D. S.; Moreira, A.; Prudencio, M. F.; Heinrichs, R.; Nogueira, M. A.; Hungria, M.; Soares filho, C. V. 2023. Foliar spray inoculation with plant growth promoting bacteria associated with nitrogen doses in *Megathyrus maximus* cv. BRS Zuri. **Agronomy**, 13,1040. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13041040>.
- Fukami, J.; Cerezini, P.; Hungria, M. A. 2018. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **ABM Express**, vol. 8:73. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>.
- Galindo, F. S.; Pagliari, P. H.; Fernandes, G. C.; Rodrigues, W. L.; Boleta, E. H. M.; Jalal, A.; CEU EGO.; Lima, B. H. D.; Lavres, J.; Teixeira Filho, M. C. 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**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.821628>.
- Garcia, N. F. S.; Arf, O.; Portugal, J. R.; Peres, A. R.; Rodrigues, M.; Pentead, M. S. 2016. Doses and Application methods of *Azospirillum brasilense* in irrigated uplands rice. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 11, p. 990-995. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n11p990-995>.
- Guimarães, G. S.; Rondina, A. B. L.; Santos, M. S.; Nogueira, M. A.; Hungria, M. 2022. Pointing out opportunities to increase grassland pastures productivity via microbial inoculants: attending the society's demands for meat production with sustainability. **Agronomy**, 12, 1748. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081748>.
- Guimarães, G. S.; Rondina, A. B. L.; Oliveira Junior, A. G.; Jank, L.; Nogueira, M. A.; Hungria, M. 2023. Inoculation with plant growth-promoting bacteria improves the sustainability of tropical pastures with *Megathyrus maximus*. **Agronomy**. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030734>.
- Gouda, S.; Kerry, R. G.; Das, G.; Paramithiotis, S.; Shin, H. S.; Patra, J. K. 2018. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. **Microbiological Research**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>.
- Grover, M.; Bodhankar, S.; Sharma, A.; Sharma, P.; Singh, J.; Nain, L. 2021. PGPR mediated alterations in root traits: way toward sustainable Crop production. **Frontiers in sustainable food systems**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.618230>.
- Glick, B. R.; Gamalero, E. 2021. Recent developments in the study of plant microbiomes. **Microorganisms**, 9, 1533. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071533>.
- Hageman, R. V.; Burris, R. H. 1978. Kinetic studies on electron transfer and interaction between nitrogenase components from *Azotobacter vinelandii*. **Biochemistry**.
- Heinrichs, R.; Meirelles, G. C.; Santos, L. F. M.; Lira, M. V. S.; Lapaz, A. M.; Nogueira, M. A.; BoninI, C. S. B.; Soares Filho, C. V.; Moreira, A. 2020. *Azospirillum* inoculation of 'Marandu' palisade grass seeds: effects on forage production and nutritional status. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 41, n. 2, p. 465-478. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n2p465>.
- 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 Soil**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>.
- Hungria, M. A.; Nogueira, M. A.; Araujo, R. S. 2016. Inoculation of *Brachiaria spp.* with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: Na environment-friendly componente in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture**,

- Ecosystems and Environment.** DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.024>.
- Hungria, M.; Rondina, A. B. L.; Nunes, A. L. P.; Araujo, R. S.; Nogueira, M. A. 2021. Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiárias (*Urochloa spp.*) as na economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. **Plant Soil.** DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04908-x>.
- Hungria, M.; Barbosa, J. Z.; Rondina, A. B. L.; Nogueira, M. A. 2022. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Agronomy.** DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21150>.
- Izydorczyk, G.; Saeid, A.; Mironiuk, M.; Witek-krowiak, A.; Koziol, K.; Grzesik, R.; Chojnacka, K. 2022. Sustainable method of phosphorus biowaste management to innovative biofertilizers: a solution for circular economy of the future. **Sustainable chemistry and pharmacy.** DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100634>.
- Jia, Z.; Giehl, R. F. H.; Hartmann, A.; Estevez, J. M.; Bennett, M.; Wirén, N. V. A. 2023. spatially concerted epidermal auxin signaling framework steers the root hair foraging response under low nitrogen. **Current Biology.** DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.08.040>.
- Ladha, J. K.; Peoples, M. B.; Reddy, P. M.; Biswas, J. C.; Bennett, A.; Jat, M. I.; Krupnik, T. J. 2022. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. **Field Crops Research.** DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108541>.
- Leite, R. C.; Dos santos, J. G. D.; Silva, E. L.; Alves, C. R. C. R.; Hungria, M. 2018. Productivity increase, reduction of nitrogen fertilizer use and drought-stress mitigation by inoculation of Marandu grass (*Urochloa brizantha*) with *Azospirillum brasilense*. **Crop & Pasture Science.** DOI: <https://doi.org/10.1071/CP18105>.
- Leite, R. C.; Santos, A. C.; Santos, J. G. D.; Leite, R. C.; Oliveira, L. B. T.; Hungria, M. 2019. Mitigation of Mombasa Grass (*Megathyrsus maximus*) dependence on nitrogen fertilization as a function of inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180234>.
- Manrique, A. E. R.; Mazzuchelli, R. C. L.; Araújo, A. S. F.; Araujo, F. F. 2019. Conditioning and coating of *Urochloa brizantha* seeds associated with inoculation of *Bacillus subtilis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical.** DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4955536>.
- MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). 2021. Plano de adaptação e baixa emissão de carbono na agricultura visão estratégica para um novociclo. <https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>. (Acessado em 11 2023).
- Mordor intelligence, **Global Biofertilisers Market-Growth, Trends and Forecast**, 2022, pp. 2022.2027. <https://www.precedenceresearch.com/biofertilizers-market>. (Acessado em 12 2023).
- Naseem, H.; Ahsan, M.; Shahid, M. A.; Khan, N. 2018. Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. **Journal of Basic Microbiology.** DOI: <https://doi.org/10.1002/jobm.201800309>.
- Numan, M.; Bashir, S.; Khan, Y.; Mumtaz, R.; Shinwari, Z. K.; Khan, A. L.; Khan, A.; Al-harrasi, A. 2018. Plant growth promoting bacteria as na alternative strategy for salt tolerance in plants: a review. **Microbiological Research**, 209, 21-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.02.003>.
- Orozco-mosqueda, M. C.; Rocha-granados, M. C.; Glick, B. R.; Santoyo. 2018. Microbiome engineering to improve biocontrol and plant growth-promoting mechanisms. **Microbiological Research.** DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.01.005>.
- Parnell, J. J.; Berka, R.; Young, H. A.; Sturino, J. M.; Kang, Y.; Barnhart, D. M.; Dileo, M. V. 2016. From the lab to the farm: an industrial perspective of plant

- beneficial microorganisms. **Frontiers in Plant Science**. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01110>.
- Pirttilä, A. M.; Tabas, H. M. P.; Baruah, N.; Koskimäki, J. J. 2021. Biofertilizers and biocontrol agentes for agriculture: how to identify and develop new potente microbial strains and trits. **Microorganisms**, 9, 817. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040817>.
- Ramakrishna, W.; Yadav, R.; Li, K. 2019. Plant growth promoting bacteria in agriculture: two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.019>.
- Rosier, A.; Medeiros, F. H. V.; Bais, H. P. 2018. Defining plant growth promoting rhizobacteria molecular and biochemical networks in beneficial plant-/smicrobe interactions. **Plant and Soil**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3679-5>.
- Sá, G. C. R.; Carvalho, C. J. M.; Moreira, A.; Hungria, M.; Nogueira, M. A.; Heinrichs, R.; Soares Filho, C. V. 2019. Biomassa yield, nitrogen accumulation and nutritive value of Mavuno grass inoculated with plant growth-promoting bacteria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 50:15, 1931-1942. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1648498>.
- Sá, G. C. R.; Hungria, M.; Carvalho, C. L. M.; Moreira, A.; Nogueira, M.; Heinrichs, R.; Soares Filho, C. V. 2019. Nutrients uptake in shoots and biomass yields and roots and nutritive value of Zuri guinea grass inoculated with plant growth-promoting bacteria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 50, NO. 22, 2927-2940. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1689256>.
- Sandini, I. E.; Pacentchuk, F.; Hungria, M.; Nogueira, M. A.; Cruz, S. P.; Nakatani, A. S.; Araujo, R. S. 2019. Seed inoculation with *Pseudomonas fluorescens* promotes growth, yield and reduces nitrogen Application in Maize.. **International Journal of Agriculture & Biology**. DOI: <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1210>.
- Santos, M. S.; Nogueira, M. A.; Hungria, M. 2019. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the presente and previewing na outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, vol. 9:205. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.
- Sarwar, S.; Khaliq, A.; Yousra, M.; Sultan, T. Ahmad, N.; Khan, M. Z. 2020. Screening of siderophore-producing PGPRs isolated from groundnut (*Arachis hypogaea* L.) rhizosphere and their influence on iron release in soil. **Communications in soil Science and plant analysis**, vol. 51, no. 12, 1680-1692. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1791159>.
- Selim, S.; Yasser, M. H.; Saleh, A. M.; Habeeb, T. H.; Abdelgawad, H. 2019. Actinobacterium isolated from a semi-arid environment improves the drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.06.029>.
- Smith, C.; Hill, A. K.; Torrente-murciano, L. 2020. Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbono-free energy landscape. **Energy & Environmental Science**, 13,331-344. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9ee02873k>.
- Schmidt, J. E.; Gaudin, A. C. 2018. What is the agronomic potential of biofertilizers for maize? A meta-analysis. **FEMS Microbiology Ecology**, 94, 2018, fiy094. DOI: <https://doi.org/10.1093/efmsec/fiy094>.
- Usman, M.; Balsalobre-lorente, D.; Jahanger, A.; Ahmad, P. 2022. Pollution concern during globalization mode in financially resource-rich countries: do financial development, natural resources, and renewable energy consumption matter?. **Renewable Energy**, 183, 90-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.067>.
- Vaishnav, A.; Shukla, A. K.; Sharma, A.; Kumar, R.; Choudhary, D. K. 2018. Endophytic bacteria in plant salt stress tolerance: current and future prospects. **Journal of Plant Growth Regulation**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9880-1>.
- Warmack, R. A.; Rees, D. C. 2024. Structural evolution of nitrogenase states under alkaline turnover. **Nature Communications**. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54713-0>.