

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BEATRIZ FERREIRA MENDONÇA

USO DE AGENTES MICROBIOLÓGICOS NO CONTROLE DE DOENÇAS  
FOLIARES DO MILHO

CURITIBA

2025

BEATRIZ FERREIRA MENDONÇA

USO DE AGENTES MICROBIOLÓGICOS NO CONTROLE DE DOENÇAS  
FOLIARES DO MILHO

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de  
Pós-Graduação Lato Sensu em Fitossanidade,  
Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal  
do Paraná, como requisito parcial à obtenção do  
título de Especialista em Fitossanidade.

Orientador: Prof. Dr Sérgio Miguel Mazaro

CURITIBA

2025

Dedico este trabalho a todos que, movidos pela busca incessante por conhecimento, contribuem com dedicação e inovação para o avanço da agricultura. Que seus esforços continuem semeando progresso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela formação acadêmica sólida e pelas oportunidades de aprendizado. Aos professores, pela dedicação e incentivo ao pensamento crítico. Em especial, ao professor Dr. Sérgio Miguel Mazaro, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Sou grata à minha família pelo suporte incondicional, ao meu gestor Jackson Lange e à Corteva pelo apoio técnico e institucional que contribuíram significativamente para a realização desta pós-graduação.

A natureza não faz nada em vão.

(Aristóteles)

## RESUMO

O milho é uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo, com destaque para sua relevância econômica, social e nutricional. Entretanto, a produtividade do milho é frequentemente comprometida por diferentes fatores bióticos, entre os quais as doenças se destacam como um dos principais limitantes. Dentre essas, as doenças foliares representam um desafio significativo para os produtores, devido à sua rápida disseminação e ao impacto direto sobre a fotossíntese e o enchimento de grãos. Nesse cenário, o controle biológico tem ganhado destaque como uma alternativa sustentável ao uso intensivo de fungicidas químicos. Microrganismos benéficos, como os pertencentes aos gêneros *Bacillus* e *Trichoderma*, têm demonstrado grande potencial no manejo de doenças foliares. O gênero *Bacillus*, por exemplo, produzem uma ampla gama de metabólitos secundários com ação antifúngica como os lipopeptídeos que atuam na lise da parede celular dos patógenos, além de promover a resistência sistêmica induzida. Já os fungos do gênero *Trichoderma* são amplamente utilizados na agricultura devido à sua versatilidade e eficácia. Eles atuam por meio de mecanismos como o parasitismo, competição por espaço e nutrientes, produção de enzimas hidrolíticas (quitinases, glucanases) e indução de resistência sistêmica nas plantas. Além disso, *Trichoderma* spp. têm sido associados à promoção do crescimento vegetal, aumento da tolerância ao estresse abiótico e melhoria da absorção de nutrientes. Apesar dos avanços, ainda existem lacunas importantes a serem superadas. A eficácia desses microrganismos em condições de laboratório (*in vitro*) nem sempre se traduz em resultados consistentes em campo (*in vivo*), devido à complexidade das interações entre microrganismo, patógeno, planta hospedeira e fatores ambientais. Além disso, a diversidade microbiana ainda pouco explorada representa uma oportunidade para a descoberta de novos agentes de biocontrole com maior especificidade, estabilidade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas. Portanto, é essencial o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento para ampliar o conhecimento sobre os mecanismos de ação, compatibilidade entre cepas e formulações comerciais. A integração do controle biológico em programas de manejo integrado de doenças (MID) pode contribuir significativamente para a sustentabilidade da produção de milho, reduzindo impactos ambientais e promovendo sistemas agrícolas mais resilientes.

Palavras-chave: Controle biológico. Microrganismos. Resistência induzida. Sustentabilidade. *Zea mays*

## ABSTRACT

Maize is one of the most important agricultural crops in the world, with a notable economic, social, and nutritional relevance. However, corn productivity is often compromised by various biotic factors, among which diseases stand out as one of the main limiting factors. Among these, foliar diseases represent a significant challenge for producers due to their rapid spread and direct impact on photosynthesis and grain filling. In this scenario, biological control has gained prominence as a sustainable alternative to the intensive use of chemical fungicides. Beneficial microorganisms, such as those belonging to the genera *Bacillus* and *Trichoderma*, have demonstrated great potential in the management of foliar diseases. The *Bacillus* genus, for example, produces a wide range of secondary metabolites with antifungal action, such as lipopeptides that act to lyse the cell walls of pathogens, in addition to promoting induced systemic resistance. Fungi of the *Trichoderma* genus are widely used in agriculture due to their versatility and efficacy. They act through mechanisms such as parasitism, competition for space and nutrients, production of hydrolytic enzymes (chitinases, glucanases), and induction of systemic resistance in plants. Furthermore, *Trichoderma* spp. have been associated with promoting plant growth, increasing tolerance to abiotic stress, and improving nutrient uptake. Despite these advances, there are still significant gaps to be overcome. The efficacy of these microorganisms under laboratory conditions (*in vitro*) does not always translate into consistent results in the field (*in vivo*), due to the complexity of the interactions between microorganisms, pathogen, host plant, and environmental factors. Furthermore, the still underexplored microbial diversity represents an opportunity for the discovery of new biocontrol agents with greater specificity, stability, and adaptability to different soil and climate conditions. Therefore, continued investment in research and development is essential to expand knowledge about their mechanisms of action, compatibility between strains, and commercial formulations. Integrating biological control into integrated disease management (IDM) programs can significantly contribute to the sustainability of corn production by reducing environmental impacts and promoting more resilient agricultural systems.

Keywords: Biological control. Microorganisms. Induced resistance. Sustainability. *Zea mays*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Objetivo geral .....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
3.1 DOENÇAS FOLIARES DO MILHO .....	18
3.1.1 Cercosporiose ( <i>Cercospora zeae-maydis/ Cercospora zeina</i> ); .....	18
3.1.2 Mancha branca (etiologia indefinida); .....	19
3.1.3 Ferrugem polissora ( <i>Puccinia polysora</i> Underw.);.....	20
3.1.4 Ferrugem comum ( <i>Puccinia sorghi</i> );.....	21
3.1.5 Ferrugem tropical ou ferrugem branca ( <i>Physopella ziae</i> );.....	22
3.1.6 Helmintosporiose ( <i>Exserohilum turcicum</i> ); .....	22
3.1.7 Mancha foliar de <i>Diplodia</i> ( <i>Stenocarpella macrospora</i> );.....	23
3.1.8 Antracnose foliar do milho ( <i>Colletotrichum graminicola</i> );.....	24
3.1.9 Mancha de <i>Bipolaris Zeicola</i> ( <i>Bipolaris zeicola</i> ); .....	25
3.1.10 Mancha de <i>Bipolaris maydis</i> ( <i>Bipolaris maydis</i> ); .....	26
3.2 MANEJO DE DOENÇAS FOLIARES DO MILHO.....	27
3.3 CONTROLE BIOLÓGICO E MECANISMOS DE AÇÃO.....	29
3.4 CONTROLE BIOLÓGICO DE DOENÇAS FOLIARES NO MILHO.....	33
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays*) é uma cultura de elevada relevância econômica, social e nutricional, destacando-se como fonte de proteínas, amidos, fibras e óleos. Além de seu uso direto na alimentação humana e animal, o grão também é amplamente utilizado como matéria-prima em diversos setores industriais, evidenciando sua versatilidade e importância estratégica para diferentes cadeias produtivas. A Companhia Nacional de Abastecimento (2025) estima produção recorde de 336,9 milhões de toneladas de grãos para a safra 2024/25. A produção mundial de milho em 2025/26 deve alcançar 1,26 bilhão de toneladas e no Brasil estima-se que a safra 2025/26 alcance 131,0 milhões de toneladas, valor praticamente estável em relação a safra 2024/25.

Nesse contexto, as doenças foliares representam um dos principais desafios na produção de milho, devido, em grande parte, à dificuldade de diagnóstico preciso em estágios iniciais de desenvolvimento. De acordo com (Rahul; Singh, 2002) o milho é acometido pelo ataque de 65 patógenos dentre fungos, bactérias e vírus. Dentre as principais doenças, a mancha de *Bipolaris maydis* antes conhecida como *Helminthosporium maydis* pode causar perdas severas de produção alcançando índices em torno de 35 a 50%, no entanto, perdas de 80 a 100% não são incomuns (GS; Shete, 2021).

Atualmente, o manejo das doenças foliares do milho baseia-se predominantemente no uso de fungicidas ou na adoção de híbridos com resistência genética. No entanto, essas estratégias têm se mostrado insuficientes para um controle eficaz, visto a grande variabilidade dos patógenos e as condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento das doenças.

Dentre as estratégias alternativas de manejo, o controle biológico tem se destacado como uma abordagem promissora, eficiente e ambientalmente sustentável para a mitigação dos danos causados por doenças foliares no milho.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As doenças foliares no milho são um dos maiores desafios para a produtividade dessa cultura, afetando diretamente a sanidade das plantas e, consequentemente, a qualidade e o rendimento dos grãos. Essas doenças, causadas por fungos, bactérias, vírus e outros patógenos, comprometem a fotossíntese, a absorção de nutrientes e a resistência das plantas ao estresse ambiental. Entre os principais problemas estão a redução do tamanho dos grãos, o enfraquecimento das plantas e o aumento da suscetibilidade a outros agentes patogênicos. Além disso, o manejo dessas doenças frequentemente exige o uso intensivo de fungicidas e outros produtos químicos, o que pode gerar resistência nos patógenos e impactos ambientais negativos. Por isso, o controle eficiente das doenças foliares no milho é essencial para garantir uma produção agrícola sustentável e rentável.

O uso de agentes microbiológicos no controle de doenças foliares do milho tem se mostrado uma alternativa eficiente e sustentável. Esses agentes, como fungos, bactérias e vírus benéficos, atuam de maneira específica, competindo com os patógenos ou promovendo a indução de resistência nas plantas. O uso de agentes microbiológicos oferece vantagens como a redução da dependência de produtos químicos, minimizando os impactos ambientais e os riscos à saúde humana, além de contribuir para a preservação da biodiversidade do solo. Esse método de controle também auxilia no manejo integrado de doenças, promovendo um controle mais natural e equilibrado das infecções, ao mesmo tempo em que pode ajudar a reduzir a resistência dos patógenos aos fungicidas.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analizar o uso de agentes biológicos no controle de doenças do milho, avaliando sua eficácia, vantagens e desafios em comparação aos métodos tradicionais de controle químico.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Revisão bibliográfica das principais doenças do milho.
2. Examinar os diferentes tipos de agentes biológicos (fungos, bactérias, vírus, e microrganismos antagonistas) utilizados no controle de doenças foliares do milho.
3. Investigar os mecanismos de ação dos agentes biológicos no controle de patógenos que afetam o milho, como competidores, parasitas ou indutores de resistência.
4. Avaliar os resultados de estudos e experimentos realizados sobre o uso de agentes biológicos em condições de campo, incluindo a eficácia no controle de doenças como a ferrugem, a mancha de folha e outras doenças comuns.
5. Discutir os benefícios e limitações do uso de agentes biológicos no manejo integrado de doenças, incluindo aspectos como segurança alimentar, impacto ambiental e custo-benefício.
6. Identificar as barreiras e desafios técnicos e econômicos que dificultam a adoção mais ampla de agentes biológicos pelos produtores de milho.
7. Analisar as perspectivas futuras e as inovações no uso de agentes biológicos no controle de doenças do milho, incluindo o potencial de combinação com outras estratégias de manejo sustentável.

## **2 METODOLOGIA**

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, com o objetivo de reunir e analisar publicações científicas relevantes sobre doenças foliares do milho e o uso de microrganismos como agentes de controle biológico. A pesquisa foi conduzida nas bases de dados Google Acadêmico, SciELO, dentre outros, utilizando combinações de palavras-chave como 'doenças foliares do milho', 'controle biológico', 'microrganismos', 'fungicidas biológicos' e 'patógenos do milho'. Foram incluídos artigos publicados nos últimos dez anos, preferencialmente em periódicos português e inglês.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 DOENÇAS FOLIARES DO MILHO

O desenvolvimento de doenças em plantas ocorre da interação de três fatores essenciais: o hospedeiro suscetível, o patógeno virulento e condições ambientais favoráveis (Islam, 2018). Essa interação é conhecida como o triângulo da doença, fundamental na fitopatologia para compreender a dinâmica das enfermidades vegetais.

Segundo Costa, Casela e Cota (2021) as principais doenças foliares do milho no Brasil são Cercosporiose (*Cercospora zeae-maydis*), Mancha branca (etiologia indefinida), Ferrugem polissora (*Puccinia polysora* Underw.), Ferrugem comum (*Puccinia sorghi*), Ferrugem tropical ou ferrugem branca (*Physopella zae*), Helmintosporiose (*Exserohilum turicum*), Mancha de Bipolaris maydis (*Bipolaris maydis*), Mancha de Bipolaris Zeicola (*Bipolaris zeicola*), Mancha foliar de Diplodia (*Stenocarpella macrospora*) e Antracnose foliar do milho (*Colletotrichum graminicola*).

A seguir, apresenta-se uma revisão individual das principais doenças, destacando-se as informações mais relevantes relacionadas à sua etiologia, epidemiologia e fatores que influenciam seu desenvolvimento.

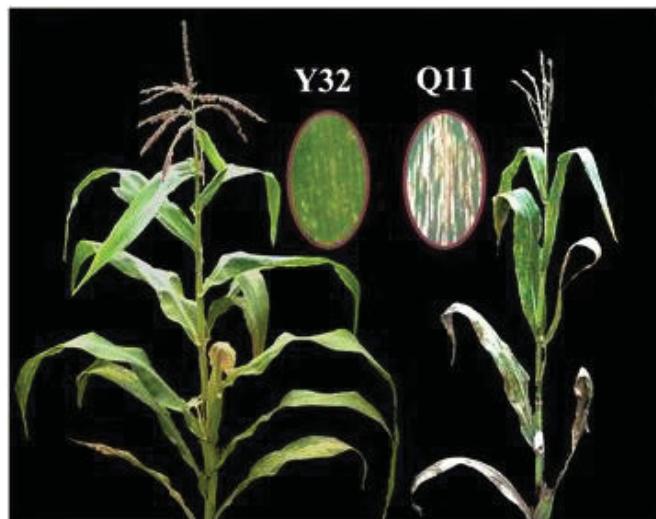
##### 3.1.1 Cercosporiose (*Cercospora zeae-maydis*/ *Cercospora zeina*);

A cercosporiose é uma doença causada pelos fungos *Cercospora zeae-maydis* e *Cercospora zeina* os quais sobrevivem em restos culturais. Os conídios dos fungos germinam ao encontrarem temperatura elevada e alta umidade (Xu *et al.*, 2015). A doença foi primeiramente reportada em 1925, no entanto, os danos econômicos foram relatados ao final dos anos 1970 e desde então a doença foi identificada em outros países da América e da Ásia (Nsibo *et al.*, 2024). Estudos reportaram severas perdas de rendimento e quando associada a outros patógenos podem chegar até 70% (Latterell; Rossi 1983).

Ao penetrar nas células do hospedeiro, o patógeno de comportamento policíclico e necrotrófico provoca lesões cloróticas e retangulares as quais após alguns dias se tornam acinzentadas as quais se localizam paralelamente as nervuras das folhas (Nsibo *et al.*, 2024). Essas lesões reduzem a área fotossintética das folhas durante o enchimento dos grãos e com isso há a redução no rendimento da cultura

(Lipps, 1998). O controle de cercosporiose é realizado principalmente por meio de cultivares resistentes, rotação de culturas, manejo do solo e controle químico.

FIGURA1 – SINTOMAS DE CERCOSPORIOSE EM MILHO.



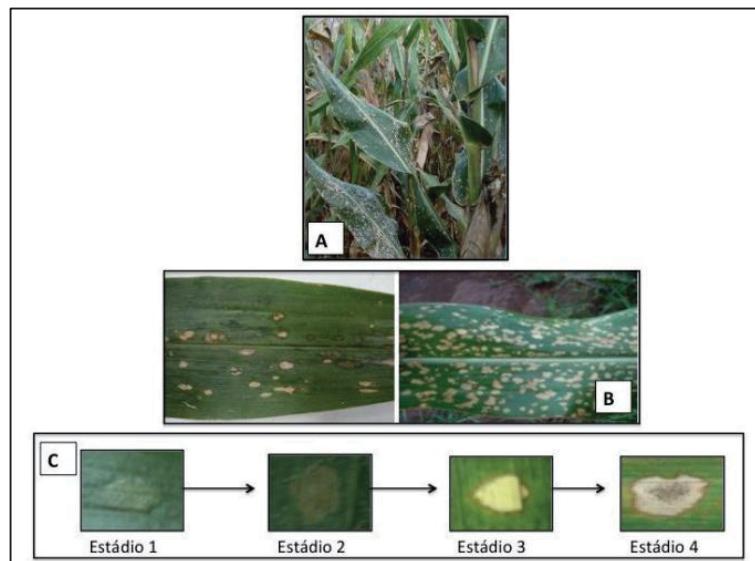
Fonte: Xu et al. (2014).

### **3.1.2 Mancha branca (etiologia indefinida);**

Muitos autores divergem sobre o agente etiológico da mancha branca do milho. Inicialmente identificou-se a *Phaeosphaeria maydis* como o patógeno responsável pela doença, no entanto, outros estudos apresentaram diferentes espécies de fungos capazes de apresentar sintomas semelhantes. Bomfeti et al. (2008) identificaram a bactéria *Pantoea ananatis* também como agente etiológico. Do mesmo modo, Jibril et al. (2025) verificaram que diversos outros patógenos foram capazes de apresentar os sintomas semelhantes de acordo com a proximidade das lesões.

Os sintomas da doença iniciam com manchas irregulares e levemente cloróticas aquosas as quais evoluem para uma coloração de tonalidade palha e necrótica (Jibril et al. 2025). Além disso, a doença pode causar morte prematura, redução do tamanho das plantas e peso dos grãos, e embora os danos sejam mais severos nos estádios finais da cultura, também é possível observar sintomas da doença em estádios iniciais das plantas (Gonçalves et al., 2013a). Algumas das medidas de controle são o controle cultural por meio da época de semeadura, manejo de nitrogênio e controle químico (Xing et al., 2023).

FIGURA 2 – SINTOMAS DE MANCHA BRANCA EM MILHO.



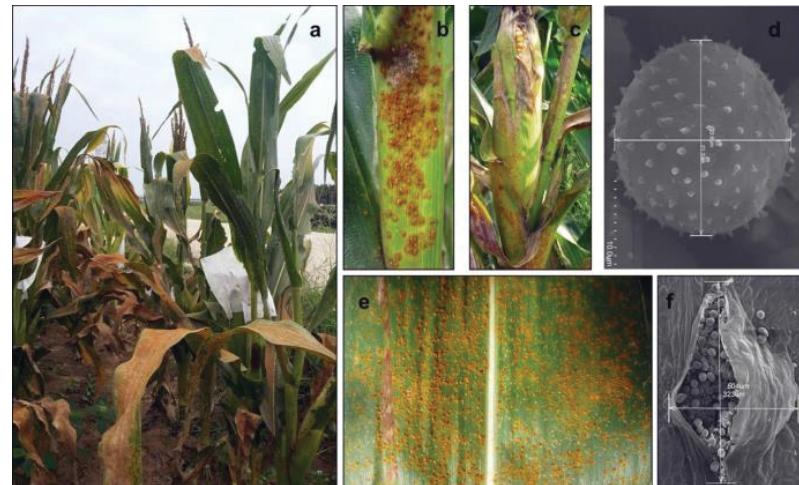
FONTE: Gonçalves *et al.* (2013b).

### 3.1.3 Ferrugem polissora (*Puccinia polysora* Underw.);

A ferrugem polissora é causada pelo fungo *Puccinia polysora* Underw o qual foi identificado por Underwood em 1897 em Alabama, EUA, no entanto, a doença já foi reportada em mais de 110 países, onde foi observado perdas de rendimento superiores a 50% (Yan *et al.*, 2024).

O patógeno é um parasita obrigatório que afeta as folhas, bainhas e caules do milho. As pústulas do fungo são produzidas nas partes superiores das folhas, e os urédiosporos tem a capacidade de esporular por até 20 dias liberando até 2,000 esporos diariamente principalmente em condições de alta temperatura e umidade relativa do ar os quais conseguem sobreviver em restos culturais e são transportados pelo vento (Sun *et al.*, 2021). No Brasil, Godoy *et al.* (2003) identificou maior severidade da doença em condições de umidade relativa do ar superior a 90%. O principal método de controle da doença é o uso de genótipos resistentes, no entanto, cultivos consorciados e controle químico são outras medidas efetivas no controle da doença (Sun *et al.*, 2021).

FIGURA 3: SINTOMAS DE FERRUGEM POLISSORA EM MILHO.



FONTE: Sun *et al.* (2021).

### 3.1.4 Ferrugem comum (*Puccinia sorghi*);

A ferrugem comum é causada pelo fungo policíclico e biotrófico *Puccinia sorghi* o qual sobrevive em restos culturais e pode causar danos severos na cultura do milho em diversos países (Kim *et al.*, 2021). Sabe-se que em genótipos susceptíveis as perdas pela doença podem alcançar 35% de severidade (Quade *et al.*, 2021).

A doença é mais predominante em altas altitudes e em baixas temperaturas, e se caracteriza por pústulas marrom-avermelhadas com formato alongado as quais se desenvolvem na superfície superior e inferior das folhas e pode afetar espigas, peso e altura de plantas, assim como, o conteúdo de óleo e proteínas da cultura (Ramirez *et al.*, 2017). De acordo com Shah e Dillard (2006) as principais medidas de controle para a doença são a resistência genética e o controle químico com fungicidas.

Figura 4: SINTOMAS DE FERRUGEM COMUM EM MILHO.



FONTE: Adaptado de Kim *et al.* (2024)

### **3.1.5 Ferrugem tropical ou ferrugem branca (*Physopella zaeae*);**

A ferrugem tropical, também conhecida como ferrugem branca tem como agente etiológico o fungo biotrófico *Physopella zaeae*, o qual foi reportado pela primeira vez na América do Sul em 1944, e no Brasil no ano de 1976 (Costa *et al.*, 2008).

Os principais sintomas são urédias de coloração branca, amarela ou palha que ocorrem paralelas as nervuras de ambas as superfícies das folhas. A infecção ocorre em até 10 dias após a inoculação do patógeno dependendo da temperatura. No entanto, o patógeno apresenta alta adaptação a diferentes ambientes, visto que possui menor exigência a temperatura e umidade, sendo bastante adaptado a regiões baixas e plantios tardios (Sanches *et al.*, 2011). A principal medida de controle da doença é por meio do controle genético, no entanto, o controle químico também é utilizado.

FIGURA 5: SINTOMAS DE FERRUGEM TROPICAL EM MILHO.



FONTE: Agrolink (2022).

### **3.1.6 Helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*);**

A helmintosporiose foi reportada pela primeira vez na Itália, no entanto, os relatos mais completos sobre a doença foram apresentados em 1878 nos Estados Unidos onde houve uma epidemia da doença em 1889, e hoje é conhecida com uma das doenças mais severas do milho em diversos países (Nsibo *et al.*, 2024). De acordo com Reddy *et al.* (2013) as perdas de rendimento podem variar de 28 a 91%. Essas perdas são mais severas quando as folhas acima da espiga são infectadas durante ou logo após o florescimento (Blandino, 2012).

A doença é causada pelo fungo policíclico *Exserohilum turcicum* o qual apresenta lesões longas, elípticas e castanho-acinzentadas de comprimento variando

de 2.5 a 30 cm os quais se desenvolvem preferencialmente em temperatura de 18 a 27°C e alta umidade relativa do ar (Nsibo *et al.*, 2024). Os conídios sobrevivem por longos períodos em restos culturais os quais são transportados pelo vento e promovem o desenvolvimento da doença (Cota; Silva; Costa, 2013). Além de bloquear o sistema vascular da planta, o patógeno reduz a área foliar fotossintética causando perdas principalmente no enchimento de grãos (Nsibo *et al.*, 2024). O controle químico é uma das principais medidas de controle, assim como, resistência genética dos genótipos.

FIGURA 6 - SINTOMAS DA MANCHA FOLIAR DE HELMINTOSPORIOSE EM MILHO.



FONTE: Cota, Silva e Costa (2013)

### 3.1.7 Mancha foliar de Diplodia (*Stenocarpella macrospora*);

A mancha foliar de Diplodia é causada pelo fungo necrotrófico *Stenocarpella macrospora* e essa doença é mais comum em ambientes quentes e úmidos como as regiões tropicais e sub-tropicais (Wordell Filho; Ducatti; Nesi, 2023). Uma das principais vias de transmissão da doença é por sementes contaminadas com os micélios do fungo, no entanto, o patógeno também pode sobreviver em restos culturais (Siqueira *et al.*, 2014).

A doença pode se desenvolver nas folhas e espigas. Nas folhas os sintomas mais comuns são pequenas manchas que se desenvolvem na coloração marrom e são envoltas com um halo clorótico que evoluem para formatos irregulares ou elípticos adquirindo anéis concêntricos com halos de coloração avermelhada ou

amarelo (Anderson; Bradley; Wise, 2021). Siqueira *et al.*, 2014 também verificaram que o patógeno pode causar a morte de plântulas ou até mesmo não apresentar os sintomas típicos da doença o que impossibilita a identificação visual da doença. As medidas de controle da doença são principalmente o uso de sementes sadias e certificadas, rotação de culturas e o controle químico, o qual é limitado, pois atualmente há apenas um produto químico registrado para o controle do patógeno.

FIGURA 7 – SINTOMAS DE MANCHA FOLIAR DE DIPLODIA EM MILHO.



FONTE: Anderson, Bradley e Wise (2021)

### 3.1.8 Antracnose foliar do milho (*Colletotrichum graminicola*);

A antracnose foliar do milho é causada pelo fungo hemibiotrófico *Colletotrichum graminicola* o qual sobrevive em restos culturais onde os conídios são produzidos e infectam as plantas susceptíveis via sistema radicular (Campos *et al.*, 2021). De acordo com Keller *et al.* (1986) os danos causados por insetos favorecem o desenvolvimento da doença a qual reduz a atividade fitossintética das folhas e consequentemente o peso de grãos. Segundo Campos *et al.* (2021) o patógeno reduz a translocação de água das raízes para as partes superiores das plantas causando a redução de produtividade, além de promover o acamamento das plantas.

Os sintomas iniciais da doença se caracterizam por lesões de diversos formatos, amareladas e posteriormente necróticas. Também podem ser observadas lesões elípticas no caule que alteram da coloração marrom-escuro para preto onde os acérvulos se desenvolvem. A parte interna do colmo também adquire a coloração marrom-escuro e posteriormente esses tecidos se deterioram promovendo o acamamento e morte das plantas (Costa *et al.*, 2014). As principais medidas de

controle da doença são a resistência genética, rotação de culturas e o tratamento químico de sementes.

FIGURA 8 – SINTOMAS DE ANTRACNOSE FOLIAR EM MILHO.



FONTE: Costa *et al.* (2014)

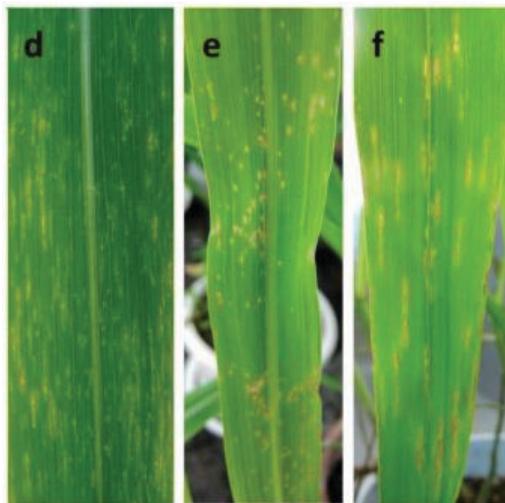
### 3.1.9 Mancha de *Bipolaris Zeicola* (*Bipolaris zeicola*);

O gênero *Bipolaris* possui mais de 100 espécies identificadas as quais são associadas a manchas foliares e podridão de raízes principalmente em espécies da família das *Poaceae* como arroz, cevada, sorgo, aveia e milho. Sun *et al.* (2020) identificaram que as espécies de *Bipolaris* mais frequentes foram a *B. maydis* e *B. zeicola* com 57.34% e 42.07%, respectivamente, no entanto, a *B. zeicola* apresentou moderada ou baixa virulência comparado a *B. maydis*. A espécie *Bipolaris zeicola* possui três raças identificadas, no entanto, geralmente a raça 1 apresenta maior patogenecidade na cultura do milho (Xia *et al.*, 2022). Segundo Sun *et al.* (2020) a raça 3 é mais presente em ambientes montanhosos com alta umidade relativa do ar e temperaturas mais amenas.

Os principais sintomas causados pelo patógeno *B. zeicola* são lesões que inicialmente são manchas pequenas com coloração preto-acinzentadas e margens irregulares e após sete dias essas lesões se tornam estreitas com dimensões de 5 a

13 mm. As principais medidas de controle são o controle genético e controle químico com fungicidas.

FIGURA 9: SINTOMAS DE MANCHA DE *BIPOLARIS ZEICOLA* EM MILHO.



FONTE: Adaptado de Sun et al. (2020)

### **3.1.10 Mancha de *Bipolaris maydis* (*Bipolaris maydis*):**

A mancha de *Bipolaris* é causada pelo fungo *Bipolaris maydis* e é uma das doenças mais severas na cultura do milho e as perdas pela doença podem atingir até 70% (Mubeen et al., 2017). A doença foi reportada pela primeira vez nos EUA em 1923, no entanto, somente em 1970 apresentou danos severos na cultura do milho (Nsibo et al., 2024). Até então denominada *Helminthosporium*, as espécies foram segregadas em quatro gêneros: *Bipolaris*, *Curvularia*, *Drechslera*, e *Exserohilum* os quais são morfológicamente semelhantes (Sun et al., 2020). Já foram relatadas quatro raças do fungo *B. maydis* (O, T, C e S), sendo a raça O a mais comum em diversos países e a raça T é mais comum em genótipos com macho esterelidade citoplasmática do tipo Texas (CMS-T), enquanto, as raças C e S são predominantes na China (Nsibo et al., 2024).

O patógeno pode sobreviver em restos culturais ou no interior das sementes, e a esporulação dos conídios ocorrem em temperaturas 20 a 28 °C e umidade relativa do ar superior a 90% dependendo da presença de luz (Gs e Shete, 2021). A infecção do patógeno no milho ocorrem no período de 12 a 18 horas e a formação das lesões maduras podem ser observadas em até 3 dias (Nsibo et al., 2024). Segundo Gs e Shete (2021), as lesões pela raça T (6- 12mm) são maiores comparado a raça O (6- 27 mm). Essas lesões podem ocorrer em folhas e espigas, e a raça T pode causar

tanto podridão da espiga como a morte de plântulas as quais murcham e senescem no período de 3 a 4 semanas. As plantas infectadas pela raça O apresentam lesões somente em folhas e com formato de diamante nos estádios iniciais da doença e em lesões maduras apresentam formato elongado e retangular de coloração castanha ( $2-6 \times 3-22$  mm). Já a raça C apresenta lesões necróticas nas folhas e também podem causar a murcha das plantas. O controle químico e uso de genótipos resistentes são as principais medidas de controle da doença, no entanto, há estudos com o uso de controle biológico com microorganismos.

FIGURA 10: SINTOMAS DE MANCHA DE *BIPOLARIS MAYDIS* EM MILHO.

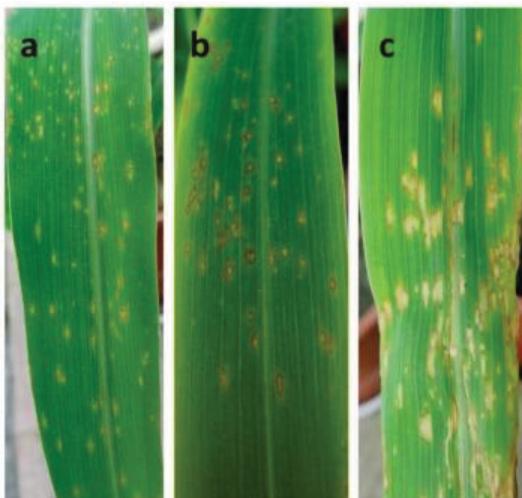


Foto: Adaptado de Sun et al. (2020)

### 3.2 MANEJO DE DOENÇAS FOLIARES DO MILHO

O controle de doenças foliares do milho possui diversas ferramentas como a seleção genética de genótipos resistentes à doenças e o uso de pesticidas (Mubeen et al., 2015). Historicamente a utilização de híbridos resistentes, práticas de rotação de cultura e plantio direto contribuíram para o controle de doenças, no entanto, nos últimos anos o incremento de resíduos no solo também favoreceram o desenvolvimento de doenças foliares (Mallowa et al., 2015). Diversos patógenos possuem características que os permitem sobreviver em restos culturais onde desenvolvem estruturas de reprodução que posteriormente disseminam os esporos e infectam plantas suscetíveis.

O aumento progressivo do uso de fungicidas para o controle de doenças no milho é uma realidade em diversos países, e embora o alto custo do manejo químico,

quando há o aumento do rendimento de grãos esse tipo de controle é justificado. Estudos demonstraram que o uso isolado ou em mistura de fungicidas Inibidores da Quinona Externa (QoI) e Fungicidas Inibidores da Desmetilação de Esteróis (DMI) apresentam controle satisfatório de doenças foliares e que além do controle da doença, o uso destes produtos favoreceram o desenvolvimento das plantas pelo fortalecimento do colmo, preservação da clorofila das folhas e atraso na senescência (Blandino *et al.*, 2012).

Outra comodidade do uso de fungicidas é a possibilidade da mistura com outros produtos químicos como herbicidas e inseticidas, no entanto, é importante que a aplicação ocorra no estádio fenológico correto da cultura para que tanto o controle de doenças quanto o incremento de produtividade seja economicamente viável. Diversos estudos relataram que a aplicação de fungicidas nos estádios pré-antese (VT-R1) promoveram o melhor controle de doenças, assim como, maiores rendimentos de grãos, no entanto, o controle químico deve ser parte do manejo integrado de doenças para evitar a resistência dos patógenos a estes fungicidas. (Mallowa, 2015).

A resistência à fungicidas é definida como adquirida e herdável, e como consequência promove a redução de sensibilidade de um fungo a determinado agente antifúngico (Massi *et al.*, 2021). Os fungicidas que atuam em sítio específico, de modo geral, apresentam alta eficácia, no entanto, a grande maioria dos patógenos de plantas possuem gerações de curto prazo, crescimento acelerado e alta capacidade de disseminação, e essa combinação favorece a seleção de patógenos resistentes aos fungicidas (Lucas; Hawkins; Fraaije, 2015). Algumas formas de resistência a fungicidas incluem alteração da proteína alvo devido a mutações no gene codificador, superexpressão do alvo devido à regulação positiva do gene codificador, ação de transportadores, dentre outros (Lucas; Hawkins; Fraaije, 2015).

A perda da eficiência dos fungicidas, assim como, preocupações ambientais pelo impacto de pesticidas têm fomentado o desenvolvimento de medidas não-químicas, assim como, a adesão de estratégias de controle integrado de doenças (Corkley; Fraaije; Hawkins, 2021). Nesse cenário, o controle biológico se apresenta promissor para o controle de doenças foliares com risco mínimo de resistência dos patógenos.

### 3.3 CONTROLE BIOLÓGICO E MECANISMOS DE AÇÃO

Os microrganismos são característicos pela biodiversidade e suas diversas funções dentro do ecossistema terrestre. Dentre essas funções destacam-se o potencial biotecnológico onde são utilizados tanto na produção de fármacos, enzimas, corantes, como no meio agroflorestal na forma de bioinoculantes, bioremediadores, controle biológico, dentre outros (Goi; Souza, 2006). No entanto, pouco se sabe sobre todo o potencial e dinâmica desses microrganismos.

Uma das grandes dificuldades na busca de informações dos microrganismos é a identificação, pois muitos destes não podem ser identificados morfológicamente e muitos não crescem em meio de cultura (Moreira *et al.*, 2006). No que diz respeito a bactérias, estima-se que apenas 1% seja cultivável em meio de cultura (Staley; Konopka, 1985). Outro motivo é a distribuição geográfica a qual está relacionada com a capacidade de dispersão dos microrganismos, mas que não necessariamente promove a diversidade genética. (Goi; Souza, 2006). Embora os diversos desafios na identificação do potencial dos microrganismos, o controle biológico de doenças já é uma realidade e tem apresentado diversos benefícios no cenário agrícola.

O controle biológico de doenças de plantas pode ser definido como o uso de microrganismos para supressão de doenças de plantas (Heimpel; Mills, 2017). Dentre as diversas estratégias de controle podemos destacar o controle aumentativo no qual é realizado a aplicação em massa dos microrganismos benéficos que são multiplicados em meio artificial (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). Empresas de biocontrole comercializam esses microrganismos os quais muitas vezes se adiciona os metabólitos produzidos pelos agentes de controle, ou em alguns casos, é comercializado somente os metabólitos. No entanto, de acordo com legislação atual de vários países esses produtos com composição exclusiva de metabólitos são considerados produtos químicos o que gera grandes discussões sobre a correta classificação e registro dos produtos.

Os modos de ação dos microrganismos no controle de doenças de plantas são diversos devido a especificidade do patógeno e sua dependência das condições ambientais e da fisiologia da cultura. A seguir serão discutidos alguns dos principais modos de ação no controle biológico de plantas.

### 3.2.1.1 Indução de resistência e *Priming*

Um dos principais modos de ação é pela indução de resistência ou “*priming*” onde os agentes de controle microbiológico atuam indiretamente nas respostas de infecção causada pelos patógenos (Kaleh et al., 2024). Algumas dessas respostas são através do padrão molecular associado ao patógeno (PAMPs) que conseguem reconhecer os ataques dos patógenos e com isso desencadeiam os estímulos necessários para a resistência sistêmica adquirida (SAR) da planta. A resistência pode ser induzida não somente localmente no tecido infectado, mas também por toda a planta, e até mesmo plantas vizinhas. Outra forma de defesa é por meio da resistência sistemática induzida (ISR) onde as plantas conseguem se defender de diversos patógenos através de microrganismos benéficos. No entanto, tanto a resistência sistemática adquirida quanto a induzida reduzem na ausência do estímulo do patógeno, enquanto o *priming* atua de forma duradoura reforçando e acelerando o sistema de defesa da planta, inclusive em gerações subsequentes (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

O estímulo de resistência induzido pelos microrganismos é chamado de padrão molecular associado a micróbios (MAMPs) que são reconhecidos pelos receptores de reconhecimento de padrões (PRRs) (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). Algumas das respostas de indução de resistência incluem produção de espécies reativas de oxigênio, fitoalexinas, compostos fenólicos ou proteínas relacionadas à patogênese, ou a formação de barreiras físicas, como modificações das paredes celulares e cutículas (Kaleh et al., 2024). No entanto, essas atividades metabólicas requerem gasto de energia diferente do *priming* que promove a defesa da planta a longo prazo com baixo custo de energia (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). Por outro lado, essas respostas de indução de resistência e *priming* podem ter outra origem como patógenos e herbívoros, ou até mesmo estresses abióticos.

### 3.2.1.2 Competição

Outro importante modo de ação utilizado no controle biológico baseia-se no uso de microrganismos não patogênicos com alta competitividade por nutrientes e espaço. Enquanto os patógenos biotróficos utilizam exclusivamente os nutrientes da

planta viva infectada, os patógenos necrotróficos primeiramente matam as plantas e posteriormente colonizam os tecidos e absorvem os nutrientes (Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025). Após o processo de necrose, microrganismos não patogênicos com estilo de vida saprofíticos também colonizam os tecidos mortos, e com isso se instaura o processo de competição por nutrientes e espaço (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

Em relação aos fungos necrotróficos, estes patógenos também dependem de fontes exógenas de nutrientes em outras etapas de seu ciclo como a formação de esporos e estruturas de resistência. Da mesma forma, as bactérias necessitam dessas fontes exógenas de nutrientes para multiplicação e consequentemente atingir o nível populacional para causar infecções em seus hospedeiros (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

Para que os microrganismos não patogênicos sejam eficientes no processo de competição, é necessário que sobrevivam e consumam as fontes de nutrientes rapidamente evitando assim que os patógenos utilizem estes compostos (Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025). Com isso, a população de patógenos é reduzida, porém não é eliminada. Alguns exemplos de microrganismos eficientes na competição por nutrientes são as leveduras que possuem alta capacidade de consumir carboidratos e fontes de nitrogênio em lesões de frutos. Outro exemplo são microrganismos benéficos que produzem sideróforos que captam o ferro no ambiente limitando o acesso deste nutriente aos microrganismos patogênicos (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

### 3.2.1.3 Hiperparasitismo

O hiperparasitismo é o modo de ação no qual um indivíduo utiliza outro indivíduo parasita como fonte de nutrientes (Schooler; Barro; Ives, 2011). Esta interação é mais comum entre fungos, sendo pouco relatada em bactérias (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). No hiperparasitismo biotrófico, estes fungos utilizam haustórios para penetrar outros fungos parasitas ainda vivos. No entanto, este tipo de controle biológico é pouco comum, pois a produção em larga escala do parasita vivo é mais complexa. Por outro lado, no hiperparasitismo necrotrófico os hiperparasitas invadem os esporos ou hifas de outro parasita após provocar a sua morte. Para que ocorra a invasão das células do hospedeiro os hiperparasitas secretam enzimas e

metabólitos secundários capazes de degradar as células da parede celular e consequentemente desorganização do citoplasma (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

Alguns estudos relatam a eficiência do hiperparasitismo microbiológico em patógenos do gênero *Rhizoctonia*, e outros indivíduos biotróficos obrigatórios como espécies de oídio e ferrugem. Os hiperparasitas de fungos mais estudados são dos gêneros *Trichoderma* e *Clonostachys* (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). Além da secreção de enzimas que degradam a parede celular de seus hospedeiros, estes indivíduos secretam metabólitos secundários com ação antimicrobiana. Devido a alta especificidade do modo de ação destes organismos, o risco de desenvolvimento de resistência pelo parasita hospedeiro é considerado baixo.

### 3.2.1.4 Antibiose

Outro modo de ação de controle de doenças de plantas é a antibiose promovida por metabólitos secundários de microrganismos os quais são eficientes na supressão do crescimento dos patógenos de plantas, no entanto, ainda é limitado o conhecimento sobre esses antibióticos devido a diferença de atividade dos estudos *in vitro* e *in situ* (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

Alguns dos gêneros de bactérias que possuem essa ação antibiótica são *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Stenotrophomonas*, *Streptomyces*, dentre outros. Em relação aos *Bacillus*, lipopeptídeos como iturina, surfactina e fengicina são os mais estudados, já no gênero *Pseudomonas*, os metabólitos antibióticos como DAPG, pirrolnitrina e fenazina são os que mais se destacam (Kaleh *et al.*, 2024). Fungos também produzem metabólitos com ação antibiótica, por exemplo, *Trichoderma* e *Clonostachys* produzem compostos como 6-PAP, gliovirina, gliotoxina, viridina e muitos outros compostos com atividade antimicrobiana os quais já foram investigados (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019).

Os antibióticos produzidos pelos microrganismos podem atuar de forma indireta alterando a viscosidade das superfícies colonizadas permitindo que as bactérias se movam para locais ricos em nutrientes e também alterando a dinâmica da água e nas superfícies das folhas, o que afeta indiretamente o desenvolvimento de patógenos (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). Exemplo desse processo ocorre em bactérias do gênero *Pseudomonas* que produz o 2,4- diacetilfloroglucinol o qual regula

a fixação de nitrogênio promovida pelo crescimento de *Azospirillum brasilense*, e antibióticos ativos apoiam a mobilização de nutrientes limitantes como manganês e ferro (Köhl; Kolnaar; Ravensberg, 2019). Do mesmo modo, em estudo com diferentes isolados de *Pseudomonas fluorescens* no Brasil, comprovou-se a inibição de até 54% do patógeno de solo *Macrophomina phaseolina* (Santos *et al.*, 2005).

### 3.4 CONTROLE BIOLÓGICO DE DOENÇAS FOLIARES NO MILHO

A eficiência de controle de doenças foliares de plantas por microrganismos vivos como agente de biocontrole é diretamente afetada pelo ambiente, condições de inoculação e capacidade de desenvolvimento dos organismos (Le Mire *et al.*, 2016). Os principais agentes de controle biológico de doenças foliares de plantas são as bactérias, fungos e vírus.

Entre as bactérias, as cepas dos gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Agrobacterium* têm o papel mais importante no controle biológico como microrganismos associados ao solo e às plantas. Bactérias do gênero *Bacillus* possuem alta capacidade de habitar uma grande variedade de nichos ecológicos estão presentes no solo, na água e no ar, assim como em superfícies e na rizosfera de plantas, e no trato gastrointestinal de animais, bem como em muitos ambientes extremos.

Do ponto de vista biotecnológico, a característica mais importante das espécies de *Bacillus* é seu metabolismo secundário diverso e a capacidade de produzir uma ampla variedade de substâncias antagônicas estruturalmente diferentes (Fira *et al.*, 2018). As bactérias do gênero *Bacillus* produzem lipopeptídeos, enzimas líticas e sideróforos, além de promoverem a resistência sistêmica induzida (Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025).

Um dos primeiros estudos sobre o uso do controle biológico por meio de rizobactérias promotoras de crescimento de plantas identificou que o microrganismo *Bacillus cereus* C1L reduziu a severidade da mancha foliar no milho causada pelo patógeno *Bipolaris maydis* em condições de estufa e campo (Huang *et al.*, 2010). Nesse estudo a inoculação da bactéria foi superior ao tratamento com o fungicida multisítio Mancozeb e a hipótese da eficiência da rizobactéria é devido o efeito promotor de crescimento e produção de fitormônios.

Da mesma forma, Cui *et al.* (2019) identificaram que a rizobactéria *B. amyloliquefaciens* B9601-Y2 reduziu a severidade da mancha foliar de *Bipolaris* promovendo diminuição de até 61,38% no índice da doença. Os resultados mostraram também que o Y2 não apenas suprime patógenos fúngicos comumente associados ao milho, como *Bipolaris zeicola* (48,58%), *Fusarium oxysporum* (66,6%), *F. verticillioides* (62,9%), mas também antagoniza várias bactérias fitopatogênicas importantes como *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* e *Ralstonia solanacearum* atingiram 56,14%, 59,20%, 61,62% e 58,22%, respectivamente. Acredita-se que a rizobactéria *B. amyloliquefaciens* B9601-Y2 promove o crescimento das plantas de milho através da síntese de moléculas de auxinas, fixação e absorção de nitrogênio, fosfato e potássio disponíveis no solo e melhoram a saúde do solo por meio de um aumento sinérgico de várias enzimas do solo.

Em outro estudo, o uso da bactéria entomopatogênica *Xenorhabdus budapestensisda* cepa C72 exibiu excelente atividade antagônica contra *B. maydis* atingindo 77,97% de controle e com boa estabilidade térmica (Li *et al.*, 2021). Além disso, o microrganismo exibiu excelente efeito inibitório contra outros quatro patógenos fúngicos diferentes de doenças foliares do milho. Observou-se a redução do crescimento micelial em mais de 70%, dos quais *E. turcicum* diminuiu 86,95%, *R. cerealis* diminuiu 83,54%, *B. zeicola* diminuiu 82,97% e *C. lunata* diminuiu 79,92%. O potencial antifúngico da *Xenorhabdus budapestensisda* cepa C72 pode ser atribuído à produção de antibióticos antifúngicos e enzimas lisantes da parede celular, além da ativação das defesas das plantas.

A indução de resistência promovida pelo gênero *Bacillus* desencadeia respostas bioquímicas e moleculares, envolvendo a ativação dos caminhos de sinalização do ácido jasmonico, ácido salicílico e etileno (Shafi *et al.*, 2017). Entre os principais compostos de indução de resistência produzidos por *Bacillus*, os lipopeptídeos cíclicos, os derivados de benzilamina e as pioverdinhas se destacam. Esses compostos aumentam a imunidade das plantas ao ativar mecanismos de defesa, aumentando assim a resistência contra vários patógenos sem exercer efeitos antimicrobianos diretos (Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025).

Os fungos pertencentes ao gênero *Trichoderma* também tem demonstrado grande potencial no controle biológico de plantas devido a capacidade de colonizar as

raízes de plantas e produzir compostos antifúngicos e enzimas que inibem o desenvolvimento de patógenos, além de promover o crescimento das plantas. Espécies do gênero *Trichoderma* antagonizam patógenos através de vários mecanismos diretos e indiretos, incluindo antibiose, micoparasitismo, indução de resistência, enzimas líticas e competição por espaço e nutrientes (Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025).

*Trichoderma* é um grupo de fungos amplamente distribuídos no solo, sendo assim, grande parte dos estudos de biocontrole avaliam a eficiência desses microrganismos no controle de doenças transmitidas pelo solo e poucos são os relatos de sucesso no uso de *Trichoderma* para proteger culturas da infecção por doenças foliares no campo.

No entanto, Wang *et al.* (2015) verificaram que *Trichoderma atroviride* SG3403 promoveu a inibição do patógeno *Cochliobolus Heterostrophus*, teleomorfo do fungo *Bipolaris maydis*, em 60,24%, e também observaram que o microrganismo teve uma forte atividade antagônica contra o patógeno desde o florescimento até a maturidade do milho. Esses resultados implicam que *T. atroviride* SG3403 possivelmente induziu a expressão de resistência sistêmica na folha de milho contra a mancha de *Bipolaris*.

Em outro estudo Limdolthamand *et al.* (2023) verificaram que tratamentos com *Trichoderma harzianum* KUFA0710, KUFA0713 e *Trichoderma asperellum* KUFA0702 resultaram em uma redução significativa na severidade da mancha de *Turicum* em 60,26%, 56,65% e 51,74%, respectivamente. No entanto, o uso de fungicida a base de piraclostrobina apresentou melhor controle da doença, reduzindo a severidade da doença em 88,40%. Nesse sentido, o uso associado do microrganismo e o controle químico pode ser uma estratégia para ampliar o espectro de controle da doença reduzindo o risco da resistência ao fungicida.

Os vírus também podem ser usados no controle de bactérias fitopatogênicas, fungos/omicetos, pragas e vetores de insetos (entomovírus), assim como, no controle de doenças virais em plantas através da proteção cruzada. No entanto, deve-se ter cuidado ao selecionar vírus que possuam as propriedades esperadas em termos de aplicabilidade e segurança.

A agência de proteção ambiental dos EUA (EPA) autorizou em 2005 quatro bacteriófagos contra *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* e *Pseudomonas*

*syringae* pv. *tomato* para proteção de plantas de tomate e pimenta de manchas bacterianas tanto em estufa quanto em campo aberto (Wagemans *et al.*, 2002). Relatos do uso de vírus no controle de doenças de milho são ainda desconhecidos.

Pesquisas direcionadas são, portanto, necessárias para entender completamente a biologia dos vírus que são aplicados. Além disso, é necessário entender o efeito dos agentes de controle biológico sobre o microbioma natural para garantir a biossegurança. Por fim, a aceitação social é um aspecto importante que deve ser investigado como um fator crucial para a aceitação dos produtos pela comunidade agrícola.

## 4 CONCLUSÃO

O uso de microrganismos no controle biológico de doenças em plantas de milho representa uma estratégia promissora e sustentável, alinhada às demandas por práticas agrícolas mais ecológicas. Espécies de bactérias do gênero *Bacillus* e fungos do gênero *Trichoderma* têm demonstrado eficácia no manejo de fitopatógenos, contribuindo para a redução do uso de defensivos químicos. No entanto, ainda são necessários estudos adicionais voltados à prospecção de microrganismos, considerando a ampla diversidade microbiana existente e as complexas interações entre microrganismo, patógeno e hospedeiro, as quais frequentemente apresentam comportamentos distintos em condições *in vitro* e *in vivo*. Apesar dessas limitações, o setor encontra-se em plena expansão, impulsionado por avanços na biotecnologia e crescente interesse do mercado por soluções biológicas. Assim, o fortalecimento da pesquisa aplicada e o desenvolvimento de formulações mais estáveis e eficazes são fundamentais para consolidar o controle biológico como uma ferramenta robusta no manejo integrado de doenças do milho.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, Nolan R.; BRADLEY, Carl A.; WISE, Kiersten A.. Diplodia Leaf Streak of Corn: a diagnostic guide. **Plant Health Progress**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 159-163, 1 jan. 2021. Scientific Societies. <http://dx.doi.org/10.1094/php-01-21-0002-dg>.

AGROLINK. Disponível em: Ferrugem tropical (*Physopella zae*). Acesso em: 17 maio 2025.

BLANDINO, Massimo; GALEAZZI, Michele; SAVOIA, Walter; REYNERI, Amedeo. Timing of azoxystrobin+propiconazole application on maize to control northern corn leaf blight and maximize grain yield. **Field Crops Research**, [S.L.], v. 139, p. 20-29, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.014>.

BOMFETI, Cleide A.; SOUZA-PACCOLA, Edneia A.; MASSOLA JÚNIOR, Nelson S.; MARRIEL, Ivanildo E.; MEIRELLES, Walter F.; CASELA, Carlos R.; PACCOLA-MEIRELLES, Luzia D.. Localization of *Pantoea ananatis* inside lesions of maize white spot disease using transmission electron microscopy and molecular techniques. **Tropical Plant Pathology**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 63-66, fev. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-56762008000100010>.

CAMPOS, Leonardo José Motta; ALMEIDA, Rodrigo Estavam Munhoz de; SILVA, Dagma Dionísia da; COTA, Luciano Viana; NAOE, Alessandra Maria Lima; PELUZIO, Joênes Mucci; BERNARDES, Fernanda Pinheiro; COSTA, Rodrigo Veras da. Physiological and biophysical alterations in maize plants caused by *Colletotrichum graminicola* infection verified by OJIP study. **Tropical Plant Pathology**, [S.L.], v. 46, n. 6, p. 674-683, 7 set. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40858-021-00465-x>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *10º Levantamento da Safra de Grãos 2024/25 – Julho 2025*. Brasília: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/10o-levantamento-safra-2024-25/apresentacao-10o-lev-safra-graos-jul.25>. Acesso em: 13 jul. 2025.

CORKLEY, Isabel; FRAAIJE, Bart; HAWKINS, Nichola. Fungicide resistance management: maximizing the effective life of plant protection products. **Plant Pathology**, [S.L.], v. 71, n. 1, p. 150-169, 20 set. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/ppa.13467>.

COSTA, Frank Magno da; BARRETO, Modesto; KOSHIKUMO, Érika Sayuri Maneti; ALMEIDA, Fernandes Antonio de. Progresso da ferrugem tropical do milho (*Zea mays L.*), sob diferentes tratamentos fungicidas. **Summa Phytopathologica**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 248-252, set. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-54052008000300008>.

COSTA, R.V. da; COTA, L.V.; SILVA, D.D. da; PARREIRA, D.F.; CASELA, C.R.; LANDAU, E.C.; FIGUEIREDO, J.e.F.. Races of *Colletotrichum graminicola*

pathogenic to maize in Brazil. **Crop Protection**, [S.L.], v. 56, p. 44-49, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.005>.

COSTA, Rodrigo Veras da; CASELA, Carlos Roberto; COTA, Luciano Viana. *Doenças foliares*. Embrapa Milho e Sorgo. Agência de Informação Tecnológica, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/pragas-e-doencas/doencas/doencas-foliares>. Acesso em: 15 maio 2025.

COTA, Luciano Viana; SILVA, Dagma Dionísia da; COSTA, Rodrigo Veras da. **Helminthosporiose Causada por Exserohilum turcicum na Cultura do Milho**. 195. ed. Sete Lagoas, Mg: Embrapa, 2013. 8 p.

CUI, Wenyan; HE, Pengjie; MUNIR, Shahzad; HE, Pengbo; LI, Xingyu; LI, Yongmei; WU, Junjie; WU, Yixin; YANG, Lijuan; HE, Pengfei. Efficacy of plant growth promoting bacteria Bacillus amyloliquefaciens B9601-Y2 for biocontrol of southern corn leaf blight. **Biological Control**, [S.L.], v. 139, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104080>.

Fira, D., Dimkić, I., Berić, T., Lozo, J., & Stanković, S. (2018). Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species. **Journal of Biotechnology**, 285, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.044>

GODOY, Cláudia V.; AMORIM, Lílian; BERGAMIN FILHO, Armando; SILVA, Herbert P.; SILVA, Willian J.; BERGER, Richard D.. Temporal progress of southern rust in maize under different environmental conditions. **Fitopatologia Brasileira**, [S.L.], v. 28, n. 3, p. 273-278, jun. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-41582003000300008>.

GOI, Silvia Regina; SOUZA, Francisco A. de. Diversidade de microrganismos do solo. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 46-65, 10 nov. 2006.

GONÇALVES, R.M.; FIGUEIREDO, J.e.F.; PEDRO, E.s.; MEIRELLES, W.F.; LEITE JUNIOR, R.P.; SAUER, A.V.; PACCOLA-MEIRELLES, L.D.. ETIOLOGY OF PHAEOSPHAERIA LEAF SPOT DISEASE OF MAIZE. **Journal Of Plant Pathology**, [S.L.], v. 95, n. 3, p. 559-569, 2013. . <http://dx.doi.org/10.4454/JPP.V95I3.037>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/255711372\\_Etiology\\_of\\_Phaeosphaeria\\_leaf\\_spot\\_disease\\_of\\_maize](https://www.researchgate.net/publication/255711372_Etiology_of_Phaeosphaeria_leaf_spot_disease_of_maize). Acesso em: 16 maio 2025.

GONÇALVES, R. M.; FIGUEIREDO, J. E. F.; PEDRO, E. S.; MEIRELLES, W. F.; LEITE JUNIOR, R. P.; SAUER, A. V.; COSTA, R. V.; COTA, L. V.; SILVA, D. D.; PACCOLA-MEIRELLES, L. D.

*Mancha-foliar-de-Phaeosphaeria (mancha-branca-do-milho): fungo ou bactéria?* Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 79).

Disponível  
em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/979784/1/bol79.pdf>. Acesso em: 16 maio 2025.

Gs, P., & Shete, P. (2021). Symptomatology, etiology, epidemiology and management of Southern corn leaf blight of maize (*Bipolaris maydis*) (Nisikado and Miyake) Shoemaker. ~ 840 ~ **The Pharma Innovation Journal**, 10(5), 840–844. <https://knoema.com>

Heimpel, G. E., and Mills, N. (2017). **Biological Control - Ecology and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press.

HUANG, Chien-Jui; YANG, Ken-Haow; LIU, Yi-Hung; LIN, Yu-Ju; CHEN, Chao-Ying. Suppression of southern corn leaf blight by a plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus cereus* C1L. **Annals Of Applied Biology**, [S.L.], v. 157, n. 1, p. 45-53, 15 jun. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00408.x>

Islam, Waqar. (2018). **Plant Disease Epidemiology**: Disease Triangle and Forecasting Mechanisms In Highlights. 5. 10.17582/journal.hv/2018/5.1.7.11.

JIBRIL, Sauban Musa; HU, Yanping; YANG, Kexin; WU, Jie; LI, Chengyun; WANG, Yi. Microbiome Analysis of Area in Proximity to White Spot Lesions Reveals More Harmful Plant Pathogens in Maize. **Biomolecules**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 252, 9 fev. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biom15020252>.

Keller NP, Bergstrom GC, Carruthers RI (1986) Potential yield reductions in maize associated with an anthracnose/European corn borer pest complex in New York. **Phytopathology** 76:586–589

KALEH, Abdussabur M; SINGH, Pooja; CHUA, Kah Ooi; HARIKRISHNA, Jennifer Ann. Modulation of plant transcription factors and priming of stress tolerance by plant growth-promoting bacteria: a systematic review. **Annals Of Botany**, [S.L.], p. 387-402, 16 set. 2024. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcae166>.

KIM, Saet-Byul; BROECK, Lisa van Den; KARRE, Shailesh; CHOI, Hoseong; CHRISTENSEN, Shawn A.; WANG, Guan-Feng; JO, Yeonhwa; CHO, Won Kyong; BALINT-KURTI, Peter. Analysis of the transcriptomic, metabolomic, and gene regulatory responses to *Puccinia sorghi* in maize. **Molecular Plant Pathology**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 465-479, 28 fev. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/mpp.13040>.

KIM, Saet-Byul; KIM, Ki-Tae; IN, Solhee; JAISWAL, Namrata; LEE, Gir-Won; JUNG, Seungmee; ROGERS, Abigail; GÓMEZ-TREJO, Libia F.; GAUTAM, Sujan; HELM, Matthew. Use of the *Puccinia sorghi* haustorial transcriptome to identify and characterize AvrRp1-D recognized by the maize Rp1-D resistance protein. **Plos Pathogens**, [S.L.], v. 20, n. 11, p. 1-25, 8 nov. 2024. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.ppat.1012662>.

Köhl, J., Kolnaar, R., & Ravensberg, W. J. (2019). Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance beyond efficacy. In **Frontiers in Plant Science** (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>

LATTERELL, F. M.; ROSSI, A. E. Gray leaf spot of corn: a disease on the move. *Plant Disease*, v. 67, n. 8, p. 842–844, 1983.

Le Mire, G., Nguyen, M.L., Fassotte, B., Du Jardin, P., Verheggen, F., Delaplace, P., Haissam Jijakli, M., 2016. Implementação de bioestimulantes vegetais e estratégias de biocontrole no manejo agroecológico de ecossistemas cultivados. Uma revisão. *Biotechnol. Agron. Soc. Ambiente*. 20, 299–313. 10.25518/1780-4507.12717.

LI, Bo; KONG, Lingxiao; QIU, Dewen; FRANCIS, Frédéric; WANG, Shuangchao. Biocontrol potential and mode of action of entomopathogenic bacteria *Xenorhabdus budapestensis* C72 against *Bipolaris maydis*. *Biological Control*, [S.L.], v. 158, p. 104605, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104605>.

LIMDOLTHAMAND, Supharoek; SONGKUMARN, Pattavipha; SUWANNARAT, Sawita; JANTASORN, Arom; DETHOUP, Tida. Biocontrol efficacy of endophytic *Trichoderma* spp. in fresh and dry powder formulations in controlling northern corn leaf blight in sweet corn. *Biological Control*, [S.L.], v. 181, p. 105217, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105217>.

Lipps, P. (1998). Gray leaf spot: a global threat to corn production (APSNet Feature). doi: 10.1094/APSnetFeature-1998-0598

LUCAS, John A.; HAWKINS, Nichola J.; FRAAIJE, Bart A.. The Evolution of Fungicide Resistance. *Advances In Applied Microbiology*, [S.L.], p. 29-92, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.aambs.2014.09.001>.

MALLOWA, Sally O.; ESKER, Paul D.; PAUL, Pierce A.; BRADLEY, Carl A.; CHAPARA, Venkata R.; CONLEY, Shawn P.; ROBERTSON, Alison E.. Effect of Maize Hybrid and Foliar Fungicides on Yield Under Low Foliar Disease Severity Conditions. *Phytopathology®*, [S.L.], v. 105, n. 8, p. 1080-1089, ago. 2015. Scientific Societies. <http://dx.doi.org/10.1094/phyto-08-14-0210-r>.

MASSI, Federico; TORRIANI, Stefano F. F.; BORGHI, Lorenzo; TOFFOLATTI, Silvia L.. Fungicide Resistance Evolution and Detection in Plant Pathogens: plasmopara viticola as a case study. *Microorganisms*, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 119, 6 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms9010119>.

MOREIRA, F. M. S., SIQUEIRA, J. O., BRUSSARD, L. Soil organisms in tropical Ecosystems: a key role for Brazil in the global quest for the conservation and sustainable use of biodiversity. In: **Soil Biodiversity in Amazonian and other Brazilian Ecosystems**. Moreira, F.M.S., Siqueira, J. O., Brussard, L. Eds. CABI Publishing, pp1-12, 2006

Mubeen, S., Rafique, M., Munis, M. F. H., & Chaudhary, H. J. (2017). Study of southern corn leaf blight (SCLB) on maize genotypes and its effect on yield. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(3), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.06.006>

Nsibo, D. L., Barnes, I., & Berger, D. K. (2024). Recent advances in the population biology and management of maize foliar fungal pathogens *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeina* and *Bipolaris maydis* in Africa. In **Frontiers in Plant Science** (Vol. 15). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1404483>

Pavan GS, Poonam Shete. Symptomatology, etiology, epidemiology and management of Southern corn leaf blight of maize (*Bipolaris maydis*) (Nisikado and Miyake) Shoemaker. **Pharma Innovation** 2021;10(5):840-844.

QUADE, Aurelie; ASH, Gavin J.; PARK, Robert F.; STODART, Benjamin. Resistance in Maize (*Zea mays*) to Isolates of *Puccinia sorghi* from Eastern Australia. **Phytopathology®**, [S.L.], v. 111, n. 10, p. 1751-1757, out. 2021. Scientific Societies. <http://dx.doi.org/10.1094/phyto-11-20-0524-r>.

Rahul, K., Singh, I.S., 2002. Inheritance of resistance to banded leaf and sheath blight (*Rhizoctonia solamf. sp. Sasakii*) of maiz. In: Proc. 8th Asian Regional Maize Works. Bangkok, Thailand, vol. 5, pp. 356–365.

RAMIREZ-CABRAL, Nadiezhda Yakovleva Zitz; KUMAR, Lalit; SHABANI, Farzin. Global risk levels for corn rusts (*Puccinia sorghi* and *Puccinia polysora*) under climate change projections. **Journal Of Phytopathology**, [S.L.], v. 165, n. 9, p. 563-574, 20 jun. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jph.12593>.

REDDY, T. Rajeshwar; REDDY, P. Narayan; REDDY, R. Ranga; REDDY, S. Sokka. Management of Turcicum Leaf Blight of Maize Caused by *Exserohilum Turcicum* in Maize. **International Journal Of Scientific And Research Publications**, New Delhi, India, v. 3, n. 10, p. 540-543, out. 2013.

SANCHES, Rafael Egea; SCAPIM, Carlos Alberto; TESSMANN, Dauri José; VIEIRA, Rafael Augusto; RODOVALHO, Marcos de Araújo; MILANI, Klayton Flávio. Genetic analysis of tropical rust resistance in popcorn lines. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 41, n. 6, p. 967-971, jun. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782011000600008>.

SANTOS, P. J. C.; BENATO, L. C.; SOUZA, N. V.; VIEIRA, N. D.; ALMEIDA, A. M. R. *Utilização de Pseudomonas fluorescens no controle biológico de Macrophomina phaseolina*. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 5., 2005, Londrina. Anais [...]. Londrina: Embrapa Soja, 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/859382/1/ID30984.pdf>.

SCHOOLER, Shon S.; BARRO, Paul de; IVES, Anthony R.. The potential for hyperparasitism to compromise biological control: why don't hyperparasitoids drive their primary parasitoid hosts extinct?. **Biological Control**, [S.L.], v. 58, n. 3, p. 167-173, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.05.018>.

SHAFI, Jamil; TIAN, Hui; JI, Mingshan. Bacillus species as versatile weapons for plant pathogens: a review. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, [S.L.], v. 31,

n. 3, p. 446-459, 13 fev. 2017. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>.

SHAH, Denis A.; DILLARD, Helene R.. Yield Loss in Sweet Corn Caused by Puccinia sorghi: a meta-analysis. **Plant Disease**, [S.L.], v. 90, n. 11, p. 1413-1418, nov. 2006. Scientific Societies. <http://dx.doi.org/10.1094/pd-90-1413>

SIQUEIRA, Carolina da Silva; MACHADO, José da Cruz; BARROCAS, Ellen Noly; ALMEIDA, Mirella Figueiró de. Potential for transmission of Stenocarpella macrospora from inoculated seeds to maize plants grown under controlled conditions. **Journal Of Seed Science**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 154-161, jun. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2317-1545v32n2904>.

SUN, Qiuyu; LI, Leifu; GUO, Fangfang; ZHANG, Keyu; DONG, Jiayu; LUO, Yong; MA, Zhanhong. Southern corn rust caused by Puccinia polysora Underw: a review. **Phytopathology Research**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-11, 19 out. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s42483-021-00102-0>.

STALEY, James T.; KONOPKA, Allan. MEASUREMENT OF IN SITU ACTIVITIES OF NONPHOTOSYNTHETIC MICROORGANISMS IN AQUATIC AND TERRESTRIAL HABITATS. **Annual Review Of Microbiology**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 321-346, out. 1985. Annual Reviews.  
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001541>.

VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ, Mirian; ESPINOZA-LOZANO, Fernando; ESPINOZA-LOZANO, Lisbeth; CORONEL-LEÓN, Jonathan. Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. **Frontiers In Agronomy**, [S.L.], v. 7, 7 maio 2025. Frontiers Media SA.  
<http://dx.doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915>.

WAGEMANS, Jeroen; HOLTAPPELS, Dominique; VAINIO, Eeva; RABIEY, Mojgan; MARZACHI, Cristina; HERRERO, Salvador; RAVANBAKHS, Mohammadhossein; TEBBE, Christoph C.; OGLIASTRO, Mylène; AYLLÓN, María A.. Going Viral: virus-based biological control agents for plant protection. **Annual Review Of Phytopathology**, [S.L.], v. 60, n. 1, p. 21-42, 26 ago. 2022. Annual Reviews.  
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-phyto-021621-114208>.

WANG, Meng; MA, Jia; FAN, Lili; FU, Kehe; YU, Chuanjin; GAO, Jinxin; LI, Yaqian; CHEN, Jie. Biological control of southern corn leaf blight by Trichoderma atroviride SG3403. **Biocontrol Science And Technology**, [S.L.], v. 25, n. 10, p. 1133-1146, 18 maio 2015. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/09583157.2015.1036005>.

WORDELL FILHO, João Américo; DUCATTI, Rafael dal Bosco; NESI, Cristiano Nunes. Macrospora leaf spot development conditions and resistance/tolerance of Brazilian commercially grown maize genotypes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 1-10, 11 dez. 2023. Universidade Estadual de Maringá.  
<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.63370>.

XIA, Xinyao; WANG, Yafei; ZHOU, Shaoqun; LIU, Wende; WU, Hanxiang. Genome Sequence Resource for Bipolaris zeicola, the Cause of Northern Corn Leaf Spot Disease. **Phytopathology®**, [S.L.], v. 112, n. 5, p. 1192-1195, maio 2022. Scientific Societies. <http://dx.doi.org/10.1094/phyto-05-21-0196-a>.

XING, Enyun; FAN, Xingming; JIANG, Fuyan; ZHANG, Yudong. Advancements in Research on Prevention and Control Strategies for Maize White Spot Disease. **Genes**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 1-16, 10 nov. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/genes14112061>.

YAN, Xiao-Cui; LIU, Qing; YANG, Qian; WANG, Kai-Lai; ZHAI, Xiu-Zhen; KOU, Meng-Yun; LIU, Jia-Long; LI, Shang-Tong; DENG, Shu-Han; LI, Miao-Miao. Single-cell transcriptomic profiling of maize cell heterogeneity and systemic immune responses against Puccinia polysora Underw. **Plant Biotechnology Journal**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 549-563, 29 nov. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/pbi.14519>.

XU, Ling; ZHANG, Yan; SHAO, Siquan; CHEN, Wei; TAN, Jing; ZHU, Mang; ZHONG, Tao; FAN, Xingming; XU, Mingliang. High-resolution mapping and characterization of qRgls2, a major quantitative trait locus involved in maize resistance to gray leaf spot. **Bmc Plant Biology**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 1-10, 31 ago. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s12870-014-0230-6>