

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROTEÇÃO DE PLANTAS

EUZANYR GOMES DA SILVA

**ESPÉCIES DO COMPLEXO *Fusarium fujikuroi* ASSOCIADAS À PODRIDÃO DA
COROA DA BANANA: DIVERSIDADE, PATOGENICIDADE, POTENCIAL
MICOTOXIGÊNICO E SENSIBILIDADE À FUNGICIDA**

Rio Largo - AL

2024

EUZANYR GOMES DA SILVA

**ESPÉCIES DO COMPLEXO *Fusarium fujikuroi* ASSOCIADAS À PODRIDÃO DA
COROA DA BANANA: DIVERSIDADE, PATOGENICIDADE, POTENCIAL
MICOTOXIGÊNICO E SENSIBILIDADE À FUNGICIDA**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisitos para obtenção do título de Doutora.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Kamila Câmara Correia

Coorientador: Prof. Dr. Sami Jorge Michereff

Rio Largo – AL

2024

Catlogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S586e Silva, Euzanyr Gomes da.

Espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* associadas à podridão da coroa da banana: diversidade, patogenicidade, potencial micotoxigênico e sensibilidade à fungicida. / Euzanyr Gomes da Silva. – 2024.

94f.: il.

Orientador(a): Kamila Câmara Correia.
Coorientador(a): Sami Jorge Michereff.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Proteção de Plantas. Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2024.

Inclui bibliografia

1. Agressividade. 2. Fumonisina. 3. Fungicida DMI. 4. Podridão pós-colheita. 5. Resistência a fungicidas. I. Título.

CDU: 634.773 : 582.28

EUZANYR GOMES DA SILVA

**ESPÉCIES DO COMPLEXO *Fusarium fujikuroi* ASSOCIADAS À PODRIDÃO DA
COROA DA BANANA: DIVERSIDADE, PATOGENICIDADE, POTENCIAL
MICOTOXIGÊNICO E SENSIBILIDADE À FUNGICIDA**

Tese submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas da Universidade Federal de Alagoas e **Aprovada** em 27 de Fevereiro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **KAMILA CAMARA CORREIA**
Data: 25/03/2024 12:15:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Kamila Câmara Correia - Universidade Federal do Cariri
Orientadora

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SARAH JACQUELINE CAVALCANTI DA SILVA**
Data: 25/03/2024 14:13:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Sarah Jacqueline Cavalcanti da Silva - Universidade Federal de Alagoas



Dr.^a Camila Primieri Nicolli - Universidade de Wisconsin-Madison

Documento assinado digitalmente
 **AILTON REIS**
Data: 26/03/2024 16:06:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Ailton Reis - EMBRAPA Hortaliças

Rio Largo – AL
2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso a minha profunda gratidão a Deus por ter-me concedido a graça de realizar meus sonhos. Sua orientação constante e seu amor inabalável têm sido os alicerces da minha jornada. Obrigada, Senhor, por cada passo dado, por cada desafio superado e por cada sonho realizado. Que sua luz continue a iluminar meu caminho, guiando-me sempre em direção à sua vontade e ao cumprimento dos propósitos que preparou para mim.

Ao São Francisco de Assis, por tua intercessão e graça.

A minha mãe, meu maior exemplo de perseverança, amor e bondade, sempre me inspirando a seguir em frente, mesmo diante dos maiores desafios.

Aos meus irmãos Regina Mourão e Armindo Mourão, pelo apoio incondicional que sempre me oferecem.

A Prof^a. Dr^a. Kamila Correia, pela orientação e dedicação. Além de uma orientadora exemplar, você se tornou uma inspiração para mim. Agradeço também por todas as oportunidades de aprendizado e crescimento que você me proporcionou.

Ao Prof. Sami Michereff e a Ana Barros por todo o auxílio e suporte que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Proteção de Plantas do Centro de Ciências Agrárias – CECA/UFAL, pelos ensinamentos.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao laboratório de Fitopatologia da UFCA, agradeço pelo espaço concedido para a realização dos experimentos deste estudo.

Aos alunos bolsistas de Iniciação Científica, especialmente Ana Karolina, Germana, Rafael e Wilson, que me ajudaram no decorrer do doutorado.

Ao Thobias Amaro, gratidão por estar ao meu lado durante este período tão importante da minha vida. Agradeço por todo o amor, compreensão, e por ser meu maior incentivador. Sua presença e apoio foram essenciais para me manter forte e focada em meus objetivos.

A Karine Feitosa e Francisco Diniz, grandes amigos e pessoas maravilhosas, que desempenharam um papel fundamental em minha estadia no Crato. Gratidão!

Ao Raimundo Thiago, por ter acreditado em mim mesmo quando eu não acreditava, e por me incentivar e contribuir para seguir nesta vida de pós-graduação.

A minha tia Raimunda Alencar, por todo o apoio e carinho.

A região do Cariri, com sua riqueza cultural, paisagens deslumbrantes e seu acolhimento.

Aos amigos que sempre acreditaram e torceram por mim.

A todos que me ajudaram de forma direta ou indireta para finalização do meu doutorado.

Muito Obrigada!

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e
os seus planos serão bem-sucedidos.”
Provérbios 16:3

RESUMO GERAL

A banana (*Musa* spp.) é uma das frutas mais consumidas globalmente, sendo valorizada tanto por seu sabor quanto por sua importância nutricional. O Brasil, está entre os maiores produtores de banana do mundo, ocupando uma posição de destaque como o quarto maior produtor. Essa fruta desempenha um papel significativo na economia agrícola do país e na dieta de muitos brasileiros, além de ser exportada para diversos mercados internacionais. No entanto, sua comercialização é seriamente afetada por doenças pós-colheita que causam danos e prejuízos consideráveis. A podridão da coroa, causada por um complexo fúngico, incluindo diversas espécies de *Fusarium*, é a doença pós-colheita mais devastadora da banana. O gênero *Fusarium* é um grupo de fungos de importância mundial, não apenas devido à sua capacidade de causar doenças em plantas, mas também porque abriga espécies toxigênicas. Dentre estas, *F. verticillioides* e *F. proliferatum*, que se agrupam no complexo de espécies *Fusarium fujikuroi* (FFSC), estão associadas à podridão da coroa. Os membros do FFSC podem produzir micotoxinas, principalmente as fumonisinas (FBs), que são prejudiciais à saúde humana e animal. O método de controle mais aplicado como tratamento pós-colheita para controlar a podridão da coroa das bananas é o uso de fungicidas. Desse modo, o objetivo do estudo foi caracterizar as espécies do FFSC que causam podridão da coroa da banana, coletados em comércios e unidades de beneficiamento, por meio de abordagem molecular, com o sequenciamento dos genes EF1- α e RPB2, testar a sua patogenicidade e agressividade; avaliar o seu potencial de produzir micotoxinas por meio da identificação dos genes FUM utilizando oligonucleotídeos específicos (FUM53F/FUM53R e VERT1/VERT2); e avaliar a resistência ao fungicida Imazalil *in vitro*. As análises filogenéticas caracterizaram 64 isolados pertencentes ao FFSC, as espécies identificadas foram *F. musae*, *F. annulatum*, *F. sacchari*, *F. verticillioides* e *F. pseudocircinatum*. Este é o primeiro relato da espécie *F. annulatum* associada à podridão da coroa no mundo. Nove isolados foram positivos para os genes que codificam a produção de fumonisinas, as espécies *F. verticillioides*, *F. musae*, *F. annulatum* e *F. pseudocircinatum* apresentaram a presença dos genes FUM1 e FUM8, possuindo a capacidade de produzir fumonisina. As espécies diferiram em na capacidade de infectar e causar danos, *F. musae* foi mais agressiva, enquanto os *F. verticillioides* não foram patogênicos. Os isolados de FFSC revelaram uma variabilidade significativa na sensibilidade ao fungicida, com a identificação de isolados altamente resistente ao fungicida Imazalil. Este estudo traz novas contribuições sobre a diversidade de agentes etiológicos associados à podridão da coroa da banana na região do Cariri cearense membros do FFSC e a capacidade dessas espécies em produzir fumonisinas. Considerando a relevância que a banana possui como uma das frutas mais presentes na alimentação da população brasileira, nossos resultados contribuem com novos conhecimentos para a avaliação futura da quantificação de micotoxinas em frutos de banana no Brasil. Uma vez que este estudo indica uma ameaça potencial à qualidade da banana brasileira.

.

Palavras-Chaves: agressividade, fumonisina, fungicida DMI; podridão pós-colheita; resistência a fungicidas;

ABSTRACT

Banana (*Musa* spp.) is one of the most globally consumed fruits, valued for both its taste and nutritional importance. Brazil ranks among the largest banana producers in the world, holding a prominent position as the fourth largest producer. This fruit plays a significant role in the country's agricultural economy and in the diets of many Brazilians, besides being exported to various international markets. However, its commercialization is seriously affected by post-harvest diseases that cause considerable damage and losses. Crown rot, caused by a fungal complex including various *Fusarium* species, is the most devastating post-harvest disease of bananas. The *Fusarium* genus is a globally important group of fungi, not only due to its ability to cause plant diseases but also because it harbors toxigenic species. Among these, *F. verticillioides* and *F. proliferatum*, which cluster in the *Fusarium fujikuroi* species complex (FFSC), are associated with crown rot. Members of the FFSC can produce mycotoxins, primarily fumonisins (FBs), which are harmful to human and animal health. The most applied method of post-harvest control to manage banana crown rot is the use of fungicides. Therefore, the aim of the study was to characterize FFSC species causing banana crown rot, collected from markets and processing units, through molecular approaches involving sequencing of the EF1- α and RPB2 genes, test their pathogenicity and aggressiveness; assess their potential to produce mycotoxins by identifying FUM genes using specific oligonucleotides (FUM53F/FUM53R and VERT1/VERT2); and evaluate resistance to the fungicide Imazalil in vitro. Phylogenetic analyses characterized 64 isolates belonging to the FFSC; the identified species were *F. musae*, *F. annulatum*, *F. sacchari*, *F. verticillioides*, and *F. pseudocircinatum*. This is the first report of the species *F. annulatum* associated with crown rot worldwide. Nine isolates were positive for genes encoding fumonisin production; *F. verticillioides*, *F. musae*, *F. annulatum*, and *F. pseudocircinatum* species showed the presence of FUM1 and FUM8 genes, indicating their capability to produce fumonisin. Species differed in their ability to infect and cause damage, with *F. musae* being more aggressive, while *F. verticillioides* were non-pathogenic. FFSC isolates showed significant variability in sensitivity to the fungicide, with identification of isolates highly resistant to the fungicide Imazalil. This study brings new contributions regarding the diversity of etiological agents associated with banana crown rot in the Cariri region of Ceará, FFSC members, and the capacity of these species to produce fumonisins. Considering the relevance of bananas as one of the most consumed fruits in the Brazilian population's diet, our results contribute with new knowledge for future evaluation of mycotoxin quantification in banana fruits in Brazil. Since this study indicates a potential threat to the quality of Brazilian bananas.

Keywords: aggressiveness; Fumonisin; DMI fungicide; post-harvest rot; fungicide resistance;

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	
1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1 Produção de banana	11
2.2 Doenças da bananeira	13
2.3 Doenças pós-colheita	13
2.4 Podridão da coroa	15
2.5 O gênero <i>Fusarium</i>	17
2.6 Complexo de espécies de <i>Fusarium Fujikuroi</i> (FFSC)	20
2.7 Micotoxinas produzidas por fungos do FFSC	21
2.8 Resistência de fungos a fungicidas	24
3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO II - DIVERSIDADE E POTENCIAL MICOTOXIGÊNICO DE ESPÉCIES DO COMPLEXO <i>Fusarium fujikuroi</i> ASSOCIADAS À PODRIDÃO DA COROA DA BANANA	40
Resumo	40
Introdução	41
Materiais e métodos.....	42
Coleta de amostras e isolamento de fungos	42
Extração de DNA e amplificação por PCR	44
Análises filogenéticas	45
Potencial micotoxigênico	45
Patogenicidade	46
Resultados	47
Espécies de <i>Fusarium</i> associados à podridão da coroa da banana	47
Potencial micotoxigênicos dos isolados de FFSC associados a banana	48
Patogenicidade dos isolados FFSC associados a banana	49
Discussão	50
Conclusão	55
Agradecimento	56
Referência.....	56
CAPÍTULO III- Sensitivity to imazalil of <i>Fusarium fujikuroi</i> species complex associated with banana crown rot in Brazil	72
CONCLUSÕES GERAIS	89

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL E REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO GERAL

A banana (*Musa* spp.) é uma das frutas tropicais largamente cultivadas e, devido ao seu sabor, textura, valor nutricional e presença de diferentes compostos bioativos benéficos à saúde, tem sido uma das frutas mais consumidas no mundo. A bananicultura tem grande importância econômica e social no Cariri, região sul do Ceará, onde são cultivados numa extensa área por médios e pequenos agricultores, bem como por empresas de grande porte, gerando emprego e renda.

No entanto, as bananas são afetadas por diversas doenças, sendo a podridão da coroa considerada uma das mais importantes doenças pós-colheita, causando grande impacto negativo na qualidade dos frutos (KAMEL; CORTESI; SARACCHI, 2016). Os fungos são os agentes causais da podridão da coroa e pertencem a diferentes gêneros e espécies, sendo que *Colletotrichum* e *Fusarium* foram o gênero de maior frequência associados à podridão da coroa em um levantamento feito em 2018 na região do Cariri cearense (SILVA *et al.*, 2019).

O gênero *Fusarium* inclui numerosas espécies toxigênicas que são patogênicas para plantas, animais ou humanos e são capazes de colonizar uma ampla variedade de ambientes na Terra (MUNKVOLD, 2016). Diversas espécies de *Fusarium* já foram relatadas associadas ao apodrecimento da coroa da banana (ZAKARIA, 2023), incluindo membros do complexo de espécies *Fusarium fujikuroi* (FFSC) que são produtoras de micotoxinas, como *F. proliferatum*, *F. verticillioides* e *F. fujikuroi* (QIU *et al.*, 2020).

Micotoxinas refere-se a um conjunto de compostos produzidos por certas espécies de fungos durante seu desenvolvimento, podendo ocasionar danos significativos quando ingeridas. Essas micotoxinas representam contaminantes naturais de difícil controle em alimentos. Estima-se que aproximadamente 25% de todos os produtos agrícolas em todo o mundo estejam contaminados por essas substâncias (ZANON *et al.*, 2023).

Os membros da FFSC são capazes de produzir uma ampla gama de micotoxinas, incluindo a fumonisina (FB) (RHEEDER; MARASAS; VISMER, 2002). A fumonisina é uma micotoxina altamente tóxica, produzida por várias espécies de *Fusarium*, predominantemente *F. verticillioides* e *F. proliferatum* (XIE *et al.*, 2021) e representam uma preocupação devido às suas implicações toxicológicas, pois seu consumo pode levar a distúrbios graves e micotoxicoses em animais e câncer em humanos (CAO *et al.*, 2020; MISSMER *et al.*, 2006).

Nesse contexto, a implementação de medidas de controle deste patógeno desempenha um papel importante para reduzir a exposição humana e animal a essas micotoxinas. O controle da podridão da coroa é realizado principalmente com fungicidas químicos sintéticos

(GONZÁLEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2023). Imazalil e tiabendazol, e a mistura azoxistrobina + fludioxonil estão registrados para uso em bananas, para controlar doenças pós-colheita (MAPA, 2024). O uso intensivo e indiscriminado de defensivos agrícolas tem causado diversos problemas e um deles é a resistência de fitopatógenos a certos defensivos. As avaliações de sensibilidade a fungicidas de populações de patógenos fúngicos são essenciais para monitorar a resistência a fungicidas específicos. Métodos clássicos de avaliação da sensibilidade basal dos fungicidas das populações de fungos baseiam-se nas determinações da metade da concentração efetiva máxima de fungicida (EC50) derivada de medições de crescimento micelial ou germinação de esporos em meios de cultura artificiais (GONZÁLEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2023).

Diante disso, este estudo tem o objetivo de (i) identificar os isolados do FFSC associados à podridão da coroa da banana na região do Cariri cearense; (ii) avaliar o potencial micotoxinas dos isolados do FFSC associadas à podridão da coroa da banana; (iii) avaliar a patogenicidade e agressividade dos isolados do FFSC associadas à podridão da coroa da banana; (iii) avaliar a sensibilidade ao fungicida imazalil os isolados do FFSC associados à podridão da coroa da banana.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Produção da banana

Originária do continente Asiático, a bananeira (*Musa spp.*) é o resultado da domesticação e hibridização de duas espécies selvagens: *Musa acuminata* Colla (genoma A) e *Musa balbisiana* Colla (genoma B) (ROUARD *et al.*, 2018). É considerada uma planta herbácea completa, apresentando em sua morfologia caule (rizoma), raiz, folhas, flores, frutos e sementes, sendo classificada como uma cultura perene, uma vez que novos perfilhos nascem da base da planta-mãe (BORGES; SOUZA; ALVES, 2000).

Plantada principalmente em regiões tropicais e subtropicais, cultivada em mais de 130 países e ocupando uma área superior a 20 milhões de hectares (AL-DAIRI *et al.*, 2023). A produção mundial em 2022 foi de aproximadamente 135 milhões de toneladas, sendo a Índia o principal país produtor, com 34,5 milhões de toneladas, seguida pela China (12,1 milhões de toneladas), Indonésia (9,2 milhões de toneladas) e Brasil (6,8 milhões de toneladas) (FAO, 2024).

Atualmente, existem mais de mil variedades de bananas e quase todas são cultivadas como produtos comestíveis (SUGIANTI *et al.*, 2022). No Brasil, as cultivares comestíveis mais

difundidas são Prata; Pacovan, Prata Anã, Maçã; Mysore; Terra e D'Angola, pertencentes ao grupo genômico AAB e consumidas somente no mercado interno. Para o mercado de exportação destacam-se as cultivares: Nanica; Nanicão e Grand Naine, pertencentes ao grupo genômico AAA. As cultivares Prata, Prata Anã e Pacovan são responsáveis por aproximadamente 60% da área cultivada com banana no Brasil (FERREIRA *et al.*, 2016).

A banana é a segunda fruta mais produzida no Brasil (FAO, 2024) e a sua produção constitui parte importante da renda dos pequenos produtores e da alimentação das mais diversas camadas da população brasileira (AMARO; FAGUNDES, 2016). Conforme a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2017/2018, o brasileiro consome em média 25 kg de banana per capita/ano (IBGE, 2024).

Em 2022, no Brasil foram cultivados 472,6 mil hectares com bananeiras, produzindo aproximadamente 7,0 milhões de toneladas de frutos. O cultivo da bananeira é realizado em todos os Estados brasileiros, sendo a Região Nordeste a maior produtora do País, com destaque para os estados da Bahia (904,3 mil toneladas), Pernambuco (507,4 mil toneladas) e Ceará (439,9 mil toneladas). A produtividade média brasileira é de 15,09 t/ha, sendo que o estado do Rio Grande do Norte é o mais produtivo, com 24,4 t/ha (IBGE, 2024).

Na mesorregião do Cariri, localizada no sul do estado do Ceará, são cultivados mais de 3 mil ha com bananeira, onde a cadeia produtiva da banana gera um elevado número de empregos e desenvolvimento (IBGE, 2024). Em 2022, foram colhidas mais de 69 mil toneladas de banana na região, principalmente no município de Missão Velha, classificada como maior produtor da fruta na região e segundo no Estado (44.675 toneladas) e o município de Barbalha onde são colhidas mais de 17 mil toneladas de bananas por ano (IBGE, 2024).

A produção de banana na região do Cariri no ano de 2022 foi menor do que no ano anterior, com uma redução de 7.651 toneladas. Em Missão Velha foram produzidas 51.039 toneladas de banana em 2021, ano em que o município ocupou a primeira posição no ranking de produtores do estado do Ceará. Com a redução de produção em 6.364 toneladas a posição passou a ser ocupada pelo município de Limoeiro do Norte, situado no Norte do Estado (IBGE, 2024).

Apesar da alta produtividade brasileira no cultivo de bananeiras, dos frutos da banana que são colhidas nas lavouras, somente cerca de 40% a 50% chegam efetivamente às mãos dos consumidores (MACHADO *et al.*, 2022), sendo as principais causas: danos mecânicos, devido ao manuseio inadequados antes e pós-colheitas, o armazenamento e a embalagem inadequados e o desenvolvimento de doenças (AL-DAIRI *et al.*, 2023; MACHADO *et al.*, 2022).

2.2 Doenças da bananeira

As bananeiras são altamente suscetíveis a diversos problemas fitossanitários causados por fungos, bactérias, vírus, nematoides, insetos e plantas daninhas (CORDEIRO *et al.*, 2017), sendo as doenças causadas por espécies fúngicas as principais causadoras de danos qualidade dos frutos e de grande limitação em muitos sistemas de cultivos (DRENTH; KEMA, 2021). As doenças normalmente afetam todo o ciclo vegetativo e produtivo da bananeira, infectando raiz, rizoma, pseudocaule, folhas e frutos (CORDEIRO *et al.*, 2017).

No Brasil, as doenças de maior importância da bananeira são as manchas foliares: Sigatoka negra, causada por *Mycosphaerella fijiensis* Morelet (*Paracercospora fijiensis* (Morelet) Deighton) e Sigatoka amarela causada por *Mycosphaerella musicola* Leach (*Pseudocercospora musae* (Zimm) Deighton); as murchas vasculares: mal do Panamá (*Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* (E.F. Smith) Sn e Hansen e moko ou murcha bacteriana (*Ralstonia solanacearum* Smith); os vírus: mosaico da bananeira, causado pelo Cucumber mosaic virus – CMV, e a estria da bananeira, causado Banana streak virus – BSV; os nematoides: *Radopholus similis*, *Helicotylenchus multicinctus*, *Pratylenchus coffeae* e *Meloidogyne* spp.; e as doenças pós-colheita, causadas por diversas espécies de fungos (CORDEIRO; MATOS; KIMATI, 2016).

Os problemas mais graves que ocorrem nos frutos são causados por patógenos específicos durante a fase de pré e pós-colheita da banana. Esses patógenos assumem maior importância devido à grande capacidade desses organismos de causar manchas ou podridões nos frutos, que se manifestam principalmente após a colheita, mesmo quando a infecção ocorre no período pré-colheita (CORDEIRO; MATOS; KIMATI, 2016; CORDEIRO *et al.*, 2017).

2.3 Doenças pós-colheitas

As principais doenças pós-colheitas que afetam a banana são a antracnose e a podridão da coroa e dos frutos (Figura 1). Normalmente, os sintomas se manifestam quando as frutas madurecem e a incidência dessas doenças está intimamente relacionada a práticas culturais e de manejo inadequados no campo, tanques de lavagem e embalagens infectados e manuseio e transporte pós-colheitas inadequados (LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014; ZAKARIA *et al.*, 2023).

Figura 1: Sintomas e sinais das principais doenças pós-colheita da banana



A: Antracnose (*Colletotrichum* spp.); B: Podridão da Coroa da banana

Fonte: Silva, 2024

A antracnose causada por fungos do gênero *Colletotrichum* (VIEIRA *et al.*, 2017) é considerada o principal problema na pós-colheita de banana, sendo relatada em todas as regiões produtoras de banana no mundo (PLOETZ; KEMA; MA, 2015). É uma doença que tem sido bastante investigada desde seus primeiros relatos, devido a sua elevada importância econômica. Com isso, muitas informações que auxiliam na elaboração do manejo dessa doença já estão disponíveis, incluindo a identificação das espécies fúngicas associadas, condições que favorecem o desenvolvimento e o registro de produtos químicos para o controle da principal espécie fúngica associada a essa doença, o *Colletotrichum musae* (Berk. & Curt.) V. Arx (CORDEIRO; MATOS; KIMATI, 2016; PLOETZ; THOMAS; SLABAUGH, 2003; MAPA 2024; VIEIRA *et al.*, 2017).

Diferentemente da antracnose, a podridão da coroa e dos frutos foi considerada uma doença de importância secundária por muito tempo e com isso as informações sobre essa doença são reduzidas, quando comparada à antracnose. A doença por muito tempo foi associada principalmente às espécies *C. musae* e *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff & Maubl (CORDEIRO; MATOS; KIMATI, 2016; PLOETZ; THOMAS; SLABAUGH, 2003). Porém, nos últimos anos aumentou o número de relatos da podridão da coroa como fator limitante da

comercialização de frutos da bananeira em diversas regiões produtora do mundo (DU *et al.*, 2017; KHAN; JAVAID, 2020; SALEM *et al.*, 2020; WALIULLAH *et al.*, 2022), com diversos patógenos associados, elevando a importância da doença e aumentando a necessidade de informações para elaboração de medidas de manejo visando a redução dos danos.

2.4 Podridão da coroa

A podridão da coroa é considerada atualmente uma das principais doença pós-colheita da banana, uma vez que limita o seu tempo de armazenamento e, assim, prejudicando as exportações, ocorrendo em todo o mundo (SANDANUWAN *et al.*, 2020). As feridas criadas durante a prática de despencamento dos frutos para a comercialização são a porta de entrada para fungos e bactérias oportunistas da podridão da coroa (BORGES; SOUZA; ALVES, 2000; LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014; ZAKARIA *et al.*, 2023). De modo geral, a podridão inicia pela coroa, com possibilidade de também se estender na região do pedicelo e nos frutos (BORGES; SOUZA; ALVES, 2000; ZAKARIA *et al.*, 2023).

A podridão da coroa afeta a qualidade dos frutos devido ao desenvolvimento de escurecimento e necrose no tecido, seguido do aparecimento de micélios, que são estruturas vegetativas do patógeno na superfície afetada (XIE *et al.*, 2022). A podridão também pode induzir o amadurecimento precoce das bananas durante o transporte. O amadurecimento precoce é muitas das vezes desencadeado pelo etileno liberado por tecidos estressados ou necróticos, mas também pelo etileno produzido por micélios de fungo como o *C. musae* (DAUNDASEKERA *et al.*, 2003; LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014). No geral, a incidência de podridão da coroa envolve uma depreciação do produto induzindo perdas econômicas significativas (XIE *et al.*, 2022).

Os primeiros sintomas normalmente se manifestam sete dias após o contato com o patógeno, inicia-se com amolecimento dos tecidos, que posteriormente escurecem, tonando-se manchas de coloração marrom ou preta, que se desenvolvem sobre a coroa no local em que foi realizado o corte para o despencamento. Os sintomas se espalham rapidamente durante o amadurecimento e pode se espalhar para o pedicelo e a polpa, dependendo da gravidade e agente causal associado. Com o avanço das lesões, estas podem ser recobertas por um mofo branco, branco acinzentado ou rosa, comumente chamado de “mofo da coroa”, que pode estar presente em toda a superfície. Em caso de infecção grave, as bananas se desprenderão do pedicelo (LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014; PLOETZ; THOMAS; SLABAUGH, 2003; RENGANATHAN *et al.*, 2022; SANDANUWAN *et al.*, 2020).

Diversos patógenos fúngicos causam a podridão da coroa na banana e, por tanto, essa doença é causada por um complexo fúngico que consiste em diferentes espécies (ZAKARIA *et al.*, 2023). As espécies fúngicas mais frequentes associadas à podridão da coroa são: *Acremonium* spp. Link, *Arthrinium phaeospermum* (Corda) M. B. Ellis, *Aspergillus* spp. P. Micheli, *Ceratocystis paradoxa* (Dade) C. Moreau, *Cladosporium* spp. Link, *C. musae*, *Curvularia luneta* (Wakker) Boedijn, *L. theobromae*; *Musicillium theobromae* (Turconi) Zare & W. Gams, *Nigrospora sphaerica* (Sacc.) E. W. Mason, *Penicillium* spp. E. M. Fries, *Phomopsis* spp. (Sacc.) Bubák, *Phyllosticta musarum* (Cooke) Aa, *Thielaviopsis paradoxa* (De Seynes) Höhn. e muitas espécies de *Fusarium* (CORDEIRO; MATOS; KIMATI, 2016; LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014; RENGANATHAN *et al.*, 2022; SANDANUWAN *et al.*, 2020; ZAKARIA *et al.*, 2023).

No entanto, a presença e prevalência das espécies fúngicas à podridão da coroa em bananas variam de acordo com a área cultivada e pela variação sazonal. Também podem diferir entre plantas e até mesmo entre coroas (LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014) e mais de um patógeno pode infectar uma mesma coroa. Os fungos associados nem sempre são patogênicos e variações na agressividade têm sido relatadas (KNIGHT, 1982; ZAKARIA *et al.*, 2023).

Na República Dominicana, *Fusarium incarnatum*, *C. musae*, *Fusarium verticillioides*, *Fusarium sacchari* e *L. theobromae* são as espécies causadoras da podridão da coroa, sendo que o *Fusarium* é o gênero mais prevalente associado a podridão da coroa da banana (KAMEL; CORTESI; SARACCHI, 2016). Na província de Mersin, no sul da Turquia, três espécies, *F. verticillioides*, *Fusarium oxysporum* e *Fusarium proliferatum* são consideradas os principais patógenos, uma vez que essas espécies foram as mais frequentemente isoladas, enquanto *Alternaria alternata*, *Aspergillus niger* e *Cladosporium cladosporioides* são consideradas espécies relativamente com agentes de doenças secundárias (FARUK; SOYLU, 2021). Na Costa Rica, duas espécies, *F. verticillioides* e *F. sacchari*, são os principais patógenos da podridão da coroa da bananeira (UMANA-ROJAS; GARCIA, 2009), enquanto no Egito, *F. semitectum* é a espécie patogênica mais comuns (ABD-ALLA *et al.*, 2014).

No Brasil, espécies de *Lasiodiplodia* já foram relatadas recentemente associadas a essa enfermidade (SANTOS *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2023). No entanto, o gênero *Fusarium* foi considerado o segundo maior gênero associadas à podridão da coroa em um levantamento feito em 2018 na região do Cariri cearense (SILVA, 2019). Recentemente, na mesma região foi identificado a espécie *Fusarium kalimantanense* associada com sintomas de podridão da coroa

da banana, sendo esse o primeiro relato mundial dessa espécie associada a esta doença (SILVA *et al.*, 2023).

Desde a década 1960 o gênero *Fusarium* tem sido relatado associado à podridão da coroa e se destacando com maior frequência nas doenças pós-colheita na banana, estando presente em todas as regiões. Os estudos realizados desde o primeiro relato até presente momento indicaram que várias espécies desde gênero podem causar podridão da coroa, sendo algumas delas produtoras de micotoxinas, que são prejudiciais à saúde humana e animal (XIE *et al.*, 2022), além de possuírem uma ampla gama de hospedeiros (ZAKARIA *et al.*, 2023), dificultando o manejo das doenças.

A escolha de medidas de controle da podridão da coroa inicia-se ainda no campo de produção, com práticas de remoção de resto culturais em decomposição; folhas velhas e outros órgãos senescentes, constituindo em uma importante ação para reduzir o potencial do inóculo (LAPEYRE DE BELLAIRE *et al.*, 2000; SIMMONDS; MITCHELL, 1940). Os restos florais dos frutos devem ser removidos precocemente para limitar a contaminação do cacho pelos agentes causais, principalmente *C. musae* e espécies de *Fusarium*, onde a contaminação pelos conídios ocorre principalmente aos 40 dias após a emergência do cacho (ALVINDIA, 2000; LASSOIS; LAPEYRE DE BELLAIRE, 2014). Além disso, os cachos de banana devem ser ensacados para diminuir o contato dos frutos com patógenos (SILVA *et al.*, 2022).

Durante a fase de colheita e pós-colheita é importante a tomada de cuidados a fim de evitar fermentos nas frutas, os quais facilitam a penetração de fitopatógenos. A sanitização das casas de embalagem é fundamental para o controle da podridão da coroa, incluindo a água do tanque de lavagem. As pencas e os frutos com sintomas da doença não devem entrar nos tanques de lavagem. Na etapa de beneficiamento, é recomendado que seja feita tratamento com produtos químicos nos frutos, com os fungicidas registrados para a cultura (RENGANATHAN *et al.*, 2022). Atualmente, apenas os ingredientes ativos imazalil e tiabendazol, e a mistura azoxistrobina + fludioxonil são registrados no Ministério da Agricultura do Brasil especificamente para o controle de *C. musae* (MAPA, 2024).

2.5 O gênero *Fusarium*

Fusarium é um dos gêneros de fungos filamentosos mais estudados e inclui que muitos patógenos agronomicamente importante por causar doenças importantes como murcha vasculares, ferrugem, cancrios e podridões em diferentes culturas, antes e depois da colheita, estando amplamente distribuído em todas as regiões geográficas do mundo (LESLIE;

SUMMERELL, 2006; SUMMERELL, 2019, TORRES-CRUZ *et al.*, 2022). Além disso, algumas espécies são produtoras de metabólitos secundários tóxicos, denominadas micotoxinas, que ameaçam a segurança alimentar global causando graves problemas de saúde para humanos e animais (YILMAZ *et al.*, 2021). Este gênero é frequentemente relatado como agente etiológico de infecções oportunistas em humanos, infectando principalmente indivíduos imunocomprometidos (NOSRATABADI *et al.*, 2023), mas também causando infecções da córnea em indivíduos com sistemas imunológicos saudáveis (HUANG *et al.*, 2022).

O gênero foi descrito pela primeira vez em 1809 pelo micologista Alemão Link e listado na taxonomia por Fires em 1821, sendo classificado atualmente na família Nectriaceae, ordem Hypocreales, classe Sordariomycetes, filo Ascomycota, e compreende cerca de 300 espécies filogeneticamente distintas, das quais muitas ainda não foram descritas formalmente (NIKITIN *et al.*, 2023), mas são classificadas como patogênicas ou saprófitas e/ou endofíticas (LESLIE; SUMMERELL, 2006). A taxonomia do gênero *Fusarium* tem sofrido profundas mudanças nos últimos anos e, conseqüentemente, o conceito de espécie também tem apresentado variações, envolvendo os conceitos morfológico, biológico e filogenético (NIKITIN *et al.*, 2023).

A identificação precisa das espécies de *Fusarium* é de suma importância para muitos campos científicos (como agricultura, ecologia e medicina), permitindo aos profissionais diagnosticar doenças, desenvolver estratégias de manejo adequadas e tomadas de decisões de tratamentos eficientes (COSTA *et al.*, 2019; THOMAS *et al.*, 2019). No entanto, os sistemas de classificação de espécies de *Fusarium* eram baseado somente em caracteres morfológicos e fisiológico o que gerava controvérsias devido à instabilidade morfológica dos fungos (BABADOOST, 2018; CROUS *et al.*, 2021).

Para identificar as espécies de *Fusarium* três conceitos devem ser considerados: caracteres morfológicos: baseado na similaridade das estruturas morfológicas observáveis, denominados de marcadores morfológicos; caracteres biológicos: baseado na compatibilidade sexual entre membros da mesma espécie; e caracteres genéticos: baseado nas sequências de DNA e relação filogenética das espécies (O'DONNELL *et al.*, 2000; SUMMERELL; SALLEH; LESLIE, 2003). Porém, atualmente o conceito de espécies baseados em características morfológicas combinadas com o estudo filogenéticos baseado na sequência gênicas são largamente utilizados para distinção de espécies do gênero (BABADOOST, 2018; CROUS *et al.*, 2021; SUMMERELL, 2019).

A abordagem de técnicas moleculares ganhou espaço nos últimos anos utilizando pesquisas baseadas em sequências de DNA e análises filogenéticas buscando uma identificação e separação precisa das espécies de *Fusarium* (CROUS *et al.*, 2021; CROUS *et al.*, 2022;

GEISER *et al.*, 2021; LOMBARD *et al.*, 2019; O'DONNELL *et al.*, 2022; YILMAZ *et al.*, 2021). Diversas regiões do DNA têm sido utilizadas para identificar espécies de *Fusarium* de importância agrícola e médica com base no sequenciamento dos genes fator de alongamento da tradução 1- α (EF1- α), calmodulina (CAL), maior subunidade da RNA polimerase I (RPB1), segunda maior subunidade da RNA polimerase II (RPB2) e β -tubulina (TUB) têm sido possível identificar corretamente espécies de *Fusarium* de importância agrícola e médica (NICOLLI *et al.*, 2020; O'DONNELL; CIGELNIK; NIRENBERG, 1998; O'DONNELL *et al.*, 2008; O'DONNELL *et al.*, 2013; XIA *et al.*, 2019).

No entanto, EF1- α e RPB2 são os dois principais genes usados em todo os trabalhos para identificação de espécies desse gênero (CROUS *et al.*, 2022; GEISER *et al.*, 2021; O'DONNELL *et al.*, 2022). Ambos oferecem alto poder discriminatório e estão bem representados em bases de dados públicos (CROUS *et al.*, 2021). O EF1- α é geralmente o marcador de identificação de primeira escolha, pois demonstra um alto nível de polimorfismo de sequências entre a maioria das espécies *Fusarium* (ZARRIN; GANJ; FARAMARZI, 2016), enquanto, o RPB2 permite uma discriminação aprimorada entres espécies intimamente relacionadas. Por exemplo, algumas espécies no complexo de espécies *Fusarium fujikuroi* que não são facilmente separadas usando EF1- α sozinho, pode ser resolvido com a concatenação das sequências com RPB2 (CROUS *et al.*, 2021; O'DONNELL *et al.*, 2000).

As análises filogenéticas moleculares publicadas indicaram que o gênero *Fusarium* são distribuídos entre 23 linhagens monofiléticas referidas como complexos de espécies (GEISEL *et al.*, 2021; O'DONNELL *et al.*, 2022). As espécies de maior preocupação para patologistas de plantas e micotoxicologistas, no entanto, estão aninhadas em seis complexos de espécies que são: complexo de espécie *Fusarium fujikuroi* (FFSC), complexo de espécie *Fusarium oxysporum* (FOSC), complexo de espécie *Fusarium solani* (FSSC), complexo de espécie *Fusarium incarnatum-equiseti* (FIESC), complexo de espécie *Fusarium sambucinum* (FSAMSC) e complexo de espécie *Fusarium tricinctum* (FTSC) (O'DONNELL *et al.*, 2022).

Apesar de *Fusarium oxysporum* raça 4 tropical (FOSC) ser atualmente a espécie de *Fusarium* mais preocupante para o cultivo de banana, outras espécies do gênero já foram reladas causando prejuízos para a cultura. Várias espécies dentro de FFSC foram relatadas como agentes etiológicos da podridão pós-colheita em frutos de banana em diferentes lugares no mundo, incluindo *F. verticillioides* (Sacc.) Nirenberg na Itália (MORETTI *et al.*, 2004), *F. proliferatum* (Matsush.) Nirenberg Georgia, no EUA (WALIULLAH *et al.*, 2022), *F. pseudocircinatum* no México (IÑIGUEZ-MORENO *et al.*, 2022), *F. sacchari* (E.J. Butler) W. Gams na Itália (RIOLO *et al.*, 2020) e *F. musae* na Hungria (MOLNÁR; BARTÓK; SZÉCSI,

2015). A presença de fungos do FFSC associados a frutos é de elevada importância devido aos indivíduos desse complexo serem fitopatogênicos e potenciais produtores de toxinas, e com isso fontes de contaminação dos alimentos (ESKOLA *et al.*, 2020).

2.6 Complexo de espécie de *Fusarium fujikuroi* (FFSC)

O complexo de espécie de *Fusarium fujikuroi* é um dos maiores e mais bem estudados complexos de espécies dentro do gênero exibindo várias ecologias (BAO *et al.*, 2023; YILMAZ *et al.*, 2021). É um grupo monofilético, cujas espécies são estabelecidas com base em relação filogenética, e corresponde em grande parte à antiga seção *Liseola* do gênero, definida taxonomicamente com base em características morfológicas (O'DONNELL; CIGELNIL; NIRENBERG, 1998; YILMAZ *et al.*, 2021). Atualmente, uma nova nomenclatura proposta “um fungo, um nome”, esse complexo foi renomeado como complexo de espécie de *Fusarium fujikuroi* (GEISER *et al.*, 2013). O complexo foi definido através do conceito filogenético (O'DONNELL; CIGELNIL; NIRENBERG, 1998; YILMAZ *et al.*, 2021).

Os conceitos morfológicos dentro da seção *Liseola* (atual FFSC) foram estabelecidos pela primeira vez por Wollenweber e Reinking (1935), agrupando espécies que produzem macroconídios em esporodóquios, microconídios em cadeia e/ou cabeças falsas e sem a presença de clamidósporos (LESLIE; SUMMERELL, 2006). Posteriormente, foram descritas várias espécies, nomeadamente *Fusarium dlamini* (MARASAS; NELSON; TOUSSOUN, 1985), *Fusarium nygamai* (BURGESS; TRIMBOLI, 1986) e *Fusarium napiforme* (MARASAS *et al.*, 1987) que se assemelhavam as características da seção *Liseola*, porém apresentava a presença de clamidósporos. Kwasna, Chelkowski, Zajkowski (1991) propôs a seção *Dlaminia* para acomodar três espécies. No entanto, estudos moleculares subsequentes mostraram que a seção *Liseola* era parafilética, porque três espécies formadas de clamidósporos classificadas na seção *Dlaminia* estão filogeneticamente aninhadas na seção *Liseola* (O'DONNELL; CIGELNIL; NIRENBERG, 1998). Uma clara explicação das complicações do uso de caracteres fenotípicos para prever parentesco e histórias evolutivas, onde a morfologia frequentemente exibe discórdia com os dados de sequência de DNA (YILMAZ *et al.*, 2021).

Uma investigação filogeográfica das espécies do FFSC conduzida por sequências de DNA de quatro genes, identificou três clados distintos de espécies com supostas origens nos continentes americano, africano e asiático (O'DONNELL; CIGELNIL; NIRENBERG, 1998). Estudos subsequentes dividiram o clado africano em duas linhagens distintas e altamente

suportadas, denominadas como clado africano A e B (SANDOVAL-DENIS; SWART, CROUS, 2018).

O FFSC contém atualmente mais de 60 espécies formalmente descritas, no entanto, várias espécies filogeneticamente distintas dentro deste complexo ainda não foram nomeadas oficialmente (YILMAZ *et al.*, 2021). Atualmente, as espécies dentro do FFSC estão sendo extensivamente estudadas devido à sua capacidade de causar doenças em plantas, produzir micotoxinas (por exemplo, fumonisinas, moniliformina e tricotecenos) e sendo relatadas causando infecções oportunistas em humanos (AL-HATMI *et al.*, 2019; BAO *et al.*, 2023, GASSE *et al.*, 2023; KVAS *et al.*, 2009).

2.7 Micotoxinas produzidas por fungos do FFSC

As micotoxinas são metabólitos tóxicos de baixo peso molecular, são originários de fungos micotoxigênicos como *Aspergillus*, *Alternaria*, *Fusarium* e *Penicillium* spp. Até o momento, mais de 400 micotoxinas já foram identificadas mundialmente, porém apenas cerca de 30 têm sido detectadas em alimentos com maior frequência (HAMAD *et al.*, 2023). Entre eles, desoxinivalenol (DON), zearalenona (ZEN), aflatoxina (AF), ocratoxina A (OTA), fumonisina (FBs) e patulina (PAT) são considerados os mais prevalentes em todo o mundo (FERRARA; PERRONE; GALO, 2022).

Ocorrências dessas micotoxinas causa deterioração e redução da qualidade e segurança dos alimentos durante diferentes etapas da cadeia produtivas como pré-colheita, processamento, pós-colheita e transporte. Assim, sua presença em alimentos e subprodutos é considerada um risco potencial à saúde humana e animal, e causam perdas econômicas significativas (CHIOTTA *et al.*, 2020). Todas essas micotoxinas são metabólitos secundários naturais com propriedades tóxicas, incluindo carcinogenicidade, genotoxicidade, imunotoxicidade, mutagenicidade, teratogenicidade (PANDEY *et al.*, 2023).

Os membros do FFSC produzem uma ampla variedade de micotoxinas, incluindo fumonisinas (FBs), moniliformina (MON), beauvericina (BEA), enniatinas (ENNs), ácido fusárico (AF), fusaproliferina (FUP) (CHIOTTA *et al.*, 2020; JAJIĆ *et al.*, 2019; O'DONNELL *et al.*, 2018; NICOLLI *et al.*, 2020). Entre esses metabólitos, os FBs são os mais frequentemente detectados associados aos membros do FFSC, com concentrações relativamente altas, especialmente no arroz e no milho (QIU *et al.*, 2020). No entanto, existe relatos de uma alta incidência em frutos, sendo identificados em figos secos na Turquia (KARBANCIOGLU-

GÜLER; HEPERKAN, 2009) e em frutos de bananas importadas na Arábia Saudita (ALGLUTHAYMI; BAHKALI, 2015) e na China (XIE *et al.*, 2021).

As fumosininas são produzidas principalmente por *F. verticillioides* e *F. proliferatum*, contudo, outros membros do FFSC, como *F. fujikuroi*, *F. nygamai*, *F. anthophilum*, *F. napiforme* e *F. subglutinans* também podem produzir esse metabolito, representando grande riscos para a segurança alimentar (CHIOTTA *et al.*, 2020; POZZI *et al.*, 2002; QIU *et al.*, 2020; SANTIN *et al.*, 2001; XIE *et al.*, 2021). Até o momento, são conhecidos um total de 28 análogos, que podem ser divididos em quatro séries principais: A, B, C e P, sendo que a forma mais comum pertence à série B (CAO *et al.*, 2020). A fumonisina B1 (FB1) é a mais comumente encontrada e é o análogo de fumonisina mais tóxico (XIE *et al.*, 2021). Com base em evidências toxicológicas, a “*International Agency for Research on Cancer*” (IARC) classificou o FB1 como cancerígeno para humanos (CAO *et al.*, 2020; XIE *et al.*, 2021).

O fígado, os rins e o trato intestinal são órgãos alvo da toxicidade do FB1 na maioria das espécies animais (CAO *et al.*, 2020). Um estudo recente confirmou a toxicidade intestinal induzida por FB1 em camundongos (LI *et al.*, 2020). O FB1 é responsável por leucoencefalomalácia (LEME) em equinos (MARASAS *et al.*, 1988), síndrome de edema pulmonar e hidrotórax em suínos (HARRINSON *et al.*, 1990); e está associado ao câncer de esôfago e defeito do tubo neural em humanos (MISSMER *et al.*, 2006).

A produção de fumonisinas é regulada por vários genes, que formam o agrupamento genético denominado agrupamento de genes biossintéticos das fumonisinas (cluster FUM). O cluster FUM consiste em 16 genes que codificam enzimas biossintéticas, proteínas de transporte e um fator de transcrição (PROCTOR *et al.*, 2003; 2013). Os genes do cluster são FUM1, FUM2, FUM3, FUM6, FUM7, FUM8, FUM10, FUM 11, FUM 13, FUM 14, FUM15, FUM16, FUM17, FUM18, FUM19 e FUM21. O número, ordem e orientação dos genes dentro do cluster FUM é dependente da espécie produtor (PROCTOR *et al.*, 2008).

O gene FUM1 codifica uma poliketídeo sintase que catalisa o primeiro passo da biossíntese das fumonisinas. A interrupção desse gene resulta na redução de mais de 99% da produção de fumonisinas na cultura. FUM6 possui elevada similaridade com membros da enzima citocromo P450 monoxigenase, ligada a uma P450 redutase NADPH dependente. FUM8 codifica uma proteína semelhante ao grupo das aminotransferases, que catalisa a condensação dos aminoácidos em acetil coenzima A. Os genes FUM7, FUM10, FUM11 e FUM14 estão envolvidos na esterificação do ácido tricarboxílico ou na biossíntese desses grupos presentes na estrutura química das fumonisinas. FUM13 codifica uma proteína similar às redutases com cadeia curta, apresentando atividade carbonil redutase. Essa enzima catalisa a

redução da carbonila presente no carbono 3 a uma hidroxila. Todos estes nove genes são estritamente ligados à biossíntese das fumonisinas. A interrupção dos mesmos, proporciona interrupção da produção dessas toxinas (BUTCHKO; PLATTNER; PROCTOR, 2006; PROCTOR *et al.*, 2003; PROCTOR *et al.*, 2008).

A detecção e quantificação de micotoxinas em alimento pode ser realizada a partir de testes de anticorpos e técnicas de cromatografia que incluem a cromatografia de camada delgada (TLC – Thin Layer Chromatography), cromatografia líquida de alta performance (HPLC – High-Performance Liquid Chromatography) e cromatografia gasosa (GC – Gas Chromatography) (STUMPF, 2011).

O método cromatográfico HPLC é o mais utilizado para detectar e quantificar micotoxinas (ALGHUTHAYMIV; BAHKALI, 2015; LI *et al.*, 2013; NICOLLI *et al.*, 2020; PROCTOR *et al.*, 2008). Porém, esse método exige equipamentos de valor elevado e mão de obra qualificada, sendo um método de alto custo, inviabilizando sua execução em muitos laboratórios. Com isso, o ensaio de reação em cadeia da polimerase (PCR) com oligonucleotídeos específicos para detecção de genes associados a biossíntese das micotoxinas em isolados de *Fusarium* tornou-se uma ferramenta poderosa para a identificação de espécies toxigênicas (MULÉ *et al.*, 2004), reduzindo os custos de execução.

A presença dos genes FUM1 e FUM8 em isolados de *Fusarium* podem ser identificados por meio da utilização dos pares de primers FUM53R/ FUM53F e VERTF1/VERTF2, respectivamente. O gene FUM 1, e outros genes desta via biossintética, foram detectados em isolados de *F. verticillioides* através do uso desses oligonucleotídeos (MAHESHWAR; MOHARRAM; JANARDHA, 2009; PATIÑO *et al.*, 2004; SÁNCHEZ-RANGEL; SANJUAN-BADILLO; PLASENCIA, 2005).

A identificação previa da presença de genes associados a biossíntese de micotoxinas consiste em uma avaliação prévia do potencial toxigênico de cada isolado, sendo uma etapa de seleção de isolados para as etapas posteriores de detecção e quantificação das micotoxinas. O uso de PCR com oligonucleotídeos específicos consiste em uma técnica rápida e confiável, de fácil de execução e tem a capacidade de identificar simultaneamente diversos isolados com a presença do gene FUM com precisão (MAHESHWAR; MOHARRAM; JANARDHA, 2009).

As espécies de *Fusarium* com elevado potencial de produção de toxinas já foram relatadas em diversas culturas de interesse econômico (CHAKRABARTI; GHOSAL, 1986; IBRAHIM *et al.*, 2020; SANCHEZ-RANGEL; ANDREA SANJUAN-BADILLO; JAVIER PLASENCIA 2005; ZAKARIA *et al.*, 2012), porém a avaliação do potencial micotoxigênico é

focada apenas nas espécies isoladas de grãos de cereais, com pouca atenção dada aos isolados obtidos de outro substrato (SHI *et al.*, 2020).

2.8 Resistência de fungos a fungicidas

Os fungicidas são amplamente utilizados em sistemas agrícolas para controlar doenças e salvaguardar o rendimento e a qualidade das culturas (BECKERMAN *et al.*, 2023; HERMANN; STENZEL, 2019; LUCAS; HAWKINS; FRAAIJE, 2015). No entanto, nem sempre os resultados são favoráveis quando as doenças de plantas são manejadas com fungicidas, devido a fatores como escolha errada do princípio ativo, dose inadequada, cobertura de pulverização inadequada, condições climáticas desfavoráveis e redução na sensibilidade do fungo alvo (HOLLOMON, 2015; THIND, 2022). Entre estes, a redução da sensibilidade tornou-se comum após a introdução de fungicidas com mecanismos específicos de ação (BECKERMAN *et al.*, 2023; HOLLOMON, 2015).

Resistência a fungicida é definida como a redução hereditária da sensibilidade de um fungo a um produto químico específico (DELP; DEKKER, 1985; MA; MICHAILIDES, 2005). O surgimento de populações de fungos com resistência a fungicidas é um grande desafio, pois leva à perda da eficácia do controle. Por esta razão, os produtores comumente aumentam o número de aplicações de fungicidas para conseguir um controle eficaz da doença. Esta prática pode levar ao aumento da pressão de seleção, aumentando o número de isolados resistentes na população, o que, por sua vez, resulta num controle ineficaz (LEITE *et al.*, 2020).

A resistência a fungicidas acarreta sérias consequências a todos os segmentos da cadeia produtiva, desde as empresas fabricantes que perdem a confiabilidade de seus clientes, passando pelos produtores agrícolas, que ao perceberem que o fungicida não controla a doença, tendem aumentar o número de aplicações e as dosagens, chegando aos consumidores, que recebem um produto com resíduos de fungicidas e preços elevados (GHINI; KIMATI, 2000).

Os fungicidas têm sido utilizados na agricultura há mais de um século e inicialmente não houve relatos de perdas de eficácia no campo. No geral, os casos de resistência confirmada aos fungicidas permaneceram raros até a década de 1970, quando novas classes de produtos químicos antifúngicos com modos de ação específicos foram introduzidos e tornaram-se amplamente utilizados (BECKERMAN *et al.*, 2023; HOLLOMON, 2015; LUCAS; HAWKINS; FRAAIJE, 2015; THIND, 2022). Desde então, tem havido uma incidência cada vez maior de casos notificados em uma ampla gama de fungos fitopatogênicos (FRAC, 2020; YIN *et al.*, 2023).

A ocorrência de isolados resistentes aos fungicidas pode ocorrer depois de poucos anos após esses compostos serem introduzidos no mercado devido a seu uso intensivo. A capacidade de determinar esse risco de resistência é de grande ajuda na seleção dos produtos químicos a serem utilizados e no estabelecimento de estratégias para aumentar sua durabilidade (HOLLOMON, 2015).

O genoma fúngico apresenta grande plasticidade e pode conter vários polimorfismos (CUOMO *et al.*, 2007). Uma população pode conter indivíduos raros, estáveis e distintos geneticamente, aptos a sobreviverem em condições de impacto metabólico não favoráveis, e que em resposta a uma pressão de seleção, podem aumentar nessa população ao custo dos indivíduos sensíveis. A ocorrência de resistência a um fungicida, irá depender de qual mecanismo de resistência está relacionado. Se o alvo do fungicida for um ponto específico, um único ponto de mutação causando uma troca de aminoácido, pode rápida e efetivamente bloquear a ligação do fungicida ao sítio-alvo, geralmente causando altos níveis de resistência (HOLLOMON, 2015).

A resistência a fungicidas pode acontecer por diversos mecanismos. Até o momento, os mecanismos moleculares comuns de resistência aos fungicidas incluem: (i) mutações no alvo do fungicida, levando a uma diminuição da afinidade do fungicida para a proteína alvo; (ii) superexpressão ou duplicação do gene alvo do fungicida, levando ao aumento da produção da proteína-alvo; (iii) superexpressão do cassete de ligação ao ATP (ABC) ou dos principais transportadores da superfamília facilitadora (MFS) que codificam as bombas de efluxo; e (iv) alterações epigenéticas, como modificações na cromatina ou histonas, alterando a expressão gênica, resultando na adaptação dos fungos ao estresse fungicida. Além disso, a desintoxicação ou metabolismo do fungicida e outros mecanismos desconhecidos também podem ser responsáveis pela resistência aos fungicidas. Entre os vários mecanismos identificados para resistência a fungicidas, as mutações no local alvo são os mais comuns em fungos fitopatogênicos. Geralmente, as mutações levam à diminuição da capacidade de ligação dos fungicidas às suas proteínas alvo, afetando assim a atividade fungicida (YIN *et al.*, 2023).

O conhecimento dos mecanismos moleculares de resistência permite o monitoramento das populações não-sensíveis dos fungos de maneira rápida e eficaz, permitindo direcionar a utilização dos princípios ativos e grupos de fungicidas (HOLLOMON, 2015; MA; MICHAILIDES, 2005; YIN *et al.*, 2023).

O desenvolvimento da resistência aos fungicidas é um processo evolutivo na população do patógeno. Estas mudanças evolutivas podem proporcionar vantagens ou desvantagens para a sobrevivência, crescimento e reprodução do patógeno sob certas condições,

incluindo estresse de seleção de fungicidas. Mudanças vantajosas resultam em sua progênie uma porcentagem maior da população nas gerações subsequentes, o que provavelmente afetará a eficácia dos fungicidas em condições de campo (YIN *et al.*, 2023).

Portanto, é importante considerar que a resistência pode ter um custo de adaptabilidade relacionado à capacidade do isolado de se desenvolver, reproduzir, sobreviver e causar doença (ISHII, 2015; MA; MICHAILIDES, 2005). Nesse contexto, a adaptabilidade pode ser composta por vários componentes que correspondem a diferentes estágios do ciclo de vida do patógeno, como crescimento micelial, produção de esporos, dispersão de esporos, eficiência de infecção e capacidade de sobreviver entre as estações de cultivo, dentre outros (MIKABERIDZE; MCDONALD, 2015).

Na ausência ou em baixas doses de fungicida, os indivíduos resistentes podem ser menos competitivos que os sensíveis (ISHII, 2015; MA; MICHAILIDES, 2005). Por outro lado, alguns isolados resistentes podem persistir na população por muitos anos, mesmo com a interrupção do uso do fungicida. Além disso, a presença ou ausência de penalidades de adaptabilidade também pode ser usada para inferir se os isolados contendo mutações associadas à resistência diminuem ou persistem entre as estações de crescimento (HAWKINS; FRAAIJE, 2018). Assim, isolados resistentes que têm pouco ou nenhum custo de adaptabilidade são mais persistentes no campo. Isolados resistentes com um custo de adaptabilidade não prevalecem no ambiente e a ausência de pressão seletiva pode, portanto, reduzir as suas prevalências ou mesmo fazê-los desaparecer (LI *et al.*, 2020).

No Brasil, apesar de não existirem fungicidas registrados para o controle de *Fusarium* na pós-colheita da banana, esse gênero está exposto a princípios ativos utilizados nessa fase, com destaque para imazalil. Este fungicida foi introduzido no mercado em 1972, pertence ao grupo químico dos imidazoles, sendo sistêmico com ação protetora e curativa. Apresenta um mecanismo específico de ação, a inibição da biossíntese dos esteróis (SBI) e por isso pertence ao grupo dos inibidores da demetilação (DMI) (FRAC, 2023; STENZEL; VORS, 2019; ZIOGAS; MALANDRAKIS, 2015).

Esteróis são constituintes essenciais na membrana celular de fungos, regulando sua estabilidade e permeabilidade. Portanto, a biossíntese de esterol é um alvo importante na inibição do crescimento fúngico. Fungicidas DMI inibem a demetilação do esterol C14 durante o processo de formação de esterol em fungos. A demetilação do lanosterol C14 é mediada por uma função mista de citocromo oxigenase P450, que é uma espécie de hemoproteína. DMIs ligam-se ao ferro do citocromo P450 por um átomo de nitrogênio e inibem a ligação de O₂ e sua transferência para o grupo metílico lanosterol C14, que é a principal fase no processo de

demetilação do lanosterol C14. A inibição da demetilação resulta no desequilíbrio entre as membranas lipídicas, com a inibição da acumulação de fosfolípidos e ácidos graxos livres que atingem níveis tóxicos aos fungos (STENZEL; VORS, 2019; ZIOGAS; MALANDRAKIS, 2015).

Estudos sobre os mecanismos bioquímicos envolvidos na resistência a DMIs relatam uma variedade de modelos para aquisição de resistência: (a) a sobrevivência de células mutantes com esteróis metílicos C14 anormais nas suas membranas plasmáticas (deficiência na demetilação C14); (b) diminuição na acumulação intracelular do fungicida mediada pelo aumento do efluxo do fungicida dependente de energia; (c) modificação do sítio-alvo no gene demetilase C14 (CYP51), resultando em diminuição da afinidade a fungicidas; (d) superexpressão do gene-alvo durante a formação do ergosterol; e (e) múltipla *cyp51s*, que parece reduzir os custos de adaptabilidade associados com as alterações na estrutura de demetilase C14 ou superexpressão do gene codificante e aumento no espectro da resistência a fungicidas. Dentre os mecanismos de resistência aos DMIs, a mutação pontual do gene CYP51 tem sido relatada para diversos fitopatógenos (YIN *et al.*, 2023; ZIOGAS; MALANDRAKIS, 2015).

Os estudos de resistência a imazalil têm se concentrado em relação aos fungos *Penicillium digitatum* (Pers.) Sacc. e *P. italicum* Wehmer, causadores das podridões verde e azul em citros, respectivamente (ECKERT; SIEVERT; RATNAYAKE, 1994; ERASMUS *et al.*, 2015; SUN *et al.*, 2011). Estudos envolvendo a resistência a imazalil em patógenos pós-colheita da banana são escassos. Em pesquisa realizada no Brasil com 218 isolados de *C. musae*, foram constatados isolados sensíveis e com baixa sensibilidade a imazalil, mas esse fungicida foi eficaz no controle da doença causada por isolados com baixa sensibilidade (LEITE *et al.*, 2020). Até o momento, o único estudo envolvendo a análise da sensibilidade a imazalil em populações de *Fusarium* de banana foi realizado com isolados de *F. moniliforme* Sheld. (agora *F. verticillioides*) e *F. pallidoroseum* (Cooke) Sacc. (agora *F. incarnatum*) obtidos de frutos com sintomas de podridão da coroa, importadas pela Inglaterra das Ilhas Barlavento, que apresentaram valores de concentração do fungicida para inibir 50% do crescimento micelial (CE₅₀) de 0,04 e 0,45 µg/mL, considerados muito baixos, indicando elevada sensibilidade ao fungicida (JOHANSON; BLAZQUEZ, 1992).

O gênero *Fusarium* é considerado com baixo risco de desenvolvimento de resistência a fungicidas (FRAC, 2019), mas aplicações contínuas de DMIs, considerados de médio risco de resistência (FRAC, 2023), podem resultar em populações resistentes em vários patógenos fúngicos, incluindo *Fusarium* (YIN *et al.*, 2023).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD-ALLA, M. A.; EL-GAMAL, N. G.; EL-MOUGY, N. S.; ABDEL-KADER, M. M. Post-harvest treatments for controlling crown rot disease of Williams banana fruits (*Musa acuminata* L.) in Egypt. **Plant Pathology and Quarantine**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2014.
- AL-DAIRI, M.; PATHARE, P. B.; AL-YAHYAI, R.; JAYASURIYA, H.; AL-ATTABI, Z. Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: A review. **Trends in Food Science & Technology**, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.003>
- ALGHUTHAYMI, M. A.; BAHKALI, A. H. Toxigenic profiles and trinucleotide repeat diversity of *Fusarium* species isolated from banana fruits. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v. 29, n. 2, p. 324-330, 2015.
- AL-HATMI, A. M. S.; SANDOVAL-DENIS, M.; NABET, C.; AHMED, S. A.; DEMAR, M.; NORMAND, A. C.; DE HOOG, G. S. *Fusarium volatile*, a new potential pathogen from a human respiratory sample. **Fungal Systematics and Evolution**, v. 4, n. 1, p. 171-181, 2019.
- ALVINDIA, D. G.; KOBAYASHI, T.; YAGUCHI, Y.; NATSUAKI, K. T. Symptoms and the associated fungi of postharvest diseases on non-chemical bananas imported from the Philippines. **Japanese Journal of Tropical Agriculture**, v. 44, n. 2, p. 87-93, 2000.
- AMARO, A. A.; FAGUNDES, P. R. S. Aspectos econômicos e comercialização. **O agronegócio da banana. Brasília: Embrapa**, p. 727-772, 2016.
- BABADOOST, M. *Fusarium*: Historical and continued importance. *Fusarium—Plant Diseases, Pathogen Diversity, Genetic Diversity*, **Resistance and Molecular Markers**, 2018.
- BAO, Y.; AKBAR, S.; YAO, W.; XU, Y.; XU, J.; POWELL, C. A.; ZHANG, M. Genetic Diversity and Pathogenicity of *Fusarium fujikuroi* Species Complex (FFSC) Causing Sugarcane Pokkah Boeng Disease (PBD) in China. **Plant Disease**, v. 105, n. 5, p. 1299-1309, 2023
- BECKERMAN, J.; PALMER, C.; TEDFORD, E.; YPEMA, H. Fifty years of fungicide development, deployment, and future use. **Phytopathology**, v. 113, n. 4, p. 694-706, 2023.
- BORGES, A. L.; SOUZA, L. S.; ALVES, E. J. Exigências edafoclimáticas. In: CORDEIRO, Z. J. M. *Banana: Produção: aspectos técnicos*. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000. (Frutas do Brasil, 1).
- BURGESS, L. W.; TRIMBOLI, D. Characterization and distribution of *Fusarium nygamai*, sp. nov. **Mycologia**, v. 78, n. 2, p. 223-229, 1986.
- BUTCHKO, R. AE; PLATTNER, R. D.; PROCTOR, R. H. Deletion analysis of FUM genes involved in tricarballic ester formation during fumonisin biosynthesis. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 54, n. 25, p. 9398-9404, 2006.

CAO, C.; ZHU, X.; LI, X.; OUYANG, H.; WANG, K.; LI, X. Assessment of ionic homeostasis imbalance and cytochrome P450 system disturbance in mice during fumonisin B1 (FB1) exposure. **Chemosphere**, v. 251, p. 126393, 2020.

CHAKRABARTI, D. K.; GHOSAL, S. H. I. B. N. A. T. H. Occurrence of free and conjugated 12, 13-epoxytrichothecenes and zearalenone in banana fruits infected with *Fusarium moniliforme*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 217-219, 1986.

CHIOTTA, M. L.; FUMERO, M. V.; CENDOYA, E.; PALAZZINI, J. M.; ALANIZ-ZANON, M. S.; RAMIREZ, M. L.; CHULZE, S. N. Toxigenic fungal species and natural occurrence of mycotoxins in crops harvested in Argentina. **Revista Argentina de Microbiología**, v. 52, n. 4, 339-347, 2020

CORDEIRO, Z. J. M.; FANCELLI, M., RITZINGER, C. H. S. P., FERREIRA, D. M. V., HADDAD, F. **Manual de identificação de doenças, nematoides e pragas na cultura da Bananeira**. Brasília: Embrapa, 2017.

CORDEIRO, Z. J. M.; MATOS, A. P. de; KIMATI, H. Doenças da bananeira (*Musa* spp.). In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIM FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas. 5. ed. São Paulo: Ceres, v. 2, p. 109-123, 2016.

COSTA, M. M.; MELO, M. P.; GUIMARÃES, E. A.; VEIGA, C. M. O.; CARMO SANDIN, F.; MOREIRA, G. M.; PFENNING, L. H. Identification and pathogenicity of *Fusarium* species associated with pokkah boeng of sugarcane in Brazil. **Plant pathology**, v. 68, n. 7, p.1350-1360, 2019.

CROUS, P. W.; SANDOVAL-DENIS, M.; COSTA, M. M.; GROENEWALD, J. Z.; VAN IPEREN, A. L.; STARINK-WILLEMSE, M.; ...; THINES, M. *Fusarium* and allied fusarioid taxa (FUSA). 1. **Fungal Systematics and Evolution**, v. 9, n. 1, p. 161-200, 2022.

CROUS, P. W.; LOMBARD, L.; SANDOVAL-DENIS, M.; SEIFERT, K. A.; SCHROERS, H. J.; CHAVERRI, P.; THINES, M. *Fusarium*: more than a node or a foot-shaped basal cell. **Studies in mycology**, v. 98, p. 100116, 2021.

CUOMO, C. A.; GÜLDENER, U.; XU, J. R.; TRAIL, F. TURGEON, B. G., DI PIETRO, A., KISTLER, H. C. The *Fusarium graminearum* genome reveals a link between localized polymorphism and pathogen speciation. **Science**, v. 317, n. 5843, p. 1400-1402, 2007

DAUNDASEKERA, M.; JOYCE, D. C.; AKED, J.; ADIKARAM, N. K. B. Ethylene production by *Colletotrichum musae* in vitro. **Physiological and molecular plant pathology**, v. 62, n. 1, p. 21-28, 2003.

DELP, C.; DEKKER, J. Fungicide resistance: Definitions and use of terms. **EPPO Bulletin**, v. 15, n. 3, p. 333-335, 1985.

DRENTH, A.; KEMA, G. The vulnerability of bananas to globally emerging disease threats. **Phytopathology**, v. 111, n. 12, p. 2146-2161, 2021.

DU, Y. X.; CHEN, F. R.; SHI, N. N.; RUAN, H. C. First report of *Fusarium chlamydosporum* causing banana crown rot in Fujian Province, China. **Plant Disease**, v. 101, n. 6, p. 1048, 2017.

ECKERT, J. W.; SIEVERT, J. R.; RATNAYAKE, M. Reduction of imazalil effectiveness against citrus green mold in California packinghouses by resistant biotypes of *Penicillium digitatum*. **Plant Disease**, v. 78, n. 10, p. 971-974, 1994.

ERASMUS, A.; LENNOX, C. L.; KORSTEN, L.; LESAR, K.; FOURIE, P. H. Imazalil resistance in *Penicillium digitatum* and *P. italicum* causing citrus postharvest green and blue mould: Impact and options. **Postharvest Biology and Technology**, v. 107, n. 1, p. 66-76, 2015.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). FAOSTAT. Rome: Food and Agriculture Organization, 2024. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>. Acesso em: 12 jan. 2024

FARUK, S.; SOYLU, S. Determination of postharvest fungal disease agents on banana fruits growing in Mersin province. **Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi**, v. 26, n. 2, p. 399-411, 2021.

FERRARA, M.; PERRONE, G.; GALLO, A. Recent advances in biosynthesis and regulatory mechanisms of principal mycotoxins. **Current Opinion in Food Science**, p. 100923, 2022.

FERREIRA, C. F.; SILVA, S. de O. e; AMORIM, E. P.; SEREJO, J. A. dos S. (Ed.). O agronegócio da banana. Brasília, DF: Embrapa, 2016. 832 p.

FRAC (FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE). **FRAC Code List ©*2023**: Fungal control agents sorted by cross resistance pattern and mode of action. Brussels: FRAC, 2023. 18 p. Disponível em: <https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-code-list/frac-code-list-2023---final.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FRAC (FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE). **List of first confirmed cases of plant pathogenic organisms resistant to disease control agents**. Brussels: FRAC, 2020. 76 p. Disponível em: https://www.frac.info/docs/default-source/publications/list-of-resistant-plant-pathogens/list-of-first-confirmed-cases-of-plant-pathogenic-organisms-resistant-to-disease-control-agents_05_2020.pdf

FRAC (FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE). **Pathogen risk list**. Brussels: FRAC, 2019. 7 p. Disponível em: <https://www.frac.info/docs/default-source/publications/pathogen-risk/frac-pathogen-list-2019.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GASSER, K.; Sulyok, M.; SPANGL, B.; KRSKA, R.; STEINKELLNER, S.; HAGE-AHMED, K. *Fusarium proliferatum* secondary metabolite profile in vitro depends on the origin of the isolates and is clearly reduced in stored garlic. **Postharvest Biology and Technology**, v. 200, p. 112312, 2023.

GEISER, D. M.; AL-HATMI, A. M.; AOKI, T.; ARIE, T.; BALMAS, V.; BARNES, I.; VILJOEN, A. Phylogenomic analysis of a 55.1-kb 19-gene dataset resolves a monophyletic *Fusarium* that includes the *Fusarium solani* species complex. **Phytopathology**, v. 111, n. 7, p. 1064-1079, 2021.

GEISER, D. M.; AOKI, T.; BACON, C. W.; BAKER, S. E.; BHATTACHARYYA, M. K.; BRANDT, M. E.; ZHANG, N. One fungus, one name: defining the genus *Fusarium* in a scientifically robust way that preserves longstanding use. **Phytopathology**, v. 103, n. 5, p. 400-408, 2013.

GHINI, R.; KIMATI, H. **Resistência de fungos a fungicidas**. Jagariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 78 p.

GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, V.; MOSCOSO-RAMÍREZ, P. A.; ORTÍZ-GARCÍA, C. F.; SÁNCHEZ-SOTO, S.; LARA-VIVEROS, F. M. Preventive and Curative Antifungal Activity of the Sodium Silicate on Postharvest Crown Rot in Banana cv. Enano Gigante. **Silicon**, p. 1-11, 2023.

HAMAD, G. M.; MEHANY, T.; SIMAL-GANDARA, J.; ABOU-ALELLA, S.; ESUA, O. J.; ABDEL-WAHHAB, M. A.; HAFEZ, E. E. A review of recent innovative strategies for controlling mycotoxins in foods. **Food Control**, v. 144, p. 109350, 2023.

HARRISON, L. R.; COLVIN, B. M.; GREENE, J. T.; NEWMAN, L. E.; COLE JR, J. R. Pulmonary edema and hidrothorax in swine produced by fumonisin B1 a toxic metabolite of *Fusarium moniliforme*. **Journal of Veterinary Diagnostic Investigation**, v.2, n.3, p.217-221, 1990.

HAWKINS, N. J.; FRAAIJE, B. A. Fitness penalties in the evolution of fungicide resistance. **Annual Review of Phytopathology**, v. 56, p. 339-360, 2018.

HERMANN, D.; STENZEL, K. FRAC node of action: Classification and resistance risk of fungicides. In: JESCHKE, P.; WITSCHKE, M.; KRÄMER, W.; SCHIRMER, U. (ed.). **Modern crop protection compounds**. Vol. 2: Fungicides. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2019. p. 589-608.

HOLLOMON, D. W. Fungicide resistance: 40 Years on and still a major problem. In: ISHII, H.; HOLLOMON, D. W. (ed.). **Fungicide resistance in plant pathogens: Principles and a guide to practical management**. Tokyo: Springer, 2015. p. 3-11.

HUANG, T.E.; OU, J. H.; HUNG, N.; YEH, L. K.; MA, D. H. K.; TAN, H. Y.; HSIAO, C. H. *Fusarium* Keratitis in Taiwan: Molecular Identification, Antifungal Susceptibilities, and Clinical Features. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 5, p. 476, 2022.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa>. Acesso em: 16 jan. 2024

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Pesquisa de orçamento familiar**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pof>. Acesso em: 16 jan. 2024

IBRAHIM, N. F.; MOHD, M. H.; MOHAMED NOR, N. M. I.; ZAKARIA, L. Mycotoxigenic potential of *Fusarium* species associated with pineapple diseases. **Archives of Phytopathology and Plant Protection**, v.53, p. 217-229, 2020.

IÑIGUEZ-MORENO, M.; CALDERÓN-SANTOYO, M.; BARROS-CASTILLO, J. C.; MISS-ZACARÍAS, D. M.; DÍAZ, J. A.; RAGAZZO-SÁNCHEZ, J. A. Nanofibers added with

citral: Characterization and their application to postharvest control of *Fusarium pseudocircinatum* in bananas. **Journal of Food Processing and Preservation**, e17188, 2022.

ISHII, H. Stability of resistance. In: ISHII, H.; HOLLOMON, D. W. (ed.). **Fungicide resistance in plant pathogens**. Tokyo: Springer Japan, 2015. p. 35-48.

JAJIĆ, I.; DUDAŠ, T.; KRSTOVIĆ, S.; KRSKA, R.; SULYOK, M.; BAGI, F.; STANKOV, A. Emerging *Fusarium* mycotoxins fusaproliferin, beauvericin, enniatins, and moniliformin in Serbian maize. **Toxins**, v. 11, n. 6, p. 357, 2019.

JOHANSON, A.; BLAZQUEZ, B. Fungi associated with banana crown rot on field-packed fruit from the Windward Islands and assessment of their sensitivity to the fungicides thiabendazole, prochloraz and imazalil. **Crop Protection**, v. 11, n. 1, p. 79-83, 1992. DOI: 10.1016/0261-2194(92)90084-I.

KAMEL, M. A. M.; CORTESI, P.; SARACCHI, M. Etiological agents of crown rot of organic bananas in Dominican Republic. **Postharvest Biology and Technology**, v. 120, p. 112-120, 2016.

KARBANCIOGLU-GÜLER, F.; HEPERKAN, D. Natural occurrence of fumonisin B1 in dried figs as an unexpected hazard. **Food and chemical toxicology**, v. 47, n. 2, p. 289-292, 2009.

KHAN, I. H.; JAVAID, A. First report of *Curvularia lunata* causing postharvest fruit rot of banana in Pakistan. **International Journal of Agriculture And Biology**, v. 24, p. 1621-1624, 2020.

KNIGHT, C. Pathogenicity of Some Fungi Associated with Crown Rot of Bananas. **Phytopathologische Zeitschrift**, v. 104, n. 1, p. 13-18, 1982.

KVAS, M.; MARASAS, W. F. O.; WINGFIELD, B. D.; WINGFIELD, M. J.; STEENKAMP, E. T. Diversity and evolution of *Fusarium* species in the *Gibberella fujikuroi* complex. **Fungal Diversity**, v. 34, p. 1-21, 2009.

KWASNA, H.; CHELKOWSKI, J.; ZAJKOWSKI, P. Grzyby (Mycota), tom XXII. Sierpik (*Fusarium*). Polska Akademia Nauk. **Flora Polska, Warszawa-Krakow, Poland**, 1991.

LAPEYRE DE BELLAIRE, L.; CHILLET, M.; DUBOIS, C.; MOURICHON, X. Importance of different sources of inoculum and dispersal methods of conidia of *Colletotrichum musae*, the causal agent of banana anthracnose, for fruit contamination. **Plant pathology**, v. 49, n. 6, p. 782-790, 2000.

LASSOIS, L.; LAPEYRE DE BELLAIRE, L. Crown rot disease of bananas. In: Postharvest decay. **Academic Press**, p. 103-130, 2014.

LEITE, I. C. H. L.; SILVA, R. A.; SANTOS, J. E. C. C.; FREITAS-LOPES, R. L.; CÂMARA, M. P. S.; MICHEREFF, S. J.; LOPES, U. P. Analysis of *Colletotrichum musae* populations from Brazil reveals the presence of isolates with high competitive ability and reduced sensitivity to postharvest fungicides. **Plant Pathology**, v. 69, n. 8, p. 1529-1539, 2020.

LESLIE, J. F.; SUMMERELL, B. A. *Fusarium* laboratory workshops—A recent history. **Mycotoxin Research**, v. 22, n. 2, p. 73-74, 2006.

LI, X.; CAO, C.; ZHU, X.; LI, X.; WANG, K. Fumonisin B1 exposure triggers intestinal tract injury via activating nuclear xenobiotic receptors and attracting inflammation response. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115461, 2020.

LI, Y.; TSUJI, S. S.; HU, M.; CÂMARA, M. P. S.; MICHEREFF, S. J.; SCHNABEL, G.; CHEN, F. Characterization of difenoconazole resistance in *Lasiodiplodia theobromae* from papaya in Brazil. **Pest Management Science**, v. 76, n. 4, p. 1344-1352, 2020. DOI: 10.1002/ps.5645.

LOMBARD, L.; SANDOVAL-DENIS, M.; LAMPRECHT, S. C.; CROUS, P. W. Epitypification of *Fusarium oxysporum*—clearing the taxonomic chaos. **Persoonia-Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi**, v. 43, n 1, p. 1-47, 2019.

LUCAS, J. A.; HAWKINS, N. J.; FRAAIJE, B. A. The evolution of fungicide resistance. **Advances in Applied Microbiology**, v. 90, p. 29-92, 2015. DOI: 10.1016/bs.aambs.2014.09.001.

MA, Z.; MICHAILIDES, T. J. Advances in understanding molecular mechanisms of fungicide resistance and molecular detection of resistant genotypes in phytopathogenic fungi. **Crop Protection**, v. 24, n. 10, p. 853-863, 2005. DOI: 10.1016/j.cropro.2005.01.011.

MACHADO, A. D. S. D. O.; BRONZE, A. B. D. S.; BRITO, S. D. N. S.; MONTEIRO, H. S. A. Métodos de indução do desverdecimento de banana mysore para uniformização e padronização do amadurecimento. **Agroamazon**, v. 1, n. 1, p. 114-123, 2022.

MAHESHWAR, P. K.; MOHARRAM, S. A.; JANARDHANA, G. R. Detection of fumonisin producing *Fusarium verticillioides* in paddy (*Oryza sativa* L.) using polymerase chain reaction (PCR). **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 40, p. 134-138, 2009.

MAPA. AGROFIT: sistema de agrotóxicos fitossanitários. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2024. Disponível em: http://extranet.agricultura.gov.br/agro-fit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 15 jan. 2024

MARASAS, W. F. O.; KELLERMAN, T. S.; GELDERBLUM, W. C.; THIEL, P. G.; VAN DER LUGT, J. J. Leukoencephalomalacia in a horse induced by fumonisin B1 isolated from *Fusarium moniliforme*. **Onderstepoort J Vet Res**, v. 55, p.197-203, 1988.

MARASAS, W. F. O. RABIE, C. J.; LÜBBEN, A.; NELSON, P. E.; TOUSSOUN, T. A.; WYK, P. V. *Fusarium napiforme*, a new species from millet and sorghum in southern África. **Mycologia**, v. 79, n. 6, p. 910-914, 1987.

MARASAS, W. F. O.; NELSON, Paul E.; TOUSSOUN, T. A. *Fusarium dlamini*, a new species from Southern Africa. **Mycologia**, v. 77, n. 6, p. 971-975, 1985.

MIKABERIDZE, A.; MCDONALD, B. A. Fitness cost of resistance: Impact on management. In: ISHII, H.; HOLLOMON, D. W. (ed.). **Fungicide resistance in plant pathogens**. Tokyo: Springer Japan, 2015. p. 77-79.

- MISSMER, S. A.; SUAREZ, L.; FELKNER, M.; WANG, E.; MERRILL JR, A. H.; ROTHMAN, K. J.; HENDRICKS, K. A. Exposure to fumonisins and the occurrence of neural tube defects along the Texas–Mexico border. **Environmental health perspectives**, v. 114, n. 2, p. 237-241, 2006.
- MOLNÁR, O.; BARTÓK, T.; SZÉCSI, Á. Occurrence of *Fusarium verticillioides* and *Fusarium musae* on banana fruits marketed in Hungary. **Acta microbiologica et immunologica Hungarica**, v. 62, n. 2, p. 109-119, 2015.
- MORETTI, A.; MULÈ, G.; SUSCA, A.; GONZÁLEZ-JAÉN, M. T.; LOGRIECO, A. Toxin profile, fertility and AFLP analysis of *Fusarium verticillioides* from banana fruits. **European Journal of Plant Pathology**, v. 110, p. 601-609, 2004.
- MUNKVOLD, G. P. *Fusarium* species and their associated mycotoxins. **Mycotoxigenic fungi: methods and protocols**, p. 51-106, 2017.
- NICOLLI, C. P.; HAIDUKOWSKI, M.; SUSCA, A.; GOMES, L. B.; LOGRIECO, A., STEA, G.; PFENNING, L. H. *Fusarium fujikuroi* species complex in Brazilian rice: Unveiling increased phylogenetic diversity and toxigenic potential. **International journal of food microbiology**, v. 330, p. 108667, 2020.
- NIKITIN, D. A.; IVANOVA, E. A.; SEMENOV, M. V.; ZHELEZOVA, A. D.; KSENOFONTOVA, N. A.; TKHAKAKHOVA, A. K.; KHOLODOV, V. A. Diversity, Ecological Characteristics and Identification of Some Problematic Phytopathogenic *Fusarium* in Soil: A Review. **Diversity**, v. 15, n. 1, p. 49, 2023.
- NOSRATABADI, M.; FAELI, L.; HAGHANI, I.; MOHAMMADI, R.; KHODAVAISY, S.; KACHUEI, R.; ABASTABAR, M. In vitro antifungal susceptibility profile of Iranian *Fusarium* isolates: Emphasising on the potent inhibitory effect of efinaconazole compared to other drugs. **Mycoses**, v. 66, n. 3, p. 258-275, 2023.
- O'DONNELL, K.; ROONEY, A. P.; PROCTOR, R. H.; BROWN, D. W.; MCCORMICK, S. P.; WARD, T. J.; ...; GEISER, D. M. Phylogenetic analyses of rpb1 and rpb2 support a middle cretaceous origin for a clade comprising all agriculturally and medically important fusaria. **Fungal genetics and biology**, v. 52 p. 20–31, 2013.
- O'DONNELL, K.; WARD, T. J.; ABERRA, D.; KISTLER, H. C.; AOKI, T.; ORWIG, N.; ...; KLEMSDAL, S. S. Multilocus genotyping and molecular phylogenetics resolve a novel head blight pathogen within the *Fusarium graminearum* species complex from ethiopia. **Fungal genetics and biology**, v. 45, p. 1514-1522, 2008.
- O'DONNELL, K.; WHITAKER, B. K.; LARABA, I.; PROCTOR, R. H.; BROWN, D. W.; BRODERS, K.; GEISER, D. M. DNA sequence-based identification of *Fusarium*: A work in progress. **Plant disease**, v. 106, n. 6, p. 1597-1609, 2022
- O'DONNELL, K. K.; KISTLER, H. C.; TACKE, B. K.; CASPER, H. H. Gene genealogies reveal global phylogeographic structure and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum*, the fungus causing wheat scab. **PNAS**, V. 97, P. 7905–7910, 2000.
- O'DONNELL, K.; CIGELNIK, E.; NIRENBERG, H. I. Molecular systematics and phylogeography of the *Gibberella fujikuroi* species complex. **Mycologia**, v. 90, n. 3, p. 465-493, 1998.

PANDEY, A. K.; SAMOTA, M. K.; KUMAR, A.; SILVA, A. S.; DUBEY, N. K. Fungal mycotoxins in food commodities: present status and future concerns. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 288, 2023.

PATIÑO, B.; MIRETE, S.; GONZÁLEZ-JAÉN, M. T.; MULÉ, G.; RODRÍGUEZ, M. T.; VÁZQUEZ, C. PCR detection assay of fumonisin-producing *Fusarium verticillioides* strains. **Journal of Food Protection**, v. 67, n. 6, p. 1278-1283, 2004.

PLOETZ, R. C.; KEMA, J. H. J.; MA, L. J. Impact of diseases on export and smallholder production of banana. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 53, p. 269-288, 2015.

PLOETZ, R. C.; THOMAS, J. E.; SLABAUGH, W. R. Diseases of banana and plantain. In: PLOETZ, R. C. (ed.). **Diseases of tropical fruit crops**. Wallingford: CAB International, 2003. p. 73-134.

POZZI, C. R.; ARCARO, J. R. P.; ARCARO JÚNIOR, I.; FAGUNDES, H.; CORRÊA, B. Occurrence and fumonisins pathophysiology-reviews. **Ciência Rural**, v. 32, p. 901-907, 2002

PROCTOR, R.H.; BROWN, D.W.; PLATTNER, R.D.; DESJARDINS, A.E. Co-expression of 15 contiguous genes delineates a fumonisin biosynthetic gene cluster in *Gibberella moniliformis*. **Fungal Genetic and Biology**, United States, v. 38, n. 2, p. 237–249, 2003.

PROCTOR, R.H.; BUSMAN, M.; SEO, J.A.; LEE, Y.W.; PLATTNER, R.D. A fumonisin biosynthetic gene cluster in *Fusarium oxysporum* strain O-1890 and the genetic basis for B versus C fumonisin production. **Fungal Genetic Biological**, Wisconsin, v. 45, n. 6, p.1016–1026, 2008.

PROCTOR, R.H.; VAN HOVE, F.; SUSCA, A.; STEA, G.; BUSMAN, M.; LEE, T.; WARD, T.J. Birth, death and horizontal transfer of the fumonisin biosynthetic gene cluster during the evolutionary diversification of *Fusarium*. **Molecular Microbiology**, Ithaca, v. 90, n. 2, p. 290-306, 2013.

QIU, J.; LU, Y.; HE, D. LEE, Y. W.; JI, F.; XU, J.; SHI, J. *Fusarium fujikuroi* species complex associated with rice, maize, and soybean from Jiangsu province, China: phylogenetic, pathogenic, and toxigenic analysis. **Plant Disease**, v. 104, n. 8, p. 2193-2201, 2020.

RHEEDER, J. P.; MARASAS, W. F. O; VISMER, H. F. Production of fumonisin analogs by *Fusarium* species. **Applied and environmental microbiology**, v. 68, n. 5, p. 2101-2105, 2002.

RENGANATHAN, P.; DHAARANI, S.; BALABASKAT, P.; DEVI, S.; JAIGANESH, V. Chapter-2 Crown Rot Disease of Banana. **Current Research and Innovations in Plant Pathology**, p. 21-32, 2022.

RIOLO, M. ALOI, F.; FAEDDA, R. CACCIOLA, S. O.; PANE, A. First report of postharvest fruit rot caused by *Fusarium sacchari* on lady finger banana in Italy. **Plant Disease**, v. 104, n. 8, p. 2290-2290, 2020.

ROUARD, M. DROC, G.; MARTIN, G.; SARDOS, J.; HUEBER, Y.; GUIGNON, V.; ROUX, N. Three new genome assemblies support a rapid radiation in *Musa acuminata* (wild banana). **Genome biology and evolution**, v. 10, n. 12, p. 3129-3140, 2018.

SALEM, N. M.; ALMOMANY, A. M.; TAHAT, M. M.; ALDAKIL, H. First report of *Fusarium verticillioides* causing banana fruit rot in Jordan. **Plant Disease**, v. 104, n. 12, p. 3255, 2020.

SÁNCHEZ-RANGEL, D.; SANJUAN-BADILLO, A.; PLASENCIA, J. Fumonisin production by *Fusarium verticillioides* strains isolated from maize in Mexico and development of a polymerase chain reaction to detect potential toxigenic strains in grains. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 22, p. 8565-8571, 2005.

SANDANUWAN, T.; ATTYGALLE, D., AMARASINGHE, S., WERAGODA, S. C., RANAWEERA, B., RATHNAYAKE, K., ALANKARA, W. Shelf Life Extension of Cavendish Banana Fruit Using Cold Plasma Treatment. In: **2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)**. IEEE, p. 182-186, 2020.

SANDOVAL-DENIS, M.; SWART, W. J.; CROUS, P. W. New *Fusarium* species from the Kruger National Park, South Africa. **MycoKeys**, v. 34, p. 63-92, 2018.

SANTIN, E.; MAIORKA, A.; ZANELLA, I.; MAGON, L. Mycotoxin of *Fusarium* spp in commercial poultry. **Ciência Rural**, v. 31, p. 185-190, 2001.

SANTOS, J. E. Á.; SILVA, D. E. M. D.; VIEIRA, R. F. B. D. S.; CORDEIRO, M. V. M.; ALMEIDA, M. M. M.; LIMA, M. A. S.; SILVA, C. D. F. B. D. First report of *Lasiodiplodia brasiliensis* causing crown rot on banana in Brazil. **Plant Disease**, (ja), 2023.

SHI, W.; TAN, Y.; WANG, S.; GARDINER, D. M.; DE SAEGER, S.; LIAO, Y.; WU, A. Mycotoxigenic potentials of *Fusarium* species in various culture matrices revealed by mycotoxin profiling. **Toxins**, v. 9, n. 1, p. 6, 2016.

SILVA, D. E. M.; VIEIRA, R. F. B. S.; INOKUTI, E. M.; ALMEIDA, M. M. M.; CORDEIRO, M. V. M.; LIMA, C. S.; SILVA, C. F. B. First report of *Lasiodiplodia iraniensis* causing crown rot on banana fruits in Brazil. **Plant Disease**, v. 107, n. 10, p. 3315, 2023.

SILVA, E. G.; SILVA, J. A.; BARROS, A. P. O.; SANTOS, A. K. V.; MICHEREFF, S. J., CORREIA, K. C. *Fusarium kalimantanense* causing crown rot on banana in Brazil. **Journal of Plant Pathology**, p.1, 2023.

SILVA, J. A.; MASCARENHAS, I. L.; FREITAS, M. G.; SANTOS, J. A. C. M.; MICHEREFF, S. J.; CORREIA, K. C. Frequência de fungos associados às doenças pós-colheita da banana no Cariri Cearense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, CBFITO, 51, 2019, Recife. **Anais [...]**. Brasília: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 2019. p. 641.

SILVA, M. S. A. C.; LEONEL, S.; FERREIRA, A. F. A.; SOUZA, J. M. A.; OLIVEIRA JUNIOR, M. A.; MARTINS, R. C.; SILVA, M. Banana bunch cover: evaluation of promising bag materials. **Comunicata Scientiae**, v. 13, p. 3741-, 2022.

SIMMONDS, J. H.; MITCHELL, E. S. Black end and anthracnose of the Banana with special reference to *Gloeosporium musarum* Cke and Mass. **Bulletin of the Council for Scientific and Industrial Research**, v.131, 1940.

STENZEL, K.; VORS, J-P. Sterol biosynthesis inhibitors. In: JESCHKE, P.; WITSCHEL, M.; KRÄMER, W.; SCHIRMER, U. (ed.). **Modern crop protection compounds**. Vol. 2: Fungicides. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2019. p. 797-608.

STUMPF, R. **Prevalência, perfil toxigênico e agressividade de espécies de *Fusarium* associadas aos grãos de milho do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia, ênfase em Fitopatologia) – Faculdade de agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, P. 132. 2011.

SUGIANTI, C.; IMAIZUMI, T.; THAMMAWONG, M.; NAKANO, K. Recent Postharvest Technologies in the Banana Supply Chain. **Reviews in Agricultural Science**, v. 10, p. 123-137, 2022.

SUMMERELL, B. A. Resolving *Fusarium*: Current status of the genus. **Annual review of phytopathology**, v. 57, p. 323-339, 2019.

SUMMERELL, B. A.; SALLEH, B.; LESLIE, J. F. A utilitarian approach to *Fusarium* identification. **Plant disease**, v. 87, n. 2, p. 117-128, 2003.

SUN, X.; WANG, J.; FENG, D; MA, Z.; LI, H. PdCYP51B, a new putative sterol 14alpha-demethylase gene of *Penicillium digitatum* involved in resistance to imazalil and other fungicides inhibiting ergosterol synthesis. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 91, n. 4, p. 1107-1119, 2011. DOI: 10.1007/s00253-011-3355-7.

THIND, T.S. New insights into fungicide resistance: A growing challenge in crop protection. **Indian Phytopathology**, v. 75, n. 4, p. 927-939, 2022. DOI: 10.1007/s42360-022-00550-4.

THOMAS, B.; AUDONNEAU, N. C.; MACHOUART, M.; DEBOURGOGNE, A. Molecular identification of *Fusarium* species complexes: Which gene and which database to choose in clinical practice?. **Journal de mycologie medicale**, v. 29, n. 1, p. 56-58, 2019.

TORRES-CRUZ, T. J.; WHITAKER, B. K.; PROCTOR, R. H.; BRODERS, K.; LARABA, I.; KIM, H. S.; BROWN, D. W.; O'DONNELL, K.; ..., GEISER, D. M. FUSARIUM-ID v. 3.0: an updated, downloadable resource for *Fusarium* species identification. **Plant disease**, v. 106, n. 6, p. 1610-1616, 2022.

UMANA-ROJAS, G.; GARCIA, J. Pathogenicity of organisms associated with banana crown rot in two banana cultivars. In: **International Conference on Postharvest and Quality Management of Horticultural Products of Interest for Tropical Regions 906**, p. 219-223, 2009.

VIEIRA, W. A.; LIMA, W. G.; NASCIMENTO, E. S.; MICHEREFF, S. J.; CÂMARA, M. P.; DOYLE, V. P. The impact of phenotypic and molecular data on the inference of *Colletotrichum* diversity associated with Musa. **Mycologia**, v. 109, n. 6, p. 912-934, 2017.

WALIULLAH, S.; FONSAH, E. G.; BROCK, J., LI, Y.; ALI, M. E. First Report of Crown Rot of Banana Caused by *Fusarium proliferatum* in Georgia, USA. **Plant Disease**, v. 106, n. 5, p.1526, 2022.

WOLLENWEBER, H. W.; REINKING, O. A. Die fusarien: ihre beschreibung, schadwirkung und bekämpfung. (No Title), 1935.

XIA, J.W.; SANDOVAL-DENIS, M. CROUS, P. W.; ZHANG, X. G.; LOMBARD, L. Numbers to names – restyling the *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex. **Persoonia**, v.43. p.186–221, 2019.

XIE, L.; WU, Y.; WANG, Y.; JIANG, Y.; YANG, B. DUAN, X.; LI, T. Fumonisin B1 induced aggressiveness and infection mechanism of *Fusarium proliferatum* on banana fruit. **Environmental Pollution**, v. 288, p. 117793, 2021.

XIE, L.; WU, Y., DUAN, X., LI, T., JIANG, Y. Proteomic and physiological analysis provides an elucidation of *Fusarium proliferatum* infection causing crown rot on banana fruit. **Microbiological Research**, v. 256, p. 126952, 2022.

YILMAZ, N.; SANDOVAL-DENIS, M.; LOMBARD, L.; VISAGIE, C. M.; WINGFIELD, B. D.; CROUS, P. W. Redefining species limits in the *Fusarium fujikuroi* species complex. **Persoonia-Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi**, v. 46, n. 1, p.129-162, 2021.

YIN, Y.; MIAO, J.; SHAO, W.; LIU, X.; ZHAO, Y.; MA, Z. Fungicide resistance: Progress in understanding mechanism, monitoring, and management. **Phytopathology**, v. 113, n. 4, p. 707-718, 2023. DOI: 10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD.

ZAKARIA, L. *Fusarium* Species Associated with Diseases of Major Tropical Fruit Crops. **Horticulturae**, v. 9, n. 3, p. 322, 2023.

ZAKARIA, L.; CHIK, M. W.; HENG, K. W.; SALLEH, B. *Fusarium* species associated with fruit rot of banana (*Musa* spp.), papaya (*Carica papaya*) and guava (*Psidium guajava*). **Malaysian Journal of Microbiology**, v. 8, n. 2, p. 127-130, 2012.

ZANON, M. A.; PENA, G.; YERKOVICH, N.; BOSSA, M.; CHIOTTA, M. L.; CHULZE, S. Aflatoxins and fumonisins in maize under a climate change scenario. Biocontrol strategies at the pre-harvest stage. **European Journal of Plant Pathology**, v. 167, n. 4, p. 551-567, 2023.

ZARRIN, M.; GANJ, F.; FARAMARZI, S. Development of a polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism method for identification of the *Fusarium* genus using the transcription elongation factor-1 α gene. **Biomedical reports**, v. 5, n. 6, p. 705-708, 2016.

ZIOGAS, B. N.; MALANDRAKIS, A. A. Sterol biosynthesis inhibitor: C14 demethylation (DMIs). In: ISHII, H.; HOLLOMON, D. W. (ed.). **Fungicide resistance in plant pathogens**. Tokyo: Springer Japan, 2015. p. 199-216.

CAPÍTULO II

Diversidade e potencial micotoxigênico de espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* associados à podridão da coroa da banana

Submissão: **European Journal of Plant Pathology**
Dordrech, Holanda
JCR = 1,8

Diversidade e potencial micotoxigênico de espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* associadas à podridão da coroa da banana

Euzanyr Gomes da Silva • Ana Karoline Vieira dos Santos • Ana Paula de Oliveira Barros • Jadson Araújo da Silva • Charem Jordânia Gomes Cruz • Layla Victória da Silva Sousa • Leticia Rejane Lima Araújo • Fabíola de Sousa Luna • Sami Jorge Michereff • Kamila Câmara correia

E. G. Silva

Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, Universidade Federal de Alagoas, 57100-000, Rio Largo, AL, Brasil

J. A. Silva • A. P. O. Barros

Programa de Pós-Graduação em Fitopatologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 52171-900, Recife, PE, Brasil

A. K. V. Santos • C. J. G. Cruz • L. V. S. Sousa • L. R. Lima • F. S. Luna • S. J. Michereff • K. C. Correia (✉)

Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Universidade Federal do Cariri, 63130-025, Crato, CE, Brasil

E-mail: kamila.correia@ufca.edu.br

Resumo A podridão da coroa causada por espécies de *Fusarium* é considerada uma das doenças pós-colheita mais importantes e é responsável por perdas significativas de banana em todo o mundo. Espécies de *Fusarium* associadas a essa doença fazem parte do complexo de espécies *Fusarium fujikuroi* (FFSC) que são grandes produtores de micotoxinas, principalmente de fumonisinas (FBs). Neste estudo foi investigado a diversidade de espécies do FFSC associadas à podridão da coroa de bananas na região do Cariri cearense, caracterizando geneticamente os isolados utilizando duas regiões gênicas (EF1- α e RPB2) e avaliando a patogenicidade a bananas e o potencial micotoxigênico dos isolados utilizando oligonucleotídeos específicos de genes FUM. Cinco espécies de *Fusarium* foram identificadas, sendo uma não patogênica. Apenas *F. sacchari* não possui isolados com potencial de produção de micotoxina. Este estudo

traz novas contribuições sobre a diversidade de agentes etiológicos associados à podridão da coroa da banana na região do Cariri cearense e informações importantes para a definição de estratégias de controle das espécies identificadas e para a redução da incidência da podridão da coroa e possíveis contaminações da banana.

Palavras-Chaves: doenças de pós-colheita; patogenicidade; genes específicos; fumosinina.

Introdução

A banana (*Musa* ssp.) é um dos alimentos mais importantes do mundo e contribui para a segurança alimentar global e para a geração de renda (Xie et al., 2022). A Índia e a China são os maiores produtores dessa fruta e o Brasil ocupa a quarta posição no ranking mundial de produção (FAO, 2024). Os frutos de banana são frequentemente acometidos por infecções fúngicas (Alghuthaymi et al., 2020), o que compromete a comercialização, arrecadação e consumo. Dentre esses fungos, os do gênero *Fusarium* foram associados a doenças pós-colheita, causando depreciação do fruto e perdas significativas no rendimento da cultura (Alghuthaymi & Bahkali, 2015; Hirata et al., 2001; Silva et al., 2023). A podridão da coroa causada por *Fusarium* é considerada uma das doenças pós-colheita mais importantes e é responsável por perdas significativas de banana em todo o mundo (Zakaria et al., 2023).

Espécies de *Fusarium* estabelecem múltiplas relações com plantas silvestres e cultivadas, variando da patogenicidade ao endofitismo, sendo a produção de metabólitos secundários um dos principais fatores envolvidos na regulação dessas interações (Manganiello et al., 2019). Algumas dessas espécies são conhecidas por causar doenças graves nas plantas, gerando perdas significativas de rendimento, e contaminar as produções agrícolas com micotoxinas, que são metabólitos secundários de grande preocupação para o consumo de alimentos e para a segurança alimentar representando riscos à saúde de humanos e animais (Manganiello et al., 2019; Xie et al., 2022). Taxonomicamente, as espécies do gênero *Fusarium* estão distribuídas em 23 linhagens monofiléticas, sendo agrupadas em complexos de espécies (Geiser et al., 2021; O'Donnell et al., 2022).

Espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* (FFSC) são comumente associadas à podridão da coroa (Zakaria et al., 2023). As espécies desse complexo são importantes fitopatógenos e possuem elevada importância também para a ciência da saúde (Yilmaz et al., 2021), pois produzem uma ampla gama de micotoxinas, incluindo fumonisinas (FBs), e podem

ser patógenos humanos oportunistas (Bacon et al., 1996; Logrieco et al., 1998; Marasas et al., 1986; Moretti et al., 1996; Nicholson et al., 2004; Rheeder et al., 2002; Triest et al., 2015).

Estas micotoxinas causam toxidade cônica e aguda em humanos e animais e cada uma delas têm impacto significativo na toxicidade e na atividade biológica dos isolados. Portanto, detectar e identificar qual quimiotipo está presente em uma determinada população é importante para prever as toxinas específicas que podem ser produzidas e avaliar o risco de exposição (Villafana et al., 2019). No entanto, induzir a produção desses compostos por isolados de *Fusarium in vitro* sempre foi um desafio. Com isso foram desenvolvidos ensaios de PCR utilizando oligonucleotídeos específicos desenhados para detectar a presença de genes envolvidos na biossíntese de micotoxinas em espécies de *Fusarium* e assim identificar isolados potencialmente tóxicos (Patiño et al. 2004; Sanchez-Rangel et al., 2005; Villafana et al., 2019).

As FBs estão associadas ao câncer de esôfago e fígado, produção de citocinas base do início da inflamação, leucoencefalomalácia em cavalos e edema pulmonar em suínos (Chen et al., 2021; Desjardins et al., 1997; Harrison et al., 1990; Marasas et al., 1988). A fumonisina B1 (FB₁) é o membro mais comum e tóxico das fumonisinas e é categorizada como um carcinógeno do grupo 2B (possivelmente carcinogênico para humanos) pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC, 1993).

FBs estão presentes em grande número de produtos alimentícios em todo o mundo, podendo contaminar plantações e alimentos durante seu crescimento, colheita, armazenamento e processamento (Xie et al., 2022). Os cereais e seus derivados são os grupos com a maior concentração documentada desta toxina (Ocampo-Acuna et al., 2023). No entanto, a FB₁ foi encontrada em diferentes tipos de alimentos, como aspargos, alho (Seefelder et al., 2004), cervejas (Kawashima et al., 2007), leites (Gazzotti et al., 2009), figos secos (Karbancioglu-Güler & Heperkan, 2009) e banana (Xie et al., 2021). Porém, na maioria dos estudos que avaliaram o perfil toxigênico de *Fusarium* foram incluídos apenas isolados de cereais, com pouca atenção dada aos isolados obtidos de outro substrato (SHI et al., 2020), sendo limitado o conhecimento sobre o potencial micotoxigênico desses isolados.

Com isso, este estudo tem como objetivo avaliar a diversidade de espécies de *Fusarium* do FFSC associados à podridão da coroa da banana no Brasil, caracterizando geneticamente as espécies e avaliando seus isolados quanto à patogenicidade e potencial micotoxigênico.

Materiais e métodos

Coleta de amostras e isolamento de fungos

Amostras de bananas (cv. Prata), sem sintomas de doenças, foram coletadas entre janeiro e março de 2022 na região do Cariri cearense, em quatro unidades de beneficiamento de empresas produtoras de banana, situadas nos municípios de Barbalha, Brejo Santo e Missão Velha, e em quatro estabelecimentos comerciais localizados nos municípios de Barbalha, Caririáçu, Crato, Farias Brito, Jardim, Juazeiro do Norte, Missão Velha e Nova Olinda. Em cada unidade de beneficiamento foram coletadas 10 pencas de banana (com 4 frutos/pencas). Em cada estabelecimento comercial foram coletadas quatro pencas de banana arbitrariamente (com 4 frutos/pencas), totalizando 992 frutos amostrados no estudo. Após a coleta, as pencas de banana foram etiquetadas e transferidas para o Laboratório de Fitopatologia do Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade da Universidade Federal do Cariri, localizado no município do Crato-CE.

Os frutos foram submetidos ao tratamento para desinfestação superficial, constituído de lavagem em água corrente e detergente, seguida de imersão por 1 minuto em solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) a 1 % e duas lavagens em água destilada esterilizada. Após o tratamento, os frutos foram secos em condições assépticas. Cada penca foi colocada sobre uma tampa de placa de Petri (9 cm de diâmetro) esterilizada e depositada em bandeja plástica (28 cm x 19 cm x 11 cm) forrada com quatro camadas de papel toalha umedecidas. As bandejas foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas em temperatura ambiente ($\cong 25^{\circ}\text{C}$).

Após sete dias, os frutos com sintomas de podridões da coroa e manchas necróticas na casca foram selecionados e submetidos ao isolamento dos fungos associados. Fragmentos internos de tecidos foram cortados assepticamente das margens das lesões e submetidas à desinfestação em álcool a 70% durante 30 segundos, em solução de NaOCl a 1% por 1 minuto, seguido de duas lavagens consecutivas em água destilada esterilizada. Em sequência foram colocados sobre papel de filtro estéril em câmara asséptica. Após a secagem, os fragmentos foram transferidos para placas de Petri contendo o meio de cultura batata-dextrose-ágar (BDA), suplementado com tetraciclina (0,5 g/L). Também foi realizado o isolamento direto, que consiste na coleta de sinais do fungo (micélio/esporos). As placas foram incubadas à temperatura ambiente ($\cong 25^{\circ}\text{C}$) e após 48h foram avaliadas. Nos casos em que foi constatado o crescimento micelial típico de *Fusarium* spp. (Leslie & Summerell, 2006), fragmentos de hifa foram transferidos individualmente para placas com meio BDA (Figura 1).

Após a obtenção de culturas puras, foram obtidas culturas monospóricas de cada isolado. Para isso, fragmentos de micélios de cada isolado foram transferidos para tubo de ensaio contendo 10 ml de água destilada esterilizada e submetidos a agitação em vórtex por

20s. Após agitação, 700 µL da suspensão foram plaqueados em placas de Petri contendo meio ágar-água (AA) e espalhados com auxílio de alça de drigalski, sendo uma placa por isolado. As placas foram incubadas no escuro a 25±3 °C. Após 8 horas, com auxílio de microscópio óptico, um conídio com desenvolvimento do tubo germinativo foi retirado de cada isolado e transferido para o centro de uma placa de Petri contendo meio BDA.

Cada isolado foi preservado pelo método de Castellani (Dhingra & Sinclair, 1995) e depositados na Coleção de Fungos Fitopatogênicos – CFC do Laboratório de Fitopatologia do Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade da Universidade Federal do Cariri – Campus Crato.

Extração de DNA e amplificação por PCR

Os isolados fúngicos foram cultivados em BDA sobreposto com uma membrana semipermeável de celofane e mantidos por sete dias a 25 °C no escuro. O micélio aéreo foi raspado da superfície da colônia com o auxílio de uma espátula esterilizada e transferido para microtubos de 2 mL contendo 4 microesferas (Beads). O DNA genômico foi extraído com o Wizard Genomic DNA Purification kit (Promega Corporation, Fitchburg, EUA), conforme as instruções do fabricante. As concentrações de DNA foram estimadas visualmente em gel de agarose a 1% comparando-se a intensidade da banda com um marcador de peso molecular com escala de 1 kb (Invitrogen 1 Kb Plus DNA Ladder; Axygen Scientific Inc., Union City, EUA).

Após a extração do DNA, as amostras foram submetidas a Reação em Cadeia da Polimerase (PCR) para amplificação dos genes fator de alongamento da tradução 1-α (EF1-α), utilizando os oligonucleotídeos EF1 (5'-ATGGGTAAGGAGGACAAGAC-3') e EF2 (5'-GGAAGTACCAGTGATCATGTT-3') (O'donnell et al., 1998), e segunda maior subunidade da RNA polimerase II (RPB2), com os oligonucleotídeos RPB2-5F2 (5'-GAYGAYCGTGATCACTTYGG-3') (Reeb & Roux, 2004) e RPB2-7cR (5'-CCCATRGCTGYTTTRCCCAT-3') (Liu et al., 1999). Os componentes usados para amplificação por PCR foram: 6,25 µL de GoTaq® Green Master Mix (2X) (Promega Corporation), 0,5 µL de cada primer, 4,25 µL de Água nuclease-Free e 1 µL de DNA, totalizando 12,5 µL. Um controle negativo (sem o DNA) foi incluso em todas as reações de PCR.

As reações PCR foram realizadas em um termociclador Biocycler MJ 96 (Applied Biosystems, Waltham, EUA), e as seguintes condições foram usadas: Para EF1-α -

desnaturação inicial a 94 °C por 1 min, seguida por 34 ciclos de desnaturação a 94 °C por 30 s, anelamento a 50 °C por 45 s, extensão a 72 °C por 1 min e uma extensão final a 72 °C por 5 min; Para RPB2 - desnaturação inicial a 94 °C por 90 s, seguida por 40 ciclos de desnaturação a 94 °C por 30 s, anelamento a 55 °C por 90 s, extensão a 68 °C por 2 min e uma extensão final a 68 °C por 5 min.

Os produtos da amplificação por PCR foram separados por eletroforese em gel de agarose a 1% em Tris-acetato 1.0 x ácido EDTA (TAE), corados com GelRed™ (Biotium Inc., Hayward, EUA) e fotografados sob luz ultravioleta (UV). Os produtos de PCR foram purificados utilizando o kit de purificação NucleoSAP® (Cellco Biotec do Brasil Ltda, Brasil), seguindo as instruções do fabricante, e sequenciados em ambas as direções com os mesmos oligonucleotídeos da amplificação usando um sequenciador ABI PRISM 3100 - Avant Genetic Analyzer (Applied Biosystems) na Plataforma Multiusuário de Sequenciamento de DNA do Departamento de Genética na Universidade Federal de Pernambuco (Recife, Brasil).

Análises filogenéticas

A análise dos cromatogramas gerados pelo sequenciamento dos genes EF1- α e RPB2 dos isolados e a montagem das sequências foram realizadas utilizando o software Staden Package® v. 2.0 (Staden et al., 1998). Para alinhar as sequências obtidas foi utilizando o programa ClustalX v.1.83 (Thompson et al., 1997) no software MEGA v. 7.0 (Kumar et al., 2016) e os loci individuais foram ajustados manualmente quando necessários. Sequências de isolados de referência de *Fusarium* obtidas do GenBank foram incluídas no alinhamento múltiplo de cada gene (Tabela 1). Análises filogenéticas utilizando o método de Máxima Verossimilhança (MV) foram realizadas para os genes individualmente e combinados e as sequências obtidas comparadas com sequências dos isolados de referência de espécies de *Fusarium*, considerando a base de dados FUSARIOID-ID (<https://www.fusarium.org/>) e os últimos trabalhos publicados com espécies do FFSC. As análises de MV foram realizadas com auxílio do programa MEGA 7 (Kumar et al., 2018), utilizando o modelo GTR + I + G e inicialização de 1000 repetições para estimar a confiabilidade dos ramos das árvores geradas.

Potencial micotoxigênico

A identificação do potencial micotoxigênico dos isolados foi realizada por meio da utilização de oligonucleotídeos específicos para amplificação de genes envolvidos na produção

de micotoxinas. A amplificação de parte do gene envolvido na produção de fumonisinas foi realizada utilizando dois conjuntos de oligonucleotídeos, seguindo seus protocolos específicos. Os oligonucleotídeos VERTF-1 (5'-GCGGGAATTCAAAAGTGGCC-3') e VERTF-2 (5'-GAGGGCGCGAAACGGATCGG-3'); que tem como gene alvo FUM8 (Patiño et al., 2004), e os oligonucleotídeos FUM53F (5'-CTTGAACGCGGAGCTAGATTAT-3') e FUM53R (5'-ATCCGTGTATGCATATGTTCGAG-3') que tem como gene alvo FUM1 (Sanchez-Rangel et al., 2005).

O volume e os componentes da reação PCR foram os mesmos previamente descritos, e a PCR realizada utilizando os oligonucleotídeos VERTF-1/VERTF-2 teve as seguintes condições: desnaturação a 94 °C por 1 min e 25 s; 25 ciclos de desnaturação a 95 °C por 20 s, anelamento a 62 °C por 20 s, extensão a 72 °C por 45 s, extensão final a 72 °C por 5 min, seguido de refrigeração a 4 °C até a retirada das amostras; e para os oligonucleotídeos FUM53F/FUM53R, as condições da PCR foram: desnaturação a 94 °C por 3 min; 27 ciclos de desnaturação a 94 °C por 40 s, anelamento a 56 °C por 40 s, extensão a 72 °C por 40 s; extensão final a 72 °C por 7 min, seguido de refrigeração a 4 °C até a retirada das amostras.

Como controle positivo foi utilizado um isolado de *Fusarium verticillioides* com potencial de produção de micotoxinas obtido de grãos. O controle negativo (sem o DNA) também foi utilizado na reação de PCR. As reações de PCR foram conduzidas e avaliadas conforme descrito anteriormente.

Patogenicidade

Neste estudo, patogenicidade foi definida como a capacidade de um microrganismo causar doença, sendo um aspecto qualitativo do organismo. Agressividade foi definida como um componente quantitativo da patogenicidade, ou seja, a quantidade de doença induzida por um organismo patogênico em um hospedeiro suscetível (Agrios, 2005).

A patogenicidade dos isolados fúngicos obtidos foi avaliada em frutos de banana (cv. Prata), no estágio de maturação 6 (Pbmh & Pif, 2006) e sem sintomas de doenças. Os frutos foram lavados em água corrente, desinfestados superficialmente em solução de NaOCl a 1% por 1 minuto e novamente lavados com água destilada esterilizada. Após a secagem, a epiderme de cada fruto foi perfurada em um ponto central, à profundidade de 3 mm, com auxílio de alfinete esterilizado. Foi adicionado 40 µL de suspensão de conídios na concentração ajustada de 10⁶ conídios/mL para todos os tratamentos, com exceção do tratamento controle em que foi adicionado 40 µL de água destilada esterilizada sobre o ponto da epiderme ferida. Foram

utilizados 64 isolados de *Fusarium* cultivados no BDA por sete dias. Cada fruto foi colocado sobre uma tampa de placa de Petri esterilizada e depositado em bandeja plástica (28 cm x 19 cm x 11 cm) forrada com quatro camadas de papel toalha umedecidas. As bandejas foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas em condições de laboratório (± 25 °C), por 48 horas. Após este período, os sacos plásticos foram removidos e os frutos mantidos na mesma temperatura.

A avaliação da patogenicidade foi realizada às 96 h após da inoculação e foi considerado patogênico o isolado que induziu sintomas em comparação à testemunha. Nos casos em que a patogenicidade foi confirmada, a agressividade dos isolados foi estimada pela mensuração do diâmetro da lesão (mm), com um auxílio de paquímetro digital. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições (frutos) por isolados. Os dados da mensuração da lesão foram utilizados para comparar a agressividade dos isolados de *Fusarium* pela análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de agrupamento de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($P < 0,05$) com o programa AgroEstat (Barbosa & Maldonado Júnior, 2015).

Resultados

Espécies de *Fusarium* associadas à podridão da coroa da banana.

Um total de 151 isolados de *Fusarium* foram obtidos de pencas e frutos de banana com podridão da coroa. Todos os isolados identificados foram sequenciados para o gene EF1- α e as sequências apresentaram tamanho variando de 583 a 693 pares de base (pb). As sequências foram alinhadas com as sequências de isolados de referência representantes de todos os complexos de espécies de *Fusarium* depositadas no banco de dados do Centro nacional de Informações sobre Biotecnologia (NCBI). Os isolados de obtidos se agruparam com isolados representantes de quatro complexos de espécies: *Fusarium solani*, *Fusarium equiseti*, *Fusarium oxysporum* e *Fusarium fujikuroi*, sendo este último o complexo com maior número de isolados agrupados (dados não mostrados).

Dos 64 isolados agrupados no clado do complexo de espécies *F. fujikuroi*, 57,8% foram obtidos de frutos coletados em unidades de beneficiamento e 42,2% dos isolados foram em pontos comerciais. Para confirmar a espécie desses isolados, a sequência do gene RPB2 foi obtida. As sequências dos genes EF1- α e RPB2 foram comparadas com sequências de espécies

pertencentes ao complexo e realizada a análise de MV para cada gene individualmente (dados não mostrados) e para as sequências concatenas EF1- α + RPB2. O alinhamento combinado das sequências de EF1- α e RPB2 continha 1631 caracteres e foi composto por 125 táxons, incluindo *Fusarium nirenbergiae* (NRRL22902) como grupo externo. O melhor modelo de substituição de nucleotídeos para as análises dos genes individuais e concatenados foi o GTR+I+G.

De acordo com as análises filogenéticas, os isolados do FFSC obtidos de banana pertencem à cinco espécies: *Fusarium musae*, *Fusarium annulatum*, *Fusarium sacchari*, *Fusarium verticillioides* e *Fusarium pseudocircinatum* (Figura 2). *F. musae* a espécie mais prevalente, com 19 isolados, seguido da espécie *F. annulatum* (17 isolados). Apenas dois isolados foram identificados como *F. pseudocircinatum*, sendo esta a espécie com o menor número de isolados. As cinco espécies foram identificadas em frutos coletados e unidades de beneficiamento e em pontos comerciais (Tabela 2). Missão velha foi o município com maior diversidade de espécies associadas à podridão da coroa, sendo obtidos isolados das cinco espécies identificadas nesse estudo, e Farias Brito o município com menor diversidade.

Potencial micotoxigênico dos isolados de FFSC associados a banana

Foi avaliada a presença dos genes FUM1 e FUM8, que fazem parte da biossíntese de fumonisina, nos 64 isolados de *Fusarium* do FFSC associados à podridão da coroa da banana, sendo confirmada a presença de, no mínimo um gene, em 28 isolados pertencente às espécies *F. annulatum*, *F. musae*, *F. pseudocircinatum* e *F. verticillioides* e apenas dez isolados possuem a presença dos dois genes. A espécie com maior número de isolados identificados com a presença de gene associado a produção fumonisina foi *F. musae* (Tabela 2).

Os isolados de *F. verticillioides* CFC-1121, CFC-1573 CFC-1593, CFC-1615, CFC-1716, CFC-1718, CFC-1719 e CFC-1721 amplificaram com os dois pares de oligonucleotídeos: FUM53F/FUM53R e VERTF-1/VERTF-2, confirmando a presença dos genes FUM1 e FUM8, respectivamente, nesses isolados. Apesar de pertencer à mesma espécie, no isolado CFC-1120 foi identificada a presença apenas do gene FUM1 (Figura 3), não sendo observada a presença de amplificação para esse isolado quando usado os oligonucleotídeos VERTF-1/VERTF-2. Situação inversa foi observada para os isolados CFC-1571 e CFC1580, onde a presença de banda de amplificação foi observada apenas quando utilizadas os oligonucleotídeos VERTF-1/VERTF-2, confirmando a presença do gene FUM8 (Figura 4).

Essa diferença entre os isolados de uma mesma espécie também foi observada nos isolados da espécie *F. musae*, onde o isolado CFC-1572 apresentou banda de amplificação

quando utilizado os dois pares de oligonucleotídeos e para os demais isolados dessa espécie foi observada banda de amplificação apenas quando utilizado os oligonucleotídeos VERTF-1/VERTF-2. O isolado CFC-1580, pertencente a espécie de *F. pseudocircinatum* e os isolados CFC-1589, CFC-1591 e CFC-1592, pertencente a espécies de *F. annulatum*, apresentaram banda de amplificação com oligonucleotídeos VERTF-1/VERTF-2, confirmando a presença do gene FUM8.

Os 14 isolados da espécie *F. sacchari* não apresentaram banda de amplificação em nenhuma das PCRs, demonstrando a ausência dos genes FUM1 e FUM8 envolvidos na biossíntese de fumonisina.

Patogenicidade dos isolados de FFSC associados a banana

O teste de patogenicidade mostrou que dos 64 isolados de *Fusarium* do complexo *F. fujikuroi* inoculados em bananas, 35 isolados (54,7%) induziram sintomas nos frutos, sendo considerados patogênicos. Os primeiros sintomas de podridão em bananas foram observados 96 horas após a inoculação. As bananas inoculadas inicialmente apresentaram manchas marrons em torno do ponto de inoculação, as quais tornaram-se de coloração negra e encharcadas com o envelhecimento da lesão, comprovando a continuação do desenvolvimento fungo inoculado. Nenhum sintoma foi identificado nos frutos utilizados como testemunha (Figura 5).

Todos os isolados da espécie *F. verticillioides* não induziram sintomas nos frutos, sendo essa a única espécie caracterizada nesse estudo identificada como não patogênica. Para as demais espécies foi observado que a patogenicidade é uma característica isolado específico, com isolados induzindo lesões nos frutos (patogênicos) e isolados não patogênicos. Apenas dois isolados da espécie *F. musae* e quatro isolados da espécie *F. sacchari* não foram patogênicos, enquanto a maioria dos isolados da espécie *F. annulatum* (10) se comportou como não patogênico. Os dois isolados da espécie *F. pseudocircinatum* diferem em relação a patogenicidade, sendo o isolado CFC-1580 não patogênico e o isolado CFC-1609 causador de lesões nos frutos.

A agressividade dos isolados patogênicos foi avaliada por meio do comprimento das lesões induzidas em frutos sadios de banana (Figura 6). Houve diferença significativa ($P \leq 0,05$) na agressividade dos isolados, com lesões variando de 5,12 a 10,97 mm, sendo possível diferenciar os isolados em cinco grupos. Somente isolados (2) de *F. musae* foram agrupados no grupo 1, sendo esses os mais agressivos, induzindo lesões maiores que 10 mm. Os isolados dessa espécie possuem grande diferença quanto à agressividade, induzindo lesões com

comprimento variando de 6,12 a 10,97 mm, possuindo isolados nos 5 grupos identificados. Os grupos 2 (segundo mais agressivo) e 4 (segundo menos agressivo) são formados por isolados de apenas duas espécies: *F. annulatum* e *F. musae*, *F. musae* e *F. sacchari*, respectivamente.

O grupo 3 foi o grupo com maior número de isolados (11), os quais pertencem as espécies *F. annulatum*, *F. musae* e *F. sacchari* e induziram lesões nos frutos com comprimento variando de 8,18 a 9,31 mm. O grupo 5 é composto por isolados das quatro espécies identificadas como patogênicas, que induziram lesões com comprimento variando de 5,12 a 6,34 mm, sendo este considerado o grupo com menor agressividade.

Discussão

No presente estudo cinco espécies do FFSC foram isoladas de frutos de banana oriundas de unidades de beneficiamento e de pontos de comercialização. A espécie de maior prevalência e com maior agressividade, *F. musae*, foi relatada nessa hospedeira em 2011 durante a caracterização de isolados de *F. verticillioides*, quando foi observado que um grupo de isolados se diferenciava e formava uma linhagem única dentro do complexo, não agrupado com isolados referências de *F. verticillioides* (Van Hove et al., 2011). Essa espécie já foi relatada causando podridão da coroa em banana em diversos países do mundo (Farr & Rossman, 2024).

Apesar de não existir relato oficial desse patossistema no Brasil, no trabalho desenvolvido por Costa et al. (2019) para identificar as espécies de *Fusarium* associadas aos sintomas de “*pokkan boeng*” em cana-de-açúcar, consta a presença de um isolado de *F. musae* (CML 2863) obtido de banana na Coleção Micológica de Lavras (CML) da Universidade Federal de Lavras em Minas Gerais. O presente trabalho trás o primeiro relato oficial da presença de *F. musae* causando podridão da coroa em banana no Brasil, mostrando que essa espécie é a mais prevalente e mais agressiva quando comparada com as demais espécies encontradas.

Essa espécie possui elevada importância agrícola, comprometendo o comércio e o consumo de bananas, principal fruta consumida *in natura* no País, possuindo elevada importância econômica, devido ao alto volume de arrecadação de Estados e de macrorregiões produtores, projetando o nome do Brasil para todo o mundo (Anuário brasileiro de horti&fruti, 2023), sendo este o 4º maior produtor mundial da fruta (FAO, 2024).

Além da importância agrícola de *F. musae* para a produção de banana, sua importância para as ciências da saúde tem aumentado na última década devido aos relatos dessa espécie associada a infecções em humanos (Degradi et al., 2022; Tava et al., 2021; Triest et al., 2015;

Triest & Hendrickx, 2016). Com isso, diversos estudos foram realizados com isolados dessa espécie, incluindo o sequenciamento completo do genoma do isolado NRRL 25059 (Chen et al., 2023), isolado tipo dessa espécie, e do isolado F31 obtido de banana com sintomas de podridão da coroa na República Dominicana (Degradi et al., 2021).

Em um estudo realizado recentemente avaliando uma coleção de 19 isolados de *F. musae* obtidos de banana e humanos na América Central, América do Norte e Europa, foi comprovado a capacidade dos isolados de causar infecção em banana e *Galleria mellonella* (usada como “proxy humano”), com níveis comparáveis de infecção em ambos os hospedeiros (Tava et al., 2021). Com isso a necessidade de monitorar essa espécie em ambientes agrícolas e principalmente a sua disseminação em ambiente clínico é de extrema importância.

A segunda espécie com maior prevalência identificada associada à podridão da coroa em banana foi *F. annulatum*. Porém, a maioria dos isolados (58,8%) não causou sintomas de podridão em banana. No entanto a agressividade dos isolados patogênicos diferiu significativamente, induzindo lesões de tamanho variável. Essa espécie foi descrita por Bugnicourt (1952), baseado em um único isolado de *Oryza sativa*, Nova Caledônia. No entanto por muitos anos foi considerada sinônimo de *Fusarium proliferatum*, situação revertida por Yilmaz et al. (2021) que ao redefinir os limites das espécies do FFSC, demonstrou que *F. annulatum* e *F. proliferatum* são espécies distintas.

F. annulatum é frequentemente encontrada em zonas tropicais e temperadas, afetando uma ampla variedade de cultura (Parra et al., 2022). É uma espécie considerada incomum, devido ter sido estudada sob o nome de *F. proliferatum*, espécie conhecida por causar doenças em diversas culturas importantes como cereais, banana, manga e coco (Yilmaz et al., 2021; Gasse et al., 2023). Com isso, a gama de hospedeiras dessa espécie ainda não foi completamente estabelecida, existindo relatos recentes da sua ocorrência apenas em açafrão, melão, milho, oliveira, orquídea, videira (Bustamante et al., 2022; Dab et al., 2023; Mirghasempour et al., 2022; Parra et al., 2022; Sanna et al., 2023; Zhang et al., 2024), sendo este o primeiro relato oficial da ocorrência dessa espécie associadas a banana no Brasil e no mundo.

Assim como outros membros do FFSC, *F. annulatum* também possui a capacidade de infectar outros organismos fora do Reino Plantae. Isolados dessa espécie já foram obtidos de pele, olho e sangue de humanos em diferentes Países (Yilmaz et al., 2021). Recentemente isolados foram obtidos de mosca-negra, praga de *Citrus* muito comum no Brasil (Santos et al., 2024;) demonstrando ser uma espécie entomopatogênica. Porém, até o presente momento, não se tem conhecimento se os isolados dessa espécie possuem hospedeiro específico ou se um mesmo isolado pode ser fitopatogênico, patógeno oportunista de humanos e entomopatogênico.

F. sacchari foi a terceira espécie mais isolada de amostras de coroa de bananas com sintomas de podridão e, assim como *F. musae*, a maioria dos seus isolados demonstrou ser patogênico a essa espécie de planta. Essa espécie foi descrita na Índia e a descrição realizada por meio da caracterização de isolados obtidos de *Saccharum officinarum* (Yilmaz et al., 2021). Apesar de relatos da ocorrência como patógeno oportunista em humanos, *F. sacchari* é uma espécie considerada de elevada importância agrícola, sendo relatada em diversas espécies de planta e em diversos países.

A sua gama de hospedeiros aumentou com a inclusão de isolados de duas espécies ao seu clado: *Fusarium neoceras* e *Fusarium desaboruense*. *F. neoceras* foi descrita há muitos anos e já tinha passado por revisões, enquanto *F. desaboruense* foi descrita recentemente na Indonésia como uma nova espécie endêmica causadora do mal do panamá em bananeira (Farr & Rossman, 2024; Yilmaz et al., 2021).

A ocorrência de *F. sacchari* causando podridão em banana já é conhecida a mais de uma década, com relatos do patossistema em alguns países, principalmente na América do Sul (Murad et al., 2017; Farr & Rossman, 2024; Kamel et al., 2016; Riolo et al., 2020). No Brasil, essa espécie foi relatada causando doença apenas em milho, cana-de-açúcar e abacaxi (Carrer Filho et al., 2023; Costa et al., 2019; Farr & Rossman, 2024), sendo esse estudo o primeiro relato do patossistema no País.

Apesar do número de isolados identificados como *F. pseudocircinatum* ser reduzido (dois isolados), foi possível observar que a patogenicidade ao fruto da bananeira também é uma característica isolado específico nesta espécie e que ela está presente em campos de produção e pontos de comercialização. É uma espécie amplamente distribuída e ecologicamente diversa, que infecta diferentes plantas silvestres e cultivadas e pode ser encontrada como endofíticos em folhas (Cavalcanti et al., 2020; Farr & Rossman, 2024).

Assim como *F. annulatum*, a associação de *F. pseudocircinatum* como patógeno humano causando problemas oftalmológicos como patógeno oportunista e infectando insetos já foi relatada (Romão et al., 2022; Tupaki-Sreepurna et al., 2018). No entanto, essa espécie se destaca como organismo fitopatogênico, devido à sua capacidade de infectar diferentes partes de uma variedade de plantas, ocasionando perdas econômicas em muitos países (Farr & Rossman, 2024).

No Brasil essa espécie já foi identificada causando doenças em semente de *Aspidosperma polyneuron* Muell. Arg. (Mazarotto et al., 2020) e *Oryza sativa* L. (Nicolli et al., 2020) e raquitismo e malformação em *Helianthus annuus* L. (Farias et al., 2023), resultando

em perdas produtivas e econômicas para os produtores brasileiros, e ocorrendo endofiticamente em folhas de *Handroanthus chrysotrichus* L. (Cavalcanti et al., 2020).

Apesar de diversas espécies de *Fusarium* estarem associadas a doenças importantes para a produção e comercialização de bananas no Brasil e os primeiros relatos de *F. pseudocircinatum* como agente etiológico da podridão da coroa serem antigos (Tarnowski et al., 2010; Kamel et al., 2016), a espécie ainda não tinha sido relatada associada a essa doença no País, sendo este o primeiro relato.

Assim como observado neste estudo, Kamel et al. (2016) também identificaram uma prevalência reduzida dessa espécie associada à podridão da coroa em banana, quando comparada com outras espécies do gênero. Porém a espécie tem sido considerada nos trabalhos que buscam formas de controle para as doenças pós-colheita da banana (Calderón-Santoyo et al., 2022; Iñiguez-Moreno et al., 2022).

Diferente do que foi observado para as demais espécies, todos os isolados de *F. verticillioides* identificados nesse estudo não foram patogênicos a frutos da bananeira. Esse resultado diverge dos resultados obtidos em estudos já realizados, onde essa espécie foi identificada causando podridão em bananas (Murad et al., 2017; Salem et al., 2020; Van Hove et al., 2011), sendo esta a principal espécie do FFSC associada à podridão pós-colheita de banana até a identificação de *F. musae*.

Uma variável que deve ser considerada é a cultivar de banana utilizada nos testes de patogenicidade, pois a maioria dos trabalhos realizados fora do Brasil utilizaram variedades de banana do grupo genômico AAA (Salem et al., 2020; Tarnowski et al., 2010), enquanto no presente estudo foi utilizado a cultivar prata que pertence ao grupo genômico AAB e é a principal variedade produzida no Brasil (Ferreira et al., 2016). A diferença nos resultados indica que a patogenicidade de *F. verticillioides* à banana também é uma característica isolado específico, já que esse é primeiro estudo sobre o patossistema com isolados brasileiros.

No Brasil, essa espécie já foi relatada causando doenças em *Brachiaria* sp., *Nopalea cochenillifera* L., *Oryza sativa*, *Sorghum bicolor* L., *Triticum aestivum* L., *Zea mays* L. e *Zingiber officinale* Roscoe (Van Der Westhuizen et al., 2003; Silva et al., 2004; Savi et al., 2014; Moreira et al., 2015; Conforto et al., 2019; Nicolli et al., 2020; Costa et al., 2021).

Existe relatos dessa espécie causando podridão da coroa em banana em diferentes países: Japão; Jordânia; Hungria; Itália; Malásia e República Dominicana (Moretti et al., 2004; Zakaria et al., 2012; Molnár; Bartok; Szécsi, 2015; Kamel et al, 2016; Salem et al., 2020), porém a elevada importância de *F. verticillioides* como patógeno de planta é devido à sua associação com grão e sua capacidade de produção de micotoxina (Yilmaz et al., 2021). Com

isso muitos estudos envolvendo isolados dessa espécie associados a grãos já foram realizados, sendo identificado a capacidade de isolados dessa espécie de permanecer como endofíticos tanto no campo quanto em milho na pós-colheita (Bacon et al., 2008).

Porém, mesmo como endofíticos, a presença de espécies de *Fusarium* em culturas alimentícias gera uma grande preocupação devido à capacidade desses organismos de produzir micotoxinas e contaminar os alimentos. As espécies do FFSC são produtoras de uma variedade de micotoxinas, com destaque para as fumonisinas (Munkvold et al., 2021; Nicolli et al., 2020; Yilmaz et al., 2021).

A produção de micotoxinas por isolados de *Fusarium* obtidos de bananas na fase pós-colheita foi demonstrada há mais de duas décadas (Jimenez et al., 1997), sendo comprovada por Alghuthaymi & Bahkali (2015), no experimento realizado com isolados de *Fusarium* obtidos de bananas importadas pela Arábia Saudita, onde foi realizado a detecção e quantificação de fumonisina e outros metabólitos secundários produzidos pelos isolados. Porém, nos dois estudos o meio utilizado para produção das toxinas foi milho e arroz, respectivamente, o que não garante que os isolados de *Fusarium* podem contaminar os frutos de banana com essas substâncias tóxicas.

Nesse estudo o potencial micotoxigênico dos isolados de *Fusarium* obtidos de bananas foi avaliado por meio da detecção dos genes FUM1 e FUM8 que fazem parte do grupamento dos genes envolvidos na biossíntese de fumonisina, sendo identificado que apenas os isolados de *F. sacchari* não possuem estes genes, indicando que os isolados dessa espécie não são potenciais produtores desta micotoxina, conforme observado no estudo desenvolvido por Munkvold et al. (2021), no qual os isolados desta espécie foram associados a outras micotoxinas, mas não as fumonisinas.

Estudos anteriores mostraram que isolados da espécie *F. annulatum* não são produtores de fumonisina (Nelson et al., 1992; Rheeder et al., 2002). No entanto, os três isolados dessa espécie identificados como não patogênicos nesse estudo possuem a presença do gene FUM8, codificador da enzima oxoamina sintase que é conhecida como uma das responsáveis pela via biossintética de fumonisina.

Situação semelhante foi observada para a espécie *F. pseudocircinatum*, no qual a presença desse gene também foi identificada no isolado não patogênico. Porém, a capacidade dessa espécie de produzir fumonisina é conhecida, com relatos da sua ocorrência em arroz, inclusive no Brasil (Nicolli et al., 2020; Pramunadipita et al., 2023)

Apesar da produção de fumonisina ter sido umas das características utilizadas para separar *F. musae* de *F. verticillioides*, considerando que essa espécie tinha sofrido uma

fragmentação do grupamento dos genes associados a fumonisina (Van Hove et al., 2011), nesse estudo *F. musae* foi a espécie com maior número de isolados com a presença do gene FUM8, sendo identificada a presença conjunta do gene FUM1 em dois isolados (CFC-1572 e CFC-1720), indicado a necessidade de novos estudos para avaliar a capacidade de produção de fumonisina dessa espécie.

Dos 12 isolados da espécie *F. verticillioides*, oito isolados possuem os genes FUM1 e FUM8, enquanto apenas em um isolado (CFC-1610) não foi identificada a presença de genes envolvidos na biossíntese de fumonisina. Essa espécie é considerada uma das principais produtoras de fumonisina dentro do FFSC, sendo a presença dessa micotoxina produzida por esta espécie detectada em diversos cereais e seus derivados (Deepa et al., 2016; Fanelli et al., 2012; Nicolli et al., 2020; Zakaria, 2023). Porém, mesmo com relatos da frequente associação desta espécie com podridões pós-colheita em banana, nenhum estudo foi realizado para detectar a produção de fumonisina por isolados obtidos dessa fruta. No entanto os resultados obtidos neste estudo mostram a necessidade da caracterização do perfil toxigênico desses isolados, que são potencialmente micotoxigênico.

A identificação dessas espécies de *Fusarium* pertencentes ao FFSC gera uma preocupação relacionada a saúde humana e segurança alimentar pelos riscos atribuídos à produção de metabólicos secundários e sua capacidade de infectar os seres humanos (Alghuthaym & Bahkall, 2015; Tava et al., 2021).

Estudos sobre a epidemiologia e o impacto da presença dessas espécies em bananas, juntamente com informações referentes à ecologia, distribuição, gama de hospedeiros e sensibilidade a fungicidas de todas as espécies encontradas são necessários. Os resultados deste estudo são de elevada importância para uma melhor definição de estratégias de controle das espécies identificadas e para a redução da incidência da podridão da coroa e possíveis contaminações da banana.

Conclusão

Este estudo relata a diversidade de espécies de *Fusarium* do complexo *F. fujikuroi* associadas a bananas produzidas e comercializadas na região do Cariri cearense, importante região produtora do Nordeste brasileiro. *F. musae*, apesar de ser a espécie mais prevalente e agressiva, não é o único agente etiológico da podridão da coroa na região. Quase todas as espécies encontradas no Cariri cearense associadas a bananas com sintomas de podridão da coroa possuem isolados com potencial micotoxigênico para a produção de fumonisina.

539

540 **Agradecimento**

541

542 Gostaríamos de agradecer ao subsídio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento
 543 Científico e Tecnológico – FUNCAP (BP4-00172-00282.01.00/20), à Coordenação de
 544 Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de Doutorado (Processo nº
 545 88887.602196/2021.00) e a Pró-reitora de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação da Universidade
 546 Federal do Cariri pela concessão de bolsas de Iniciação Científica.

547

548 **Referência**

549 Agrios, G. N. (2005). Plant disease caused by fungi. In: *AGRIOS, G. N. Plant pathology*. 5.
 550 ed. San Diego: Elsevier, 385-614.

551 Alghuthaymi, M. A. & Bahkali, A. H. (2015). Toxigenic profiles and trinucleotide repeat
 552 diversity of *Fusarium* species isolated from banana fruits. *Biotechnology & Biotechnological*
 553 *Equipment*, 29(2), 324-330. <https://doi.org/10.1080/13102818.2014.995519>

554 Alghuthaymi, M., Alshehri, W. A., Al-Maary, K. S., Bahkali, N. A., AlKahtani, M. D.,
 555 Alarfaj, A. A., ... & Ameen, F. (2020). Mycotoxigenicity of *Fusarium* isolated from banana
 556 fruits: Combining phytopathological assays with toxin concentrations. *Journal of King Saud*
 557 *University-Science*, 32(2), 1482-1485. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.12.001>

558 Bacon, C. W., Glenn, A. E., & Yates, I. E. (2008). *Fusarium verticillioides*: managing the
 559 endophytic association with maize for reduced fumonisins accumulation. *Toxin Reviews*,
 560 27(3-4), 411-446. <https://doi.org/10.1080/15569540802497889>

561 Bacon, C. W., Porter, J. K., Norred, W. P., & Leslie, J. (1996). Production of fusaric acid by
 562 *Fusarium* species. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(11), 4039-4043.
 563 <https://doi.org/10.1128/aem.62.11.4039-4043.1996>

564 Barbosa, J. C. & Maldonado Júnior, W. Experimentação agrônômica & AgroEstat: sistema
 565 para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: *Multipress*, 2015. 396 p.

566 Blacutt, A. A.; Gold, S. E.; Voss, K. A.; Gao, M. & Glenn, A. E (2018). *Fusarium*
 567 *verticillioides*: Advancements in understanding the toxicity, virulence, and niche adaptations
 568 of a model mycotoxigenic pathogen of maize. *Phytopathology*, 108(3), 312-326.
 569 <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-17-0203-RVW>

570 Bugnicourt F. (1952). Une espèce fusarienne nouvelle, parasite du riz. *Revue Générale de*
 571 *Botanique*, 59, 13–18.

572 Bugnicourt F. Une espèce fusarienne nouvelle, parasite du riz. (1952) *Revue Générale de*
 573 *Botanique*, 59, 13–18.

574 Bustamante, M. I., Elfar, K., Smith, R. J., Bettiga, L. J., Tian, T., Torres, G. A., & Eskalen, A.
 575 (2022). First report of *Fusarium annulatum* associated with young vine decline in California.
 576 *Plant Disease*, 106(10), 2752. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2790-PDN>

- 577 Calderón-Santoyo, M., Iñiguez-Moreno, M., Barros-Castillo, J. C., Miss-Zacarías, D. M.,
578 Díaz, J. A., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Microencapsulation of citral with Arabic gum
579 and sodium alginate for the control of *Fusarium pseudocircinatum* in bananas. *Iranian*
580 *Polymer Journal*, 31(5), 665-676.
- 581 Carrer Filho, R., Guimarães, M., Abreu, V. P. D., Rocha, G. A., Menezes, R. D. C., Dias, V.
582 D., & Cunha, M. G. D. (2023). *Fusarium sacchari* associated with stem rot in sweet corn in
583 Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 53. [https://doi.org/10.1590/1983-](https://doi.org/10.1590/1983-40632023v5374263)
584 [40632023v5374263](https://doi.org/10.1590/1983-40632023v5374263)
- 585 Carrer Filho, R., Guimarães, M., Abreu, V. P. D., Rocha, G. A., Menezes, R. D. C., Dias, V.
586 D. & Cunha, M. G. D. (2023). *Fusarium sacchari* associated with stem rot in sweet corn in
587 Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 53. [https://doi.org/10.1590/1983-](https://doi.org/10.1590/1983-40632023v5374263)
588 [40632023v5374263](https://doi.org/10.1590/1983-40632023v5374263)
- 589 Cavalcanti, A. D., Da Silva Santos, A. C., De Oliveira Ferro, L., Bezerra, J. D., Souza-Motta,
590 C. M. & Magalhães, O. M. C. (2020). *Fusarium massalimae* sp. nov. (*F. lateritium* species
591 complex) occurs endophytically in leaves of *Handroanthus chrysotrichus*. *Mycological*
592 *Progress*, 19, 1133-1142.
- 593 Chen, J., Wen, J., Tang, Y., Shi, J., Mu, G., Yan, R., ... & Long, M. (2021). Research progress
594 on fumonisin b1 contamination and toxicity: A review. *Molecules*, 26(17), 5238.
595 <https://doi.org/10.3390/molecules26175238>
- 596 Chen, Y. P., Su, P. W., Hyde, K., & Maharachchikumbura, S. (2023). Phylogenomics and
597 diversification of Sordariomycetes. *Mycosphere*, 14(1), 414-451.
598 <https://doi.org/10.5943/mycosphere/14/1/5>
- 599 Conforto, C., Lima, N. B., Silva, F. J. A., Câmara, M. P. S., Maharachchikumbura, S. &
600 Michereff, S. J. (2019). Characterization of fungal species associated with cladode brown spot
601 on *Nopalea cochenillifera* in Brazil. *European Journal of Plant Pathology*, 55, 1179-1194.
- 602 Costa, M. M., Melo, M. P., Carmo, F. S., Moreira, G. M., Guimarães, E. A., Rocha, F. S. &
603 Pfenning, L. H. (2021). *Fusarium* species from tropical grasses in Brazil and description of
604 two new taxa. *Mycological Progress*, 20, 61-72.
- 605 Costa, M. M., Melo, M. P., Guimarães, E. A., Veiga, C. M. O., Carmo Sandin, F., Moreira, G.
606 M. & Pfenning, L. H. (2019). Identification and pathogenicity of *Fusarium* species associated
607 with pokkah boeng of sugarcane in Brazil. *Plant pathology*, 68(7), 1350-1360.
608 <https://doi.org/10.1111/ppa.13053>
- 609 Crous, P. W., Lombard, L., Sandoval-Denis, M., Seifert, K. A., Schroers, H. J., Chaverri, P. &
610 Thines, M. (2021). *Fusarium*: more than a node or a foot-shaped basal cell. *Studies in*
611 *mycology*, 98, 100116. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2021.100116>
- 612 Dab, A., Hasnaoui, I., Mechri, S., Allala, F., Bouacem, K., Noiriél, A., ... & Jaouadi, B.
613 (2023). Biochemical characterization of an alkaline and detergent-stable Lipase from
614 *Fusarium annulatum* Bugnicourt strain CBS associated with olive tree dieback. *Plos one*,
615 18(5), e0286091. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286091>

- 616 Degradi, L., Tava, V., Prigitano, A., Esposto, M. C., Tortorano, A. M., Saracchi, M., ... &
 617 Pasquali, M. (2022). Exploring Mitogenomes Diversity of *Fusarium musae* from Banana
 618 Fruits and Human Patients. *Microorganisms*, 10(6), 1115.
 619 <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061115>
- 620 Desjardins, A. E., Plattner, R. D., & Nelson, P. E. (1997). Production of fumonisin B (inf1)
 621 and moniliformin by *Gibberella fujikuroi* from rice from various geographic areas. *Applied*
 622 *and Environmental Microbiology*, 63(5), 1838-1842. [https://doi.org/10.1128/aem.63.5.1838-](https://doi.org/10.1128/aem.63.5.1838-1842.1997)
 623 1842.1997
- 624 Dhingra, O. D. & Sinclair, J. B. (1985). *Basic plant pathology methods*. 2. ed. Boca Ratom:
 625 Lewis Publishers, 442.
- 626 Duan, C., Qin, Z., Yang, Z., Li, W., Sun, S., Zhu, Z. & Wang, X. (2016). Identification of
 627 pathogenic *Fusarium* spp. causing maize ear rot and potential mycotoxin production in China.
 628 *Toxins*, 8(6), 186. <https://doi.org/10.3390/toxins8060186>
- 629 Fanelli, F., Schmidt-Heydt, M., Haidukowski, M., Susca, A., Geisen, R., Logrieco, A., &
 630 Mulè, G. (2012). Influence of light on growth, conidiation and fumonisin production by
 631 *Fusarium verticillioides*. *Fungal biology*, 116(2), 241-248.
 632 <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.11.007>
- 633 FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS).
 634 FAOSTAT. Rome: Food and Agriculture Organization, 2024. Disponível em:
 635 <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>.
- 636 Farias, O. R., Cruz, J. M. F. D. L., Silva Veloso, J., Souza, J. T., Duarte, I. G., Barbosa, P. R.
 637 R., ... & Do Nascimento, L. C. (2023). *Fusarium pseudocircinatum* causing stunting and
 638 malformation of sunflower plants in Brazil. *Plant Disease*, 107(1), 216.
 639 <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-22-0212-PDN>
- 640 FARR, D.F.; ROSSMAN, A.Y. Fungal Databases - Fungus-Host Distributions U.S. National
 641 Fungus Collections, ARS, USDA, 2021. Disponível em: < [https://nt.ars-](https://nt.ars-grin.gov/fungaldatabases)
 642 [grin.gov/fungaldatabases](https://nt.ars-grin.gov/fungaldatabases)>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- 643 Ferreira, C. F.; Silva, S. De O. E; Amorim, E. P.; Serejo & J. A. Dos S. (Ed.). O agronegócio
 644 da banana. Brasília, DF: Embrapa, 2016. 832 p.
- 645 Gasser, K., Sulyok, M., Spangl, B., Krska, R., Steinkellner, S. & Hage-Ahmed, K. (2023).
 646 *Fusarium proliferatum* secondary metabolite profile in vitro depends on the origin of the
 647 isolates and is clearly reduced in stored garlic. *Postharvest Biology and Technology*, 200,
 648 112312. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112312>
- 649 Gazzotti, T., Lugoboni, B., Zironi, E., Barbarossa, A., Serraino, A., & Pagliuca, G. (2009).
 650 Determination of fumonisin B1 in bovine milk by LC–MS/MS. *Food Control*, 20(12), 1171-
 651 1174. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.02.009>
- 652 Geiser, D. M., Al-Hatmi, A. M., Aoki, T., Arie, T., Balmas, V., Barnes, I., ... & Viljoen, A.
 653 (2021). Phylogenomic analysis of a 55.1-kb 19-gene dataset resolves a monophyletic
 654 *Fusarium* that includes the *Fusarium solani* species complex. *Phytopathology*, 111(7), 1064-
 655 1079. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-20-0330-LE>

- 656 Goudarzi, A., Samavi, S., Amiri Mazraie, M., & Majidi, Z. (2021). Fungal pathogens
657 associated with pre-And postharvest fruit rots of mango in southern Iran. *Journal of*
658 *Phytopathology*, 169(9), 545-555. <https://doi.org/10.1111/jph.13027>
- 659 Harrison, L. R., Colvin, B. M., Greene, J. T., Newman, L. E., & Cole Jr, J. R. (1990).
660 Pulmonary edema and hydrothorax in swine produced by fumonisin B1, a toxic metabolite of
661 *Fusarium moniliforme*. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 2(3), 217-221.
662 <https://doi.org/10.1177/10406387900020031>
- 663 Hirata, T., Kimishima, E., Aoki, T., Nirenberg, H. I., & O'Donnell, K. (2001). Morphological
664 and molecular characterization of *Fusarium verticillioides* from rotten banana imported into
665 Japan. *Mycoscience*, 42(2), 155-166. <https://doi.org/10.1007/BF02464132>
- 666 IARC (1993) List of classifications by cancer sites with sufficient or limited evidence in
667 humans, Volumes 1 to 123. IARC Monographs
- 668 IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Levantamento
669 sistemático da produção agrícola. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e
670 Estatística, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa>.
- 671 Iñiguez-Moreno, M., Calderón-Santoyo, M., Barros-Castillo, J. C., Miss-Zacarías, D. M.,
672 Díaz, J. A., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Nanofibers added with citral: Characterization
673 and their application to postharvest control of *Fusarium pseudocircinatum* in bananas.
674 *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(12), e17188.
675 <https://doi.org/10.1111/jfpp.171>
- 676 Jimenez, M., Huerta, T., & Mateo, R. (1997). Mycotoxin production by *Fusarium* species
677 isolated from bananas. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(2), 364-369.
678 <https://doi.org/10.1128/aem.63.2.364-369.1997>
- 679 Kamel, M. A. M., Cortesi, P. & Saracchi, M. (2016). Etiological agents of crown rot of
680 organic bananas in Dominican Republic. *Postharvest Biology and Technology*, 120, 112-120.
681 <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.06.002>
- 682 Kawashima, L. M., Vieira, A. P., & Soares, L. M. V. (2007). Fumonisin B1 and ochratoxin A
683 in beers made in Brazil. *Food Science and Technology*, 27, 317-323.
684 <https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000200019>
- 685 Kumar, S., Stecher, G., & Tamura, K. (2016). MEGA7: molecular evolutionary genetics
686 analysis version 7.0 for bigger datasets. *Molecular biology and evolution*, 33(7), 1870-1874.
687 <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
- 688 Kumar, S., Stecher, G., Li, M., Knyaz, C., & Tamura, K. (2018). MEGA X: molecular
689 evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Molecular biology and evolution*,
690 35(6), 1547. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy096>
- 691 Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). *Fusarium* laboratory workshops—A recent history.
692 *Mycotoxin Research*, 22(2), 73-74.
- 693 Liu, Y. J.; Whelen, S. & Hall, B. D. (1999). Phylogenetic relationships among ascomycetes:
694 evidence from an RNA polymerase II subunit. *Molecular biology and evolution*, 16(12), 1799-
695 1808. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a026092>

- Logrieco, A., Moretti, A., Castella, G., KostECKi, M., Golinski, P., Ritieni, A., & Chelkowski, J. (1998). Beauvericin production by *Fusarium* species. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(8), 3084-3088. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.8.3084-3088.1998>
- Long, H., Yin, X., Zhao, Z., Long, Y., Fan, J., Shu, R., & Gu, G. (2021). First report of fruit blotch on plum caused by *Fusarium fujikuroi* in China. *Plant Disease*, 105(8), 2256. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-20-1784-PDN>
- Manganiello, G., Marra, R., Staropoli, A., Lombardi, N., Vinale, F., & Nicoletti, R. (2019). The shifting mycotoxin profiles of endophytic *Fusarium* strains: A case study. *Agriculture*, 9(7), 143. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070143>
- Marasas, W. F. O., Kellerman, T. S., Gelderblom, W. C., Thiel, P. G., & Van der Lugt, J. J. (1988). Leukoencephalomalacia in a horse induced by fumonisin B₁ isolated from *Fusarium moniliforme*. *Onderstepoort J. vet. Res.*, 55, 197-203.
- Marasas, W.F.O., (1986). *Fusarium moniliforme*: A mycotoxicological miasma. In: Steyn, P.S., Vleggaar, R. (Eds.), *Mycotoxins and Phycotoxins*. Elsevier Science, Amsterdam, 19–28.
- Mazarotto, E. J., Poitevin, C. G., Do Carmo, A. L. M., Dos Santos, A. F., Tralamazza, S. M. & Pimentel, I. C. (2020). Pathogenic *Fusarium* species complexes associated to seeds of indigenous Brazilian forest tree *Aspidosperma polyneuron*. *European Journal of Plant Pathology*, 158, 849-857.
- Mirghasempour, S. A., Studholme, D. J., Chen, W., Zhu, W., & Mao, B. (2022). Molecular and pathogenic characterization of *Fusarium* species associated with corm rot disease in saffron from China. *Journal of Fungi*, 8(5), 515. <https://doi.org/10.3390/jof8050515>
- Molnár, O.; Bartók, T. & Szécsi, Á. (2015). Occurrence of *Fusarium verticillioides* and *Fusarium musae* on banana fruits marketed in Hungary. *Acta microbiologica et immunologica Hungarica*, 62(2), 109-119. <https://doi.org/10.1556/030.62.2015.2.2>
- Moreira, S. I., Melo, M. P., Andrade, C. C. L., Alves, E. & Pereira, O. L. (2015). Postharvest Ginger Rhizome Rot Caused by *Fusarium verticillioides* in Brazil. *Plant Disease*, 99(8), 1177-1177. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-14-1095-PDN>
- Moretti, A., Logrieco, A., Bottalico, A., Ritieni, A., Fogliano, V., & Randazzo, G. (1996). Diversity in beauvericin and fusaproliferin production by different populations of *Gibberella fujikuroi* (*Fusarium* section Liseola). *Sydowia*, 48(1), 44-56.
- Moretti, A., Mulè, G., Susca, A., González-Jaén, M. T. & Logrieco, A. (2004). Toxin profile, fertility and AFLP analysis of *Fusarium verticillioides* from banana fruits. *European Journal of Plant Pathology*, 110, 601-609.
- Munkvold, G. P., Proctor, R. H., & Moretti, A. (2021). Mycotoxin production in *Fusarium* according to contemporary species concepts. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 373-402. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-102825>
- Murad, N. B.; Mohamed Nor, N. M. I., Shohaimi, S. & Mohd Zainudin, N. A. I. (2017). Genetic diversity and pathogenicity of *Fusarium* species associated with fruit rot disease in

- 734 banana across Peninsular Malaysia. *Journal of applied microbiology*, 123(6), 1533-1546.
735 <https://doi.org/10.1111/jam.13582>
- 736 Nelson, P. E.; Plattner, R. D.; Shackelford, D. D. & Desjardins, A. E. (1992). Fumonisin B1
737 production by *Fusarium* species other than *F. moniliforme* in section Liseola and by some
738 related species. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(3), 984-989.
739 <https://doi.org/10.1128/aem.58.3.984-989.1992>
- 740 Nelson, P. E.; Plattner, R. D.; Shackelford, D. D.; Desjardins, A. E. (1992). Fumonisin B1
741 production by *Fusarium* species other than *F. moniliforme* in section Liseola and by some
742 related species. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(3), 984-989.
- 743 Nicholson, P., Simpson, D. R., Wilson, A. H., Chandler, E., & Thomsett, M. (2004).
744 Detection and differentiation of trichothecene and enniatin-producing *Fusarium* species on
745 small-grain cereals. *Molecular Diversity and PCR-detection of Toxigenic Fusarium Species*
746 *and Ochratoxigenic Fungi*, 503-514.
- 747 Nicolli, C. P., Haidukowski, M., Susca, A., Gomes, L. B., Logrieco, A., Stea, G. & Pfenning,
748 L. H. (2020). *Fusarium fujikuroi* species complex in Brazilian rice: Unveiling increased
749 phylogenetic diversity and toxigenic potential. *International journal of food microbiology*,
750 330,108667. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108667>
- 751 O'Donnell, K., Whitaker, B. K., Laraba, I., Proctor, R. H., Brown, D. W., Broders, K., ... &
752 Geiser, D. M. (2022). DNA sequence-based identification of *Fusarium*: A work in progress.
753 *Plant disease*, 106(6), 1597-1609. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-21-2035-SR>
- 754 Ocampo-Acuna, Y. D., Salazar-Rios, E., Ramírez-Cisneros, M. Á., & Rios, M. Y. (2023).
755 Comprehensive review of liquid chromatography methods for fumonisin determination, a
756 2006-2022 update. *Arabian Journal of Chemistry*, 104716.
757 <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104716>
- 758 O'Donnell, K.; Cigelnik, E. & Nirenberg, H. I. (1998). Molecular systematics and
759 phylogeography of the *Gibberella fujikuroi* species complex. *Mycologia*, 90(3), 465-493.
760 <https://doi.org/10.1080/00275514.1998.12026933>
- 761 Parra, M. Ä., Gómez, J., Aguilar, F. W., & Martínez, J. A. (2022). *Fusarium annulatum*
762 causes *Fusarium* rot of cantaloupe melons in Spain. *Phytopathologia Mediterranea*, 61(2),
763 269-277.
- 764 Patiño, B., Mirete, S., González-Jaén, M. T., Mulé, G., Rodríguez, M. T., & Vázquez, C.
765 (2004). PCR detection assay of fumonisin-producing *Fusarium verticillioides* strains. *Journal*
766 *of Food Protection*, 67(6), 1278-1283. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.6.1278>
- 767 PBMH; PIF. Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura e Produção Integrada
768 de Frutas. Normas de classificação de banana. São Paulo: CEAGESP, 2006. (Documentos,
769 29).
- 770 Pramunadipita, S., Widiastuti, A., Wibowo, A., & Priyatmojo, A. (2023). Mycotoxins
771 Detection and Pathogenicity of *Fusarium* spp. Pathogen of Rice Sheath Rot Disease. *In IOP*
772 *Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1172(1), 012028).
773 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1172/1/012028>

- 774 Proctor, R. H., Plattner, R. D., Desjardins, A. E., Busman, M., & Butchko, R. A. (2006).
 775 Fumonisin production in the maize pathogen *Fusarium verticillioides*: genetic basis of
 776 naturally occurring chemical variation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(6),
 777 2424-2430. <https://doi.org/10.1021/jf0527706>
- 778 Reeb, V.; Lutzoni, F. & Roux, C. (2004). Contribution of RPB2 to multilocus phylogenetic
 779 studies of the euascomycetes (*Pezizomycotina*, Fungi) with special emphasis on the lichen-
 780 forming Acarosporaceae and evolution of polyspory. *Molecular phylogenetics and evolution*,
 781 32(3), 1036-1060. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2004.04.012>
- 782 Rheeder, J. P.; Marasas, W. F. O & Vismer, H. F. (2002) Production of fumonisin analogs by
 783 *Fusarium* species. *Applied and environmental microbiology*, 68(5), 2101-2105.
 784 <https://doi.org/10.1128/AEM.68.5.2101-2105.2002>
- 785 Rheeder, J. P.; Marasas, W. F. O. & Vismer, H. F. (2002). Production of fumonisin analogs
 786 by *Fusarium* species. *Applied and environmental microbiology*, 68(5), 2101-2105.
 787 <https://doi.org/10.1128/AEM.68.5.2101-2105.2002>
- 788 Riolo, M., Aloï, F., Faedda, R., Cacciola, S. O. & Pane, A. (2020). First report of postharvest
 789 fruit rot caused by *Fusarium sacchari* on lady finger banana in Italy. *Plant Disease*, 104(8),
 790 2290-2290. <https://doi.org/10.1094/pdis-01-20-0143-pdn>
- 791 Romão, T. C., Menezes-Filho, A. C. P., Harakava, R., Castro, C. F. S., & Moraes, P. B.
 792 (2022). Molecular and morphological diversity, qualitative chemical profile and antioxidant
 793 activity of filamentous fungi of the digestive tract of *Phylloicus* sp. (Trichoptera:
 794 Calamoceratidae). *Brazilian Journal of Biology*, 84, e259983. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.259983>
- 796 Salem, N. M., Almomany, A. M., Tahat, M. M. & Aldakil, H. (2020). First report of
 797 *Fusarium verticillioides* causing banana fruit rot in Jordan. *Plant Disease*, 104(12), 3255.
 798 <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-20-1116-PDN>
- 799 Sánchez-Rangel, D.; Sanjuan-Badillo, A. & Plasencia, J. (2005). Fumonisin production by
 800 *Fusarium verticillioides* strains isolated from maize in Mexico and development of a
 801 polymerase chain reaction to detect potential toxigenic strains in grains. *Journal of*
 802 *Agricultural and Food Chemistry*, 53(22), 8565-8571. <https://doi.org/10.1021/jf0514827>
- 803 Sanna, M., Martino, I., Guarnaccia, V., & Mezzalama, M. (2023). Diversity and Pathogenicity
 804 of *Fusarium* Species Associated with Stalk and Crown Rot in Maize in Northern Italy. *Plants*,
 805 12(22), 3857. <https://doi.org/10.3390/plants12223857>
- 806 Santos, A. C. S., Pedroso, S. K. B., Alves, A. L., Diniz, A. G., de Oliveira, N. T., & Tiago, P.
 807 V. (2024). *Fusarium* species associated with citrus blackfly (*Aleurocanthus woglumi*) from an
 808 agroecological polyculture in Brazil, including an augmented description of *F. volatile*.
 809 *Mycologia*, 116(1), 92-105. <https://doi.org/10.1080/00275514.2023.2283944>
- 810 Savi, G. D., Piacentini, K. C., Tibola, C. S. & Scussel, V. M. (2014). Mycoflora and
 811 deoxynivalenol in whole wheat grains (*Triticum aestivum* L.) from Southern Brazil. *Food*
 812 *Additives & Contaminants*, 7(3), 232-237, 2014.
 813 <https://doi.org/10.1080/19393210.2014.898337>

- 814 Seefelder, W., Knecht, A., Goßmann, M., Kleta, S., Büttner, C., & Humpf, H. U. (2004).
 815 Occurrence of fumonisins in asparagus (*Asparagus officinalis* L.) and garlic (*Allium sativum*
 816 L.) from Germany. *Mycotoxin Research*, 20, 29-30.
- 817 Silva, E. G., Silva, J. A., Barros, A. P. O., Santos, A. K. V., Michereff, S. J. & Correia, K. C.
 818 (2023), *Fusarium kalimantanense* causing crown rot on banana in Brazil. *Journal of Plant*
 819 *Pathology*, 105, 1199. <https://doi.org/10.1007/s42161-023-01401-5>
- 820 Silva, J. B. D., Dilkin, P., Fonseca, H. & Corrêa, B. (2004). Production of aflatoxins by
 821 *Aspergillus flavus* and of fumonisins by *Fusarium* species isolated from Brazilian sorghum.
 822 *Brazilian Journal of Microbiology*, 35(3), 182-186. [https://doi.org/10.1590/S1517-](https://doi.org/10.1590/S1517-83822004000200002)
 823 [83822004000200002](https://doi.org/10.1590/S1517-83822004000200002)
- 824 Staden, R.; Beal, K. F. & Bonfield, J.K. (1998). The staden package, 1998. In: Misener, S.;
 825 Krawetz, S. A. (ed.). *Bioinformatics Methods and Protocols. Totowa: Humana Press*, 115-
 826 130.
- 827 Tarnowski, T. L., Pérez-Martínez, J. M., & Ploetz, R. C. (2010). Fuzzy pedicel: A new
 828 postharvest disease of banana. *Plant disease*, 94(5), 621-627. [https://doi.org/10.1094/PDIS-](https://doi.org/10.1094/PDIS-94-5-0621)
 829 [94-5-0621](https://doi.org/10.1094/PDIS-94-5-0621)
- 830 Tava, V., Prigitano, A., Cortesi, P., Esposto, M. C. & Pasquali, M. (2021). *Fusarium musae*
 831 from diseased bananas and human patients: Susceptibility to fungicides used in clinical and
 832 agricultural settings. *Journal of Fungi*, 7(9), 784. <https://doi.org/10.3390/jof7090784>
- 833 Thompson, J. D., Gibson, T. J., Plewniak, F., Jeanmougin, F. & Higgins, D. G. (1997). The
 834 CLUSTAL_X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by
 835 quality analysis tools. *Nucleic acids research*, 25(24), 4876-4882.
 836 <https://doi.org/10.1093/nar/25.24.4876>
- 837 Triest, D. & Hendrickx, M. (2016). Postharvest disease of banana caused by *Fusarium musae*:
 838 A public health concern?. *PLoS Pathogens*, 12(11), e1005940.
 839 <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1005940>
- 840 Triest, D., Piérard, D., De Cremer, K., & Hendrickx, M. (2016). *Fusarium musae* infected
 841 banana fruits as potential source of human fusariosis: May occur more frequently than we
 842 might think and hypotheses about infection. *Communicative & Integrative Biology*, 9(2),
 843 e1162934. <http://dx.doi.org/10.1080/19420889.2016.1162934>
- 844 Tupaki-Sreepurna, A., Thanneru, V., Natarajan, S., Sharma, S., Gopi, A., Sundaram, M., &
 845 Kindo, A. J. (2018). Phylogenetic diversity and in vitro susceptibility profiles of human
 846 pathogenic members of the *Fusarium fujikuroi* species complex isolated from South India.
 847 *Mycopathologia*, 183, 529-540.
- 848 Tupaki-Sreepurna, A., Thanneru, V., Natarajan, S., Sharma, S., Gopi, A., Sundaram, M. &
 849 Kindo, A. J. (2018). Phylogenetic diversity and in vitro susceptibility profiles of human
 850 pathogenic members of the *Fusarium fujikuroi* species complex isolated from South India.
 851 *Mycopathologia*, 183, 529-540.
- 852 Van Der Westhuizen, L., Shephard, G. S., Scussel, V. M., Costa, L. L., Vismer, H. F.,
 853 Rheeder, J. P. & Marasas, W. F. (2003). Fumonisin contamination and *Fusarium* incidence in

- 854 corn from Santa Catarina, Brazil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(18), 5574-
855 5578. <https://doi.org/10.1021/jf034298z>
- 856 Van Hove, F., Waalwijk, C., Logrieco, A., Munaut, F. & Moretti, A. (2011). *Gibberella*
857 *musae* (*Fusarium musae*) sp. nov., a recently discovered species from banana is sister to *F.*
858 *verticillioides*. *Mycologia*, 103(3), 570-585. <https://doi.org/10.3852/10-038>
- 859 Visentin, I.; Tamietti, G.; Valentino, D.; Portis, E.; Karlovsky, P.; Moretti, A. & Cardinale, F.
860 (2009). The ITS region as a taxonomic discriminator between *Fusarium verticillioides* and
861 *Fusarium proliferatum*. *Mycological research*, 113(10), 1137-1145.
862 <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2009.07.011>
- 863 Wang, M. M., Crous, P. W., Sandoval-Denis, M., Han, S. L., Liu, F., Liang, J. M., ... & Cai,
864 L. (2022). *Fusarium* and allied genera from China: species diversity and distribution.
865 *Persoonia-Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 48(1), 1-53.
866 <https://doi.org/10.3767/persoonia.2022.48.01>
- 867 Wigmann, É. F.; Meyer, K.; Cendoya, E.; Maul, R.; Vogel, R. F. & Niessen, L. (2020). A
868 loop-mediated isothermal amplification (LAMP) based assay for the rapid and sensitive
869 group-specific detection of fumonisin producing *Fusarium* spp. *International journal of food*
870 *microbiology*, 325, 108627. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108627>
- 871 Xie, L., Wu, Y., Wang, Y., Jiang, Y., Yang, B., Duan, X. & Li, T. (2021). Fumonisin B1
872 induced aggressiveness and infection mechanism of *Fusarium proliferatum* on banana fruit.
873 *Environmental Pollution*, 288, 117793. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117793>
- 874 Xie, L.; Wu, Y., Duan, X., Li, T. & Jiang, Y. (2022). Proteomic and physiological analysis
875 provides an elucidation of *Fusarium proliferatum* infection causing crown rot on banana fruit.
876 *Microbiological Research*, 256, 126952. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126952>
- 877 Yilmaz, N.; Sandoval-Denis, M.; Lombard, L.; Visagie, C. M.; Wingfield, B. D. & Crous, P.
878 W. (2021). Redefining species limits in the *Fusarium fujikuroi* species complex. *Persoonia-*
879 *Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 46(1), 129-162.
880 <https://doi.org/10.3767/persoonia.2021.46.05>
- 881 Zakaria, L. (2023). *Fusarium* Species Associated with Diseases of Major Tropical Fruit
882 Crops. *Horticulturae*, 9(3), 322. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030322>
- 883 Zakaria, L.; Chik, M. W.; Heng, K. W. & Salleh, B. (2012). *Fusarium* species associated with
884 fruit rot of banana (*Musa* spp.), papaya (*Carica papaya*) and guava (*Psidium guajava*).
885 *Malaysian Journal of Microbiology*, 8(2), 127-130. <http://dx.doi.org/10.21161/mjm.03812>
- 886 Zhang, H., Sha, H., Chen, W., & Mao, B. Z. (2024). First Report of *Fusarium annulatum*
887 Causing Blight on *Bletilla striata* (Baiji) in China. *Plant Disease*, (ja).
888 <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-23-1715-PDN>

Figura 1: Características culturais e morfológicas de isolados de *Fusarium* obtidos de bananas coletadas em pontos de comercialização e unidades de beneficiamento na região do Cariri cearense. A – C: colônias em meio BDA. D-E: hifas, células conidiogênicas e conídios. F: micro e macroconídios.

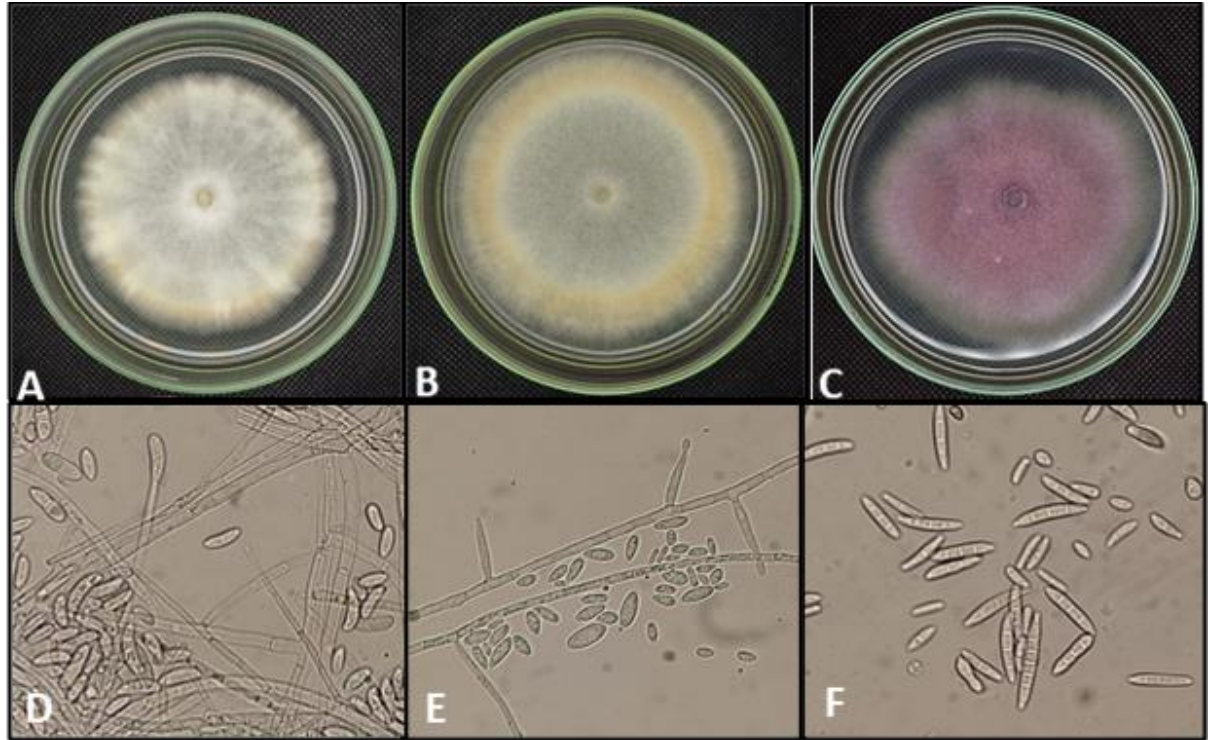


Tabela 1: Espécies de *Fusarium* utilizadas nas análises filogenéticas neste estudo com seus números de acesso do GenBank.

Espécies	Isolado	Número de acesso GenBank	
		TEF1	RPB2
<i>Fusarium acutatum</i>	CBS 402.97 ^T	KR071754	KT154005
<i>F. acutatum</i>	CBS 401.97	KU604455	KU604287
<i>F. andiyazi</i>	CBS 119857 ^T	LT996092	LT996138
<i>F. andiyazi</i>	NRRL 31727	MN193854	MN193882
<i>F. annulatum</i>	CBS 258.54 ^T	MT010994	MT010983
<i>F. annulatum</i>	CBS 115.97	MW401973	MW402785
<i>F. caapi</i>	CML 3657	MT901350	MT901316
<i>F. chinhyiense</i>	NRRL 25221 ^T	MN534050	MN534262
<i>F. chinhyiense</i>	NY 001B5	MN534051	MN534263
<i>F. concentricum</i>	CBS 450.97 ^T	AF160282	LT575063
<i>F. concentricum</i>	NRRL 25202	JF740760	JF741086
<i>F. denticulatum</i>	CBS 407.97 ^T	KR909385	MT010970
<i>F. denticulatum</i>	CBS 406.97	MN533999	MN534273
<i>F. dhileepani</i>	BRIP 71717 ^T	OK509072	OK533536
<i>F. elaeagni</i>	LC 13627 ^T	MW580466	MW474412
<i>F. fujikuroi</i>	CBS 221.76 ^T	AB725605	KU604255
<i>F. fujikuroi</i>	CBS 227.52	MK560310	MN892319
<i>F. globosum</i>	CBS 431.97	LT746232	MW402816
<i>F. globosum</i>	NRRL 26131 ^T	KF466417	KF466406
<i>F. hechiense</i>	LC 13644 ^T	MW580494	MW474440
<i>F. lactis</i>	CBS 420.97	MN534015	MN534296
<i>F. lactis</i>	NRRL 25200 ^T	AF160272	LT996149
<i>F. madaense</i>	CBS 146648	MW402095	MW402761
<i>F. madaense</i>	CBS 146669 ^T	LR792625	LR792589
<i>F. mangiferae</i>	CBS 120994 ^T	LT574978	LT575059
<i>F. mangiferae</i>	NRRL 25229	HM347115	EF470123
<i>F. mundagurra</i>	RBG 5717 ^T	KP083256	KP083276
<i>F. musae</i>	NRRL 25059 ^T	FN552086	FN552108
<i>F. musae</i>	NRRL 28893	FN552092	FN552114
<i>F. napiforme</i>	CBS 135139	KU604410	KU604234
<i>F. napiforme</i>	NRRL 13604	MT919903	EF470117
<i>F. nygamai</i>	CBS 413.97	MW402127	MW402815
<i>F. nygamai</i>	CBS 748.97 ^T	AF160266	EF470117
<i>F. proliferatum</i>	CBS 480.96 ^T	MN534059	MN534272
<i>F. pseudocircinatum</i>	CBS 455.97 ^T	MG838023	MN724939
<i>F. pseudocircinatum</i>	NRRL 36939	MN193866	MW402715
<i>F. ramigenum</i>	CBS 526.97	MN534032	MN534292
<i>F. ramigenum</i>	NRRL 25208 ^T	AF160267	KF466412
<i>F. sacchari</i>	CBS 131372	MN534033	MN534293
<i>F. sacchari</i>	CBS 223.76 ^T	AF160278	JX171580
<i>F. thapsinum</i>	CBS 539.79	MW402140	MW402818
<i>F. thapsinum</i>	CBS 776.96 ^T	MW928844	MW928833
<i>F. verticillioides</i>	CBS 167.87	MW402101	MW402834
<i>F. verticillioides</i>	CBS 218.76 ^T	KF499582	MW928835
<i>F. xyrophilum</i>	NRRL 62710	MN193875	MN193903
<i>F. xyrophilum</i>	NRRL 62721 ^T	MN193877	MN193905
<i>F. nirenbergiae</i> (outgroup)	NRRL 22902	AF160312	LT575065

^T Isolado tipo da espécie.

Figura 2 Árvore filogenética obtida a partir da análise de máxima verossimilhança (MV) de um conjunto de dados combinados de sequências dos genes EF-1 α e RPB2 de espécies de *Fusarium* do complexo *F. fujikuroi*. Valores de suporte para MV $\geq 70\%$ são indicadas nos nós.

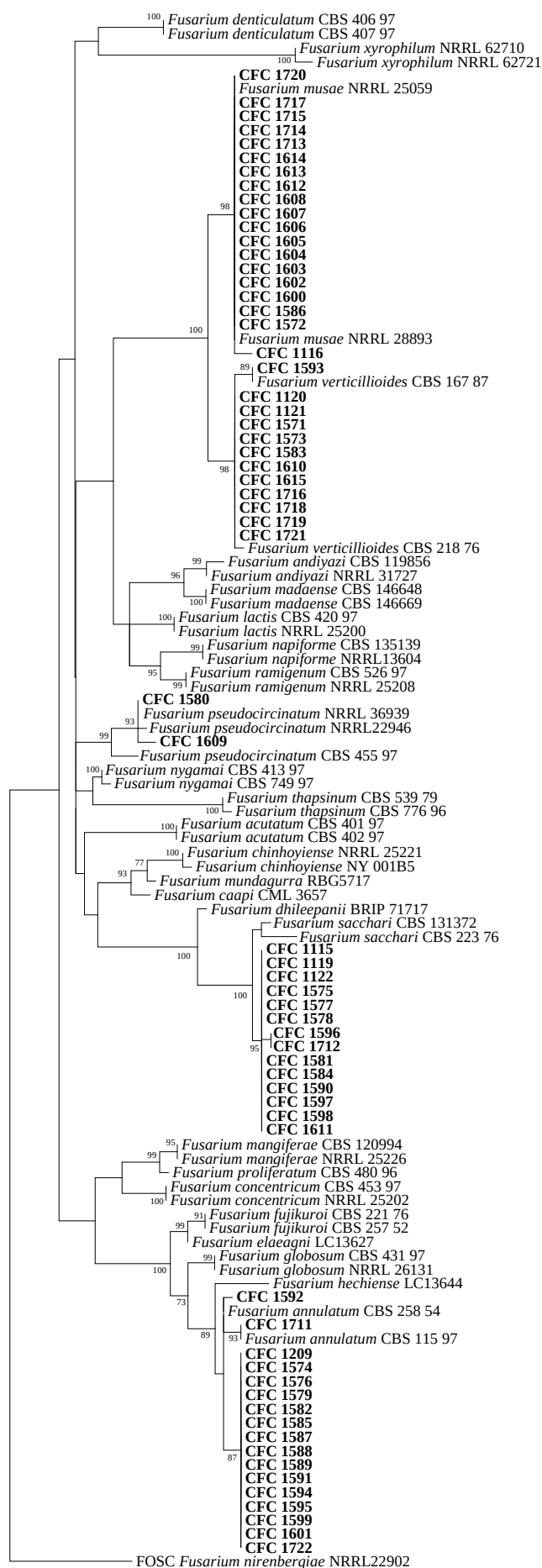


Tabela 2 Isolados de *Fusarium* obtidos de bananas com sintomas de podridão da coroa coletadas em unidades de beneficiamento e pontos comerciais da região do Cariri cearense.

Código do isolado ^a	Espécie	Município de coleta	Local de coleta	Gene detectado	
				FUM1 ^b	FUM8 ^b
CFC-1115	<i>F. sacchari</i>	Barbalha	Ponto comercial	-	-
CFC-1116	<i>F. musae</i>	Caririaçu	Ponto comercial	-	-
CFC-1119	<i>F. sacchari</i>	Crato	Ponto comercial	-	-
CFC-1120	<i>F. verticillioides</i>	Farias Brito	Ponto comercial	+	-
CFC-1121	<i>F. verticillioides</i>	Juazeiro do Norte	Ponto comercial	+	+
CFC-1122	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Ponto comercial	-	-
CFC-1209	<i>F. annulatum</i>	Nova Olinda	Ponto comercial	-	-
CFC-1571	<i>F. verticillioides</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1572	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	+	+
CFC-1573	<i>F. verticillioides</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	+	+
CFC-1574	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1575	<i>F. sacchari</i>	Barbalha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1576	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1577	<i>F. sacchari</i>	Barbalha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1578	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1579	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1580	<i>F. pseudocircinatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1581	<i>F. sacchari</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1582	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1583	<i>F. verticillioides</i>	Barbalha	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1584	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1585	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1586	<i>F. musae</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	+

CFC-1587	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1588	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1589	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1590	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1591	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1592	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1593	<i>F. verticillioides</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	+	+
CFC-1594	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1595	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1596	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1597	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1598	<i>F. sacchari</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1599	<i>F. annulatum</i>	Missão Velha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1600	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1601	<i>F. annulatum</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1602	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1603	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1604	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1605	<i>F. musae</i>	Caririaçu	Ponto comercial	-	+
CFC-1606	<i>F. musae</i>	Caririaçu	Ponto comercial	-	+
CFC-1607	<i>F. musae</i>	Caririaçu	Ponto comercial	-	+
CFC-1608	<i>F. musae</i>	Crato	Ponto comercial	-	-
CFC-1609	<i>F. pseudocircinatum</i>	Crato	Ponto comercial	-	-
CFC-1610	<i>F. verticillioides</i>	Farias Brito	Ponto comercial	-	-
CFC-1611	<i>F. sacchari</i>	Jardim	Ponto comercial	-	-
CFC-1612	<i>F. musae</i>	Jardim	Ponto comercial	-	-
CFC-1613	<i>F. musae</i>	Nova Olinda	Ponto comercial	-	+
CFC-1614	<i>F. musae</i>	Nova Olinda	Ponto comercial	-	-
CFC-1615	<i>F. verticillioides</i>	Juazeiro do Norte	Ponto comercial	+	+
CFC-1711	<i>F. annulatum</i>	Barbalha	Ponto comercial	-	-

CFC-1712	<i>F. sacchari</i>	Barbalha	Unidade de beneficiamento	-	-
CFC-1713	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1714	<i>F. musae</i>	Brejo Santo	Unidade de beneficiamento	-	+
CFC-1715	<i>F. musae</i>	Jardim	Ponto comercial	-	+
CFC-1716	<i>F. verticillioides</i>	Nova Olinda	Ponto comercial	+	+
CFC-1717	<i>F. musae</i>	Nova Olinda	Ponto comercial	-	+
CFC-1718	<i>F. verticillioides</i>	Juazeiro do Norte	Ponto comercial	+	+
CFC-1719	<i>F. verticillioides</i>	Juazeiro do Norte	Ponto comercial	+	+
CFC-1720	<i>F. musae</i>	Juazeiro do Norte	Ponto comercial	+	+
CFC-1721	<i>F. verticillioides</i>	Juazeiro do Norte	Ponto comercial	+	+
CFC-1722	<i>F. annulatum</i>	Nova Olinda	Ponto comercial	-	-

^aColeção de Culturas de Fungos Fitopatogênicos do Cariri da Universidade Federal do Cariri - Campus Crato, Crato-CE, Brasil.

^{b+}: Presença do gene que faz parte da produção da biossíntese da micotoxina fumonisina.

^{b-}: Ausência do gene que faz parte da produção da biossíntese da micotoxina fumonisina.

Figura 3 Amplificação por PCR de um fragmento do gene *fum1* usando oligonucleotídeos FUM53F/FUM53R em DNA genômico de isolados de espécies do FFSC, CFC 1116 (1), CFC 1119 (2), CFC 1120 (3), CFC 1121 (4), CFC 1571 (5), CFC 1572 (6), CFC 1573 (7), CFC 1577 (8), CFC 1580 (9), CFC 1583 (10), CFC 1586 (11), CFC 1591 (12), CFC 1592 (13), CFC 1593 (14), CFC 1596 (15), CFC 1600 (16), CFC 1603 (17), CFC 1605 (18), CFC 1606 (19), CFC 1607 (20), CFC 1609 (21), CFC 1610 (22), CFC 1613 (23), CFC 1615 (24), CFC 1713 (25), CFC 1714 (26), CFC 1715 (27), CFC 1716 (28), CFC 1717 (29), CFC 1718 (30), CFC 1719 (31), CFC 1720 (32), CFC 1721 (33), CFC 1722 (34). Controle positivo *F. verticillioides* obtidos de grãos de milho (+), Controle negativo, sem DNA (-). Marcador de tamanho molecular de DNA de 100 pb (M).

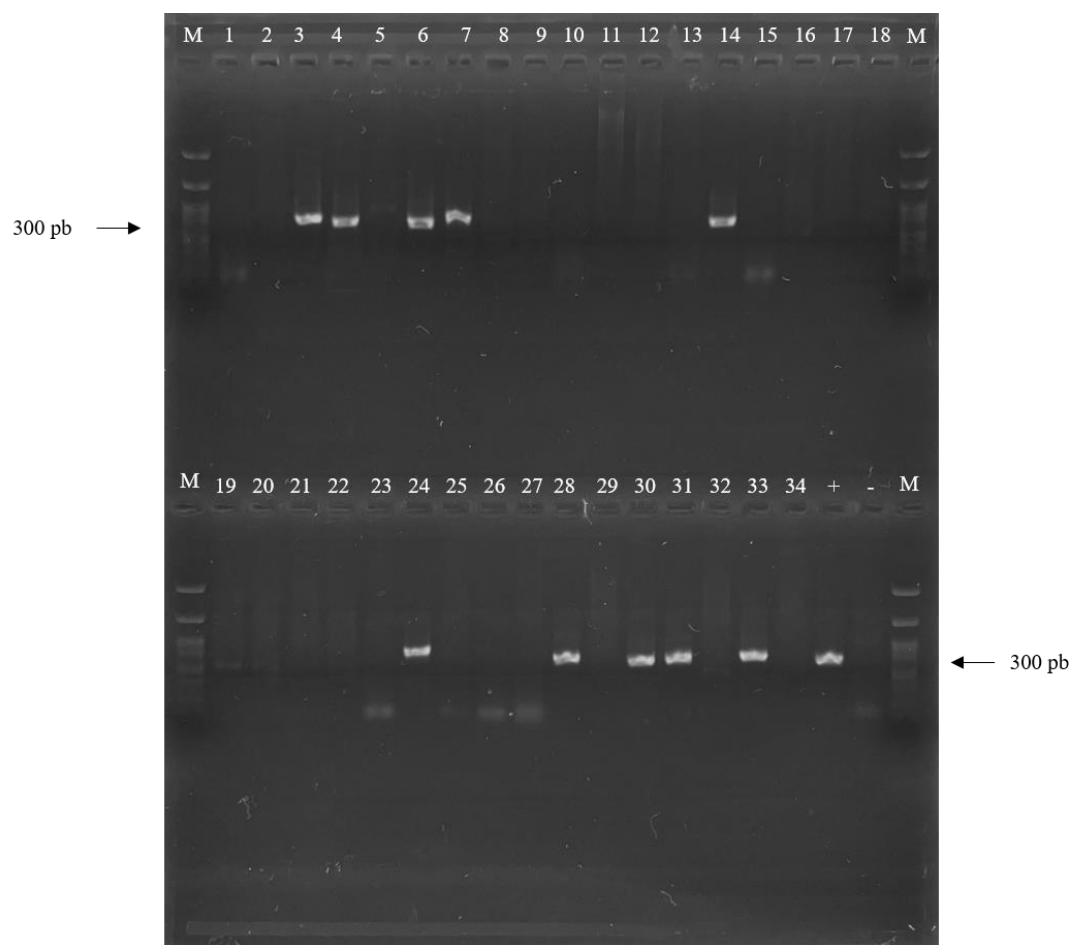


Figura 4 Amplificação por PCR de um fragmento do gene *fum* 8 usando oligonucleotídeos VERTF-1/ VERTF-2 em DNA genômico de isolados de espécies do FFSC, CFC 1116 (1), CFC 1119 (2), CFC 1120 (3), CFC 1121 (4), CFC 1571 (5), CFC 1572 (6), CFC 1573 (7), CFC 1577 (8), CFC 1580 (9), CFC 1583 (10), CFC 1586 (11), CFC 1591 (12), CFC 1592 (13), CFC 1593 (14), CFC 1596 (15), CFC 1600 (16), CFC 1603 (17), CFC 1605 (18), CFC 1606 (19), CFC 1607 (20), CFC 1609 (21), CFC 1610 (22), CFC 1613 (23), CFC 1615 (24), CFC 1713 (25), CFC 1714 (26), CFC 1715 (27), CFC 1716 (28), CFC 1717 (29), CFC 1718 (30), CFC 1719 (31), CFC 1720 (32), CFC 1721 (33), CFC 1722 (34). Controle positivo *F. verticillioides* obtidos de grãos de milho (+), Controle negativo, sem DNA (-). Marcador de tamanho molecular de DNA de 100 pb (M).

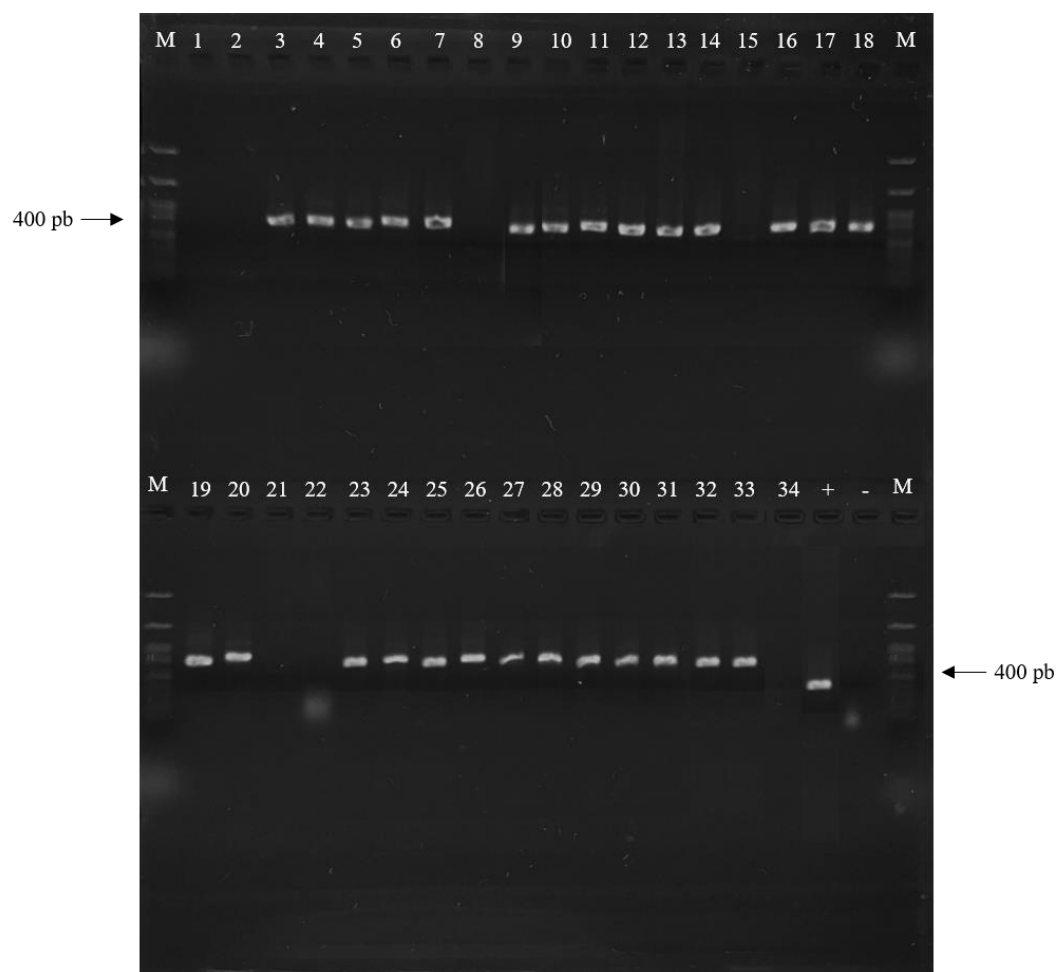
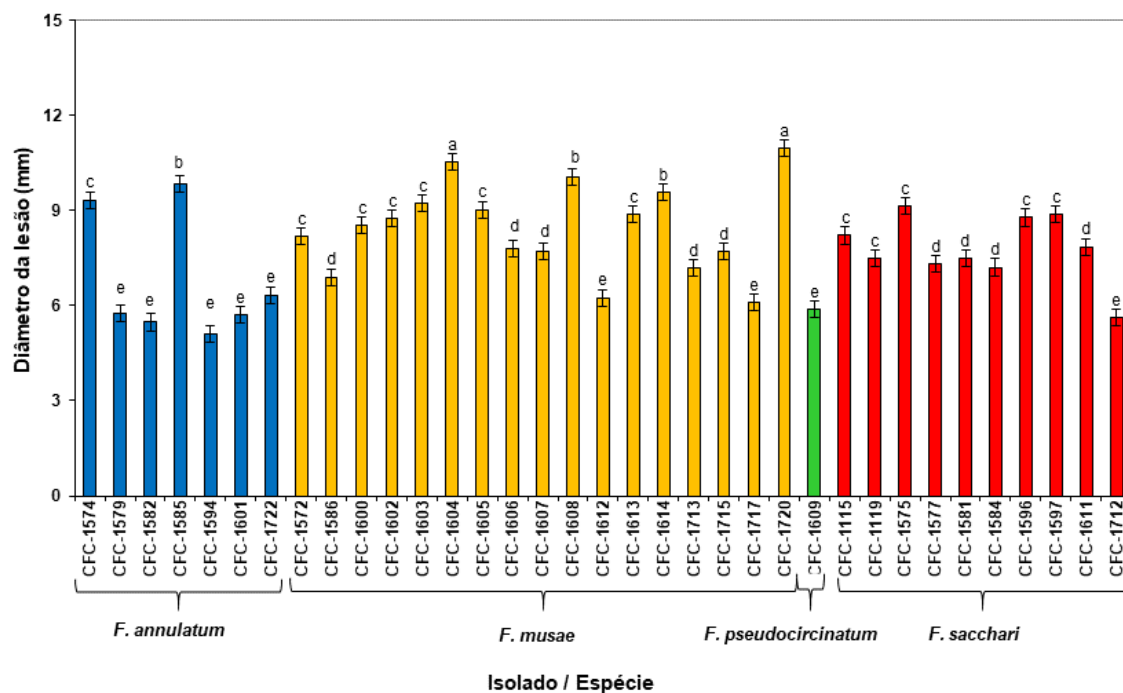


Figura 5 Teste de patogenicidade de isolados de *Fusarium* do complexo de *F. fujikuroi* inoculados em bananas. A: Testemunha, sem sintomas; B: Fruto inoculado com *F. musae*; C: Fruto inoculado com *F. sacchari* e D: Fruto inoculado com *F. annulatum*;



Figura 6 Diâmetro médio das lesões (mm) causadas por quatro espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* associadas à podridão da coroa da banana (Nordeste do Brasil) aos quatro dias após a inoculação com suspensão de esporos em frutos destacados e feridos da cultivar Prata. As barras acima das colunas são o erro padrão da média. Colunas com a mesma letra não diferem significativamente de acordo com o teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$).



CAPÍTULO III

Sensitivity to imazalil of *Fusarium fujikuroi* species complex associated with banana crown rot in Brazil

Submissão: **Journal of Phytopathology**

Short communication

Göttingen, Alemanha

JCR =1,9

1 SHORT COMMUNICATION

2
3 **Sensitivity to imazalil of *Fusarium fujikuroi* species complex associated with**
4 **banana crown rot in Brazil**

5
6 **Euzanyr Gomes da Silva¹ | Wilson Pereira da Silva² | Rafael Luis de Oliveira² | Germana**
7 **Vitória Ricarto Moreira² | Ivna Ribeiro Salmito Melo² | Sami Jorge Michereff² | Kamila**
8 **Câmara Correia²**

9
10 ¹Graduate Program in Plant Protection, Federal University of Alagoas, Rio Largo 57100-000,
11 Alagoas, Brazil

12 ²Center for Agricultural Sciences and Biodiversity, Federal University of Cariri, Crato 63133-
13 610, Ceará, Brazil

14
15 **Correspondence**

16 Kamila C. Correia, Laboratory of Phytopathology, Center for Agricultural Sciences and
17 Biodiversity, Federal University of Cariri, Crato 63133-610, Ceará, Brazil

18 Email: kamila.correia@ufca.edu.br

19
20 **Abstract**

21 Imazalil is a fungicide used in the postharvest treatment of bananas to control diseases.
22 However, information about the sensitivity of *Fusarium fujikuroi* complex (FFSC) isolates
23 associated with banana crown rot to imazalil is limited. Therefore, the sensitivity of 64 FFSC
24 isolates obtained from bananas in the Cariri region of Ceará (Brazil) was evaluated by analyzing
25 the effective concentration of imazalil required to inhibit 50% of mycelial growth (EC₅₀). The

EC₅₀ values ranged between 0.045 and 6.914 µg/mL. There was a 153.64-fold difference between the maximum and minimum EC₅₀ values, and the frequency distribution of the EC₅₀ did not generate an unimodal, indicating the presence of imazalil-resistant isolates in the population. Based on the fungicide resistance factor (RF) values, the isolates of FFSC were classified into sensitive (six isolates), low resistant (15), moderately resistant (33), and highly resistant (10) isolates. *Fusarium pseudocircinatum* exhibited the highest EC₅₀ value (3.601 µg/mL), followed by *F. annulatum* (2.175 µg/mL). In contrast, *F. musae*, *F. sacchari*, and *F. verticillioides* displayed the lowest EC₅₀ values. The majority of isolates highly resistant to imazalil belonged to *F. annulatum*, while the most sensitive isolates to imazalil were from *F. verticillioides*. The discovery of FFSC isolates from bananas resistant to imazalil is indeed concerning, especially considering that this fungicide is exclusively used in postharvest.

KEYWORDS

chemical control, DMI fungicide, fungicide resistance, *Musa* spp., postharvest disease

Banana (*Musa* spp.) is the fruit most consumed in Brazil. In 2022, the country cultivated approximately 472.6 thousand hectares of banana trees, resulting in a total production of 6.8 million tons of fruit. This production solidifies Brazil's position as the fourth-largest banana producer globally (FAO, 2024).

Bananas are affected by several diseases, and crown rot is considered one of the most important postharvest diseases, causing a great negative impact on fruit quality. Fungi are the causal agents of crown rot, and they belong to various genera and species, whose presence and frequency varied according to farming area. The presence and frequency of these fungal pathogens can vary significantly depending on the farming area (Lassois & De Lapeyre De Bellaire, 2014; Kamel et al., 2016). In addition to causing fruit rot and affecting the quantity

and quality of soluble sugars, certain fungi associated to crown rot in bananas can produce mycotoxins (Lassois & De Lapeyre De Bellaire, 2014). Among these fungi, the genus *Fusarium* is notable, posing a threat to human and animal health (Zakaria, 2023). In banana plants, *Fusarium* species can colonize decomposing leaves and floral parts in the field, with the latter being particularly effective as a source of inoculum. Fruit contamination can occur at various stages, including in the field during the growth of the bananas, during harvest, and when clusters are trimmed from bunches. Additionally, washing tanks in packinghouses can also contribute to contamination if they are not properly sanitized, leading to the presence of contaminated washing water (Lassois & De Lapeyre De Bellaire, 2014).

In Brazil, specifically in the Cariri region of Ceará, a recent study in packinghouses and markets has identified five species belonging to the *Fusarium fujikuroi* complex (FFSC) (*F. annulatum*, *F. musae*, *F. pseudocircinatum*, *F. sacchari*, and *F. verticillioides*) associated with banana crown rot (Silva et al., 2024).

One strategy for managing postharvest diseases in bananas involves chemical control through the immersion of banana fruit in fungicide suspension (Leite et al., 2020). Although no specific fungicides are registered for controlling *Fusarium* in postharvest bananas in Brazil, this genus may be exposed to active ingredients (a.i.) utilized for controlling *Colletotrichum musae*, particularly imazalil (MAPA, 2024). This fungicide belongs to the chemical group of imidazoles, characterized by its systemic action and specificity to a particular target site within fungal cells. It can inhibit fungal growth by interacting with the heme iron of the cytochrome P450 sterol 14 α -demethylase (CYP51), an essential enzyme for biosynthesis of the predominant sterol in fungal membranes. This mode of action categorizes it within the demethylation inhibitor (DMI) group of fungicides (Stenzel & Vors, 2019). The specific mode of action is one of the primary factors contributing to the development of resistance in fungal populations (Hollomon, 2015). While the genus *Fusarium* is considered to be at low risk of

developing fungicide resistance (FRAC, 2019), continuous applications of DMI fungicides, which are categorized as being at medium risk of resistance (FRAC, 2023), can indeed lead to the development of resistant populations in various fungal pathogens, including *Fusarium* (Yin et al., 2023).

To date, the only study analyzing sensitivity to imazalil in banana *Fusarium* populations was conducted with 17 isolates of *F. moniliforme* (now *F. verticillioides*) and 16 isolates of *F. pallidoroseum* (now *F. incarnatum*) obtained from fruits exhibiting symptoms of crown rot. These fruits were imported into England from the West Indies. The study found that the fungicide concentration values required to inhibit 50% of mycelial growth (EC₅₀) ranged from 0.04 to 0.45 µg/mL. These values were considered very low, indicating a high sensitivity of the *Fusarium* isolates to the fungicide (Johanson & Blazquez, 1992).

This study aimed to analyze the sensitivity to imazalil of FFSC isolates obtained from bananas with crown rot in the Cariri region of Ceará, Brazil. Understanding the sensitivity of these *Fusarium* isolates to imazalil can provide valuable insights into the effectiveness of the fungicide in controlling crown rot and inform future disease management strategies in banana cultivation.

A total of 64 isolates belonging to the FFSC were obtained from the Culture Collection of Phytopathogenic of Cariri (CFC) at the Universidade Federal do Cariri (Crato, Ceará, Brazil). These isolates encompassed various species within the complex, including *F. annulatum* (17 isolates), *F. musae* (19 isolates), *F. pseudocircinatum* (2 isolates), *F. sacchari* (14 isolates), and *F. verticillioides* (12 isolates) (Table S1). The isolates originated from bananas showing symptoms of crown rot collected between 2018 and 2022 in packinghouses and markets in the Cariri region of Ceará. They were previously identified at the species level through phylogenetic inference based on sequences of the elongation factor gene 1- α (EF1- α) and the second largest subunit of RNA polymerase II (RPB2) (Silva et al., 2024).

The sensitivity of FFSC isolates to the fungicide imazalil was evaluated by a mycelial growth assay, using the commercial formulation Magnate 500 EC (500 g/L a.i., Adama Brasil, Londrina – PR, Brazil). The fungicide was suspended in sterile distilled water and added to molten (45°C) potato dextrose agar (PDA) to obtain the final concentrations of 0.01, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 5, and 10 µg a.i./mL. Mycelial plugs (5 mm in diameter) were removed from the margins of 7-day-old cultures and transferred to the centre of the PDA plates amended with the different fungicide concentrations. Petri plates containing PDA without fungicide were used as controls. Three replicates of each isolate were used to test each fungicide concentration and control. The experiment was conducted twice. Following a 96-hour incubation period at 30°C in the dark, the diameter of each colony was measured in two perpendicular directions. The percentage of mycelial growth (PMG) was obtained using the formula: $PMG = (100 \times F)/C$, where F corresponds to mycelial growth in PDA containing fungicide, and C is the control (mycelial growth in fungicide-free PDA). The value for PMG was subtracted from 100 to yield the percentage of growth inhibition at each fungicide concentration. The effective concentration of the fungicide that was able to inhibit mycelial growth by 50% (EC₅₀) was calculated for each isolate by linear regression of the mycelial growth inhibition versus the log₁₀ transformation of the fungicide concentration.

The one-way analyses of variance (ANOVA) conducted on the EC₅₀ values from two experiments indicated that the two experiments did not differ statistically ($p > .05$). Therefore, the average EC₅₀ values obtained from the two experiments for each isolate were used in the subsequent data analysis.

Frequency distribution of the isolates based on EC₅₀ values was established. The differences among EC₅₀ values from five *Fusarium* species were compared using the Kruskal-Wallis test with comparisons of mean ranks, at a significance level of $p = .05$. Furthermore, the differences among EC₅₀ values of isolates collected in two types of establishments

(packinghouses and markets) were compared via the Wilcoxon Rank Sum test, also at a significance level of $p=.05$. All statistical analyses were performed using the software Statistix v. 9.0 (Analytical Software, Tallahassee, USA).

The fungicide resistance factor (RF) for each isolate was calculated using the formula: $RF = EC_{50}$ of the tested isolate/ EC_{50} of the most sensitive isolate (Li et al., 2020). Based on the RF values obtained, the isolates of *Fusarium* were classified in relation to imazalil as follows: sensitive (S): $0 < RF \leq 5$, low resistant (LR): $5 < RF \leq 10$, moderately resistant (MR): $10 < RF \leq 50$, and highly resistant (HR): $50 < RF$ (Peng et al., 2022).

The EC_{50} values obtained for the isolates of five species of the FFSC ranged between 0.045 and 6.914 $\mu\text{g/mL}$, with the mean EC_{50} value being $1.259 \pm 0.157 \mu\text{g/mL}$ (Figure 1; Table S1). This difference in sensitivity may be related to the natural characteristics of the species or isolates, such as genetic diversity or physiological traits, or another hypothesis is that the isolates had been more exposed to fungicides, which led to the selection of less sensitive isolates in the population (Brent & Hollomon, 2007; Santos et al., 2019).

Based on the EC_{50} value of the tested isolates, there was a 153.64-fold difference between the maximum and minimum EC_{50} values, and the frequency distribution of the EC_{50} did not generate an unimodal (Figure 1), indicating the presence of imazalil-resistant isolates in the population.

The 64 isolates of the FFSC were classified into four categories of sensitivity to imazalil based in the RF values: six sensitive, 15 low resistant, 33 moderately resistant, and ten highly resistant isolates (Table 1). This classification provides insights into the varying degrees of sensitivity to the fungicide within the FFSC population from banana.

The mean EC_{50} values of *Fusarium* species were significantly different. *Fusarium pseudocircinatum* exhibited the highest EC_{50} value (3.601 $\mu\text{g/mL}$), followed by *F. annulatum* (2.175 $\mu\text{g/mL}$). In contrast, *F. musae*, *F. sacchari*, and *F. verticillioides* displayed the lowest

EC₅₀ values (0.684-0.928 µg/mL), which did not significantly differ from each other (Table 1). This significant variation underscores the diversity in sensitivity levels among the species within the FFSC. The variation in sensitivity to imazalil observed between populations of *F. verticillioides* from the West Indies and those in this study is noteworthy. The estimated mean EC₅₀ value of 0.45 µg/mL reported by Johanson & Blazquez (1992) for the West Indies population is lower than the mean EC₅₀ of 0.684 µg/mL found in our study. This difference suggests potential variability in fungicide sensitivity among different geographic populations of *F. verticillioides*.

According to the RF values, the majority of isolates highly resistant to imazalil belonged to *F. annulatum*, representing 70% of these isolates. On the other hand, the most sensitive isolates to imazalil were from *F. verticillioides*, comprising 66.7% of the sensitive isolates. The majority of *F. musae* isolates (57.9%) and *F. sacchari* isolates (71.4%) demonstrated moderate resistance to imazalil (Table 1). There was no significant difference in mean EC₅₀ values based on the type of establishment where the FFSC isolates were obtained, whether it be packinghouses or markets (Table 2). Based on the RF values, 16.2% of isolates collected in packinghouses were classified a highly resistant to imazalil, while 56.8% were moderately resistant and 10.8% were sensitive. Among those collected at markets, 14.8% were highly resistant to imazalil, while 44.4% were moderately resistant and 7.4% were sensitive (Table 2). This suggests that the sensitivity to imazalil among the isolates was not influenced by the location from which they were collected. No sensibility studies to imazalil have been conducted with FFSC isolates from bananas or other crops that would enable a direct comparison with the levels of resistance identified in this research.

Fungicide resistance is uncommon in populations that have not been exposed to fungicide application, as alleles linked to resistance are rare or absent. However, these alleles can proliferate in frequency in the presence of fungicides, depending on the intensity and

frequency of selection pressure (Brent & Hollomon, 2007). The discovery of FFSC isolates from bananas resistant to imazalil is indeed concerning, especially considering that this fungicide is exclusively used postharvest. One hypothesis is that the exposure of FFSC isolates to fungicides with the same mode of action as imazalil, used in the field for controlling leaf spots, may indeed select for isolates with reduced sensitivity to imazalil.

This study represents the first investigation into the sensitivity to imazalil among isolates and species belonging to the FFSC obtained from bananas in Brazil. The findings unveiled significant variability in sensitivity to the fungicide across isolates, with the identification of highly resistant isolates. This highlights the importance of monitoring fungicide applications and implementing rotational strategies involving different modes of action to prevent the development of resistance to imazalil in FFSC isolated from banana. Further research is warranted to investigate the potential cross-resistance of imazalil with other active ingredients sharing the same mode of action used in field applications. Additionally, analyzing the factors contributing to the observed resistance to imazalil among the FFSC isolates is crucial. This includes identifying mutations associated with reduced sensitivity, as well as assessing the stability of resistance and related fitness variables. Such studies will provide valuable insights into the mechanisms of fungicide resistance and inform strategies for managing fungal diseases effectively while minimizing the risk of resistance development.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conception and design, critical revision of the manuscript for important intellectual content: KCC and SJM. Data acquisition and interpretation: EGS, WPS, RLO, and GVRM. Preparation of the draft manuscript: EGS. Coordination of the research project: KCC. Technical and material support: IRSM. All authors read and approved the final manuscript.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Higher Education Personnel Improvement Coordination – CAPES (Brazil) for the doctoral grant for EGZ (BCT 88887.602196/2021.00), the Cearense Foundation for Supporting Scientific and Technological Development – FUNCAP (Brazil) for the research fellowships for KCC (309290/2019-8), and the National Council for Scientific and Technological Development – CNPq (Brazil) for the research fellowships for SJM (309290/2019-8).

FUNDING INFORMATION

This work was supported by the Cearense Foundation for Supporting Scientific and Technological Development – FUNCAP (Brazil).

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare that they have no conflict of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

ORCID

Euzanyr Gomes da Silva: <https://orcid.org/0000-0001-8248-4392>

Wilson Pereira da Silva: <https://orcid.org/0000-0002-7184-0328>

Rafael Luis de Oliveira: <https://orcid.org/0009-0002-4679-5649>

Germana Vitória Ricarto Moreira: <https://orcid.org/0009-0000-5473-194X>

Ivna Ribeiro Salmito Melo: <https://orcid.org/0000-0003-3515-0415>

226 Sami Jorge Michereff: <http://orcid.org/0000-0002-2156-3502>

227 Kamila Câmara Correia: <https://orcid.org/0000-0001-9113-9064>

228

229 REFERENCES

230 Brent, K. J., & Hollomon, D. W. (2007). *Fungicide resistance in crop pathogens: how can it*
231 *be managed?* Fungicide Resistance Action Committee.

232 FAO (2024). *FAOSTAT*. Food and Agriculture Organization. [http://www.fao.org/faostat/](http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize)
233 [es/#data/QC/visualize](http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize).

234 FRAC (2023). *FRAC Code list* ©*2023: *fungicide control agents sorted by cross resistance*
235 *pattern and mode of action*. Fungicide Resistance Action Committee.
236 [https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-code-list/frac-code-list-](https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-code-list/frac-code-list-2023---final.pdf)
237 [2023---final.pdf](https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-code-list/frac-code-list-2023---final.pdf).

238 FRAC (2019). *Pathogen risk list*. Fungicide Resistance Action Committee.
239 [https://www.frac.info/docs/default-source/publications/pathogen-risk/frac-pathogen-](https://www.frac.info/docs/default-source/publications/pathogen-risk/frac-pathogen-list-2019.pdf)
240 [list-2019.pdf](https://www.frac.info/docs/default-source/publications/pathogen-risk/frac-pathogen-list-2019.pdf).

241 Hollomon, D. W. (2015). Fungicide resistance: 40 Years on and still a major problem. In H.
242 Ishii, & D. W. Hollomon. (Eds.), *Fungicide resistance in plant pathogens: principles*
243 *and a guide to practical management* (pp. 3–11). Springer.

244 Johanson, A., & Blazquez, B. (1992). Fungi associated with banana crown rot on field-packed
245 fruit from the Windward Islands and assessment of their sensitivity to the fungicides
246 thiabendazole, prochloraz and imazalil. *Crop Protection*, 11(1), 79–83. [https://doi.](https://doi.org/10.1016/0261-2194(92)90084-I)
247 [org/10.1016/0261-2194\(92\)90084-I](https://doi.org/10.1016/0261-2194(92)90084-I)

248 Kamel, M. A. M., Cortesi, P., & Saracchi, M. (2016). Etiological agents of crown rot of organic
249 bananas in Dominican Republic. *Postharvest Biology and Technology*, 120(1), 112–
250 120, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.06.002>

- 251 Lassois, L., & De Lapeyre De Bellaire, L. (2014). Crown rot disease of bananas. In S. Bautista-
 252 Baños, (Eds.), *Postharvest decay: control strategies* (pp. 103–130). Elsevier.
- 253 Leite, I. C. H. L., Silva, R. A., Santos, J. E. C. C., Freitas-Lopes, R. L., Câmara, M. P. S.,
 254 Michereff, S. J., & Lopes, U. P. (2020). Analysis of *Colletotrichum musae* populations
 255 from Brazil reveals the presence of isolates with high competitive ability and reduced
 256 sensitivity to postharvest fungicides. *Plant Pathology*, 69(8), 1529–1539, 2020.
 257 <https://doi.org/10.1111/ppa.13229>.
- 258 Li, y., Tsuji, S. S., Hu, M., Câmara, M. P. S., Michereff, S. J., Schnabel, G., & Chen, F. (2020).
 259 Characterization of difenoconazole resistance in *Lasiodiplodia theobromae* from
 260 papaya in Brazil. *Pest Management Science*, 76(4), 1344–1352.
 261 <https://doi.org/10.1002/ps.5645>
- 262 MAPA (2024). *AGROFIT: Sistema de agrotóxicos fitossanitários* [Phytosanitary pesticides
 263 system]. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
 264 http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons.
- 265 Peng, Q., Younas, M. W., Yang, J., Zhu, H., Miao, J., Gu, B. & Liu, X. (2022). Characterization
 266 of prochloraz resistance in *Fusarium fujikuroi* from Heilongjiang Province in China.
 267 *Plant Disease*, 106(2), 418–424. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-21-0372-RE>
- 268 Santos, K. M., Tsuji, S. S., Câmara, M. P. S., Michereff, S. J., & Lopes, U. P. (2019). Sensitivity
 269 to methyl benzimidazole carbamate fungicides of Botryosphaeriaceae species from
 270 mango orchards in the Northeast of Brazil. *European Journal of Plant Pathology*,
 271 153(1), 209–222, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1556-y>
- 272 Silva, E. G., Santos, A. K. V., Barros, A. P. O., Silva, J. A., Cruz, C. J. G., Sousa, L. V. S.,
 273 Araújo, L. J. L., Luna, F. S., Michereff, S. J., Correia, K. C. (2024). Diversidade e
 274 potencial micotoxigênico de espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* associados à
 275 podridão da coroa da banana. (AINDA NÃO PUBLICADO)

- 276
- 277 Stenzel, K., & Vors, J-P. (2019). Sterol biosynthesis inhibitors. In P. Jeschke, M. Witschel, W.
- 278 Krämer & U. Schirmer (Eds.), *Modern crop protection compounds. vol. 2: fungicides*.
- 279 3rd ed. (pp. 797–608). Wiley-VCH.
- 280 Yin, Y., Miao, J., Shao, W., Liu, X., Zhao, Y., & Ma, Z. Fungicide resistance: Progress in
- 281 understanding mechanism, monitoring, and management. *Phytopathology*, 113(4), 707–
- 282 718. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD>
- 283 Zakaria, L. (2023). *Fusarium* species associated with diseases of major tropical fruit crops.
- 284 *Horticulturae*, 9, e322. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030322>

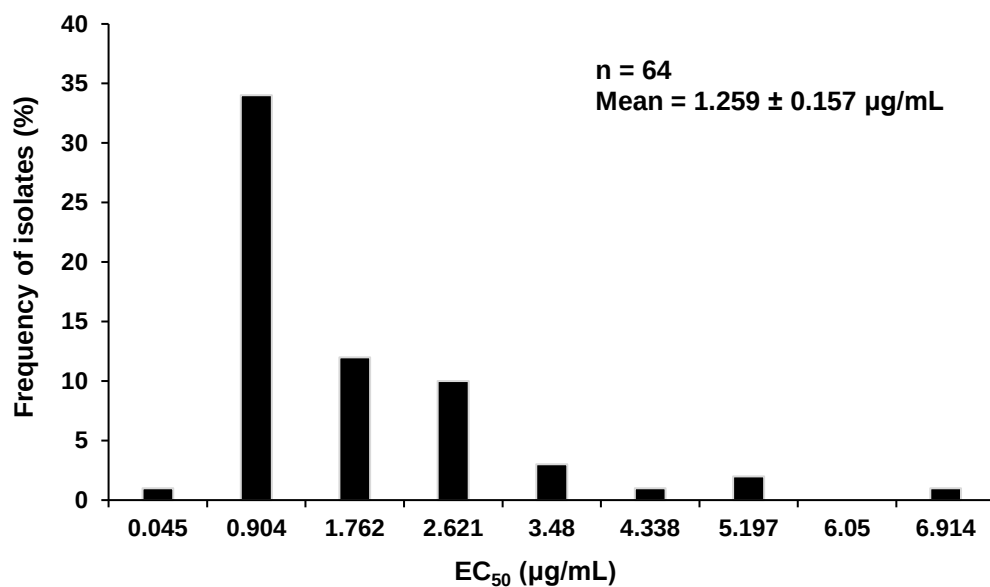


FIGURE 1 Frequency distribution of effective concentrations of imazalil required to inhibit 50% of the mycelial growth (EC₅₀) of 64 isolates of *Fusarium fujikuroi* complex species obtained from bananas in the Cariri region of the State of Ceará.

TABLE 1 Effective concentration of imazalil required to inhibit 50% of the mycelial growth (EC₅₀) and fungicide resistance factor for the five *Fusarium fujikuroi* complex species obtained from bananas in the Cariri region of Ceará, Brazil.

Species	Number of isolates	EC ₅₀ (µg/mL) ¹	Resistance factor ²			
			S	LR	MR	HR
<i>Fusarium annulatum</i>	17	2.175 ± 0.245 b		1	9	7
<i>Fusarium musae</i>	19	0.799 ± 0.137 c		7	11	1
<i>Fusarium pseudocircinatum</i>	2	3.601 ± 3.313 a		1		1
<i>Fusarium sacchari</i>	14	0.928 ± 0.160 c	2	2	10	
<i>Fusarium verticillioides</i>	12	0.684 ± 0.346 c	4	4	3	1
Total	64		6	15	33	10

¹Values followed by the same letter do not differ significantly at $p = .05$ according to Kruskal-Wallis test.

²Calculated using the formula: RF (Resistance factor) = EC₅₀ of the tested isolate/EC₅₀ of the most sensitive isolate (0.045) (Li et al., 2020). S (sensitive): $0 < RF \leq 5$; LR (low resistant): $5 < RF \leq 10$; MR (medium resistant): $10 < RF \leq 50$; and HR (highly resistant): $50 < RF$ (Peng et al., 2022).

TABLE 2 The effective concentration of imazalil required to inhibit 50% of the mycelial growth (EC₅₀) and fungicide resistance factor for isolates of the *Fusarium fujikuroi* complex species obtained from bananas in packinghouses and markets in the Cariri region of Ceará, Brazil.

Type of establishment	Number of isolates	EC ₅₀ (µg/mL) ¹	Resistance factor ²			
			S	LR	MR	HR
Packinghouses	37	1.355 ± 0.172 a	4	6	21	6
Markets	27	1.128 ± 0.292 a	2	9	12	4
Total	64		6	15	33	10

¹Values followed by the same letter do not differ significantly at $p = .05$ according to Wilcoxon Rank Sum test.

²Calculated using the formula: RF (Resistance factor) = EC₅₀ of the tested isolate/EC₅₀ of the most sensitive isolate (0.045) (Li et al., 2020). S (sensitive): $0 < RF \leq 5$; LR (low resistant): $5 < RF \leq 10$; MR (medium resistant): $10 < RF \leq 50$; and HR (highly resistant): $50 < RF$ (Peng et al., 2022).

TABLE S1 Sensitivity to imazalil for the 64 isolates of five *Fusarium fujikuroi* complex species obtained from bananas in the Cariri region of Ceará, Brazil.

Species	Isolates	Year	County	Place	EC ₅₀ (µg/mL) ¹	RI ²	RI Class ³
<i>Fusarium annulatum</i>	CFC-1209	2019	Nova Olinda	Market	2.761	61.356	HR
	CFC-1574	2020	Missão Velha	Packinghouse	2.155	47.889	MR
	CFC-1576	2019	Missão Velha	Packinghouse	2.637	58.600	HR
	CFC-1579	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.185	26.333	MR
	CFC-1582	2019	Missão Velha	Packinghouse	3.800	84.444	HR
	CFC-1585	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.071	23.800	MR
	CFC-1587	2019	Missão Velha	Packinghouse	4.601	102.244	HR
	CFC-1588	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.425	31.667	MR
	CFC-1589	2019	Missão Velha	Packinghouse	2.289	50.867	HR
	CFC-1591	2019	Missão Velha	Packinghouse	2.122	47.156	MR
	CFC-1592	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.956	43.467	MR
	CFC-1594	2019	Missão Velha	Packinghouse	2.013	44.733	MR
	CFC-1595	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.501	33.356	MR
	CFC-1599	2019	Missão Velha	Packinghouse	2.358	52.400	HR
	CFC-1601	2019	Brejo Santo	Packinghouse	2.127	47.267	MR
	CFC-1711	2019	Barbalha	Market	2.702	60.044	HR
	CFC-1722	2019	Nova Olinda	Market	0.286	6.356	LR
<i>Fusarium musae</i>	CFC-1116	2019	Caririaçu	Market	0.505	11.222	MR
	CFC-1572	2020	Brejo Santo	Packinghouse	0.423	9.400	LR
	CFC-1586	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.003	22.289	MR
	CFC-1600	2019	Brejo Santo	Packinghouse	1.061	23.578	MR
	CFC-1602	2019	Brejo Santo	Packinghouse	0.560	12.444	MR
	CFC-1603	2019	Brejo Santo	Packinghouse	0.416	9.244	LR
	CFC-1604	2019	Brejo Santo	Packinghouse	2.271	50.467	HR
	CFC-1605	2022	Caririaçu	Market	0.692	15.378	MR
	CFC-1606	2022	Caririaçu	Market	0.321	7.133	LR

	CFC-1607	2022	Caririaçu	Market	0.822	18.267	MR
	CFC-1608	2022	Crato	Market	0.235	5.222	LR
	CFC-1612	2022	Jardim	Market	0.886	19.689	MR
	CFC-1613	2022	Nova Olinda	Market	0.522	11.600	MR
	CFC-1614	2022	Nova Olinda	Market	0.361	8.022	LR
	CFC-1713	2019	Brejo Santo	Packinghouse	0.791	17.578	MR
	CFC-1714	2019	Brejo Santo	Packinghouse	1.996	44.356	MR
	CFC-1715	2019	Jardim	Market	0.316	7.022	LR
	CFC-1717	2019	Nova Olinda	Market	0.257	5.711	LR
	CFC-1720	2019	Juazeiro do Norte	Market	1.747	38.822	MR
<i>Fusarium pseudocircinatum</i>	CFC-1580	2019	Missão Velha	Packinghouse	0.289	6.422	LR
	CFC-1609	2022	Crato	Market	6.914	153.644	HR
<i>Fusarium sacchari</i>	CFC-1115	2019	Barbalha	Market	0.440	9.778	LR
	CFC-1119	2019	Crato	Market	1.479	32.867	MR
	CFC-1122	2019	Missão Velha	Market	1.223	27.178	MR
	CFC-1575	2020	Barbalha	Packinghouse	0.085	1.889	S
	CFC-1577	2019	Barbalha	Packinghouse	0.405	9.000	LR
	CFC-1578	2019	Missão Velha	Packinghouse	0.897	19.933	MR
	CFC-1581	2019	Brejo Santo	Packinghouse	0.087	1.933	S
	CFC-1584	2019	Missão Velha	Packinghouse	0.811	18.022	MR
	CFC-1590	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.353	30.067	MR
	CFC-1596	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.374	30.533	MR
	CFC-1597	2019	Missão Velha	Packinghouse	2.000	44.444	MR
	CFC-1598	2019	Missão Velha	Packinghouse	1.674	37.200	MR
	CFC-1611	2022	Jardim	Market	0.677	15.044	MR
	CFC-1712	2019	Barbalha	Packinghouse	0.487	10.822	MR
<i>Fusarium verticillioides</i>	CFC-1120	2019	Farias Brito	Market	0.252	5.600	LR
	CFC-1121	2019	Juazeiro do Norte	Market	4.387	97.489	HR
	CFC-1571	2022	Missão Velha	Packinghouse	0.428	9.511	LR
	CFC-1573	2020	Brejo Santo	Packinghouse	0.080	1.778	S
	CFC-1583	2019	Barbalha	Packinghouse	0.045	1.000	S
	CFC-1593	2019	Missão Velha	Packinghouse	0.346	7.689	LR
	CFC-1610	2022	Farias Brito	Market	0.085	1.889	S
	CFC-1615	2018	Juazeiro do Norte	Market	0.068	1.511	S
	CFC-1716	2019	Nova Olinda	Market	0.301	6.689	LR

CFC-1718	2019	Juazeiro do Norte	Market	0.867	19.267	MR
CFC-1719	2019	Juazeiro do Norte	Market	0.680	15.111	MR
CFC-1721	2019	Juazeiro do Norte	Market	0.671	14.911	MR

¹Effective concentration of fungicide required to inhibit 50% of the mycelial growth.

²Fungicide resistance index, calculated using the formula: $RI = EC_{50}$ of the tested isolate/ EC_{50} of the most sensitive isolate (0.045) (Li et al., 2020).

³S (sensitive): $0 < RI \leq 5$; LR (low resistance): $5 < RI \leq 10$; MR (medium resistance): $10 < RI \leq 50$; and HR (high resistance): $50 < RI$ (Peng et al., 2022).

CONCLUSÕES GERAIS

CONCLUSÕES GERAIS

1. Cinco espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* estão associadas a bananas produzidas e comercializadas na região do Cariri cearense.
2. As espécies *F. musae*, *F. annulatum*, *F. sacchari* e *F. pseudocircinatum* são agentes causais da podridão da coroa da banana na região do Cariri cearense.
3. Isolados das espécies *F. verticillioides*, *F. musae*, *F. annulatum* e *F. pseudocircinatum* são potenciais produtores de fumonisina.
4. *F. verticillioides* está associado a banana na fase pós-colheita sem causar doenças.
5. As espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* estão associadas a bananas produzidas e comercializadas na região do Cariri cearense diferem enquanto nos níveis de sensibilidades ao fungicida imazalil.
6. Nenhum isolados das *F. annulatum*, *F. musae*, *F. pseudocircinatum* coletadas no Cariri do cearense possui sensibilidade ao fungicida imazalil.
7. A sensibilidade ao fungicida imazalil de *F. verticillioides* é uma característica isolado específicos.