

# EXPLORANDO O PAPEL DAS BACTÉRIAS PRODUTORAS DE ACC DESAMINASE NO CRESCIMENTO DO TRIGO (*TRITICUM AESTIVUM* L.)

Data de aceite: 01/04/2024

**Clarissa Castoldi Facco**

<http://lattes.cnpq.br/7781929390774155>

**Nataniel de Oliveira Amarante**

<http://lattes.cnpq.br/5916353798822680>

**Christiane Fernandes de Oliveira**

<http://lattes.cnpq.br/1581998066031441>

**Jorge Andres Betancur Gonzalez**

<https://orcid.org/0000-0002-6777-3361>

**Paulo Henrique da Silva Câmara**

<https://orcid.org/0000-0002-2964-7866>

**Raphael Ramon Buch**

<https://lattes.cnpq.br/8861530678280477>

**Vitória dos Santos Alves**

<https://lattes.cnpq.br/4401980715749803>

**Euvaldo de Sousa Costa Junior**

<https://orcid.org/0000-0003-3359-4944>

**Victor Roberto da Silva**

<http://lattes.cnpq.br/2287402190969333>

**Elelan Vitor Machado**

<http://lattes.cnpq.br/9185497597006417>

**Bruna da Rosa Dutra**

<http://lattes.cnpq.br/5465236195452838>

**Fernando Luis Diniz D'Avila**

<https://orcid.org/0009-0001-8644-0351>

**RESUMO:** O trigo é um dos cereais mais importantes cultivados globalmente. No Brasil, a produção atual é insuficiente para suprir a demanda interna, devido a dificuldades no manejo e à alta necessidade de fertilizantes químicos. No entanto, o trigo pode se associar a microrganismos promotores do crescimento vegetal. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo testar isolados de bactérias produtoras de ACC desaminase em trigo e seu efeito na promoção do crescimento, estado nutricional e atividade fotossintética. Para tanto, 11 isolados bacterianos foram inoculados em trigo, com sete repetições, e cultivados em casa de vegetação por 42 dias. Ao final do experimento, foram avaliadas a massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), teores de pigmentos fotossintéticos (clorofila a, clorofila b e carotenoides) e teores e acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) na MSPA. Foram encontradas diferenças significativas em todos os parâmetros avaliados, com exceção do teor de magnésio na MSPA. Entre as bactérias testadas, aquelas que promoveram maior produção de biomassa vegetal foram *Achromobacter insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *Pseudomonas arsenicoxydans*, *Pantoea*

*cyripedii* adu *Pseudomonas mohnii*. Esses isolados, além de promoverem maior crescimento vegetal, também contribuíram para uma maior absorção de nutrientes pelas plantas (P, K, N e Ca), destacando-se como potenciais para uso na agricultura.

**PALAVRAS-CHAVE:** BPCP. Microrganismos. Macronutrientes. Pigmentos fotossintéticos.

## EXPLORING THE ROLE OF ACC DEAMINASE BACTERIA IN THE GROWTH OF WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.)

**ABSTRACT:** Wheat is one of the most important globally cultivated cereals. In Brazil, current production is insufficient to meet domestic demand, due to difficulties in management and the high need for chemical fertilizers. However, wheat can associate with plant growth-promoting microorganisms. In this context, the present study aimed to test isolates of ACC deaminase-producing bacteria in wheat and their effect on growth promotion, nutritional status, and photosynthetic activity. For this purpose, 11 bacterial isolates were inoculated into wheat, with seven repetitions, and grown in a greenhouse for 42 days. At the end of the experiment, shoot dry mass, root dry mass, photosynthetic pigment levels (chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids), and levels and accumulation of macronutrients (N, P, K, Ca, and Mg) in the shoot dry mass were evaluated. Significant differences were found in all parameters evaluated, except for the magnesium content in the shoot dry mass. Among the tested bacteria, those that promoted the highest plant biomass production were *Achromobacter insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *Pseudomonas arsenicoxydans*, *Pantoea cyripedii*, and *Pseudomonas mohnii*. These isolates, in addition to promoting greater plant growth, also contributed to increased nutrient uptake by plants (P, K, N, and Ca), standing out as potential candidates for use in agriculture.

**KEYWORDS:** PGPB. Microorganisms. Macronutrients. Photosynthetic pigments.

## INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.), espécie anual pertencente à família Poaceae, é considerada uma das culturas mais importantes na produção agrícola mundial, constituindo parte essencial da alimentação humana na forma de farinhas, pães e outros derivados, além de ser utilizado como ração na produção animal (EMBRAPA, 2016). Trata-se do segundo cereal de maior produção em nível global. O Brasil ocupa a 16ª posição mundial, sendo a região sul responsável por 91% de toda a produção brasileira (CONAB, 2022), devido à adaptação da espécie às temperaturas mais baixas encontradas nessa região. Em 2021, a produção brasileira de trigo atingiu 7,7 milhões de toneladas (CONAB, 2022), enquanto o consumo médio anual no país é estimado em 12 milhões de toneladas (ABITRIGO, 2021), o que torna a produção atual insuficiente para atender à demanda interna.

Os cultivos de trigo no Brasil são, em sua grande maioria, dependentes de fertilizantes minerais. O aumento dos preços desses insumos nos últimos anos tem causado preocupação aos agricultores e consumidores finais, visto que o aumento dos custos de produção reflete na redução da margem de lucro para o produtor e no aumento do preço do produto para o consumidor final. Um dos nutrientes limitantes para o cultivo do trigo é o nitrogênio (N), em

que as plantas conseguem absorver apenas cerca de 50% do N fornecido via fertilizante, enquanto o restante é perdido por lixiviação, volatilização e outros processos (Dobbelaere et al., 2002). O potássio (K) e o fósforo (P) também são determinantes no cultivo, contribuindo para aumentos de produtividade e qualidade dos grãos, e possuem baixo aproveitamento pelas plantas quando aplicados ao solo. Além disso, os nutrientes minerais aplicados em excesso podem ser perdidos por lixiviação e deflagrar problemas ambientais, como eutrofização das águas e degradação de solos (Pires et al., 2011).

A partir dessa situação entende-se como necessária a busca por potenciais soluções que possam contribuir para elevar a produtividade sem que se aumente o uso de fertilizantes. Nesse contexto, a utilização de microrganismos promotores de crescimento de plantas e a inoculação destes no trigo e em outras espécies tem potencial para atender ao exposto. O uso de produtos biológicos com microrganismos promotores de crescimento vegetal tem aumentado globalmente nos últimos anos. Esses produtos proporcionam maior sustentabilidade e ganhos econômicos aos produtores além de promoverem aumento de produtividade em diversas culturas sem o uso de produtos químicos. Apresentam também resultados positivos mesmo em condições adversas ao crescimento vegetal, sendo consequência dos diferentes mecanismos de ação benéficos às plantas que esses microrganismos possuem (Oliveira et al., 2003).

Alguns microrganismos já conhecidos, ao serem inoculados em plantas, promovem o crescimento das plantas por mecanismos como estímulo do sistema radicular, modulação do sistema hormonal das plantas, indução de resistência a doenças, dentre outros (Vessey, 2003). Dentre os microrganismos utilizados para promover o crescimento de plantas, as bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) tem grande relevância devido sua capacidade de atuar na interação planta-solo (Oliveira et al., 2003) e aos diferentes mecanismos de ação, como produção de fitormônios que influenciam no crescimento vegetal, síntese enzimática, produção de sideróforos, fixação biológica de nitrogênio, indução de resistência a patógenos e pragas e solubilização de nutrientes (Asghar et al., 2002; Mariano et al., 2004; Glick, 2005).

As bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCP) atuam por diferentes mecanismos diretos e indiretos (Glick, 1995). Diretamente, produzem sideróforos, enzimas, hormônios, solubilizam fosfatos e fixam nitrogênio. Indiretamente, induzem resistência a patógenos e antagonismo. A promoção de crescimento depende do gênero ou linhagem das BPCP. Esses mecanismos conferem benefícios às plantas hospedeiras.

A enzima ACC desaminase, produzida pelas BPCP, também contribui para o desenvolvimento vegetal ao reduzir os níveis de etileno nas plantas, promovendo seu crescimento (Glick, 2005; Nascimento, 2011). AS BPCP protegem as plantas do estresse ambiental causado pelo excesso de etileno. Sua inoculação pode aumentar a sobrevivência de mudas após a semeadura (Glick et al., 1999). A presença de BPCP com ACC desaminase pode reduzir os níveis de etileno em até 2 a 4 vezes (Penrose et al., 2001).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de dez isolados de bactérias produtoras de ACC desaminase para a promoção de crescimento vegetal de trigo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição geral do experimento

O experimento foi realizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis/SC. O solo utilizado possui as seguintes características: 0,9% de matéria orgânica, 11,1 mg/dm<sup>3</sup> de fósforo, 158,6 mg/dm<sup>3</sup> de potássio, 8,3 cmolc/dm<sup>3</sup> de cálcio e 8,4 cmolc/dm<sup>3</sup> de magnésio. Esse solo foi peneirado e corrigido com calcário dolomítico (PRNT 60%) visando atingir pH 6,0 e foi posteriormente adicionado em tubetes já autoclavados. Cada unidade experimental foi constituída de um tubete com capacidade de 350 mL e foram semeadas em torno de 20 sementes em cada unidade experimental.

Os isolados utilizados neste trabalho foram obtidos de Nascimento (2018). Previamente à inoculação, os isolados foram crescidos em meio de cultura Caldo Triptona Soja (Trypticase Soy Broth – TSB), contendo Triptona (17,0 g L<sup>-1</sup>), Digestão Papaica de Farinha de Soja (3,0 g L<sup>-1</sup>), Glicose (2,5 g L<sup>-1</sup>), Cloreto de Sódio (5,0 g L<sup>-1</sup>) e Fosfato Dipotássico (2,5 g L<sup>-1</sup>), com pH 7,3. Os isolados foram multiplicados por 48 horas em incubadora com agitação de 135 rpm a 28 °C e então inoculados na superfície das sementes dispostas para cada tubete, com 1 mL de inóculo contendo 10<sup>9</sup> células mL<sup>-1</sup>. As sementes de trigo, da cultivar TBIO CONVICTO, utilizadas no experimento foram cedidas pela empresa BioTrigo.

A sala e a bancada onde foi realizado o experimento foram previamente higienizadas com hipoclorito de sódio com concentração de 2,5% e álcool 70° antes de receber os tubetes. As plantas cresceram sob um fotoperíodo de 12 horas diárias, iluminadas com lâmpadas tubulares de cor fria (6000 lumens/m<sup>2</sup>). A temperatura média no período do experimento foi de 20 °C.

Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com 11 tratamentos e sete repetições. No tratamento 1 não foi realizada inoculação (testemunha); do segundo ao décimo primeiro foram inoculados os isolados bacterianos descritos no quadro 1. O período de condução do experimento foi de 20 de abril a 01 de junho de 2022.

Nome da bactéria	Código da bactéria	Compostos e enzimas produzidos
Não inoculado – sem tratamento	--	--
<i>Achromobacter insolitus</i>	AB2	Enzimas (protease, esterase, amilase)
<i>Arthrobacter</i> spp.	PM3	AIA, enzimas (lipase, amilase), acetoína
<i>Microbacterium laevaniformans</i>	PM5	AIA, sideróforos, enzimas (protease, amilase, celulase), acetoína, redução de nitrato
<i>Pseudomonas arsenicoxydans</i>	ACM1	AIA, sideróforos, solubilização de fosfatos
<i>Pantoea cyripedii</i>	NE1	AIA, sideróforos, solubilização de fosfatos, enzimas (protease, lipase, amilase), redução de nitrato, produção de amônia
<i>Pseudomonas mohnii</i>	PLMAX	AIA, sideróforos, solubilização de fosfatos, enzimas (lipase, amilase), produção de poliamina, produção de NO ou N <sub>2</sub> a partir da redução de nitrato, produção de amônia
<i>Pseudomonas oryzihabitans</i>	MS8	AIA, sideróforos, solubilização de fosfatos, enzimas (lipase, amilase e celulase), produção de poliamina, redução de nitrato, produção de amônia
<i>Pantoea phytobeneficialis</i>	MSR2	AIA, sideróforos, solubilização de fosfatos, redução de nitrato
<i>Pseudomonas putida</i>	IAAD1	AIA
<i>Serratia grimesii</i>	BXF1	AIA, sideróforos, solubilização de fosfatos, enzimas (protease, lipase, esterase, celulase), acetoína, produção de poliamina, redução de nitrato, produção de amônia

Quadro 1 – Identificação dos tratamentos.

Aos sete dias foi realizado o desbaste das plantas, mantendo dez plantas por unidade experimental, quantidade determinada a fim de avaliar os parâmetros de massa seca da parte aérea, visto que as folhas do trigo possuem área foliar pequena, além da massa seca das raízes.

## Coleta do experimento e variáveis analisadas

A coleta foi realizada 42 dias após semeadura (DAS) e as plantas foram secas em estufa com circulação de ar, na temperatura de 65 °C até alcançarem peso constante. As variáveis avaliadas foram: massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), teores de pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides) e macronutrientes (teores e acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na MSPA).

## Determinação de pigmentos fotossintéticos e nutrientes do tecido vegetal

A avaliação dos teores de pigmentos fotossintéticos foi determinado por meio da extração com solução de dimetilsulfóxido (DMSO), segundo metodologia adaptada de Kuki et al. (2005). 0,1g de tecido foliar fresco foi adicionado em tubo do tipo Falcon e o material foi incubado em 6 mL de DMSO por 2 horas, em temperatura ambiente. As absorbâncias

dos extratos foram determinadas por meio de espectrofotômetro UV-VIS (SpectraMax® Paradigm® Multi-Mode Microplate Reader, CA, USA), nos comprimentos de onda 480, 649 e 665 *nm*. Os teores dos pigmentos fotossintéticos foram determinados segundo as equações propostas por Wellburn (1994).

A MSPA foi moída em moinho de facas tipo Willye (Tecnal, SP, Brasil) e submetida a digestão sulfúrica para posterior determinação dos teores de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio), seguindo metodologia de Tedesco (1995).

### **Análise estatística**

A análise estatística foi realizada através do software R (R CORE TEAM, 2020). Os dados foram submetidos à análise de homogeneidade de variância através do teste de Bartlett e ao teste de normalidade de resíduos (Shapiro-Wilk), e posterior análise de variância (ANOVA). As médias foram separadas por Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Tanto a ANOVA quanto a separação de médias foram executados utilizando o pacote “ExpDes” (Ferreira et al., 2021). Os gráficos foram gerados com as respectivas médias e erros padrões utilizando o pacote “metan” (Olivoto & Lucio, 2020).

## **RESULTADOS**

Foi observada uma diferença significativa na MSPA entre os tratamentos, como ilustrado no gráfico 1a (Figura 1). Os tratamentos que envolveram a inoculação com *Arthrobacter spp.*, *Pseudomonas arsenicoxydans*, *P. mohnii* e *P. oryzihabitans* demonstraram um desempenho superior, resultando em valores médios de MSPA cerca de 37% maiores em comparação com o tratamento não inoculado. Não foram encontradas diferenças significativas nos demais tratamentos em relação ao tratamento sem inoculação.

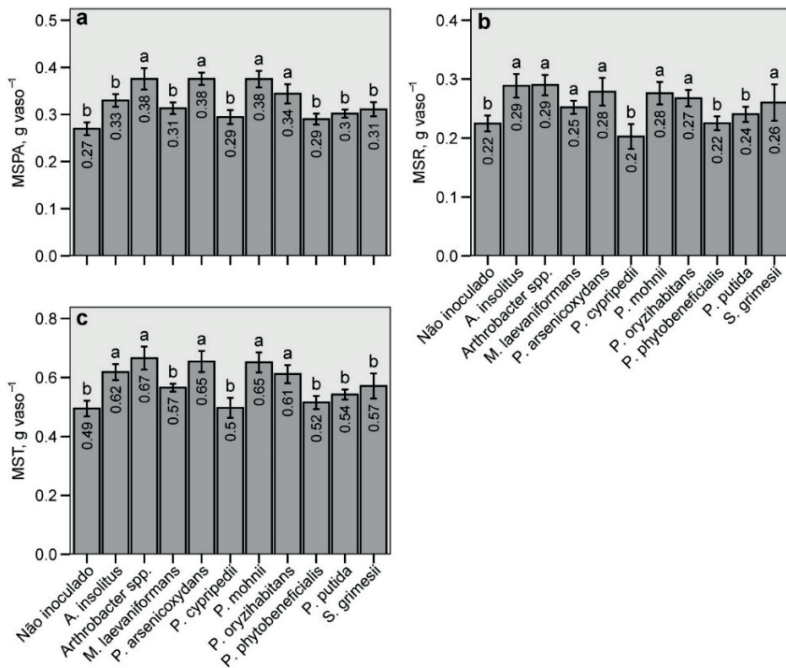


Figura 1. Gráfico 1a: Massa seca da parte aérea (MSPA g vaso<sup>-1</sup>), gráfico 1b: massa seca da raiz (MSR g vaso<sup>-1</sup>) e gráfico 1c: massa seca total (MST g vaso<sup>-1</sup>) de trigo com e sem inoculação de diferentes isolados bacterianos.

Na análise da MSR, como representado no gráfico 1b, foram observadas diferenças significativas nos tratamentos que receberam inoculação com *Achromobacter insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *Microbacterium laevaniformans*, *Pseudomonas arsenicoxydans*, *P. mohnii*, *P. oryzihabitans* e *Serratia grimesii*. Estes tratamentos apresentaram um aumento médio de 18% em relação à média dos demais tratamentos. Quanto à MST, conforme mostrado no gráfico 1c, *A. insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *P. arsenicoxydans*, *P. mohnii* e *P. oryzihabitans* exibiram um incremento médio de 21% em comparação com a média dos outros tratamentos.

Foi evidenciada uma diferença significativa no teor de clorofila *a* do trigo, conforme ilustrado no gráfico 2<sup>a</sup> (Figura 2). Os isolados *Microbacterium laevaniformans*, *Pseudomonas putida* e *Pseudomonas mohnii* apresentaram um teor médio 38% superior ao do tratamento não inoculado, enquanto os isolados *A. insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *P. arsenicoxydans*, *Pantoea cypripedii*, *P. oryzihabitans* e *Pantoea phytobeneficialis* promoveram um aumento médio de 25% em relação ao tratamento não inoculado. No que diz respeito à clorofila *b* (gráfico 2b) e aos carotenoides (gráfico 2c), não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos inoculados, entretanto, em comparação com o tratamento não inoculado, os teores médios de clorofila *b* e carotenoides foram aproximadamente 29% e 25% maiores, respectivamente.

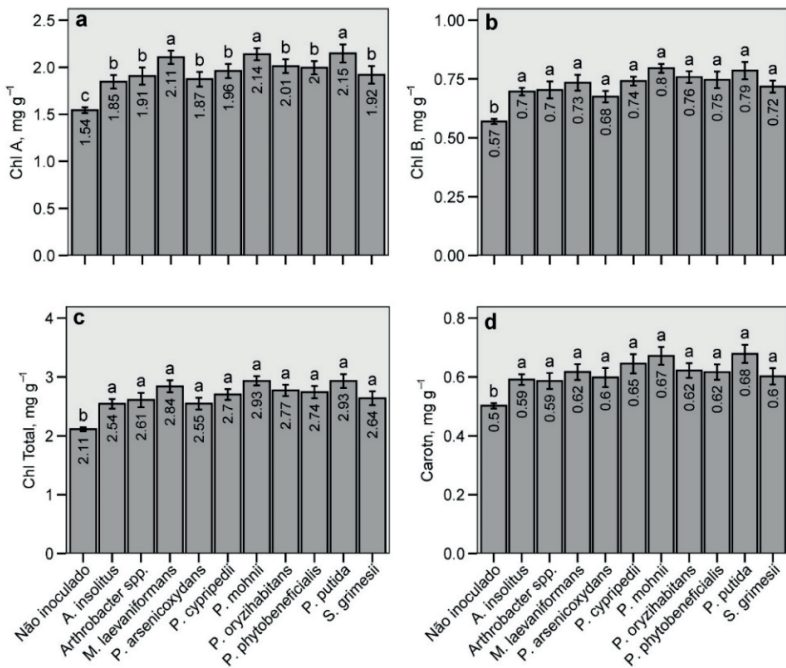


Figura 2. Gráfico 2a: teores de clorofila a (Chl A mg g<sup>-1</sup>), gráfico 2b: clorofila b (Chl B mg g<sup>-1</sup>), gráfico 2c: clorofila total (Chl total mg g<sup>-1</sup>) e gráfico 2d: carotenoides (Carotn mg g<sup>-1</sup>) em trigo sem inoculação e inoculado com dez diferentes isolados bacterianos.

No que diz respeito aos teores de nitrogênio, conforme ilustrado no gráfico 3a (Figura 3), os isolados *P. arsenicoxydans*, *Pantoea cyripedii*, *P. mohnii*, *Pantoea phytobeneficialis* e *Serratia grimesii* demonstraram um aumento de 15% em comparação com os demais tratamentos. Foi observado um acréscimo nos teores de fósforo (gráfico 3b) nos tratamentos com *A. insolitus*, *P. arsenicoxydans*, *Pantoea cyripedii*, *P. mohnii*, *P. phytobeneficialis* e *Serratia grimesii*, representando um aumento médio de 21% em relação à média dos demais tratamentos. Quanto aos teores de potássio (gráfico 3c), os isolados *Pseudomonas arsenicoxydans* e *Pantoea phytobeneficialis* promoveram um aumento médio de 25% em relação à média dos demais tratamentos. Os isolados de *A. insolitus*, *P. arsenicoxydans*, *Pantoea cyripedii* e *P. putida* foram capazes de induzir um incremento médio de 17% nos teores de cálcio (gráfico 3d) em comparação com os demais tratamentos, em média. Não foram observadas diferenças significativas nos teores de magnésio (gráfico 3e).



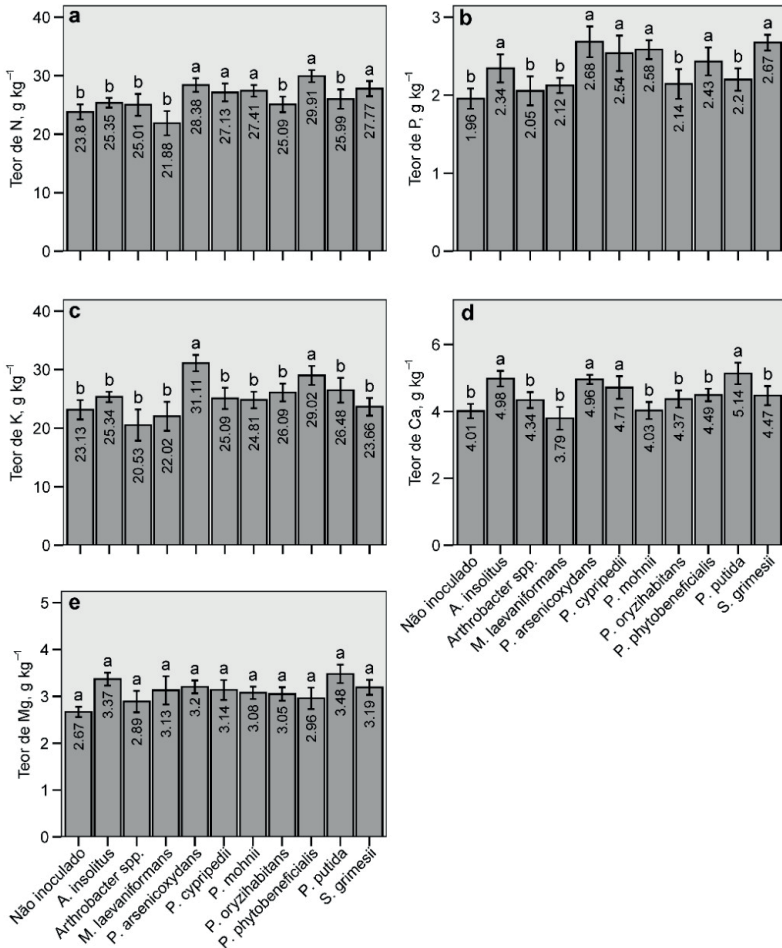


Figura 3. Figura 3a: teores de Nitrogênio (N g kg<sup>-1</sup>), figura 3b: teores de Fósforo (P g kg<sup>-1</sup>), figura 3c: teores de Potássio (K g kg<sup>-1</sup>), figura 3d: teores de Cálcio (Ca g kg<sup>-1</sup>) e figura 3e: teores de Magnésio (Mg g kg<sup>-1</sup>) em trigo sem inoculação e inoculado com dez diferentes isolados bacterianos.

O acúmulo de nutrientes na MSPA também foi examinado (Figura 4). *Arthrobacter spp.*, *P. arsenicoxydans* e *P. mohnii* promoveram um aumento médio de 21% no teor de nitrogênio (gráfico 4a) em comparação com a média dos isolados *A. insolitus*, *Pantoea cypripedii*, *P. oryzihabitans*, *P. phytobeneficialis*, *P. putida* e *S. grimesii*, e um aumento médio de 51% em relação à média dos demais tratamentos. Quanto ao fósforo (gráfico 4b), *P. arsenicoxydans*, *P. mohnii* e *S. grimesii* demonstraram um incremento de 45% em relação aos outros tratamentos. Para o potássio (gráfico 4c), *P. arsenicoxydans* apresentou um teor 36% superior aos isolados *A. insolitus*, *P. mohnii*, *P. oryzihabitans*, *P. phytobeneficialis* e *P. putida*, e um teor 67% superior aos demais tratamentos. No acúmulo de cálcio na parte aérea (gráfico 4d), os isolados *A. insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *P. arsenicoxydans*, *P. mohnii*, *P. oryzihabitans* e *P. putida* induziram um aumento médio de 27% em relação aos demais

tratamentos, enquanto para o acúmulo de magnésio (gráfico 4e), os isolados *A. insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *M. laevaniformans*, *P. arsenicoxydans*, *P. mohinii*, *P. oryzihabitans*, *P. putida* e *S. grimesii* exibiram um teor médio 29% superior aos demais tratamentos.

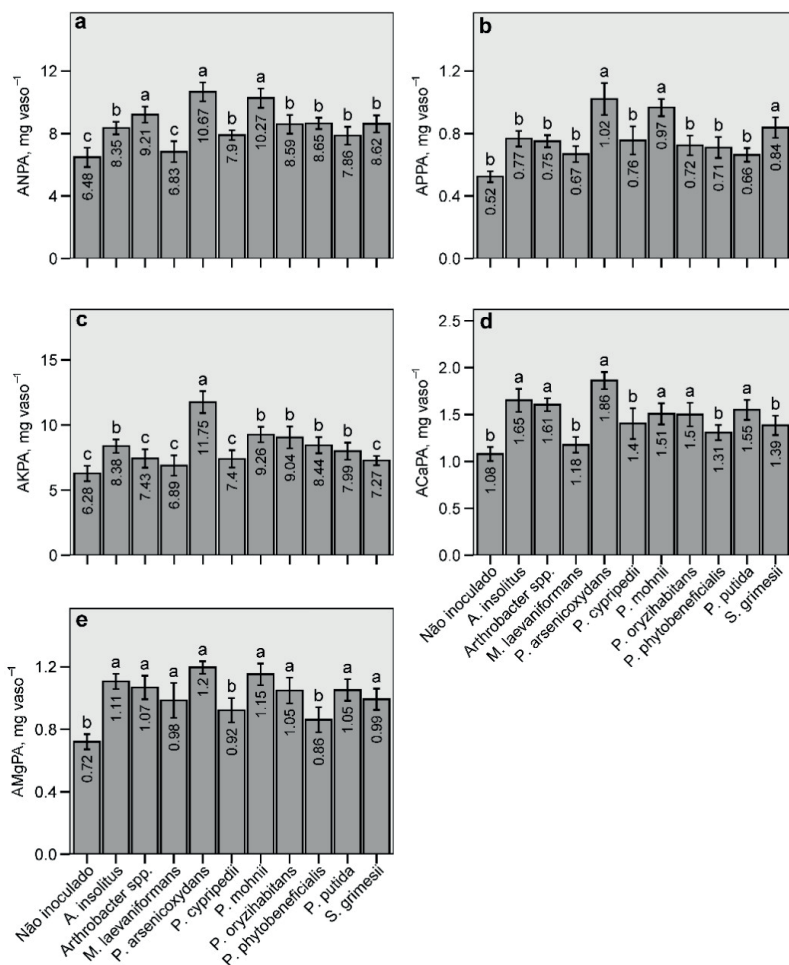


Figura 4. Gráfico 4a: acúmulo de nitrogênio (ANPA mg vaso<sup>-1</sup>), gráfico 4b: acúmulo de fósforo (APPA mg vaso<sup>-1</sup>), gráfico 4c: acúmulo de potássio (AKPA mg vaso<sup>-1</sup>), gráfico 4d: acúmulo de cálcio (ACaPA mg vaso<sup>-1</sup>) e gráfico 4e: acúmulo de magnésio (AMgPA mg vaso<sup>-1</sup>) na parte aérea de trigo sem inoculação e inoculado com isolados bacterianos.

## DISCUSSÃO

Para otimizar a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR) (Figuras 1a e 1b), observou-se que três isolados do gênero *Pseudomonas* (*P. arsenicoxydans*, *P. mohnii* e *P. putida*), além do tratamento com *P. phytobeneficialis*, foram eficazes na promoção do crescimento das plantas. Esses isolados também contribuíram para a produção de MST, juntamente com o tratamento com *A. insolitus* (gráfico 1c). Estudos anteriores sugerem que bactérias do gênero *Pseudomonas* podem influenciar o crescimento de diversas espécies vegetais por meio de diferentes mecanismos de ação (Guimarães et al., 2021; Oliveira et al., 2012; Santos, 2019). Özdoğan et al. (2022) constataram que isolados de *Pseudomonas* e *Arthrobacter* apresentaram elevadas taxas de produção de ácido indolacético (AIA) quando inoculados em plantas de trigo. Fischer e colaboradores (2007) demonstraram que isolados bacterianos altamente relacionados a *Pseudomonas*, identificados por análises de DNA, aumentaram em 23% a massa seca da parte aérea e em 45% a massa seca das raízes do trigo.

Nascimento (2018) avaliou os isolados bacterianos utilizados no presente experimento em relação à produção de AIA e sideróforos, identificando que os isolados foram capazes de produzir estes compostos, com exceção de *Achromobacter* e *Arthrobacter* que não produziram sideróforos. O autor investigou também a importância ecológica da enzima ACC desaminase, que degrada o ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC), minimizando os efeitos do etileno no crescimento vegetal. Sabendo que a enzima ACC desaminase é ativa nestes isolados, sugere-se que a sua ação enzimática é um dos mecanismos de ação destes na promoção de crescimento das plantas, aliados a ação dos demais compostos presentes (ácido indolacético (AIA), sideróforos, produção de amônia, solubilização de fosfatos). Constata-se assim os diferentes mecanismos de ação dos isolados bacterianos atuando nas plantas de trigo.

O Ácido Indolacético (AIA) é um fito-hormônio do grupo das auxinas, que desempenha um papel crucial na regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas. Além de induzir a alongação celular em espécies vegetais, o AIA também tem a capacidade de promover a germinação de sementes, influenciar a formação de pigmentos e participar na biossíntese de diversos metabólitos. Evidências indicam que o AIA desempenha um papel importante na resposta das plantas ao estresse, ajudando a mitigar os efeitos adversos de condições ambientais desfavoráveis (Kuss et al., 2007; Spaepen & Vanderleyden, 2011).

Além do AIA, destaca-se a ação dos sideróforos, capazes de solubilizar o ferro na rizosfera, e estimulam o crescimento vegetal ao facilitar a absorção desse elemento pelas plantas, promovendo o desenvolvimento radicular (Benite et al., 2002). Estudos documentam a produção de sideróforos por bactérias do gênero *Pseudomonas* (Kloppler et al., 1980; Tian et al., 2009; Nascimento, 2018). Além disso, *P. fluorescens* e *P. putida* foram identificados como produtores de sideróforos (Kloppler et al., 1980). A melhoria da MSR,

induzida por BPCP, está correlacionada à maior eficiência na absorção de minerais e água, favorecendo o crescimento das plantas (Oliveira et al., 2003). Estudos evidenciaram que a inoculação de *Brassica juncea* com *Pseudomonas* spp. promoveu o crescimento vegetal (Rajkumar & Freitas, 2008).

Nas condições deste experimento, a ação da ACC desaminase, a produção de AIA e de sideróforos podem ter contribuído para incrementos na MSPA e MSR, assim como estes compostos relacionam-se também com as demais variáveis avaliadas, dado que todos os isolados utilizados produzem esses compostos, exceto *Achromobacter insolitus* que não produz AIA nem sideróforos, e *Arthrobacter* spp. que não produz sideróforos, o que pode também demonstrar mecanismo de ação através de outros meios, como a ação enzimática presente nos isolados.

Os teores de pigmentos fotossintéticos estão intimamente ligados aos níveis de nutrientes na planta, especialmente de nitrogênio, uma vez que uma parcela significativa do nitrogênio presente nas folhas compõe as clorofilas *a*, *b* e os carotenoides, influenciando o ciclo de Kelvin (Latsague et al., 2014). Estudos mostram que a taxa fotossintética está correlacionada com a concentração de nitrogênio nas plantas, devido ao efeito deste nutriente na resistência estomática e na atividade da enzima Rubisco, resultando em um aumento na taxa fotossintética em resposta ao incremento nos teores de nitrogênio (Costa et al., 1988). A ação das BPCP pode afetar a absorção de nutrientes pelas plantas, sendo que pesquisas têm demonstrado o potencial de bactérias do gênero *Pseudomonas* na promoção do crescimento vegetal (Godoy, 2020). Embora estudos anteriores tenham associado o aumento nos teores de nitrogênio à inoculação de trigo com bactérias do gênero *Azospirillum* (Sala et al., 2007; Dalla Santa et al., 2008), há poucas pesquisas envolvendo bactérias de outros gêneros (Brenneck et al., 2016; Quecine et al., 2012; Sala et al., 2008), como as utilizadas neste estudo.

*A. insolitus*, *P. arsenicoxydans*, *Pantoea cyripedii*, *P. mohnii*, *P. phytobeneficialis* e *Serratia grimesii* obtiveram destaque quanto aos teores de fósforo. O fósforo no solo possui baixa mobilidade e desta forma encontra-se menos disponível para absorção pelo sistema radicular das plantas (Novais & Smyth, 1999; Resende & Furtini-Neto, 2007). Alguns microrganismos do solo tem a capacidade de solubilizar fosfatos insolúveis, produzindo compostos orgânicos que, ao acidificar o solo, liberam íons fosfato solúveis capturados pelas plantas (Jones, 1998). A solubilização do fosfato pode ser elencada como um dos mecanismos de ação das BPCP, aumentando a disponibilidade de fósforo para a planta (Kloepper et al., 1989) porém a variedade de mecanismos de ação que podem ser atribuídos às bactérias faz com que seja difícil demonstrar exatamente qual o efeito que a solubilização dos fosfatos produz nas plantas.

Outro nutriente importante nos processos bioquímicos de plantas é o potássio. Depois do nitrogênio, é o nutriente absorvido em maior quantidade por espécies vegetais (Marschner, 1995; Viana & Kiehl, 2010). O potássio é o cátion mais abundante em todas

as culturas, estando presente nos tecidos, e é considerado o mais móvel dos nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera (Malavolta, 2005). O potássio e o nitrogênio são os maiores responsáveis pela qualidade e produtividade do trigo (Viana & Kiehl, 2010). Esses macronutrientes em conjunto com fósforo, cálcio, magnésio e enxofre são componentes estruturais, alguns deles atuando nos processos bioquímicos da fotossíntese e na estrutura dos fitormônios e até mesmo na manutenção da produtividade das espécies vegetais.

Além dos mecanismos mencionados como possíveis formas de ação, os efeitos indiretos podem contribuir para a promoção do crescimento do trigo, incluindo a potencial proteção contra patógenos. Esses efeitos podem ocorrer em associação ou não com os efeitos diretos atribuídos à ação de substâncias como o Ácido Indolacético (AIA), sideróforos, enzimas, solubilização de fosfatos, produção de amônia, entre outros, conforme descrito por Nascimento (2018). A avaliação dos isolados bacterianos com potencial de promoção de crescimento neste estudo tem importância devido à sua possível aplicação futura como inoculantes direcionados para incrementar a produtividade em cultivos de trigo.

Com base nos resultados deste estudo, juntamente com experimentos futuros para complementá-lo, pode-se considerar a possibilidade de desenvolver produtos comerciais com base nos isolados destacados. Para isso, serão necessários novos experimentos, incluindo testes em campo e a validação dos isolados de acordo com as diretrizes dos órgãos reguladores, garantindo a qualidade e segurança ao longo da cadeia produtiva do trigo.

## CONCLUSÕES

Os tratamentos com *Achromobacter insolitus*, *Arthrobacter spp.*, *Pseudomonas arsenicoxydans*, *Pantoea cyripedii* e *Pseudomonas mohnii* foram os mais eficazes na promoção do crescimento da parte aérea do trigo. Apesar de *Achromobacter insolitus* não produzir ácido indolacético e sideróforos, apresentou bom desempenho na massa seca da raiz e nos teores de fósforo, cálcio e magnésio.

O tratamento com *Pseudomonas arsenicoxydans* demonstrou maiores aumentos na massa das plantas, nos teores de potássio e fósforo, e no acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio no tecido vegetal, sugerindo sua capacidade de promover o crescimento do trigo. Entre os isolados eficazes, destacam-se as espécies *Pseudomonas arsenicoxydans*, *Pseudomonas oryzihabitans* e *Pseudomonas mohnii*.

## REFERÊNCIAS

- ABITRIGO. Associação Brasileira da Indústria do Trigo. Estatísticas Trigo. Consumo mundial de trigo. Julho 2022. Disponível em: <<https://www.abitrigo.com.br/wp-content/uploads/2021/02/CONSUMO-MUNDIAL-DE-TRIGO-2017-2021.pdf>> Acesso em 05 jul 2022.
- ASGHAR, H., ZAHIR, Z., ARSHAD, M., KHALIQ, A. Relationship between in vitro production of auxins by rhizobacteria and their growth-promoting activities in *Brassica juncea* L. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 231-237, 2002.
- BENITE, A. M. C.; MACHADO, S. P.; MACHADO, B. C. Sideróforos: uma resposta dos microrganismos. *Quím. Nova*. 2002, vol.25, n.6b, pp. 1155-1164.
- BRENNECK, K., BERTIPAGLIA, L. M. A., ANTONIAZZI, A., SOUZA, E. F. Inoculação da bactéria *Pseudomonas fluorescens* no índice de crescimento da *Brachiaria decumbens*. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, 14, 217-224, 2016.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira – grãos: Nono levantamento, junho 2022 – safra 2021/2022. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>.
- COSTA, R. C. L.; LOPES, L. F.; OLIVA, M. A.; DE BARROS, N. F. Efeito da água e do nitrogênio sobre a fotossíntese, respiração e resistência estomática em *Phaseolus vulgaris*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 23, p. 1371-1379, 1988.
- DALLA SANTA, O. R.; DALLA SANTA, H. S.; FERNÁNDEZ, R.; MICHELENA, G.; JÚNIOR, P. R.; SOCCOL, C. R. Influência da inoculação de *Azospirillum* sp. em trigo, cevada e aveia. **Ambiência**, v.4, n.2, p.197-207, 2008.
- DOBBELAERE, S.; CROONENBORGH, A.; THYS, A.; PTACEK, D.; OKON, Y.; VANDERLEYDEN, J. Effect of inoculation with wild type *Azospirillum brasilense* and *A. irakense* strains on development and nitrogen uptake of spring wheat and grain maize. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, n. 4, p. 284-297, 2002.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: experimental designs package. R package version 1.2.2. 2021. Disponível em: <http://CRAN.R-project.org/package=ExpDes>
- FISCHER, S. E.; FISCHER, S. I.; MAGRIS, S.; MORI, G. B. Isolation and characterization of bacteria from the rhizosphere of wheat. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 23, n. 7, p. 895-903, 2007.
- GLICK, B. R. Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC desaminase. **FEMS Microbiology Letters**, v. 251, n. 1, p. 1-7, 2005.
- GLICK, B. R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 41, p. 109-117, 1995.
- GLICK, B. R.; PATTEN, C. L.; HOLGUIN, G.; PENROSE, D. M. Biochemical and genetics mechanisms used by plant growth promoting bacteria. **Word Scientific**, 1999.
- GLICK, B. R.; PENROSE, D. M.; LI, J. A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. **Journal of theoretical biology**, v. 190, n. 1, p. 63-68, 1998.

GODOY, F. A. Identificação de bactérias promotoras de crescimento de trigo e seu impacto na comunidade bacteriana da rizosfera. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; KLEIN, D. K. Promoção de crescimento e solubilização de fosfato na cultura da soja: coinoculação de sementes com *Bradyrhizobium japonicum* e *Pseudomonas fluorescens*. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e366101120078-e366101120078, 2021.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. **Plant and Soil**, v. 205, 1998.

KLOEPPER, J. W.; LEONG, J.; TEINTZE, M.; SCHROTH, M. N. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. **Nature**, v. 286, n. 5776, p. 885-886, 1980.

KLOEPPER, J. W.; LIFSHITZ, R.; ZABLOTOWICZ, R. M. Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. **Trends in Biotechnology**, v. 7, p. 39-44, 1989.

KUKI, K. N.; OLIVA, M. A.; GOMES F. P.; COSTA, A. C. Avaliação da eficiência do dimetilsulfóxido na extração de pigmentos foliares de *Schinus terebenthifolius* e *Cocos nucifera*. In: X Congresso Brasileiro de Fisiologia Vegetal e XII Congresso Latino-Americano de Fisiologia Vegetal, Recife. **Anais, SBFV**. CD Rom, 2005.

KUSS, A. V.; KUSS, V. V.; LOVATO, T.; FLÔRES, M. L. Fixação de nitrogênio e produção de ácido indolacético in vitro por bactérias diazotróficas endofíticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1459-1465, 2007.

LATSAGUE, M.; SAEZ, P.; MORA, M. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio, sobre el contenido foliar de carbohidratos, proteínas y pigmentos fotosintéticos en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook. f. **Gayana Botanica**, v. 71, n. 1, p. 37-42, 2014.

MALAVOLTA, E. Potássio – Absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, p. 179-230, 2005.

MARIANO, R. L. R.; SILVEIRA, E. B.; ASSIS, S. M. P. de; GOMES, A. M. A.; NASCIMENTO, A. R. P.; DONATO, V. M. T. S. Importância de bactérias promotoras de crescimento e de biocontrole de doenças de plantas para uma agricultura sustentável. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, Recife, vol. 1, p.89-111, 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Londres: Academic Press, 1995, 889 p.

NASCIMENTO, F. I. X. 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) desaminase em estirpes de Mesorhizobium: prevalência e efeito na simbiose com *Cicer arietinum*. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Bioquímica, Universidade de Évora, Évora, 2011.

NASCIMENTO, F. I. X. Promoting plant growth using ACC desaminase-producing bacteria: insights into plant-bacterial interactions and agricultural and biotechnological applications. 2018. 441 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.

OLIVEIRA, A. L. M.; URQUIAGA, S.; BALDANI, J. I. Processos e mecanismos envolvidos na influência de microrganismos sobre o crescimento vegetal. Embrapa Agrobiologia, 2003. 40p. **Embrapa Agrobiologia Documentos**, 161, 2003.

OLIVEIRA, M. A.; ZUCARELI, C.; SPOLAOR, L. T.; DOMINGUES, A. R.; FERREIRA, A. S. Desempenho agrônomo do milho sob adubação mineral e inoculação das sementes com rizobactérias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1040-1046, 2012.

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, n. 6, p. 783-789, 2020.

ÖZDOĞAN, D. K.; AKÇELIK, N.; AKÇELIK, M. Genetic diversity and characterization of plant growth-promoting effects of bacteria isolated from rhizospheric soils. **Current Microbiology**, v. 79, n. 5, p. 1-11, 2022.

PENROSE, D. M.; MOFFATT, B. A.; GLICK, B. R. Determination of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) to assess the effects of ACC desaminase-containing bacteria on roots of canola seedlings. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 47, n. 1, p. 77-80, 2001.

PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. da (Ed.). Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo, cap. 6, p. 135-184, 2011.

QUECINE, M. C., ARAÚJO, W. L., ROSSETO, P. B., FERREIRA, A., TSUI, S., LACAVAL, P. T., MONDIN, M., AZEVEDO, J. L. D., PIZZIRANI-KLEINER, A. A. Sugarcane growth promotion by the endophytic bacterium *Pantoea agglomerans* 33.1. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 78 (21), p. 7511-7518, 2012.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

RAJKUMAR, M.; FREITAS, H. Effects of inoculation of plant growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 3491 - 3498, 2008.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos de cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 32 p.

SANTOS, Luís Alberto Lima dos. Efeitos da co-inoculação de *azospirillum brasilense* e *pseudomonas fluorescens* associados adubação química e orgânica na cultura do milho. 2019. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul, 2019.

SALA, V. M. R.; CARDOSO, E. J. B. N.; FREITAS, J. G. de; SILVEIRA, A. P. D. de. Resposta de genótipos de trigo à inoculação de bactérias diazotróficas em condições de campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.833-842, 2007.

SALA, V. M. R.; CARDOSO, E. J. B. N.; FREITAS, J. G.; SILVEIRA, A. P. D. Novas bactérias diazotróficas endofíticas na cultura do trigo em interação com a adubação nitrogenada, no campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1099-1106, 2008.

SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J. Auxin and plant-microbe interactions. **Cold Spring Harbor perspectives in biology**, v. 3, n. 4, p. a001438, 2011.



TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TIAN, F.; DING, Y.; ZHU, H.; YAO, L.; DU, B. Genetic diversity of siderophore-producing bacteria of tobacco rhizosphere. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 40, p. 276-284, 2009.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and soil**, v. 255, n. 2, p. 571-586, 2003.

VIANA, E. M.; KIEHL, J. C. Doses de nitrogênio e potássio no crescimento do trigo. **Bragantia**, v. 69, p. 975-982, 2010.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, Lancaster, v.144, n.3, p.307-313, 1994.