



FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL

DEPARTAMENTO DE PROTECÇÃO VEGETAL

Licenciatura em Engenharia Agronómica

Projecto Final

Avaliação do Efeito das Alterações Climáticas na Ocorrência e Distribuição de Fungos e Micotoxinas nas Culturas de Milho (*Zea mays* L.), Arroz (*Oryza sativa* L.) e Amendoim (*Arachis hypogaea* L.) na Região Sul de Moçambique

Autor:

Abílio Carlos Mandlate

Supervisores:

Prof. Doutor João Bila

Mestre Artur Pedro Madal

Maputo, Dezembro de 2025

Avaliação do Efeito das Alterações Climáticas na Ocorrência e Distribuição de Fungos e Micotoxinas nas Culturas de Milho (*Zea mays* L.), Arroz (*Oryza sativa* L.) e Amendoim (*Arachis hypogaea* L.) na Região Sul de Moçambique

Abílio Carlos Mandlate

Projecto final submetido à Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Departamento de Protecção Vegetal, como parte dos requisitos para obtenção do grau académico de Licenciado em Engenharia Agronómica, sob a supervisão do **Prof. Doutor João Bila** e do **Mestre Artur Pedro Madal**.

Maputo, Dezembro de 2025

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Abílio Carlos Mandlate** declaro por minha honra que este trabalho de culminação de curso é da minha autoria e nunca foi submetido nesta ou em outra instituição para aquisição de qualquer outro grau académico e que ele constitui o resultado do meu trabalho individual e das orientações dos meus supervisores, o seu conteúdo é real e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto e na bibliografia final.

Abílio Carlos Mandlate

Data: ____ / 12 / 2025

Por ser verdade, confirmo que o trabalho foi realizado pelo candidato sob minha supervisão.

Departamento de Protecção Vegetal, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal,
Universidade Eduardo Mondlane.

Prof. Doutor João Bila

Data: ____ / 12 / 2025

Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal,
Universidade Eduardo Mondlane.

Mestre Artur Pedro Madal

Data: ____ / 12 / 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, em primeiro lugar a Deus, fonte de toda a criação e da vida, reconhecendo que foi ele quem me sustentou com força e conhecimento (Provérbios 9:9).

À Celeste Honwana, minha querida mãe, dedico este trabalho como fruto do esforço que sempre fez, pelas inúmeras palavras de incentivo e amor que sempre deu a mim e aos meus irmãos, e por cada oração que me permitiu iniciar e concluir esta trajetória.

Ao meu pai, Carlos Abílio Mandlate (em memória), por ter sido a minha fonte de inspiração em vários momentos, e por ter sido a prova de que a dedicação sempre vence o sonho, e mais, por me inspirar a ser um verdadeiro PhD – *Positive, hungry and Driven*.

E aos meus irmãos, Cacilda, Celeste e Jeff.

O meu muito obrigado!

Depois de escalar uma grande montanha, descobre-se que existem ainda muitas outras por escalar. Cada conquista é apenas uma etapa de uma longa caminhada, que exige responsabilidade, perseverança e coragem para continuar.

- Nelson Rolihlahla Mandela

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha família, pelo apoio incondicional e por ter sido um pilar importante em toda minha trajetória académica. Aos meus pais, Carlos Mandlate (em memória) e Celeste Honwana, que sempre contribuíram para o meu crescimento pessoal e académico, mostrando os caminhos certos a seguir em todos momentos da vida. Aos meus irmãos, Cacilda, Celeste e Jeff, e aos meus tios Xavier Mula, Samuel Mula, Sérgio Maúngue e Eleuteria Maúngue pelos ensinamentos e incentivos que sempre me deram.

Ao Projecto MYCOTOX-PALOP “Parceria para análise de risco de micotoxinas na cadeia alimentar em Países Africanos de Língua Portuguesa (PALOP)” pelo apoio financeiro para a realização da colecta de dados em campo.

Aos meus supervisores, Prof. Doutor João Bila e Mestre Artur Pedro Madal, por todo apoio prestado na realização deste trabalho, pela paciência e pela disponibilidade imediata durante todo o processo de elaboração. Agradeço igualmente pela partilha de material bibliográfico científico fundamental para o aprimoramento e finalização deste estudo, bem como pelos valiosos ensinamentos sobre epidemiologia de doenças e uso de sistemas de modelação.

Ao Mestre Cláudio Matusse, pelo acompanhamento durante a colecta de dados em campo, bem como pelas sugestões e contribuições valiosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Às Professoras Doutoradas Custódia Macuamule e Paula Rodrigues, Coordenadoras do Projecto MYCOTOX-PALOP, pelos ensinamentos transmitidos, orientações, apoio moral e pela disponibilização de recursos materiais e financeiros para a materialização do trabalho.

À Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do curso. Aos docentes, pelos ensinamentos partilhados ao longo das aulas, principalmente ao Prof. Doutor Armindo Cambule, Doutor Arsénio Ndeve, Eng.º Hélio Cuamba, Dr. António Machava, Dra. Ernestina Macamo e Sr. Ricardo Enosse. Ao pessoal do Departamento de Protecção Vegetal, em especial ao Eng.º Francisco Fernando Munguambe, Eng.º Amândio Muthambe, Eng^a. Julieta Gove e à dona Jordina, pela colaboração, orientação e apoio moral que foram indispensáveis para que este trabalho fosse concluído.

Aos meus amigos Bernardo Chau, Édio Massinga, Fumo Cadre, Samuel Chaúque, Eng.º Dércio Cossa, Liocédio Fanheiro, Ruben Mate, Lírio Doane, Amisse Abdala, Miller Pedro, Carlos Jussemane, David Lucas, Manuel Norberto, Jorge Langa, Tomás Timba, Crimildo Mondlane e Délcio Maulano, pelo suporte e pelas energias positivas. E às meninas, Chelsea Fernando, Isoldina Rafael, Rafaela Massingue, Bialódia Jonasse, Tania Langa, Joana Cangela, Tarcilia Marurele, Martilene Chilundo, Helena Souto e Lurdes Nhatuve, o meu muito obrigado pelos momentos de descontração, pela força e pelo apoio proporcionados.

A todos que, directa ou indirectamente contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, deixo o meu sincero agradecimento pelos incentivos, pela força e pelos conhecimentos partilhados comigo.

O meu muito obrigado!

RESUMO

A produção de micotoxinas depende do crescimento fúngico, podendo ocorrer em qualquer época do crescimento, colheita, ou armazenamento das culturas. Os fungos toxigénicos e as micotoxinas são comuns em culturas alimentares, sendo a sua ocorrência condicionada por factores abióticos favoráveis. Assim, as condições ambientais constituem factores-chave para a colonização fúngica, bem como para a produção de micotoxinas, principalmente em regiões tropicais, onde as condições climáticas favorecem o seu desenvolvimento, representando uma ameaça à segurança alimentar. Neste contexto, foi realizado o presente trabalho que teve como objectivo avaliar o efeito das mudanças climáticas na ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas na região sul de Moçambique, com vista a compreender o impacto da interação de factores abióticos relacionados com as mudanças climáticas sobre o risco relativo de contaminação por fungos toxigénicos e as micotoxinas associadas. Foram utilizadas 80 amostras de grãos das culturas de milho (30), arroz (30) e amendoim (20), colectadas nos distritos de Chókwè, Manjacaze e Chongoene, com os pontos de amostragem devidamente georreferenciados. Procedeu-se a análise do número de ocorrência de fungos toxigénicos e micotoxinas identificados nas amostras. A modelação da distribuição potencial e preditiva foi realizada através do modelo MaxEnt versão 3.4.4, com 4 variáveis bioclimáticas e 2 variáveis do solo, considerando o cenário actual, e os cenários futuros previstos pelo IPCC: RCP 4.5 (2041 – 2060) e RCP 8.5 (2041 – 2060), baseados no modelo climático MIROC – 6. Os resultados indicaram que a precipitação média anual (Bio12), temperatura média anual (Bio 1) e a amplitude térmica anual (Bio 7) foram as variáveis que mais contribuíram para a ocorrência e distribuição dos fungos e micotoxinas. As áreas potencialmente propensas à ocorrência de fungos e micotoxinas na região sul do país concentram-se, sobretudo, nos distritos localizados próximos à faixa costeira e nos cursos de águas interiores (rios), podendo atingir até 27.86%. As projecções indicaram uma redução das áreas propensas a ocorrência do *Aspergillus flavus*, *Fusarium* spp., Aflatoxinas e Fumonisin; entretanto, observa-se um aumento das áreas propensas à ocorrência de Zearalenona.

Palavras-chave: Fungos toxigénicos, micotoxinas, segurança alimentar, epidemiologia, mudanças climáticas, modelo MaxEnt.

ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iii
DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE ANEXOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	xiv
I. INTRODUÇÃO	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problema de Estudo e Justificação	2
1.3. Objectivos	5
1.3.1. Objectivo Geral.....	5
1.3.2. Objectivos Específicos	5
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Fungos e seus principais grupos em culturas agrícolas.....	6
2.1.1. Micotoxinas e seus principais efeitos.....	7
2.2. Situação da produção de grãos de cereais e oleaginosas no mundo e em Moçambique	9
2.3. Situação da contaminação por fungos e micotoxinas em alimentos no mundo e em Moçambique.....	10
2.4. Influência das condições ambientais na ocorrência de fungos e micotoxinas	11
2.5. Mudanças climáticas	12
2.6. Mudanças climáticas e seu impacto na distribuição de doenças	13

2.7. Modelos de distribuição de doenças	13
2.8. Modelo MaxEnt	14
III. METODOLOGIA	16
3.1. Descrição da Área de Estudo	16
3.1.1. Clima	17
3.1.2. Solos	17
3.2. Identificação dos fungos toxigénicos e as respectivas micotoxinas	18
3.2.1 Amostragem e colecta de dados	18
3.3. Análise da influência das variáveis ambientais na ocorrência e distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim	18
3.4. Mapeamento da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas pelo modelo MaxEnt	19
3.4.1. Dados Abióticos	19
3.4.2. Modelagem	21
3.5. Projecção da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim em função das mudanças climáticas	22
3.6. Validação do Modelo	23
3.7. Análise de Dados	23
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Análise da influência das variáveis ambientais na ocorrência e distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim	25
4.2. Mapeamento da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas pelo modelo MaxEnt	28
4.3. Projecções da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas em função das mudanças climáticas para o ano de 2052.....	31
4.3.1. Análise da distribuição actual e futura dos fungos toxigénicos e micotoxinas na região sul de Moçambique.....	37

V.	CONCLUSÕES.....	38
VI.	RECOMENDAÇÕES	39
VII.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
	ANEXOS.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Camadas bioclimáticas e propriedades do solos extraídas do banco de dados do Worldclim e SoilGrids, utilizadas nos procedimentos de parametrização (pré-análise).....	19
Tabela 2: Variáveis ambientais seleccionadas para modelagem de distribuição dos fungos e micotoxinas.....	21
Tabela 3: Projecções de aumento da temperatura média global da superfície (°C) para diferentes Cenários de Concentração Representativos (RCPs) definidos pelo IPCC, considerando os períodos de 2046 a 2065 e 2081 a 2100.....	23
Tabela 4: Percentagem de contribuição das variáveis de estudo para a distribuição das espécies fúngicas e as respectivas micotoxinas.....	25
Tabela 5: Percentagem da área potencialmente propensa a ocorrência dos fungos e micotoxinas.....	28
Tabela 6: Percentagem da área potencialmente propensa a ocorrência dos fungos e micotoxinas no futuro (2052) num cenário de mudanças climáticas (RCP 4.5 e RCP 8.5).....	31
Tabela 7: Resultados dos testes de validação dos modelos.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A - Micélio de <i>Aspergillus flavus</i> em milho cultivado em placa de Petri, no laboratório; B – Colónias do Fungo; C – Estrutura do <i>Aspergillus flavus</i> observado no microscópio.....	7
Figura 2: Estrutura do processo de modelação com base no modelo MaxEnt.....	15
Figura 3: Mapa de Localização da área de estudo e locais de amostragem.....	16
Figura 4: Áreas potencialmente propensas à ocorrências dos fungos: <i>Aspergillus flavus</i> (A) e <i>Fusarium</i> spp. (B) na região sul de Moçambique.....	30
Figura 5: Áreas potencialmente propensas à ocorrências das micotoxinas: Aflatoxinas (A), Fumonisin (B) e Zearalenona (C) na região sul de Moçambique.....	30
Figura 6: Variação da percentagem da área com adequabilidade ambiental para ocorrência dos fungos toxigénicos e micotoxinas nos diferentes cenários climáticos.....	32
Figura 7: Áreas potencialmente propensas à ocorrência do fungo <i>Aspergillus flavus</i> na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.....	33
Figura 8: Áreas potencialmente propensas à ocorrência do fungo <i>Fusarium</i> spp. na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.....	34
Figura 9: Áreas potencialmente propensas à ocorrência de Aflatoxinas na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.....	35
Figura 10: Áreas potencialmente propensas à ocorrência de Fumonisin na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.....	35
Figura 11: Áreas potencialmente propensas à ocorrência de Zearalenona na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.....	36

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Identificação dos fungos toxigénicos presentes nas diferentes amostras das culturas testadas na província de Gaza.....	53
Anexo 2: Identificação das micotoxinas presentes nas culturas na província de Gaza.....	53
Anexo 3: Ficha de levantamento das coordenadas geográficas (Reconstituição).....	54
Anexo 4: Levantamento das coordenadas geográficas dos pontos de amostragem.....	55
Anexo 5: Representação gráfica da matriz de correlação de Pearson no programa RStudio.....	55
Anexo 6: Gráficos da avaliação da contribuição das variáveis ambientais na modelagem com base no teste de jackknife.....	55
Anexo 7: Área sob a curva de ROC.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
AUC	Área Abaixo da Curva
a_w	Actividade da água
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EPA	Environmental Protection Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IARC	Agência Internacional para a Investigação do Cancro
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRRI	Instituto Internacional de Investigação de Arroz
ISRIC	Internacional Soil Reference and Information Centre
MADER	Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural
MAE	Ministério de Administração Estatal
MaxEnt	Maximum Entropy Modelling
MICOA	Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental
MIROC – 6	Center for Climate Research, Japan
PDA	Potato Dextrose Agar
pH	Potencial de hidrogénio
RCP	Patamares de Concentração Representativos
ROC	Receiver Operating Characteristic
USAID	Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional

I. INTRODUÇÃO

1.1. Antecedentes

A agricultura é uma actividade económica altamente dependente das condições do clima e do solo para a produção de alimentos e fibras para a satisfação do crescimento global da população. Nessa perspectiva, é evidente que esta actividade humana apresenta elevada vulnerabilidade às mudanças climáticas, uma vez que as alterações no clima resultam em variação dos padrões de temperatura, da precipitação, da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos como cheias, secas e ciclones (Southworth, 2000; IPCC, 2007; FAO, 2012; Viagem, 2013). De acordo com Wutke *et al.* (2000), o estado do clima influencia directamente a produção agrícola, podendo, ser substancialmente afectada por esse conjunto de factores abióticos desde a sementeira até a pós-colheita.

As mudanças climáticas têm apresentado impactos mais intensos em África, e em particular em Moçambique. Essa situação decorre das diversas fragilidades nas ferramentas voltadas ao aumento da produção de alimentos, que frequentemente negligenciam mecanismos essenciais para a resiliência na segurança e qualidade de alimentos (Zucula, 2011; FAO, 2012; Viagem, 2013).

Os impactos físicos associados às mudanças climáticas não afectam apenas a forma como os alimentos são cultivados, armazenados, transportados e preparados, mas também podem influenciar directamente na ocorrência, distribuição e persistência de diversos patógenos como bactérias, vírus, fungos e espécies hospedeiras, bem como doenças associadas a esses patógenos (Tirado *et al.*, 2010).

Estima-se que de 20 a 40% da produção agrícola mundial seja perdida anualmente devido a problemas fitossanitários e de segurança (FAO, 2015). Entre esses problemas fitossanitários, os fungos e seus derivados metabólicos, as micotoxinas, estão entre os principais problemas que dificultam a produção de cereais e leguminosas, como o milho, arroz e amendoim, devido à sua elevada capacidade de adaptação. Um resultado importante das doenças que afectam a produção agrícola na pré-colheita e pós-colheita é a contaminação com micotoxinas, metabólitos tóxicos fúngicos que podem não produzir sintomas visíveis no alimento, mas estima-se que afectam 25 a 60% das culturas alimentares do mundo, que resultam em perdas na ordem da qualidade e quantidade dos alimentos (Eskola *et al.*, 2019; Maxwell, 2020). A produção de micotoxinas

depende do crescimento fúngico, portanto, pode ocorrer em qualquer fase da produção ou pós-colheita da cultura. Entretanto, o crescimento do fungo e a presença de micotoxinas não são sinônimos, porque nem todos os fungos produzem micotoxinas (Iamanaka *et al.*, 2010).

De entre o elevado número de fungos conhecidos, os principais produtores de toxinas pertencem aos géneros: *Alternaria* spp., *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium* spp., *Rhizoctonia* spp. e *Stachybotrys* spp., e dentre esses, os géneros mais predominantes e os principais produtores naturais de micotoxinas, são *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp. e *Penicillium* spp. (Rupollo *et al.*, 2004; Scussel *et al.*, 2013; Escrivá *et al.*, 2017). Actualmente, já foram identificadas mais de 300 micotoxinas, sendo que, cinco delas são consideradas de maior risco à saúde humana e animal, incluindo: Aflatoxinas, Ocratoxina A, Zearalenona, Desoxinivalenol e Fumonisinhas (Iamanaka *et al.*, 2010).

Em climas tropicais e subtropicais, o desenvolvimento fúngico é favorecido por diversos factores como a presença de substratos altamente nutritivos e as condições de humidade e de temperatura ideais para o seu desenvolvimento, crescimento e facilidade de distribuição (Mistura, 2019). Deste modo, a incidência e severidade das contaminações podem variar devido às alterações nos padrões do estado do clima, pois, a dado momento, o surgimento de fungos é favorecido por determinados padrões ambientais.

1.2. Problema de Estudo e Justificação

A produção e a qualidade dos grãos são significativamente influenciadas por vários factores ambientais e estresses bióticos, devido à ampla gama de microrganismos que podem colonizar as plantas e seus produtos durante toda a cadeia de produção (Mistura, 2019; Leslie *et al.* 2021; Pedro, 2021). Algumas das culturas produzidas em Moçambique são facilmente contaminadas por fungos e micotoxinas. Um exemplo são as espécies do género *Aspergillus* spp., que podem produzir micotoxinas potencialmente perigosas, como as Aflatoxinas. Essas micotoxinas são frequentemente encontradas em culturas consumidas pela população, como milho, arroz e amendoim (Perrone *et al.*, 2020; USAID, 2021; Bila *et al.*, 2022).

Os cereais e leguminosas são muito susceptíveis à contaminação por fungos, muitas vezes, facilitada pelas condições de armazenamento dos grãos, ocasionadas pela falta de observação dos

níveis de humidade e temperaturas adequadas. Sob condições ambientais favoráveis, os fungos podem produzir micotoxinas em produtos agrícolas durante o crescimento das plantas, colheita, armazenamento e processamento (Valmorbida, 2016; Matusse *et al.*, 2025).

O processo de contaminação pode ser acelerado por vários factores como temperatura, substrato, actividade de água, humidade, pH e tempo (Bankole *et al.*, 2006; Mistura, 2019). Porém, entre os factores abióticos estudados, a humidade e a temperatura são os fundamentais para o desenvolvimento de fungos e micotoxinas nos produtos agrícolas (Augusto *et al.*, 2014). Ainda, de acordo com Lopes (2019), o período de tempo e as condições climáticas a que os grãos, como o caso do milho, arroz e amendoim são expostos a factores como temperatura e precipitação são fundamentais para a qualidade dos grãos, independentemente das tecnologias de produção aplicadas nos sistemas de produção.

As condições climáticas de um país determinam, significativamente as classes de fungos que irão crescer e os tipos de micotoxinas que podem ser produzidos (Penagos-Tabares *et al.*, 2025). Em Moçambique, a diversidade agroecológica favorece o desenvolvimento de vários tipos de fungos produtores de micotoxinas, uma vez que permitem a adaptação dos microrganismos. Segundo Rodríguez-Amaral (2002), as variações anuais de temperatura e precipitação, diferentes climas, práticas agrícolas, manejo pós-colheita, processamento e condições de armazenamento não devem ser considerados como factores absolutos, mas sim indicativos das causas de diferentes níveis de contaminação.

A avaliação da distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas, por meio de técnicas de amostragem, e isolamento em laboratórios, tem servido de apoio para trabalhos realizados que visam confirmar a presença de patógenos responsáveis por doenças nos campos e na pós-colheita. Com base nesses resultados, são ajustadas estratégias de modo a ter uma perspectiva dos campos afectados e seus agentes causadores (Ximba *et al.*, 2022; Dias *et al.*, 2023; Matusse *et al.*, 2024; Casu *et al.*, 2024; Matusse *et al.*, 2025; Guermech *et al.*, 2025).

Contudo, os mesmos dados também podem ser integrados a programas de simulação geo-espacial, para estimar os níveis de ocorrência e distribuição desses microrganismos, bem como a identificação de áreas potencialmente afectadas num determinado período, de acordo com a similaridade das condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento das doenças. A integração

de ferramentas de modelação, como o modelo MaxEnt, permite simular e mapear áreas com maior risco de ocorrência, com base nas condições ambientais favoráveis (Phillips *et al.*, 2006; Mshelia *et al.*, 2020; Perrone *et al.*, 2020; Penagos-Tabares *et al.*, 2025).

Neste contexto, foi realizado este estudo em determinadas regiões do país, com o objectivo de avaliar o impacto das condições ambientais na ocorrência e distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas. O estudo visa fornecer dados essenciais, incluindo a identificação dos fungos toxigénicos e micotoxinas que ocorrem na região sul, bem como as áreas com maior risco de contaminação, considerando os factores ambientais que favorecem a ocorrência desses fungos e a produção de seus metabólitos secundários, as micotoxinas.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo Geral

- Avaliar o efeito das mudanças climáticas na ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas na região sul de Moçambique.

1.3.2. Objectivos Específicos

- Analisar a influência das variáveis ambientais na ocorrência e distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim;
- Mapear a ocorrência e distribuição geo-espacial dos fungos toxigénicos e micotoxinas usando o modelo MaxEnt;
- Projectar o efeito dos diferentes cenários climáticos na ocorrências e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fungos e seus principais grupos em culturas agrícolas

Os fungos são organismos eucariontes, aclorofilados, heterotróficos, que se reproduzem de forma sexuada e assexuada. Suas estruturas somáticas são geralmente filamentosas e ramificadas, com parede celular contendo celulose ou quitina, ou ambos (Michereff, 2011). Geralmente, esses organismos são multinucleados que aparecem como filamentos. Esses filamentos podem ou não apresentar septos entre eles, porém, mesmo quando presentes, as funções metabólicas ocorrem sem impedimentos entre as células (Zucula, 2011). Esses filamentos celulares são denominados hifas. O agrupamento intenso de hifas constitui os micélios. As paredes rígidas das hifas são formadas de quitina, celulose e glicose (Taniwak, 2001; Valmorbida, 2016). É importante salientar que micélios fúngicos nunca constituem tecidos (Michereff, 2011).

Os diferentes fungos produtores de micotoxinas são encontrados em todas as regiões do mundo, e podem crescer em diversos substratos e sob várias condições de humidade, pH e temperatura. Assim, os grãos estão sujeitos à invasão por fungos e à contaminação com micotoxinas no campo, durante a colheita, processamento, transporte e armazenamento, quando em condições deficientes de manejo das culturas (Scussel, 2002; Rupollo *et al.*, 2004;).

Actualmente, pesquisas indicam que existem mais de 80 espécies de fungos capazes de produzir micotoxinas, totalizando mais de 300 tipos diferentes de micotoxinas resultantes do metabolismo dos fungos, sendo que, nem todas representam um risco para a saúde humana (FAO, 1997; Pedro, 2021). Algumas dessas espécies têm a capacidade de sintetizar múltiplas micotoxinas simultaneamente, podendo estar presentes em um mesmo produto. Entre os principais fungos produtores de micotoxinas, destacam-se os géneros *Alternaria* spp., *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium* spp., *Rhizoctonia* spp. e *Stachybotrys* spp. Destes, destacam-se os géneros: *Aspergillus* (Figura 1), *Penicillium* e *Fusarium*, por serem considerados os mais relevantes na contaminação de alimentos e rações, devido à sua ampla ocorrência e elevada capacidade de produção de micotoxinas (Iamanaka *et al.*, 2010; Santos, 2013; Valmorbida, 2016).

Sob condições ambientais favoráveis, estes fungos podem produzir micotoxinas em produtos agrícolas durante o crescimento da planta, ou após a colheita em armazenagem (Valmorbida, 2016).

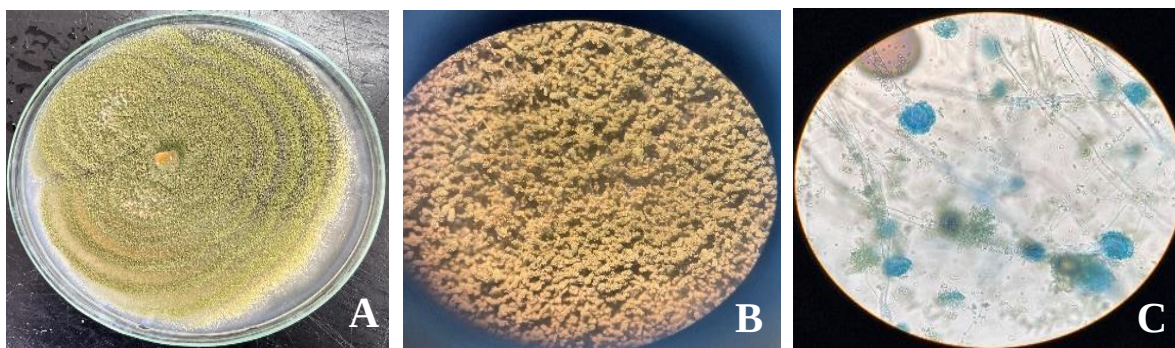


Figura 1: **A** - Micélio de *Aspergillus flavus* em milho cultivado em placa de Petri, no laboratório; **B** – Colônias do Fungo; **C** – Estrutura do *Aspergillus flavus* observado no microscópio.

Fonte: Autor.

2.1.1. Micotoxinas e seus principais efeitos

O termo micotoxina é derivado da palavra grega “*mykes*” que significa fungo, e do latim “*toxican*” que significa toxinas. O termo é usado para designar um grupo de compostos produzidos por algumas espécies fúngicas durante seu crescimento e que podem causar doenças ou morte quando ingeridos pelo homem ou pelos animais (Iamanaka *et al.*, 2010; Mistura, 2019). As micotoxinas são metabólitos secundários tóxicos produzidos por diferentes tipos de fungos, que comprometem consideravelmente a segurança dos alimentos para consumo humano e de rações animais e, por isso, representam um problema para a saúde humana e animal (Haschek *et al.*, 2013; Pedro, 2021).

A produção de micotoxinas depende do crescimento fúngico. Portanto, pode ocorrer em qualquer época do crescimento, colheita, ou armazenamento do alimento. Estes compostos podem estar presentes, mesmo após a remoção do micélio, uma vez que a maior parte deles são resistentes a tratamentos físicos e químicos. Eles podem persistir no alimento durante o processamento e armazenamento (Iamanaka *et al.*, 2010; Pedro, 2021). Contudo, o crescimento do fungo e a presença de micotoxinas não são sinônimos, porque nem todos os fungos produzem micotoxinas em alimentos, comprometendo, deste modo, a qualidade de vários produtos alimentares de forma contínua (Iamanaka *et al.*, 2010; Reges *et al.*, 2016; Valmorbidia, 2016).

Actualmente, encontram-se identificadas mais de 300 micotoxinas sendo que, nem todas representam um risco para a saúde humana (FAO, 1995; Valmorbidia, 2016; Pedro, 2021). De entre o elevado número de fungos que se conhecem, os géneros mais predominantes e os principais produtores de micotoxinas são o *Aspergillus* spp., o *Fusarium* spp. e o *Penicillium* spp. (Escrivá *et al.*, 2017). Desse grupo de fungos, são frequentemente encontradas as seguintes micotoxinas que apresentam riscos sérios para a saúde humana: Aflatoxinas produzidas por *Aspergillus* spp., Ocratoxina A, produzida por *Penicillium* spp., Desoxinivalenol, Zearalenona e Fumonisinias produzidas por *Fusarium* spp. (Duarte *et al.*, 2014; Pedro, 2021). Existem micotoxinas como Toxina T-2 e HT2, Patulina e outras que podem causar problemas esporadicamente, contudo, actualmente estas cinco toxinas têm sido implicadas na maioria dos problemas e desafios associados às micotoxinas e micotoxicoses (Iamanaka *et al.*, 2010; Penagos-Tabares *et al.*, 2025).

As micotoxinas são toxinas provenientes do metabolismo secundário de fungos, ocorrendo de forma natural, e por serem contaminantes naturais, não podem ser completamente eliminados dos alimentos, o que torna imperativo o acompanhamento constante dos produtos destinados ao consumo humano ou animal, devendo a sua presença ser reduzida a níveis que não apresentem risco para os consumidores (Iamanaka *et al.*, 2010; Duarte *et al.*, 2014; Pedro, 2021). A exposição crónica a baixas doses destas toxinas tem sido alvo de investigação dado o potencial carcinogénico destes compostos. Neste sentido, a *International Agency for Research on Cancer* (IARC) classificou algumas micotoxinas quanto à evidência científica que suporta o seu potencial carcinogénico em humanos (Pedro, 2021).

Além da problemática ao nível da segurança alimentar, as micotoxinas apresentam consequências a nível socioeconómico, sendo responsáveis por perdas económicas, nomeadamente na produção de cereais, no seu processamento, na redução do valor nutricional dos alimentos e ainda nas perdas por patologias e/ou mortes de animais alimentados com rações contaminadas (Maxwell, 2020; Pedro, 2021).

2.2. Situação da produção de grãos de cereais e oleaginosas no mundo e em Moçambique

Os grãos de cereais e oleaginosas são um dos produtos de culturas mais importantes no mundo, tanto em termos de produção quanto de consumo, por fornecerem uma parcela de nutrientes essenciais, em forma de calorias, proteínas e gorduras saudáveis consumidas a nível mundial, facto que os torna indispensáveis na dieta alimentar da população (Vilella & Juste, 1987; Freire *et al.*, 2005; IRRI, 2019). Essas culturas têm sido cultivadas em todo o mundo, abrangendo os cinco continentes, destacando-se como uma fonte vital de alimento.

Em 2023, a produção mundial de cereais apresentou um aumento significativo. O milho destacou-se como o cereal mais produzido a nível mundial, com uma produção de aproximadamente 1,2 bilhões de toneladas, cultivado em uma área de 208 milhões de hectares (FAO, 2023). Em seguida, como o terceiro cereal mais produzido a nível mundial, o arroz apresentou uma produção de 799 milhões de toneladas em uma área colhida de 168 milhões de hectares (FAO, 2023). Por outro lado, de acordo com o IPAD (2022), a cultura de amendoim foi considerada a quarta oleaginosa mais cultivada no mundo, cobrindo cerca de 23 milhões de hectares com uma produção mundial actual de 49 milhões de toneladas por ano.

Moçambique tem vindo a registar um crescimento significativo na produção agrícola, sendo de destacar o facto de que o país já produzir excedentes em culturas como milho e mandioca (Comé, 2016). De acordo com a MADER (2023), a produção de milho foi de 2.124.749 toneladas, o que representa 82,6 % da produção nacional de cereais. A produção de arroz foi de 160.882 toneladas, o que corresponde a 13,6 % da produção dos cereais a nível nacional. E mais, a cultura de amendoim apresentou uma produção de 226.498 toneladas, correspondentes a 39% da produção das pequenas e médias explorações que produziram oleaginosas (MADER, 2023).

A produção de cereais, como o caso do milho, possui maior potencial na redução da pobreza (Comé, 2016). Esse facto é sustentado pela análise feita pela MADER (2023), que desmostrou que essa cultura apresentou maior índice de aumento na produção de 2020 a 2023, ou seja, no grupo de cereais, o milho teve um crescimento significativo em 30 % comparativamente ao ano 2020, passando de 1.632.321 toneladas para 2.124.749 toneladas.

2.3. Situação da contaminação por fungos e micotoxinas em alimentos no mundo e em Moçambique

As micotoxinas já foram encontradas em quase todos os cereais, oleaginosas e outros produtos alimentícios, tanto de origem vegetal como animal. Actualmente, existem informações suficientes para decidir quais os alimentos e matérias primas que são de maior risco, pois alguns produtos são muito mais susceptíveis que outros à invasão de fungos potencialmente toxigênicos (Pitt, 1984; Iamanaka *et al.*, 2010). Essas informações ajudam na implementação de medidas que visam restringir o consumo de certos produtos agrícolas em determinadas quantidades, de modo a evitar-se o aumento do risco de exposição a metabólitos secundários dos fungos, as micotoxinas (Pedro, 2021).

Estima-se que cerca de um quarto das culturas alimentares a nível mundial se encontrem contaminadas com micotoxinas, o que representa um perigo inevitável para a agricultura, visto que, actualmente, não é possível evitar ou prever com eficácia a ocorrência de micotoxinas (FAO, 2002; Eskola *et al.*, 2019; Pedro, 2021). As culturas contaminadas têm um valor de mercado reduzido ou são rejeitadas, impedindo o acesso a mercados de comércio internacional de maior valor (Maxwell, 2020). Deste modo, os produtores das culturas afectadas por fungos toxigênicos e micotoxinas ganham menos por causa da rejeição do produto (Wu, 2015; Maxwell, 2020).

Moçambique tem registado um crescimento na produção de cereais, leguminosas e raízes, destacando-se entre as principais culturas agrícolas cultivadas pelos pequenos e médios a grandes produtores: o milho, a mandioca, o amendoim e as leguminosas (MADER, 2023). No país, as micotoxinas representam uma preocupação significativa devido às condições climáticas favoráveis ao crescimento de fungos produtores de micotoxinas, bem como às práticas agrícolas locais inadequadas aplicadas na pré-colheita e na pós-colheita (Mussalama, 2023).

A exposição humana é negligenciada sobretudo em países em desenvolvimento, devido ao desconhecimento sobre esta problemática, à deficiente implementação da regulamentação e à inclusão de alimentos contaminados na cadeia alimentar em períodos de escassez de alimentos devido a secas, guerras, crises políticas e económicas (Wagacha & Muthomi, 2008; Pedro, 2021; Bila *et al.*, 2025).

2.4. Influência das condições ambientais na ocorrência de fungos e micotoxinas

O crescimento fúngico e a produção de micotoxinas dependem de factores bióticos e abióticos (Zorzete, 2010). Entender detalhadamente cada factor envolvido é essencial para compreender completamente o processo de contaminação, permitindo não apenas a previsão, mas também a prevenção da produção de micotoxinas. Isso se justifica pelo facto de as condições ambientais exercerem uma influência significativa no crescimento fúngico, sendo que a produção de micotoxinas é geneticamente regulada em resposta a essas condições. (Chaberlain *et al.*, 1993; Hollinger & Ekperigin, 1999; Zorzete, 2010)

Em climas tropicais e subtropicais, o desenvolvimento fúngico é favorecido por diversos factores, como a presença de substratos altamente nutritivos e as condições de humidade e de temperatura (Tanaka *et al.*, 2001; Mistura, 2019). Algumas culturas são contaminadas ainda no campo, ou seja, na pré-colheita, enquanto outras são contaminadas na pós-colheita quando são armazenadas em condições inadequadas (Matusse *et al.*, 2025).

Quando expostos a condições ambientais favoráveis, os fungos podem produzir micotoxinas em produtos agrícolas, como em cereais, durante o crescimento da planta, colheita, armazenagem e industrialização. Este processo pode ser acelerado por vários factores, como temperatura, substrato, actividade de água, humidade, pH e o tempo (Bankole *et al.*, 2006; Iamanaka *et al.*, 2010; Valmorbida, 2016)

O crescimento fúngico é sensível à temperatura, pois em temperaturas adequadas, o patógeno é favorecido no processo de colonização, infecção e desenvolvimento da doença, em contrapartida, quando as temperaturas são inadequadas, o crescimento e desenvolvimento do patógeno pode ser retardado ou até mesmo interrompido (Mshelia *et al.*, 2020). A ocorrência de altas temperaturas e alta humidade relativa do ar pode ocasionar aumento na incidência de fungos nos grãos durante as fases de maturação e colheita (Mistura, 2019).

A precipitação é também um dos factores climáticos de maior relevância, pois influencia directamente o ciclo da água, além de impactar outros elementos do clima, como a humidade do ar, que é um dos elementos importantes para a ocorrência de espécies de fungos e seus produtos tóxicos (Alvarenga, 2012). Os grãos colhidos com alto teor de humidade, apresentam potencial risco de crescimento de fungos no armazenamento (Pedro, 2021; Matusse *et al.*, 2025). Da mesma

forma, em regiões onde a humidade é alta e as secagens no campo são deficientes, os riscos de contaminação por fungos se tornam bastante significativos. É importante salientar que muitas espécies de fungos, como o caso de *Aspergillus* spp., se desenvolvem lentamente em determinadas culturas com conteúdo de humidade do grão abaixo de 18% (Mshelia *et al.*, 2020; Maxwell, 2020).

A maioria dos fungos necessitam de humidade relativa acima de 80% e um mínimo de actividade de água (a_w) para crescer, pois a produção de toxinas pode não ocorrer em humidade relativa abaixo daquele valor (Iamanaka *et al.*, 2010). As micotoxinas podem ser produzidas em actividades de água que vão de 0,60 a 0,90 em alimentos de humidade intermediária. O conteúdo de água é dependente da humidade relativa do ar à uma determinada temperatura. Os fungos são mais resistentes aos efeitos das condições de baixa actividade de água do que as bactérias e leveduras, e alguns podem sobreviver em produtos com uma actividade de água tão baixa quanto 0,60, embora 0,70 seja o mínimo que garante o crescimento de fungos de armazenamento (Mshelia *et al.*, 2020). As micotoxinas podem ser encontradas em vários alimentos, contudo, certos alimentos são mais susceptíveis que outros. Tendo em conta esse facto, de acordo com Iamanaka *et al.* (2010) os alimentos que apresentam alto teor de carboidratos são mais favoráveis à produção de micotoxinas.

2.5. Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são causadas pelas actividades humanas e por factores naturais, que alteram a composição global da atmosfera. Estas duas causas não são mutuamente exclusivas mas se apresentam como complementares, proporcionando um agravamento à natural dinâmica global do estado climático (IPCC, 2007). Para Davis (2011), as mudanças climáticas ocorrem tanto naturalmente em função do sistema climático regional e global, quanto em resposta à influência adicional devido à actividade humana.

De acordo com o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, revelou-se que o aquecimento do sistema climático é inequívoco, com muitas das mudanças observadas nas últimas décadas sendo sem precedentes (IPCC, 2014). Essas alterações dos factores ambientais podem provocar um aumento ou redução inesperada do risco relativo de contaminações por fungos e micotoxinas (Perrone *et al.*, 2020).

2.6. Mudanças climáticas e seu impacto na distribuição de doenças

Ao nível global, a agricultura tem registado avanços significativos nos últimos anos, com expansão das áreas de cultivo e aumento da capacidade produtiva. No entanto, as mudanças climáticas globais provocadas por acções antrópicas podem alterar o actual cenário fitossanitário da agricultura mundial (Valadares, 2004).

De acordo com a EPA (1989), estima-se que qualquer mudança no clima pode afectar o zoneamento agrícola, a produtividade das culturas e as técnicas de manejo, alterando o real cenário da agricultura, com consequências econômicas, sociais e ambientais. Modificações na importância relativa das pragas e doenças das principais culturas podem ocorrer em um futuro próximo. O aparecimento e desenvolvimento de uma doença é resultante da interação de três factores: planta susceptível, agente patogénico e factores ambientais favoráveis. Os impactos económicos, sociais e ambientais decorrentes podem ser positivos, negativos ou neutros, pois as mudanças climáticas podem diminuir, aumentar ou não ter efeito sobre os diferentes problemas fitossanitários, em cada região. O ambiente, portanto, é uma componente relevante nesta interação, podendo, inclusive, impedir a ocorrência da doença mesmo na presença de hospedeiro susceptível e patógeno virulento (Vale *et al.*, 2004).

A observação que tem se feito relativamente ao aumento de temperatura e mudanças nos padrões de precipitação têm um impacto na persistência e nos padrões de ocorrência de bactérias, vírus e fungos e nos padrões de suas doenças de origem alimentar correspondentes (Tirando *et al.*, 2010). Essas alterações também têm um impacto na ecologia e crescimento microbiano, fisiologia vegetal e animal e susceptibilidade do hospedeiro, o que pode resultar no surgimento, redistribuição e mudanças na incidência e intensidade de doenças de plantas e animais e infestações de pragas, todas com potencial de afectar a qualidade e segurança dos alimentos (Tirando *et al.*, 2010; Perrone *et al.*, 2020)

2.7. Modelos de distribuição de doenças

A modelagem de distribuição é uma técnica que combina dados de ocorrência de espécies e características ambientais de uma determinada região para prever a distribuição de uma espécie (Guisan e Thuiller, 2005). Estes modelos são baseados nas leis da física, que representam as

interações entre diferentes componentes do sistema climático como a superfície da terra, a atmosfera e os oceanos (Davis, 2011). Nos últimos anos, o aumento das ferramentas para modelar a distribuição de espécies tem sido impulsionado pelo avanço dos métodos de análise estatística e das tecnologias de informação geográfica (Guisan *et al.*, 2000).

Em determinados momentos, as mudanças nas condições climáticas provocam alterações significativas nos padrões de distribuição das doenças. Nessas situações, para compreender sua dinâmica, são utilizados modelos que permitem monitorar o estado de uma doença em diferentes períodos de tempo. Assim, os modelos são utilizados mais frequentemente de quatro maneiras: (1) para calcular a adequabilidade relativa do habitat ocupado pelas espécies – distribuição actual; (2) para estimar a adequabilidade relativa do habitat em áreas geográficas que não são ocupadas pelas espécies – distribuição potencial/espécies invasoras; (3) para estimar mudanças na adequação de habitat ao longo do tempo, dado um cenário específico para a mudança ambiental – paleomodelagem e modelagem futura; e (4) como estimativa do nicho ecológico da espécie (Warren & Seifert, 2011; Dalapiccola, 2016a).

As correlações entre os dados bióticos e abióticos podem ser realizadas por diferentes algoritmos (funções matemáticas implementadas em diferentes *softwares*), dentre os quais encontramos os modelos: BIOCLIM, CLIMEX, GARP e o MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006; Byeon *et al.*, 2018).

2.8. Modelo MaxEnt

O Modelo de Máxima Entropia (*Maximum Entropy Modelling* - MaxEnt), é um modelo que utiliza o princípio da máxima entropia em dados de presença para estimar um conjunto de funções que se relacionam com variáveis ambientais do habitat de modo a se aproximar da distribuição geográfica potencial das espécies alvos (Phillips *et al.*, 2006).

O modelo MaxEnt é uma ferramenta mundialmente reconhecida por produzir resultados robustos sobre distribuição de espécies com dados de ocorrência esparsos, amostrados de forma irregular e com pequenos erros na sua localização (Elith *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006). Este modelo é actualmente uma das ferramentas mais utilizadas em ecologia, biogeografia e biologia evolutiva para modelar e mapear a distribuição das espécies, utilizando dados de presença e variáveis

ambientais para prever probabilidades de adequabilidade ambiental e presença de uma determinada espécie (Record *et al.*, 2013).

A construção dos modelos no MaxEnt envolve três etapas fundamentais (Figura 2), que inclui: (a) a pré-análise que compreende a selecção, organização e limpeza dos pontos de ocorrência, bem como a selecção dos dados ambientais; (b) a modelagem que é o uso do algoritmo (neste caso o MaxEnt) e os dados gerados no processo de pré-análise (parametrização); (c) a pós-análise que compreende a avaliação (validação) dos modelos gerados na etapa da modelagem.

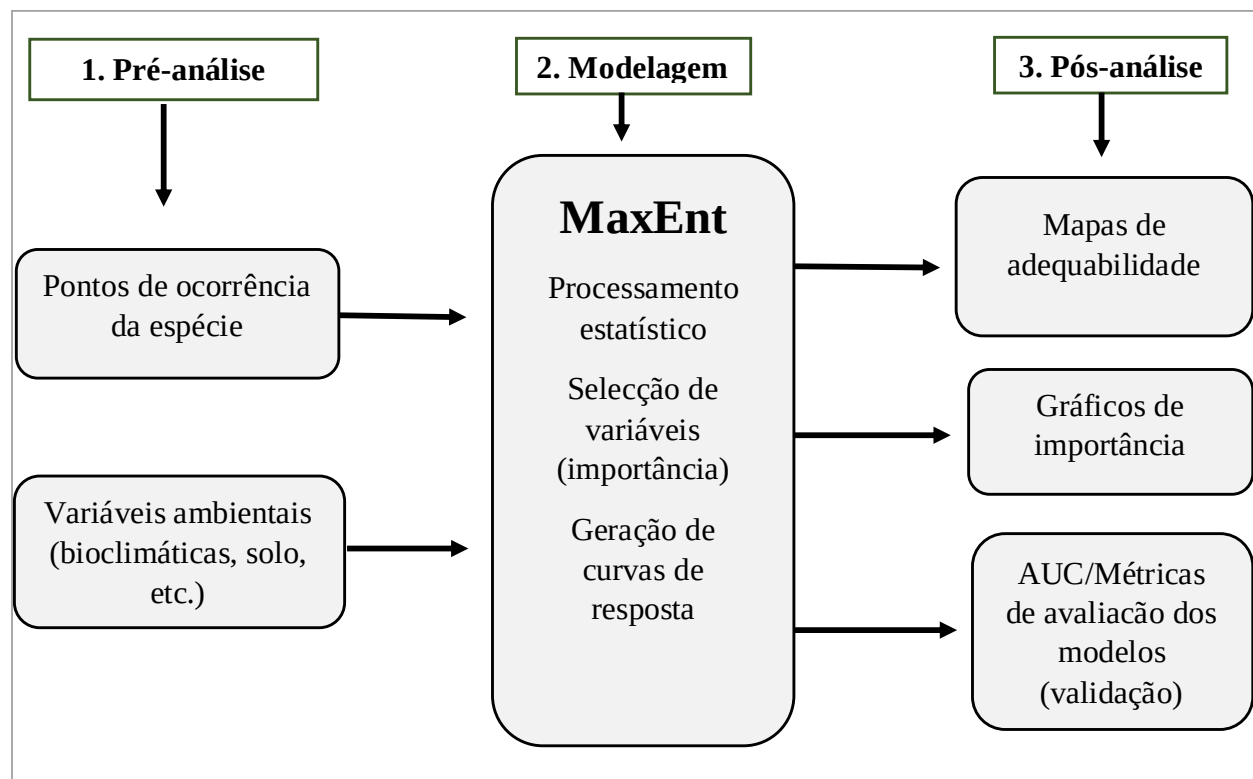


Figure 2: Estrutura do processo de modelação com base no modelo MaxEnt.

Fonte: Adaptado de Dalapicolla (2016b) pelo autor.

III. METODOLOGIA

3.1. Descrição da Área de Estudo

O estudo foi realizado nos distritos de Chókwè, Manjacaze (também conhecido por Mandlakazi) e Chongoene, na província de Gaza. A província está inserida na região Sul de Moçambique. Os distritos de Chókwè, Manjacaze e Chongoene, apresentam uma superfície de aproximadamente 2.466 km², 3.049 km² e 1.575 km², respectivamente (MICOA, 2012a, 2012b, 2012c; INE, 2023).

O distrito de Chókwè apresenta uma população estimada em 214.183 habitantes, com uma densidade populacional de cerca de 88 hab/km². O distrito de Manjacaze possui uma população aproximada de 141.120 habitantes e uma densidade de 46,3 hab/km². Por sua vez, o distrito de Chongoene conta com cerca de 101.975 habitantes e apresenta a maior densidade populacional entre os três distritos, estimada em 136,6 hab/km² (MICOA, 2012c). Nos três distritos, a agricultura constitui a principal actividade econômica, abrangendo cerca de 80 % população (INE, 2023).

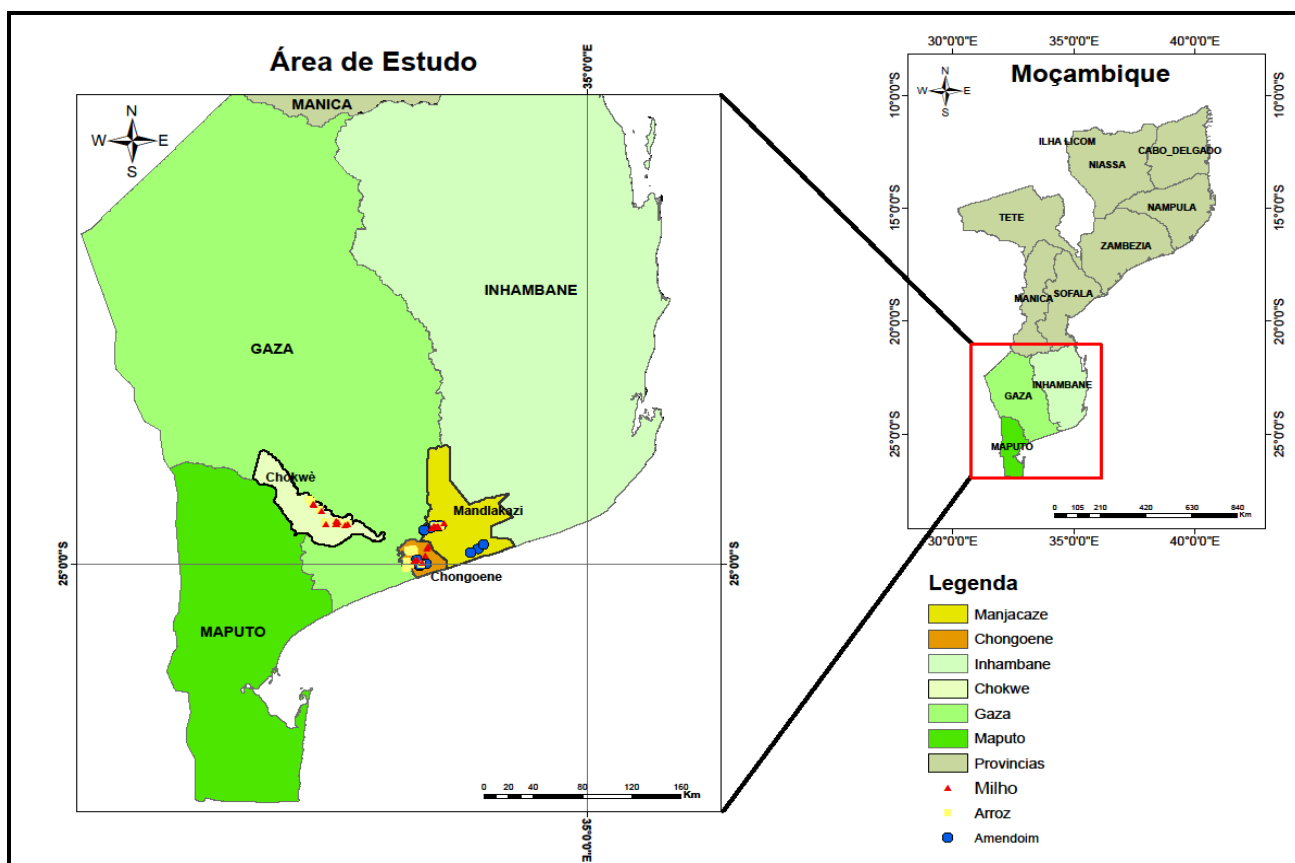


Figura 3: Mapa de localização da área de estudo e locais de amostragem (**Fonte:** Autor).

3.1.1. Clima

O distrito de Chókwè apresenta um clima semi-árido, onde a precipitação varia de 500 mm a 800 mm, confirmando o gradiente do litoral para o interior (MAE, 2005). Em Chókwè, as temperaturas médias anuais variam entre 22 °C e 26° C, e a humidade relativa média anual varia entre 60 a 65%. A região apresenta uma acentuada deficiência de água, aliada ao facto de observar-se elevadas temperaturas, e baixa pluviosidade. E, mesmo durante a estação chuvosa ocorrem secas frequentes e estiagem devido à queda irregular da precipitação nesse período (MAE, 2005).

O distrito de Chongoene apresenta um clima tropical seco. No entanto, o clima é influenciado pelos anticiclones do Oceano Índico. A temperatura média anual é de 22,9 °C., e a humidade relativa anual varia de 75 a 76 %. A precipitação média mensal da região apresenta uma variação sazonal relevante, destacando-se um período húmido, entre Novembro e Abril e outro no período seco entre Maio e Outubro (MAE, 2005). A precipitação média anual da região é de 572 mm, havendo, no entanto, uma variação anual significativa devido à acção da faixa costeira (MICOA, 2012c).

O distrito de Manjacaze apresenta zonas com características tropicais, sendo mais seco no interior do distrito e sub-húmido no litoral. As temperaturas médias anuais variam entre 19 °C (mínimas em Julho) e 32 °C (máximas em Dezembro). A humidade relativa média anual situa-se entre 75 % e 76 %. Durante a estação chuvosa, os níveis de humidade aumentam, observando-se níveis de humidade de até 78 % em Março, enquanto na estação seca, com ênfase no mês de Setembro, os níveis podem descer para cerca de 68 %. A precipitação anual varia entre 400 mm e 950 mm, sendo que os meses de verão (Novembro a Abril) ocorrem a maior parte da precipitação (MICOA, 2012b)

3.1.2. Solos

No distrito de Chókwè predominam na sua maioria solos aluviais e argilosos, derivados de sedimentos transportados pelo rio Limpopo. Os solos aluviais e argilosos são mais comuns nas proximidades do leito principal do rio (MAE, 2005). No distrito de Chongoene, predominam os solos arenosos (64 % da área total do distrito), seguido dos solos aluviais (36 %). Por outro lado, no distrito de Manjacaze, os solos variam entre arenosos e argilosos. Neste distrito, os solos são

essencialmente arenosos no litoral, que se seguem associações de solos de aluviões, e franco-arenosos a argilosos mais para o interior, intercalados com solos hidromórficos (MICOA, 2012b).

De modo geral, a região é marcada por um ecossistema associado à influência da bacia hidrográfica do rio Limpopo (Chókwè) e pela acção costeira (litoral) do Oceano Índico (Chongoene e Manjacaze), que desempenham papel crucial na fertilidade dos solos e na distribuição da vegetação nativa (MAE, 2005; MICOA, 2012a, 2012b, 2012c).

3.2. Identificação dos fungos toxigénicos e as respectivas micotoxinas

3.2.1 Amostragem e colecta de dados

Para a elaboração do presente estudo, foi usada uma base de dados secundários, na qual as amostras foram colectadas e analisadas no âmbito do projecto MYCOTOX – PALOP (Anexos 1 e 2), em várias localidades nos distritos de Chókwè, Chongoene e Manjacaze, conforme descrito por Matusse *et al.*, (2024). A colecta ocorreu de Junho a Agosto de 2022, com o objectivo de identificar os principais fungos e micotoxinas presentes na produção das culturas de milho, arroz e amendoim (Dias *et al.*, 2023; Matusse *et al.*, 2024; Tolentino *et al.*, 2025). Para à reconstituição das coordenadas geográficas dos locais onde foram colectadas as amostras, realizou-se um trabalho de campo adicional que decorreu entre os dias 05 a 08 de Junho de 2025 (Anexos 3 e 4).

A colecta de dados (amostras) foi realizada com base em uma amostragem por conveniência. Essa amostragem foi realizada junto dos produtores das culturas de milho, arroz e amendoim, seleccionadas como culturas de maior relevância para o estudo. A escolha dessas culturas baseou-se em questionários de consumo administrados às famílias (hábitos alimentares), questionários aos produtores agrícolas e com base no Inquérito Agrário Integrado 2020 (MADER, 2020; Matusse *et al.*, 2024; Bila *et al.*, 2025).

3.3. Análise da influência das variáveis ambientais na ocorrência e distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim

Inicialmente, organizou-se os dados ambientais e de ocorrência dos fungos toxigénicos e micotoxinas da área de estudo, com os devidos formatos aceites no *software* de análise da contribuição das variáveis ambientais: o modelo MaxEnt (Processo detalhado no subcapítulo 3.4).

Para análise da correlação entre as variáveis bióticas (presença confirmada) e abióticas (dados ambientais), foram utilizadas como base as estimativas médias de contribuições relativas das variáveis ambientais analisadas pelo modelo MaxEnt para cada fungo toxigénico e micotoxina, tendo como base o teste de Jackknife (Phillips *et al.*, 2006; Dudik *et al.*, 2008).

3.4. Mapeamento da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas pelo modelo MaxEnt

3.4.1. Dados Abióticos

Os dados abióticos correspondem a variáveis ambientais associadas ao estudo, geradas através de interpolação e de imagens de satélite (Dalapiccola, 2016b; Laquine, 2024). Para a realização da modelagem dos fungos toxigénicos e micotoxinas, foram escolhidas camadas ambientais contendo dados com potencial de relevância biológica para a sua ocorrência. No total foram previamente extraídas 30 variáveis ambientais (Tabela 1), sendo que 19 variáveis bioclimáticas foram obtidas na base de dados do WorldClim - *Global Climatic Data* (<http://www.worldclim.org/bioclim>) com uma resolução espacial de 1 km² e 11 variáveis de caracterização de propriedades do solo foram obtidas da base de dados da SoilGrids - informações globais sobre o solo em grade do ISRIC - *WorldSoilInformation* (<https://soilgrids.org/>) com uma resolução espacial de 1 km².

Tabela 1: Camadas bioclimáticas e propriedades do solos extraídas do banco de dados do Worldclim e SoilGrids, utilizadas nos procedimentos de parametrização (pré-análise).

Código da variável	Descrição da variável	Formato
Bio 1	Temperatura média anual - °C	Contínuo
Bio 2	Variação Diurna Média de Temperatura - °C	
Bio 3	Isotermalidade - °C	
Bio 4	Sazonalidade da Temperatura - °C	
Bio 5	Temperatura máxima do mês mais quente - °C	
Bio 6	Temperatura mínima do mês mais frio - °C	
Bio 7	Amplitude térmica anual - °C	
Bio 8	Temperatura média do trimestre mais húmido - °C	

Bio 9	Temperatura média do trimestre mais seco - °C	Contínuo
Bio 10	Temperatura média do trimestre mais quente - °C	
Bio 11	Temperatura média do trimestre mais frio - °C	
Bio 12	Precipitação Anual – mm	
Bio 13	Precipitação do mês mais chuvoso – mm	
Bio 14	Precipitação do mês mais seco – mm	
Bio 15	Sazonalidade da Precipitação – mm	
Bio 16	Precipitação do trimestre mais chuvoso – mm	
Bio 17	Precipitação do trimestre mais seco – mm	
Bio 18	Precipitação do trimestre mais quente – mm	
Bio 19	Precipitação do trimestre mais frio – mm	
pH	Potencial de Hidrogenio	Contínuo
C_Org	Teor de carbono orgânico do solo - %	
dS	Densidade aparente do solo – g/cm ³	
Fra_Gros	Teor de fragmentos grossos - %	
Tar	Teor de areia - %	
Ts	Teor de silte - %	
Targ	Teor de argila - %	
CTC	Capacidade de troca catiónica (CTC) – cmols/kg	
TN	Nitrogênio total – g/kg	
cS	Classe de solo	
sC	Estoque de carbono orgânico – tC/ha	

As variáveis bioclimáticas são frequentemente correlacionadas, o que por vezes resulta num mau desempenho e numa interpretação errada do modelo gerado pelo MaxEnt (Dormann *et al.*, 2013; Munguambe, 2023). De modo a evitar-se esses erros, foram seleccionadas as variáveis de maior relevância biológica para espécies que não apresentaram forte correlação pelo teste de correlação de Pearson (2005). A análise de correlação de Pearson deve ser feita para remover as variáveis altamente correlacionadas, que apresentam coeficiente de correlação maior que 0.75 ($|r| > 0,75$)

(Dormann *et al.*, 2013; Singh, *et al.*, 2021; Munguambe, 2023). Este procedimento resultou na selecção de 4 variáveis bioclimáticas e 2 variáveis edáficas (Tabela 2).

Tabela 2: Variáveis ambientais seleccionadas para modelagem de distribuição dos fungos e micotoxinas.

Variável	Descrição	Unidade
Bio 1	Temperatura média anual	°C
Bio 2	Variação Diurna Média de Temperatura	°C
Bio 7	Amplitude térmica anual	°C
Bio 12	Precipitação Anual	mm
pH	Potencial de Hidrogenio	-
C_Org	Teor de carbono orgânico do solo	g/kg

3.4.2. Modelagem

Para gerar os modelos de distribuição dos fungos e micotoxinas utilizou-se o programa *Maximum Entropy Species Distribution Modelling* (MaxEnt) na versão 3.4.4, desenvolvido por Phillips *et al.*, (2006). O modelo de máxima entropia tem capacidade de estimar a probabilidade de ocorrência das espécies tendo como base o cálculo de distribuição de máxima entropia (1):

$$S(p) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

Onde:

S(p) - Entropia máxima da variável aleatória p;

i - Constante de ajuste dimensional;

n - Número total de categorias ou estados;

p_i - Distribuição de probabilidade.

Após seleccionar as variáveis ambientais através do teste de correlação de Pearson, foram inseridas no modelo as ocorrências das espécies no formato CSV (*Comma Separated Values*). As variáveis ambientais, previamente recortadas a área de estudo no *ArcGIS 10.3*, foram armazenadas na mesma pasta em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). As formas de entrada dos dados no *software* MaxEnt são os formatos CSV e ASCII (Dalapicolla, 2016b).

Em seguida, os dados bióticos e abióticos foram carregados no programa MaxEnt (versão 3.4.4), de modo a gerar os modelos de distribuição potencial e preditiva dos fungos toxigénicos e micotoxinas na região sul de Moçambique.

3.5. Projectão da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim em função das mudanças climáticas

As projecções consistiram em prever a ocorrência e distribuição de fungos toxigénicos e micotoxinas, nos 30 anos após recolha dos dados (2022 a 2052), onde para o cenário climático futuro, foi considerado o modelo climático global MIROC – 6 (*Center for Climate System Research, Japan*), com dois cenários: o RCP 4.5 e RCP 8.5 do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC), projectados para o período de 2041 a 2060.

Os cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5, representam uma situação balanceada e pessimista. O primeiro cenário é mais optimista, pois prevê uma situação em que o estado climático (factores ambientais) actual se mantenha estável, e o segundo, é baseado em numa situação pessimista, pois prevê uma mudança brusca nos padrões climáticos devido a contínua negligência das actividades associadas às mudanças do padrão climático, como a contínua emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2013). Recorreu-se a esses dois Patamares de Concentração Representativos (RCPs), por representarem cenários futuros aproximados ao contexto de Moçambique. Sendo que o cenário RCP 4.5 aproxima-se mais da realidade actual, enquanto o cenário RCP 8.5 busca mostrar uma situação oposta, onde não há nenhuma medida para minimizar os efeitos das mudanças climáticas (Tabela 3).

Tabela 3: Projeções de aumento da temperatura média global da superfície (°C) para diferentes Cenários de Concentração Representativos (RCPs) definidos pelo IPCC, considerando os períodos de 2046 a 2065 e 2081 a 2100.

Alteração da Temperatura Média Global da superfície (°C)	2046-2065			2081-2100	
	Cenário	Média	Intervalo provável	Média	Intervalo provável
	RCP 2.6	1.0	0.4-1.6	1.00	0.3-1.7
	RCP 4.5	1.4	0.9-2.0	1.80	1.1-2.6
	RCP 6.0	1.3	0.8-1.8	2.20	1.4-3.1
	RCP 8.5	2.0	1.4-2.6	3.70	2.6-4.8

Fonte: Adaptado por Chiau (2023)

3.6. Validação do Modelo

A validação é a etapa de avaliação dos modelos, onde são feitos testes estatísticos para analisar se os modelos propostos são adequados (Dalapicolla, 2016a, 2016b).

Para validação dos modelos, foram executadas 10 réplicas no modelo MaxEnt, usando a análise *Bootstrap* com 25% dos pontos definidos como pontos de teste e o restante 75% como treino. E, de modo a permitir a validação das réplicas, foi utilizado o valor da área abaixo da curva (AUC) em função das curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*), que são calculados pelo próprio modelo MaxEnt. Os valores de AUC podem ser classificados como excelente (1,0 – 0,9), bom (0,9 – 0,8), médio (0,8 – 0,7), mau (0,7 – 0,6) e muito mau (0,6 – 0,5), conforme descrito por Metz (1986). Desse modo, valores de AUC mais próximos de 1 indicam as regiões de máxima entropia, sendo essas as áreas com nicho ecológico mais provável para a ocorrência da espécie considerando as variáveis ambientais utilizadas no modelo (Phillips *et al.*, 2006).

3.7. Análise de Dados

Para a análise de dados, foi utilizado o *Microsoft Office Excel* 2016 para a organização dos dados, construção de tabelas e elaboração dos gráficos. De forma complementar, foi usado o pacote estatístico *RStudio*, para a avaliação da correlação entre as variáveis abióticas (ambientais) que foram utilizadas no modelo MaxEnt para avaliação da distribuição potencial e preditiva dos fungos

e micotoxinas, através do coeficiente de Pearson ($[r] > 0,75$). De modo adicional, recorreu-se ao *ArcGIS 10.8* para o recorte dos dados ambientais da área de estudo e para a reclassificação dos mapas gerados pelo modelo MaxEnt.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise da influência das variáveis ambientais na ocorrência e distribuição de fungos toxigênicos e micotoxinas nas culturas de milho, arroz e amendoim

A Tabela 4, mostra as estimativas médias de contribuição relativa das variáveis ambientais analisadas pelo modelo MaxEnt, baseados no teste de Jackknife (Anexo 6). Conforme apresentado nesta tabela, é possível notar que para todos os anos e cenários climáticos (RCP 4.5 e RCP 8.5), as variáveis de maior expressão em ordem decrescente para o modelo foram: precipitação média anual (Bio 12), temperatura média anual (Bio 1) e amplitude térmica anual (Bio 7). As variáveis de menor contribuição foram: potencial de hidrogénio no solo (pH), teor de carbono orgânico no solo (C_org) e variação diurna média de temperatura (Bio 2).

Tabela 4: Percentagem de contribuição das variáveis de estudo para a distribuição das espécies fúngicas e as respectivas micotoxinas.

	Espécie/grupo	Ano/cenário	Variável (%)					
			BIO1	BIO2	BIO7	BIO12	pH	C_org
FUNGO	<i>Aspergillus flavus</i>	Actual	9.2	0	8.6	76.1	5.8	0.4
		2052/RCP 4.5	16.9	0	12.1	70.9	0.2	0
		2052/RCP 8.5	18.5	0	10.4	71.1	0	0
	<i>Fusarium spp.</i>	Actual	12.2	0	9.6	74.1	1.8	2.2
		2052/RCP 4.5	9.2	0	10.8	76.5	2.7	0.7
		2052/RCP 8.5	13.6	0.3	10.4	72.5	2.5	0.8
MICOTOXINA	Aflatoxinas	Actual	16.7	0.6	13.1	65.5	3	1.2
		2052/RCP 4.5	16.7	0.6	13.2	67.9	1.2	0.4
		2052/RCP 8.5	17.3	0.7	16.5	64.2	0.7	0.6
	Fumonisinhas	Actual	5	0.1	10.1	80.8	3.9	0
		2052/RCP 4.5	9.5	0.4	10.9	74.8	2.7	1.7
		2052/RCP 8.5	10.5	0	9	77.6	0.5	2.4

		Actual	0	1.7	2	93.7	0.2	2.4
	Zearalenona	2052/RCP 4.5	0.2	0.2	1.2	94.9	0	3.5
		2052/RCP 8.5	0.1	0	2	89.2	0	8.7

A temperatura média anual (Bio 1) e a precipitação média anual (Bio 12) foram as variáveis que mostraram uma maior contribuição para os modelos, o que pode evidenciar que o crescimento dos fungos (*Aspergillus flavus* e *Fusarium* spp.) e a produção de micotoxinas (Aflatoxinas, Fumonisinhas e Zearalenona) têm uma maior dependência da variação da temperatura e precipitação, pois estes microrganismos podem responder melhor a zonas com uma faixa térmica ótima (20 °C a 35 °C), e disponibilidade hídrica que é associada a níveis de humidade no solo e no microclima das culturas, através da variação da humidade relativa do ambiente.

De acordo com Magan *et al.* (2003), as condições ambientais associadas ao clima, tais como a temperatura e a precipitação, representam a principal força motriz do agroecossistema para a colonização fúngica e produção de micotoxinas. Sendo que, a maioria dos fungos e seus metabólitos secundários necessitam de uma humidade relativa acima de 80 % e de um nível mínimo de actividade de água (a_w) para contaminar os grãos, podendo, por esse motivo não ocorrer em ambientes com humidade relativa inferior a esse valor (Iamanaka *et al.*, 2010).

Estudos têm mostrado que essas matrizes têm uma alta susceptibilidade a incidência de fungos tanto no campo como no armazenamento, sendo que as espécies associadas ao género *Fusarium* são reportados com maior ênfase nas amostras colectadas no campo, pois são mais adaptadas as condições em que a humidade do grão está em equilíbrio com uma humidade relativa acima de 90%, porém também tem sido reportado em milho armazenado com alto teor de humidade (Valmorbida, 2016; Penagos-Tabares *et al.*, 2025). Por sua vez, o fungo *Aspergillus flavus* tem sido reportado como um fungo que ocorre com maior frequência no armazenamento das culturas, este facto está associado à capacidade do fungo crescer em substratos com uma actividade de água reduzida, cerca de 70 a 90 % do teor de humidade em alimentos armazenados (Silliker *et al.*, 1985; Maxwell, 2020).

A elevada contribuição da temperatura média anual (Bio 1) e da precipitação média anual (Bio 12) para os modelos indica que essas variáveis são determinantes para variação da incidência dos

fungos e dos níveis de contaminação por micotoxinas em determinadas áreas, visto que essas variáveis têm influência directa no metabolismo dos fungos, assim como na variação do teor de humidade do grão no campo e durante a secagem. Nesses processos, a humidade relativa do ar desempenha um papel importante, sendo condicionada principalmente pela temperatura e precipitação da região.

Essas evidências corroboram os resultados do trabalho realizado por Penagos-Tabares *et al.* (2025), no estudo sobre a contaminação por múltiplas micotoxinas em milho da Sérvia durante 2021–2023, os quais demonstraram que a ocorrência de micotoxinas, tais como Aflatoxinas, Fumonisinhas e Zearalenona, apresentam forte variabilidade temporal e espacial, directamente associada às condições climáticas, e principalmente a maior humidade relativa e precipitação dos locais amostrados. Esses resultados reforçam que a disponibilidade de água e a variação térmica criam um microclima favorável ao desenvolvimento de *Aspergillus* spp. e *Fusarium* spp., produtoras das principais micotoxinas que afectam a segurança alimentar.

Para Matusse *et al.* (2024), o país continua a ser afectado por fungos e micotoxinas, como as aflatoxinas, devido à sua vulnerabilidade climática, combinada com as altas temperaturas e elevada humidade relativa que favorecem o crescimento de fungos produtores de micotoxinas. Além disso, essa situação é agravada por práticas de pós-colheita inadequadas e por sistemas de secagem lentos, devido a dependência das condições climáticas locais, que influenciam sem nenhum controle na temperatura, humidade relativa e fluxos de ar nos pontos de secagem natural (ao sol).

Resultados similares ao estudo também foram relatados por Alkhalifah *et al.* (2022) na modelagem da distribuição potencial de *Aspergillus niger*, onde observaram que a precipitação média anual (Bio 12), temperatura média anual (Bio 1) e amplitude térmica anual (Bio 7) foram as variáveis bioclimáticas que apresentaram maior contribuição significativa aos modelos gerados pelo MaxEnt, facto que foi atribuído à maior demanda energética da espécie para suas actividades fisiológicas.

4.2. Mapeamento da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas pelo modelo MaxEnt

Os resultados das previsões da distribuição potencial dos fungos toxigénicos obtidos através das variáveis climáticas e edáficas, mostraram que a área actualmente propensa a ocorrência destas espécies na região sul de Moçambique (Tabela 5), corresponde a 17,08 % para *Aspergillus flavus* e 17,33 % para o *Fusarium* spp. No que se refere às micotoxinas: Aflatoxinas, Fumonisinas e Zearalenona apresentaram um nicho potencial de 21,82 %, 25,57 % e 27,86 %, respectivamente.

Tabela 5: Percentagem da área potencialmente propensa a ocorrência dos fungos e micotoxinas

	Percentagem da área potencial (%)	
	Adequada	Inadequada
<i>Aspergillus flavus</i>	17.08	82.92
<i>Fusarium</i> spp.	17.33	82.67
Aflatoxinas	21.82	78.18
Fumonisinas	25.57	74.43
Zearalenona	27.86	72.14

As figuras 4 e 5, mostram as áreas estimadas pela modelagem da distribuição potencial com maior adequabilidade ambiental para ocorrência dos fungos toxigénicos e micotoxinas. Os resultados indicam que os fungos *Aspergillus flavus* e *Fusarium* spp., e seus metabólitos secundários: Aflatoxinas, Fumonisinas e Zearalenona, apresentam maior adequabilidade ambiental em toda a região sul do país, abrangendo as províncias de Maputo, Gaza e Inhambane. A existência de condições ambientais favoráveis para esses microrganismos é mais evidente nos distritos que se encontram mais próximos à faixa costeira, uma área que é caracterizada por maiores índices de precipitação e temperaturas mais amenas, que condicionam a possibilidade de ocorrência de alta humidade relativa, favorecendo deste modo a ocorrência desses fungos e a produção de micotoxinas. Por outro lado, nas áreas mais interiores observa-se uma menor probabilidade de ocorrência desses microrganismos, que pode estar associada principalmente a condições de

temperaturas altas e precipitações muito baixas durante quase todo ano, limitando deste modo o crescimento destes microrganismos e/ou a produção de micotoxinas.

Estudos realizados por Mshelia *et al.* (2020) e Penagos-Tabares *et al.* (2025), demonstraram resultados similares ao avaliar a ocorrência de fungos e micotoxinas em diferentes ambientes na cultura de milho. Nos referidos estudos, verificou-se que a ocorrência de *Aspergillus* spp. e *Fusarium* spp., e as micotoxinas produzidas, estão directamente associadas a condições ambientais, como a disponibilidade de humidade relativa óptima e temperaturas moderadas no ambiente.

Os resultados deste estudo (Figura 4 e 5) corroboram os obtidos no estudo feito Bila *et al.* (2022), que avaliaram a ocorrência de fungos micotoxigênicos e Aflatoxinas em amendoim na região sul de Moçambique, os quais demonstraram a ocorrência de diferentes fungos associados ao campo, bem como ao armazenamento (pós-colheita) em grãos de amendoim. Nestes, os fungos de campo reportados foram *Fusarium verticillioides*, *F. oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Alternaria* sp., *Cladosporium* sp. e *Macrophomina phaseolina*; por outro lado, os fungos de armazenamento identificados foram *Aspergillus flavus*, *A. ochraceus*, *A. niger*, *Penicillium* sp. e *Rhizopus stolonifer*. Um aspecto igualmente relevante no estudo, foi a confirmação da existência de alguns fungos toxigênicos associados à produção de pelo menos três micotoxinas com impacto na segurança alimentar, nomeadamente Aflatoxinas, Fumonisinhas e Ocratoxina A. E, mais de 83 % das amostras testadas estavam contaminadas com Aflatoxinas.

A elevada ocorrência de contaminações em produtos agrícolas nesta região do país, principalmente por fungos toxigênicos (*Aspergillus flavus* e *Fusarium* spp.) e micotoxinas do grupo das Aflatoxinas, também foi verificada por Parruque *et al.* (2025) e Sineque *et al.* (2025) ao trabalharem com as culturas de milho e amendoim. Os níveis de ocorrência desses fungos toxigênicos e micotoxinas nestas culturas podem ser correlacionados com o facto dos géneros *Aspergillus* e *Fusarium* serem os predominantes em grãos nas regiões tropicais, crescendo em altas temperaturas e actividade de água reduzida (Khosravi *et al.*, 2007; Dias *et al.*, 2023; Matusse *et al.*, 2024; Tolentino *et al.*, 2025).

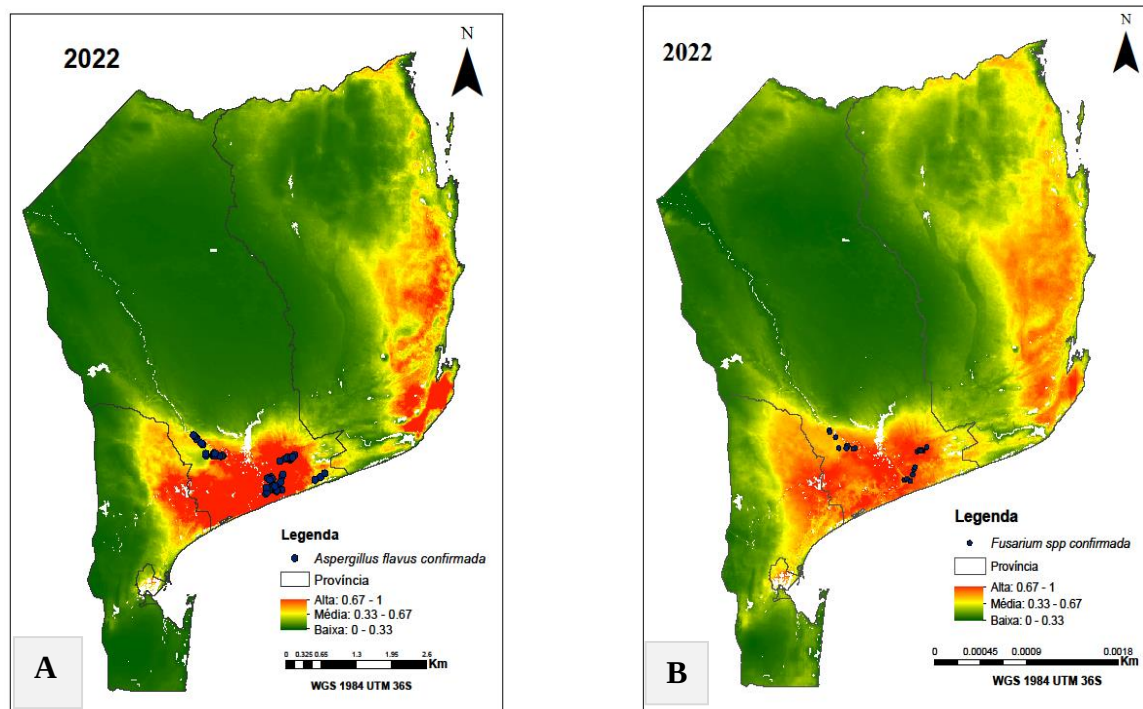


Figura 4: Áreas potencialmente propensas à ocorrências dos fungos: *Aspergillus flavus* (A) e *Fusarium* spp. (B) na região sul de Moçambique

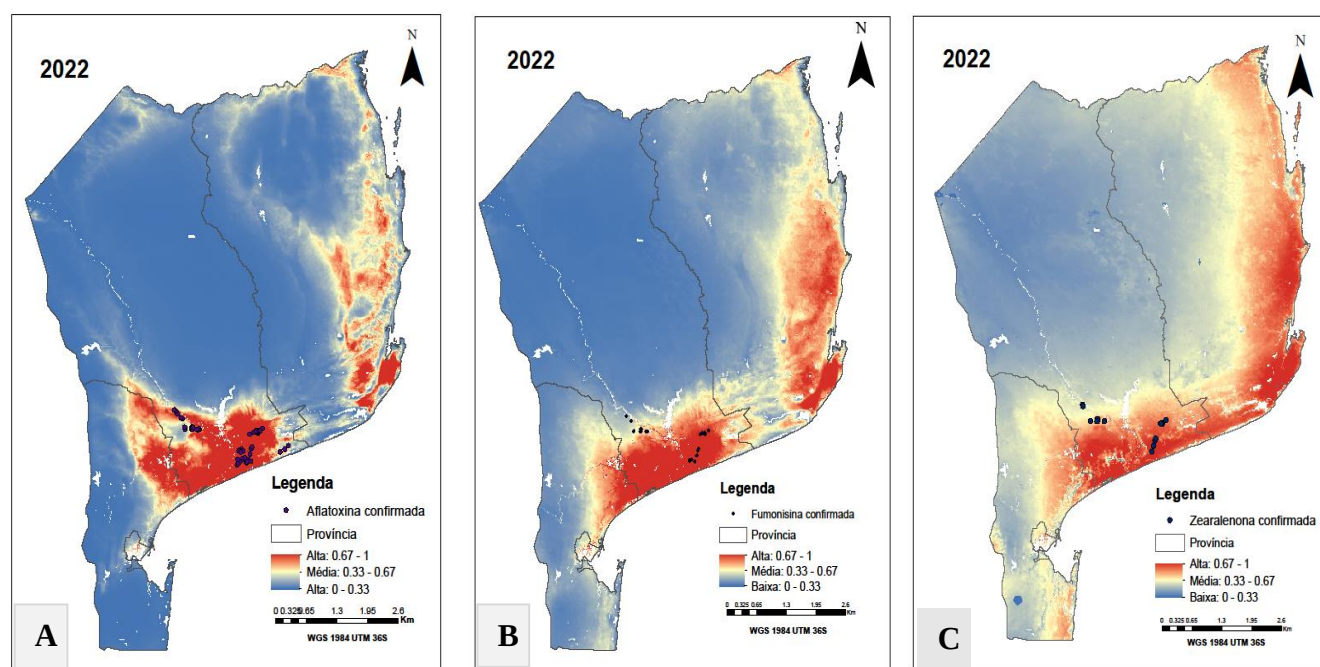


Figura 5: Áreas potencialmente propensas à ocorrências das micotoxinas: Aflatoxinas (A), Fumonissinas (B) e Zearalenona (C) na região sul de Moçambique

4.3. Projecções da ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas em função das mudanças climáticas para o ano de 2052

Na Tabela 6, são apresentados os resultados da distribuição preditiva dos fungos e micotoxinas obtidos através das variáveis climáticas e edáficas tendo em conta os cenários associados as mudanças climáticas. Esses resultados, mostraram que a área actualmente propensa (potencial) a ocorrência destas espécies na região de sul de Moçambique, apresenta uma tendência de redução, onde no cenário optimista (RCP 4.5) e cenário pessimista (RCP 8.5) a percentagem das áreas adequadas poderá atingir uma redução média de 44,58 % e 72,29 %, respectivamente. Contudo, as projecções mostram que a Zearalenona vai reagir diferente das demais micotoxinas, apresentando uma tendência de aumento médio da área adequada face aos dois cenários das mudanças climáticas, com 40,88 % (RCP 4.5) e 64,75 % (RCP 8.5).

Tabela 6: Percentagem da área potencialmente propensa a ocorrência dos fungos e micotoxinas no futuro (2052) num cenário de mudanças climáticas (RCP 4.5 e RCP 8.5)

	Percentagem da área potencial (%)					
	Adequada			Inadequada		
	Actual	RCP 4.5	RCP 8.5	Actual	RCP 4.5	RCP 8.5
<i>Aspergillus flavus</i>	17.08	9.23	5.28	82.92	90.77	94.72
<i>Fusarium spp.</i>	17.33	16.92	7.71	82.67	83.08	92.29
Aflatoxinas	21.82	6.21	3.98	78.18	93.79	96.02
Fumonisinhas	25.57	10.63	4.40	74.43	89.37	95.60
Zearalenona	27.86	39.25	45.90	72.14	60.75	54.10

As mudanças climáticas manifestam-se principalmente pelo aumento da temperatura e dos níveis de dióxido de carbono (CO₂), sendo projectado que proporcionem condições adequadas para a expansão de pragas e patógenos em regiões que, de outra forma, seriam inadequadas (Mshelia *et al.*, 2020; Munguambe, 2023). De acordo com Perrone *et al.* (2020), as alterações observadas nos agrossistemas têm impactos significativos nos ciclos de vida de fungos toxigénicos e na

modificação das interações hospedeiro – resistência e hospedeiro – patógeno, bem como na resiliência de diferentes espécies toxigênicas e na sua capacidade de produzir micotoxinas.

Essa alteração do comportamento das espécies, é revelado a partir da Tabela 6 e da Figura 6, onde ao comparar as condições actuais com os cenários futuros de emissões balanceadas (RCP 4.5) e emissões altas (RCP 8.5), para o mesmo ano de análise, verifica-se que a percentagem da área propensa a ocorrência dos fungos em estudo reduz, facto que também é observado nas Aflatoxinas e Fumonisinias. Por outro lado, a micotoxina Zearalenona mostrou que as condições ambientais futuras serão mais adequadas à sua ocorrência em diferentes locais, apresentando um aumento das áreas com condições ambientais favoráveis à sua ocorrência. Essa diferença na dinâmica da distribuição preditiva da Zearalenona pode ser sustentada pelos estudos de Iamanaka *et al.* (2010) e Mshelia *et al.* (2020), os quais indicam que as principais espécies de fungos associadas à Zearalenona (*Fusarium culmorum* e *Fusarium graminearum*) estão directamente relacionadas às condições de temperatura do ambiente, sendo que o *F. graminearum* destaca-se como a espécie mais comum em climas mais quentes devido às suas diferenças nos mecanismos de adaptação ou tolerância aos factores ambientais associados as mudanças climáticas.

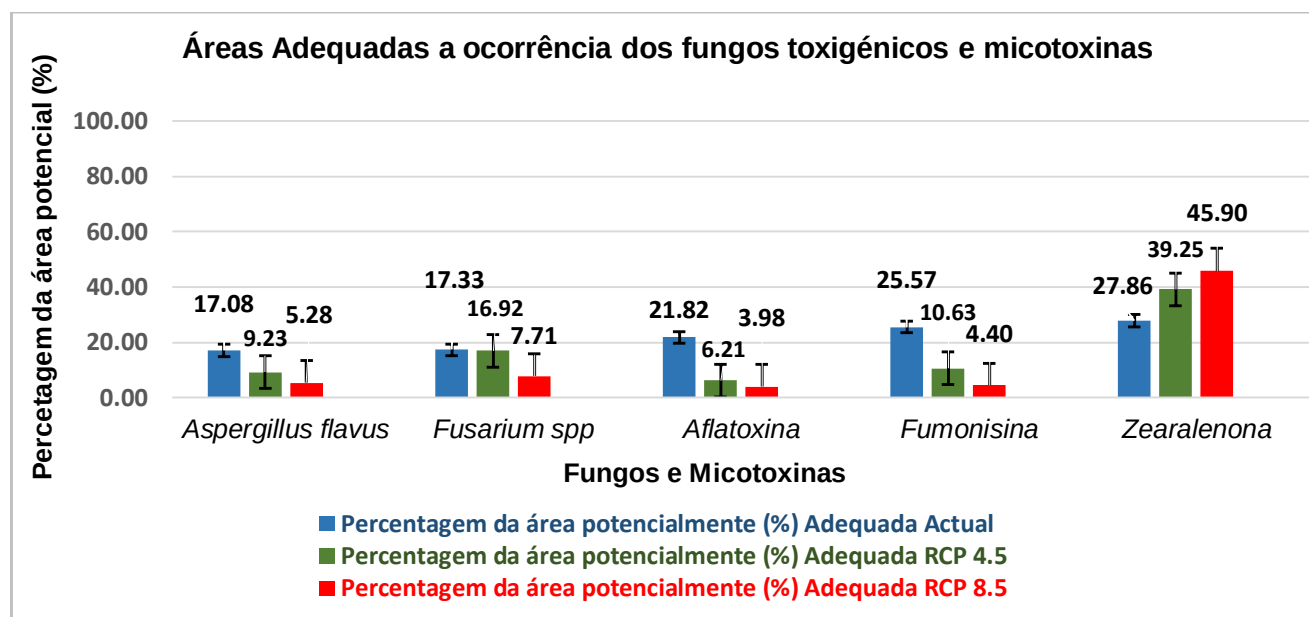


Figura 6: Variação da percentagem da área com adequabilidade ambiental para ocorrência dos fungos toxigênicos e micotoxinas nos diferentes cenários climáticos.

Nas figuras 7 a 11, apresentam-se de forma ilustrativa as tendências das áreas potencialmente adequadas à ocorrência dos fungos e micotoxinas na região sul de Moçambique. Observa-se a redução das áreas propensas mais para o interior da região, principalmente nas áreas consideradas de difícil cultivo agrícola, devido a predominância do clima tropical seco e semi-árido que estão associados a escassez de precipitação e temperaturas altas, condições que comprometem a ocorrência desses microrganismos. Deste modo, as áreas que continuam adequadas à ocorrência dos fungos e micotoxinas seguem um padrão agro-climático, pois os fungos toxigênicos e micotoxinas identificados tendem a ocorrer em maior extensão na faixa costeira da região sul e em áreas mais para o interior de Maputo, que são consideradas de melhor adequabilidade agrícola por coincidirem com a zona agro-ecológica 2, bem como por apresentarem influência dos cursos de águas de rios, e microclimas influenciados pela altitude, que favorecem a disponibilidade de temperaturas e humidade relativa óptimas ao desenvolvimento desses microrganismos (INE, 2003).

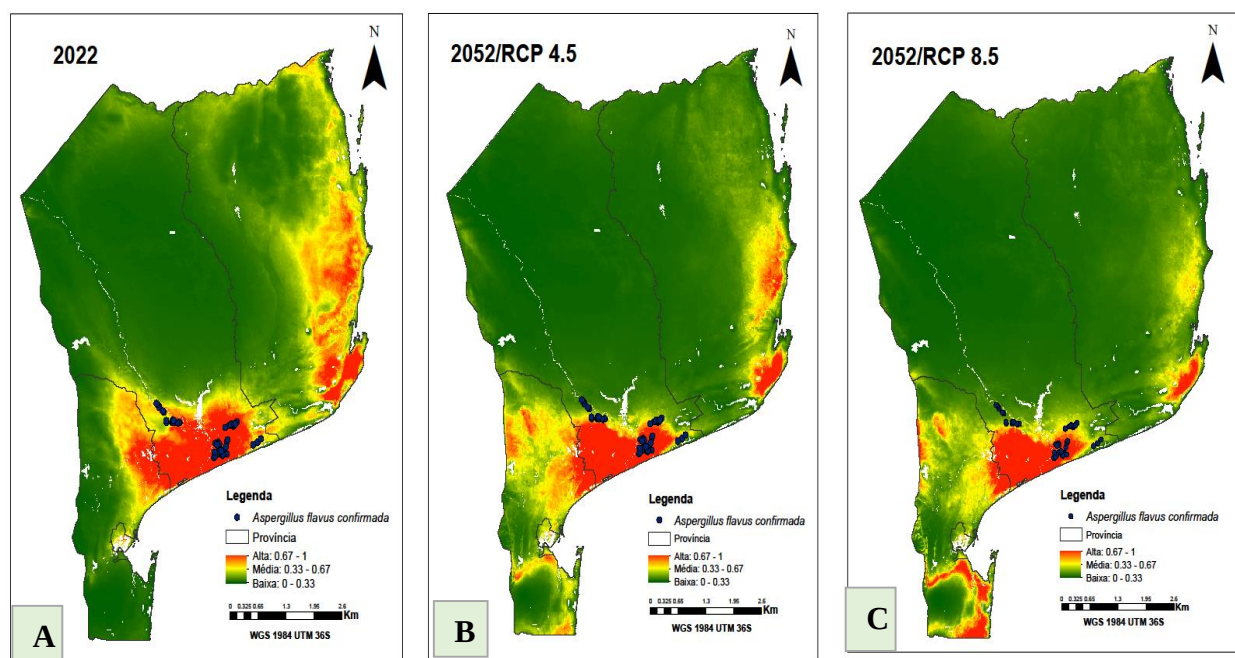


Figura 7: Áreas potencialmente propensas à ocorrência do fungo *Aspergillus flavus* na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.

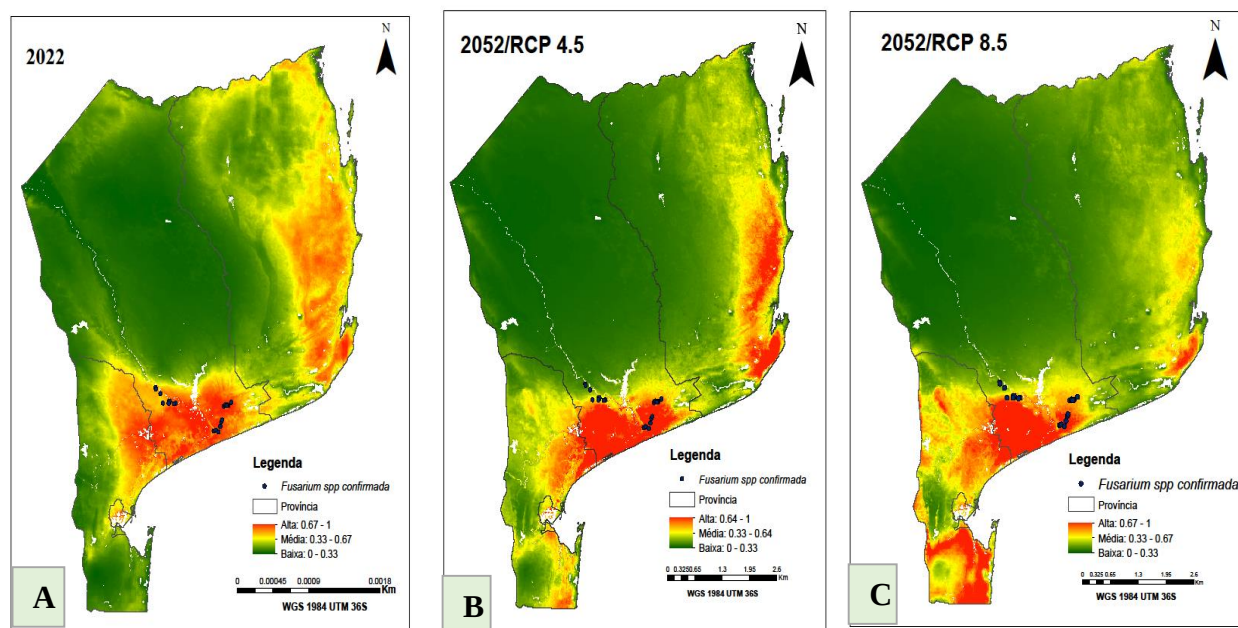


Figura 8: Áreas potencialmente propensas à ocorrência do fungo *Fusarium* spp. na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.

No contexto regional, verifica-se que a província de Maputo apresenta um aumento significativo das áreas favoráveis à ocorrência dos fungos (*Aspergillus* spp. e *Fusarium* spp.) e micotoxinas (Aflatoxinas e Fumonisinas) em todos distritos com potencial agrícola. Essa tendência verifica-se em áreas no interior da província, sugerindo que as áreas actualmente consideradas menos adequadas poderão tornar-se favoráveis à presença desses patógenos no futuro. Entretanto, nas províncias de Gaza e Inhambane, quando comparadas à província de Maputo, observa-se uma redução das áreas adequadas à ocorrência dos dois fungos e das micotoxinas, apresentando maior restrição da adequabilidade na faixa costeira, com predominância do clima tropical húmido (MICOA, s.d.).

Estes resultados mostram que as mudanças na temperatura, precipitação e concentração atmosférica de CO₂ podem levar a um futuro aumento ou redução inesperado do risco relativo de contaminações por fungos e micotoxinas de culturas no campo, dependendo do tipo de fungo e micotoxina considerado (Paterson *et al.*, 2010; Perrone *et al.*, 2020; IPCC, 2022). Facto, que pode ter um impacto na distribuição geográfica de cereais e outras culturas básicas, bem como dos fungos toxigénicos e suas micotoxinas (Paterson *et al.*, 2010; Penagos-Tabares *et al.*, 2025).

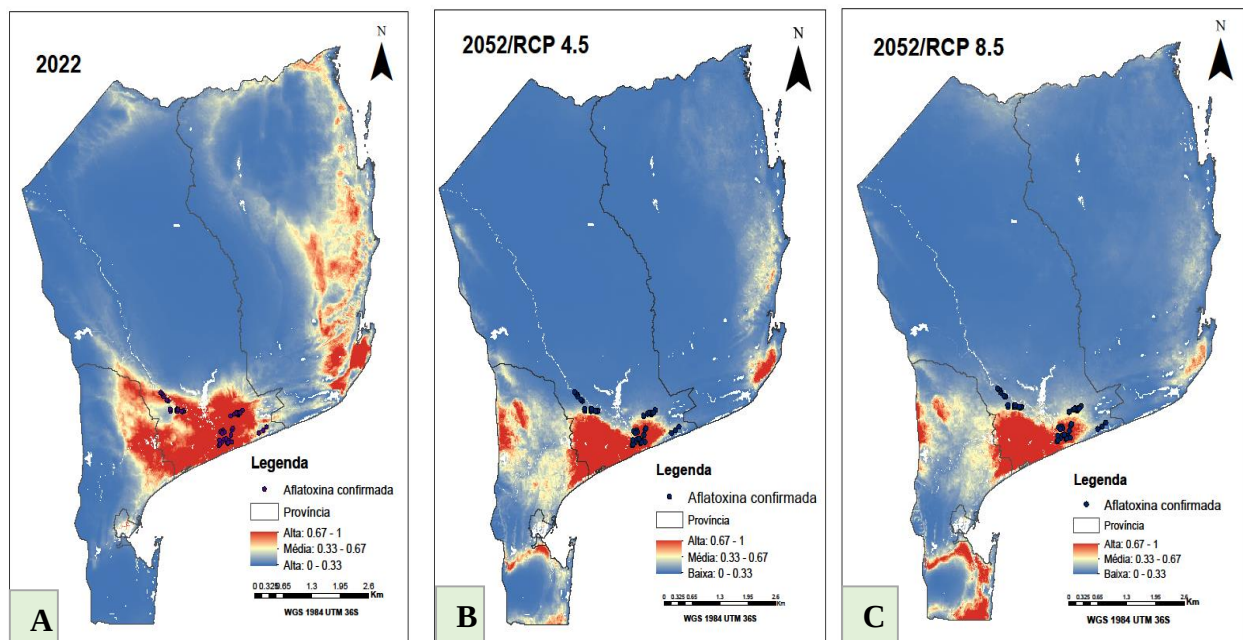


Figura 9: Áreas potencialmente propensas à ocorrência de Aflatoxinas na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.

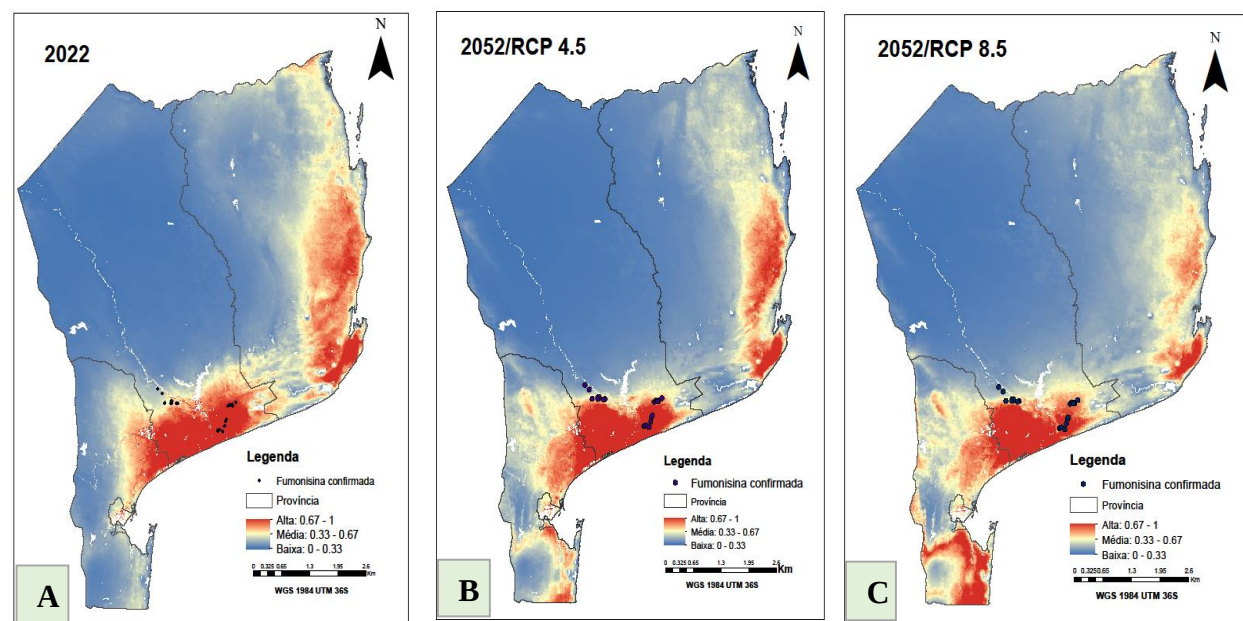


Figura 10: Áreas potencialmente propensas à ocorrência de Fumonissinas na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.

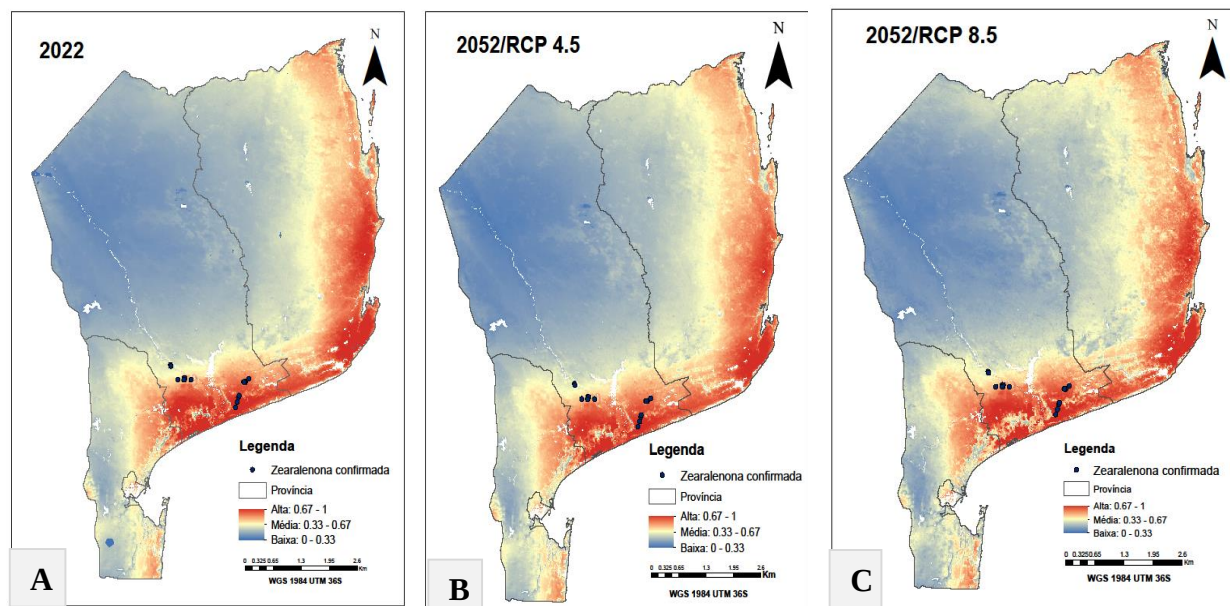


Figura 11: Áreas potencialmente propensas à ocorrência de Zearalenona na região sul de Moçambique no presente (A) e futuro (B e C), num contexto de mudanças climáticas.

Resultados similares ao presente estudo, também foram obtidos por Alkhalifah *et al.* (2022), no estudo sobre a biogeografia de *Aspergillus niger* utilizando o modelo MaxEnt. Estes autores constataram que, para os cenários dos RCPs (optimista e pessimista) para o ano de 2050 e 2070, mostraram grandes alterações na adequabilidade de habitat deste fungo em todo o globo, sendo que grande parte dos países do continente africano apresentaram aumento das áreas inadequadas, bem como uma redistribuição da ocorrência da espécie, conforme observado neste estudo para *Aspergillus flavus* e *Fusarium* spp. (Figuras 7 – 11). Vários autores, como Perrone *et al.* (2020), Akelo *et al.* (2021) e Alkhalifah *et al.* (2023), associam estes resultados à influência dos factores sazonais e agroecológicos na incidência e prevalência de fungos e seus produtos metabólicos.

Num estudo feito por Mshelia *et al.* (2020) sobre o efeito dos factores ambientais relacionados às mudanças climáticas no nível da contaminação por fungos toxigénicos e micotoxinas na cultura de milho, constataram que a variação da temperatura, actividade de água (a_w) e níveis de dióxido de carbono (CO_2), reduziram a taxa de crescimento e a produção de micotoxinas associadas a *Fusarium* spp., e foi observado que a ocorrência desses fungos e suas micotoxinas foram detectadas em uma faixa mais restrita em função dessas condições abióticas.

4.3.1. Análise da distribuição actual e futura dos fungos toxigénicos e micotoxinas na região sul de Moçambique

Os modelos ajustados através do *software* de modelação MaxEnt resultaram em curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*), obtidos através da média de 10 replicações realizadas (Anexo 7). Este parâmetro permitiu fazer a relação entre a sensibilidade e a especificidade, que podem ser traduzidos na capacidade do modelo em diagnosticar os verdadeiros positivos (presenças) e negativos (ausências), respectivamente (Trindade, 2019).

Na Tabela 7, são apresentados os resultados do parâmetro usado para validação dos modelos: A área abaixo da curva (AUC) da curva ROC. Nota-se que os modelos gerados mostraram um excelente desempenho, com valores de AUC variando de 0,859 a 0,962. De acordo com os graus de precisão preditiva proposto por Metz (1986), os modelos são considerados óptimos, desde que os mesmo apresentem uma área abaixo da curva (AUC) acima de 0.70, e quanto mais próximos de 1 estiverem são considerados excelentes. Os valores de AUC variam entre 0 a 1, sendo aceitável para publicação acima de 0.75 (Phillips *et al.*, 2006; Dalapicolla, 2016a). Os resultados obtidos neste estudo denotam uma elevada capacidade preditiva do modelo, pois todos os valores de AUC aproximam-se de 1, contrariamente a uma previsão totalmente aleatória, cujo o valor de AUC é de 0.5 (Trindade, 2019; Munguambe, 2023).

Tabela 7: Resultados dos testes de validação dos modelos.

	Área abaixo da curva (AUC)		
	Actual	2052 - RCP 4.5	2052 - RCP 8.5
<i>Aspergillus flavus</i>	0.949	0.947	0.954
<i>Fusarium spp.</i>	0.936	0.936	0.942
Aflatoxinas	0.962	0.957	0.958
Fumonisinhas	0.938	0.945	0.942
Zearalenona	0.884	0.859	0.889

V. CONCLUSÕES

- A precipitação média anual (Bio 12), temperatura média anual (Bio 1) e a amplitude térmica anual (Bio 7) foram as variáveis que mais contribuíram para a ocorrência e distribuição dos fungos toxigénicos e micotoxinas associadas.
- As áreas potencialmente propensas à ocorrência de fungos toxigénicos e micotoxinas na região Sul do país concentram-se, sobretudo, nos distritos localizados próximos à faixa costeira e nos cursos de águas (rios e lago), podendo atingir até 27,86%.
- As projecções indicaram uma redução das áreas propensas a ocorrência do *Aspergillus flavus*, *Fusarium* spp., Aflatoxinas e Fumonisinias; entretanto, observa-se um aumento das áreas propensas à ocorrência de Zearalenona para os próximos 30 anos (2052).

VI. RECOMENDAÇÕES

Com base nas conclusões deste estudo, recomenda-se:

- Melhorar os procedimentos de amostragem, de modo a assegurar maior representatividade espacial e temporal das áreas de produção das principais culturas susceptíveis à incidências dos fungos toxigênicos e micotoxinas. Essa melhoria permitirá que o modelo represente com maior precisão a ocorrência e distribuição dos fungos toxigênicos e suas micotoxinas associadas;
- Fortalecer o controle através da criação de programas regulares de monitoramento de fungos toxigênicos e micotoxinas nas zonas agrícolas com condições ambientais mais favoráveis à sua ocorrência;
- Promover boas práticas agrícolas como a rotação de culturas, o manejo pós-colheita adequado, armazenamento seguro, com vista a reduzir a incidência de fungos toxigênicos e micotoxinas em cenários de maior risco climático;
- Integrar os cenários de mudanças climáticas nos programas de extensão agrícola e nas políticas públicas, dando prioridade as regiões-chave que apresentam maior susceptibilidade à redistribuição de *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp. e micotoxinas associadas.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrios, G.N. (2005). Plant Pathology. 5ª ed. San Diego: Elsevier Academic Press.
- Akello, J., Ortega-Beltran, A., Katati, B., Atehnkeng, J., Augusto, J., Mwila, C. M., Mahuku, G., Chikoye, D., Bandyopadhyay, R. (2021). Prevalence of aflatoxin- and fumonisin producing fungi associated with cereal crops grown in Zimbabwe and their associated risks in a climate change scenario. *Foods* 10, 287. <https://doi.org/10.3390/foods10020287>.
- Alkhalifah, D. H. M., Damra, E., Khalaf, S. M. H., Hozzein, W. N. (2022). Biogeography of black mold *Aspergillus niger*: Global situation and future perspective under several climate change scenarios using MaxEnt modeling. *Diversity*, 14, 845. <https://doi.org/10.3390/d14100845>.
- Alkhalifah, D. H. M., Damra, E., Melhem, B. M., Hozzein, W. N. (2023). Fungus under a changing climate: modeling the current and future global distribution of *Fusarium oxysporum* using geographical information system data. *Microorganisms*, 11, 468. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020468>.
- Alvarenga, L. A. (2012). Precipitação no sudeste brasileiro e sua relação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Revista Agrogeoambiental*, v.4 n.2. Brasil.
- Augusto, J., Joseph, A., Akello, J., Cotty, P., Bandyopadhyay, R. (2014). Prevalence and Distribution of *Aspergillus* section Flavi in maize and groundnut fields and aflatoxin contamination in Mozambique. In *Proceedings of the 2014 APS-CPS Joint Meeting*. Minneapolis. USA.
- Bankole, S, Schollenberg, M., Drochner, W. (2006) Mycotoxins in food systems; in sub-Saharan Africa: A review. *Mycotoxin Research*, 22 (3); 163 - 169. <https://doi.org/10.1007/BF02959270>.
- Bergamin F. A, Kimati H., Amorim L., (1995) Manual de fitopatologia: princípios e conceitos. Ceres. Sao Paulo.
- Bila, J., Macuamule, C., Bombe, A., Ribeiro, M.I., Venâncio, A., Afonso, S., Rodrigues, P. (2025). Assessment of farmer's knowledge and attitudes towards fungi and mycotoxin contamination in staple crops in Southern Mozambique. *Frontiers Sustainable Food Systems*. 9, 1622532. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1622532>.

- Bila, J., Mustafa, I., Muthambe, A., Mondjana, A. (2022). Mycotoxigenic fungi and aflatoxins quantification in groundnuts (*Arachis hypogaea* L.) from Southern Mozambique. Green Rep. 3, 28–34. <https://doi.org/10.36686/Ariviyal.GR.2022.03.09.051>.
- Byeon, D. H., Jung, J. M., & Lee, H. S. (2018). Predicting the global habitat suitability of *Spodoptera frugiperda* using CLIMEX and MaxEnt. Journal of Asia-Pacific Entomology, 21(2), 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2018.03.004>.
- Cambaza, E., Koseki, S., & Kawamura, S. (2018). Aflatoxins in Mozambique: Impact and Potential for Intervention. Agriculture, 8 (7), 100. <https://doi.org/10.3390/agriculture8070100>.
- Casu, A., Leggieri, M. C., Toscano, P., Battilani, P. (2024). Changing climate, shifting mycotoxins: A comprehensive review of climate change impact on mycotoxin contamination. Comprehensive Review in Food Science and Food Safety. 23 (2), e13323. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13323>.
- Chamberlain, W. J., Voss, V. A., Norred, W. P. (1993) Analysis of commercial laboratory rat rations for fumonisin B, a mycotoxin produced on corn by *Fusarium moniliforme*. Contemporary Topics in Laboratory Animal Science. 33 (1), 26 – 28. https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/2632/437a20b5643bc964e2047fdbc341624a12ead66a.pdf?.
- Chiau, J. B. (2023). Avaliação do efeito da mudança da temperatura e precipitação no rendimento do feijão nhemba (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) usando o modelo APSIM. Trabalho de Licenciatura (Monografia). Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Comé, E. (2016). Influência da participação no mercado do milho no processo de adoção de tecnologias agrárias melhoradas no centro de Moçambique. Tese de Mestrado. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo, Moçambique.
- Cvak, B., Warth, B., Atehnkeng, J., Parich, A., Moritz, A., Sulyok, M., Krska, R. (2021). Evaluating the performance of lateral flow devices for total aflatoxins with special emphasis on their robustness under Sub-Saharan conditions. Toxins 13, 742. <https://doi.org/10.3390/toxins13110742>.
- Dalapiccola, J. (2016a). Tutorial de modelos de distribuição de espécie: guia teórico. Laboratório de Mastozoologia e Biogeografia. Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <http://blog.ufes.br/lamab/tutoriais>. (Acessado a 15 de Setembro de 2024).

- Dalapicolla, J. (2016b). Tutorial de modelos de distribuição de espécies: guia prático usando o MaxEnt e o ArcGIS 10. Laboratório de Mastozoologia e Biogeografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Disponível em: <http://blog.ufes.br/lamab/tutoriais>. (Acessado a 15 de Setembro de 2024).
- Davis, C. L. (2011). *Climate Risk and Vulnerability: A Handbook for South Africa*. 1^a ed. Council for Scientific and industrial Research. ISBN: 978-0-620-50627-4. Pretoria, South Africa. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236144201_Climate_risk_and_vulnerability_A_ha_n_dbook_for_Southern_Africa. (Acessado a 17 de Novembro de 2025).
- Dias, T. V., Matusse, C., Carvalho, S., Silva, B., Soares, C., Lucamba, Z., Afonso, S., Macuamule, C., Venâncio, A., Rodrigues, P. (2023). Isolation of filamentous fungi from different food matrices from Angola and Mozambique. Livro de Resumos do *41st ECCO meeting*, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: <http://mycotox-palop.esa.ipb.pt/eventos/> (Acessado a 17 de Novembro de 2025).
- Donato, S. L. R., Arantes, A. de M., Coelho, E. F., Rodrigue, M. G. V. (2015). Considerações ecofisiológicas e estratégias de manejo da bananeira (Ecophysiological considerations and banana management strategies). Instituto Federal Baiano - Campus Guanambi, Brasil, 2p.
- Duarte, S. C., Lino, C. M., Pena, A. (2010). Mycotoxin food and feed regulation and the specific case of ochratoxin A: a review of the worldwide status. *Food Additives & Contaminants: Part A – Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 27(10), 1440-1450. <https://doi.org/10.1080/19440049.2010.497166>.
- Duarte, S., Lino, C., Pena, A. (2014). Mycotoxins and their implications in food safety. *Future Science*. ISBN 978-1-909453-22-7. Disponível em: https://www.academia.edu/104659176/Mycotoxins_and_their_Implications_in_Food_Safety_#title. (Acessado a 17 de Novembro de 2025).
- Dudík, M., Phillips, S.J. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P, Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A, Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J.,

- Richardson, K. S., ScachettiPereira, R., Schapire, R., Soberon, E J., Williams, S., Wisz, M. S., Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>.
- Elith, J., Kearney, M., Phillips, S. (2010). The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4), 330-342. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x>.
 - Escrivá, L., Font, G., Manyes, L., Berrada, H. (2017). Studies on the Presence of Mycotoxins in Biological Samples: An Overview. *Toxins*, 9, 251. <https://doi.org/10.3390/toxins9080251>.
 - Eskola M., Kos G., Elliott C. T., Hajšlová J., Mayar S., Krska R. (2019). Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25%. *Critical Review in Food Science and Nutrition*. Vol. 60, 2773 – 2789. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>.
 - FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1995). Worldwide regulations for mycotoxins 1995. A compendium. Disponível em: <https://iifir.org/en/fridoc/worldwide-regulations-for-mycotoxins-1995-a-compendium-2143?> (Acessado a 05 de Abril de 2025).
 - FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2012). Adaptation to Climate Change in Semi-Arid Environments. Experiences and Lessons from Mozambique. ISSN 1684-8241. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2581e>. (Acessado a 05 de Abril de 2025).
 - FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Gender and Climate Change Research in Agriculture and Food Security for Rural Development. Disponível em: <https://www.fao.org/4/md280e/md280e.pdf>. (Acessado a 05 de Abril de 2025).
 - FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). Manual on the application of the HACCP system in mycotoxin prevention and control. Disponível em: www.fao.org/3/a-y1390e.pdf. (Acessado a 05 de Abril de 2025).
 - FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). Crops and livestock products. FAOSTAT. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. (Acessado a 2 de abril de 2025).
 - Fontenele, S. S., Elena, E. J. D., Lassen, F. L. S., Maciel, F. N., Souza, E. S., Cavalcante, M. M. A. (2014). Cheia no Rio Madeira: diagnóstico das áreas críticas na cidade de Porto Velho

- RO. Revista Geonorte. 10 (1), 256-261. (ISSN 2237-1419). Disponível em: <http://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1690>. (Acessado a 05 de Março de 2025).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, World Food Programme. (2014). The state of food insecurity in the world 2014: Strengthening the enabling environment for food security and nutrition [Report]. FAO. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ad888f5b-a590-43d9-b066-9a852b95777e/content>. (Acessado em 14 de junho de 2025).
- Freire, R. M. M, Narain, N., Miguel, A. M. R. de O., Santos, R. C. dos. (2005). Aspectos nutricionais de amendoim e seus derivados. In: Santos, R.C. dos (Editor Técnico). O Agronegócio do Amendoim no Brasil. Campina Grande: Embrapa Algodão, p. 389-420. [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?vazio&busca=\(autoria:%22SANTOS](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?vazio&busca=(autoria:%22SANTOS).
- Guermech, S., Somma, S., Masiello, M., Haidukowski, M., Sanzani, S. M., Ippolito, A., Moretti, A., Gargouri, S. (2025). Geographical distribution of *Fusarium* species involved in *Fusarium* head blight and *Fusarium* crown rot of wheat in Tunisia and their mycotoxin accumulation. Plant Pathology. 74, 1290–1301. <https://doi.org/10.1111/ppa.14092>.
- Guisan, A., Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology letters, 8 (9), 993-1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>.
- Guisan, A., Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling. 135, 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9).
- Haschek, W. M., Voss, K. A. (2013). Mycotoxins: In Haschek and Rousseaux's Handbook of Toxicologic Pathology (Third Edition). [S.l.]: Elsevier. 2, 118–1258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415759-0.00039-X>.
- Hollinger, K., Ekperigin, H. E. (1999). Mycotoxin in food producing animals. In Veterinary Clinics of North America: Food Animals Practice. Elsevier. 15, 133–165. [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)30211-5](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)30211-5).
- Iamanaka, B.T., Taniwaki, M. H., Oliveira, I. S. (2010). Micotoxinas em alimentos. Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica. 7, 138-161. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/245516262/Micotoxinas-Em-Alimentos>. (Acessado a 20 de Novembro de 2025).

- Instituto Nacional de Estatística (2023). Estatísticas dos Distritos 2017–2021. Instituto Nacional de Estatística de Moçambique. Disponível em: <https://www.ine.gov.mz>. (Acessado a 28 de Setembro de 2024).
- Instituto Nacional de Estatística (2003). Censo Agro-Pecuário (CAP) - 1999-2000. Resultados temáticos. INE. Disponível em: <https://www.ine.gov.mz>. (Acessado a 12 de Agosto de 2025).
- IPAD (2022). *Relatório Anual 2022*. Moçambique. Maputo. Disponível em: <https://www.agricultura.gov.mz/instituicional/ministerio/arquivo/relatorios/>. (Acessado a 24 de Abril de 2025).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (R.K. Pachauri and L.A. Meyer, Eds.). Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. (Acessado a 28 de Agosto de 2024).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryVolume.pdf. (Acessado a 01 de Outubro de 2025).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). The Science of Climate Change; contribution of Working Group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Working Group, I Report. Disponível em: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf. (Acessado a 12 de Julho de 2024).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Working Group, I Report. Disponível em: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf. (Acessado a 28 de Agosto de 2024).

- IRRI - International Rice Research Institute. (2019). Transforming rice breeding: Re-designing the irrigated breeding pipeline at the international rice research institute (IRRI). Crop Breeding, Genetics and Genomics. 1, 190008. <https://doi.org/10.20900/cbgg20190008>.
- Jay, J.M. (2015). Microbiologia de Alimentos. 6. ed – Porto Alegre: Artmed,. p.633-640.
- Joint F., World Health Organization, WHO Expert Committee on Food Additives (2017) Evaluation of certain contaminants in food: eighty-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health Organization. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241210027>. (Acessado a 17 de Novembro de 2025).
- Khosravi, A. R., Shokri, H., Ziglari, T., Naeini, A. R., Aliabadi, M. A. (2007). Mycoflora of maize harvested from Iran and imported maize. Pakistan Journal of Biological Sciences, 10 (24), 4432–4437. <https://doi.org/10.22059/ijvm.2008.27374>.
- Laquine, A. (2024). Estado de Ameaça e Distribuição Potencial da “Icuria dunensis” no Centro de Endemismo de Rovuma, Moçambique. Tese de Licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Leslie, J. F., Summerell B. A. (2006). The Fusarium Laboratory Manual. Blackwell Publishing. ISBN:9780470278376. <https://doi.org/10.1002/9780470278376>.
- Lopes, L. S. (2019). Avaliação Quantitativa de riscos de Fumonisina em Milho Produzido em Diferentes Regiões do Brasil: Influência das Condições Climáticas. Dissertação. Campinas, SP. Universidade de Campinas.
- MADER (2020). Inquérito Agrário Integrado 2020 | Marco Estatístico; Ministério de Agricultura e Desenvolvimento Rural. Maputo, Moçambique.
- MADER (2021). Relatório de Fitossanidade e Sanidade Animal – Campanha Agrária 20|21 ; Ministério de Agricultura e Desenvolvimento Rural. Maputo, Moçambique.
- Magan, N., Hope, R., Cairns, V., Aldred, D. (2003). Post-harvest fungal ecology: Impact of fungal growth and mycotoxin accumulation in stored grain. European Journal of Plant Pathology 109: 723–730. <https://doi.org/10.1023/A:1026082425177>.
- Mallmann, C.A., Dilkin P., Giacomini, L. Z., Rauber, R. H.; Pereira C.E. (2007). Micotoxinas e Ingredientes para Alimento Balanceado de Aves. In: XX Congresso Latinoamericano de Avicultura.; p. 191 – 204.

- Matusse, C., Bila, J., Macuamule, C., Sampaio, A., Venancio, A., Rodrigues, P. (2025). Evaluation of corn drying and storage techniques to mitigate damage and total aflatoxin contamination in Mozambique. *Journal of Stored Products Research*, 105, 102794. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102794>.
- Matusse, C., Lucamba, Z., Bila, J., Macuamule, C., Sampaio, A., Afonso, S., Venancio, A., Rodrigues, P. (2024). Aflatoxin contamination of various staple foods from Angola and Mozambique. *Toxins*, 16 (12), 516. <https://doi.org/10.3390/toxins16120516>.
- Maxwell, L. A. (2020). Environmental Degradation of Aflatoxins and Genetic Diversity of *Aspergillus* Section *Flavi* with a Focus on Mozambique. Tese de doutoramento. Universidade de Arizona. <http://hdl.handle.net/10150/642198>. (Acessado a 19 de Março de 2025)
- Metz, C. E. (1986). ROC methodology in radiologic imaging. *Investigative Radiology*. 21, 720-733. <https://doi.org/10.1097/00004424-198609000-00009>.
- Michereff, S. J. (2001). Fundamentos de Fitopatologia (Apostila/Manual Académico). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento De Agronomia, Área De Fitossanidade, 150p.
- MICOA (2012a). Perfil ambiental e mapeamento do uso actual da terra nos distritos da zona costeira de Moçambique: Distrito de Chókwé, Província de Gaza (versão preliminar). Projecto de Avaliação Ambiental Estratégica da Zona Costeira – Moçambique. Disponível em: <https://biblioteca.biofund.org.mz>. (Acessado a 03 de Julho de 2024).
- MICOA (2012b). Perfil ambiental e mapeamento do uso actual da terra nos distritos da zona costeira de Moçambique: Distrito de Mandlakazi, Província de Gaza (versão preliminar). Projecto de Avaliação Ambiental Estratégica da Zona Costeira – Moçambique. Disponível em: <https://biblioteca.biofund.org.mz>. (Acessado a 03 de Julho de 2024).
- MICOA (2012c). Perfil ambiental e mapeamento do uso actual da terra nos distritos da zona costeira de Moçambique: Distrito de Xai-Xai, Província de Gaza (versão preliminar). Projecto de Avaliação Ambiental Estratégica da Zona Costeira – Moçambique. Disponível em: <https://biblioteca.biofund.org.mz>. (Acessado a 03 de Julho de 2024).
- MICOA (S.d.). Plano de acção nacional de combate a seca e a desertificação. Moçambique. Disponível em: <https://biblioteca.biofund.org.mz>. (Acessado a 03 de Julho de 2024).
- Ministério da Administração Estatal (2005). Perfil do distrito de Chówè. MAE. Maputo. Disponível em: www.portaldogoverno.gov.mz. (Acessado a 03 de Julho de 2024).

- Mistura, M. (2019). Avaliação da incidência de Aflatoxinas, Fumonisina e Zearalenona em milho produzido entre 2016 e 2018 nos estados de Paraná, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Toledo, Centro de Engenharia e Ciências Exatas.
- Mshelia, L. P., Selamat, J., Samsudin, N. I. P., Rafii, M. Y., Mutalib, N. A. A., Nordin, N., Berthiller, F. (2020). Effect of temperature, water activity and carbon dioxide on fungal growth and mycotoxin production of acclimatised isolates of *Fusarium verticillioides* and *F. graminearum*. *Toxins*. 12, 478. <https://doi.org/10.3390/toxins12080478>.
- Mungumbe, F. F. (2023). Distribuição de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC e seu impacto no distrito de Chókwè. Tese de mestrado. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Mussalama, E. A. (2023). Avaliação dos hábitos alimentares das populações nas províncias de Inhambane e Gaza - sul de Moçambique: Contribuição para a avaliação de risco de exposição às Micotoxinas. Trabalho de Licenciatura (Monografia). Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Oliveira, M. S., Rocha, A., Sulyok, M., Krska, R., Mallmann, C. A. (2016). Natural mycotoxin contamination of maize (*Zea mays* L.) in the South region of Brazil. Elsevier. *Food Control* 73 (2017) 127 - 132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.033>.
- Owusu, A., Bila, J. (2023). Risk assessment of mycotoxigenic fungi and aflatoxins B1 in cashew nut processed in Maputo, Mozambique. *Green Rep.* 4, 5 – 12. <http://doi.org/10.36686/Ariviyal.GR.2023.04.10.053>.
- Parruque, M. J. M., Nhamuchue, N., Abubacar, R., Mongo, E., Magaia, T., Silva, J., Rodrigues, L., & Cambaza, E. (2025). Análise da contaminação por fungos potencialmente aflatoxigénicos em cadeias produtivas na província de Maputo, Moçambique. Livro de Resumos da XIII Conferência Científica da UEM. Disponível em: <https://www.cecoma.uem.mz/conferencias/index.php/XIIIUEM2025/XIIICCUEM2025/paper/view/2922>. (Acessado a 17 de Novembro de 2025).
- Paterson, R. R. M, Lima, N. (2010). How will climate change affect mycotoxins in food? *Food Res. Int.*, 43, 1902–1914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.010>.
- Pedro, I. A. V. (2021) Ocratoxina A em Arroz: Ocorrência e Avaliação da Exposição da população Portuguesa. Dissertação de Mestrado. Universidade do Coimbra. Coimbra.

- Penagos-Tabares, F., Todorov, A., Raj, J., Farkaš, H., Grubješić, G., Jakovčević, Z., Cujic, S., Nedeljković-Trailović, J., Vasiljević, M. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination in Serbian Maize During 2021–2023: Climatic Influences and Implications for Food and Feed Safety. *Toxins* 2025, 17, 227. <https://doi.org/10.3390/toxins17050227>.
- Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M. (2020). Toxigenic fungi and mycotoxins in a Climate Change Scenario: Ecology, Genomics, Distribution, Prediction and Prevention of the Risk. *Microorganisms* 8, 1496. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Pitt, J. I. (1984). The significance of potentially toxigenic fungi in food. *Food Technology in Australia*. 36:218–219. https://doi.org/10.1007/0-387-28391-9_1.
- Record, S., M. C. Fitzpatrick, A. O. Finley, S. Veloz e A. M. Ellison (2013). Should species distribution models account for spatial autocorrelation? A test of model projections across eight millennia of climate change. *Global Ecology and Biogeography*. 22, 760–771. <https://doi.org/10.1111/geb.12017>.
- Reges, J. T. A., Jesus, M. N., Silva, S. D. R., Souza, M.H., Santos, I.J., Santos, S.M., Rodrigues, J. W. (2016). Occurrence of fungi and mycotoxins in corn grains in Jataí – GO, Brazil. *Rev. Colomb Investig Agroindustriales*. <http://dx.doi.org/10.23850/24220582.342>.
- Rodriguez-Amaral, D. B, Sabino, M. (2002). Mycotoxin Research in Brazil: The Last Decade in Review. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. Brasil. *Brazilian Journal of Microbiology*. 33, 1-11. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822002000100001>.
- Rupollo, G., Gutkoski, L. C., Martini, L. J., Elias, M.C. (2004). Hermetic and conventional storage systems in oat grains conservation. *Ciencia Rural*, 34 (6). ISSN 0103-8478. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000600008>.
- Santos, G., Naeher, K., Encarnacao, P. (2013). Prevalencia de micotoxinas en los ingredientes de alimentos acuícolas. *Aquafood Internacional*. Disponível em: <http://aquafeed.co/prevalencia-de-micotoxinas-en-los-ingredientes-de-alimentos-acuicolas>. (Acessado a 14 de Abril de 2025).

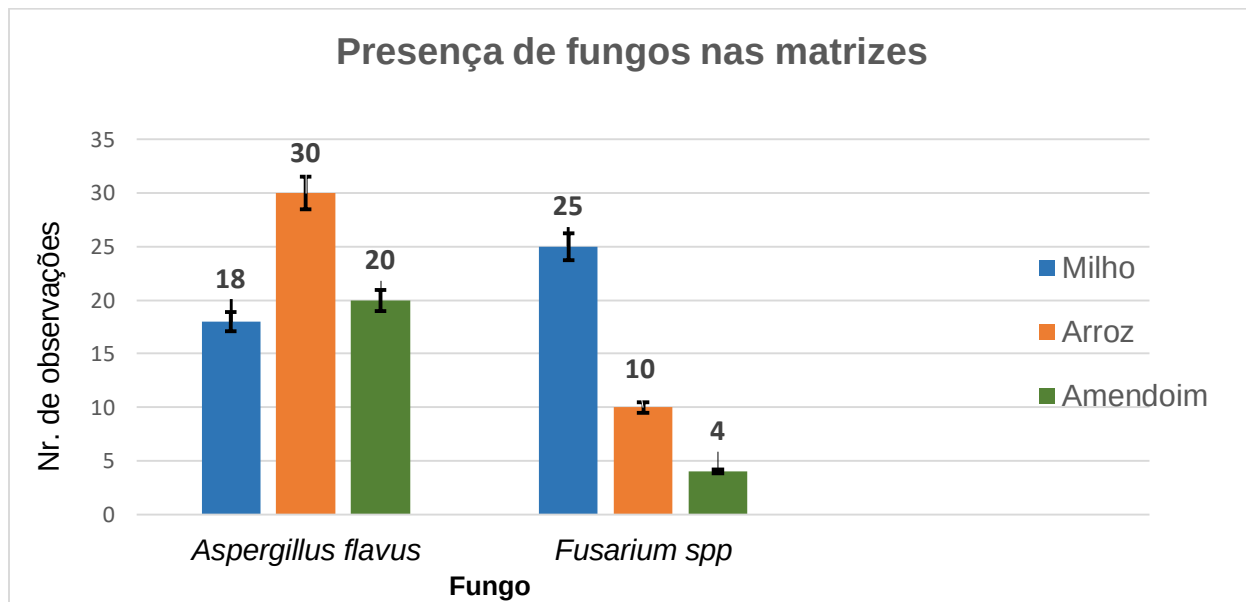
- Scussel, V. M., Beber-Rodrigues, M (2013). Mycoflora and Mycotoxicological Quality of Four Freshly Harvested Paddy Rice Cultivars and Relation with Harvest to Industry Reception Timing. *Rice Science*. 20, 303-308. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(13\)60151-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(13)60151-1).
- Scussel, V.M. (2002). Fungos em grãos armazenados. In: Lorini, I.; Mike, L.H.; Scussel, V.M. (ed). *Armazenagem de grãos*. Campinas: IBG, p.675-804.
- Silliker, J. H., Elliot, R. P., Baird-Packer, A. C., Bryan, F. L., Christian, J. H. B., Clark, D. S., Olson, J. C., Roberts, T. A. Jr. (1985). Cereales y sus productos derivados (Cap. 23, Vol. II, p. 278). In *Ecología microbiana de los alimentos* (Ed. Acribia S.A.). Zaragoza, España.
- Sineque, C. I. I. M., Bachir, A., Muchanga, A., Nhamahango, J., Saveca, J., Pondja, A., Pedro, O., Cecchi, G., Dos Anjos, F., Macuamule, C., Di Piazza, S. (2025). Assessment of fungal contamination in corn and peanuts marketed in southern Mozambique. *Livro de Resumos da XIII Conferência Científica da UEM*. Disponível em: <https://www.cecoma.uem.mz/conferencias/index.php/XIIIUEM2025/XIIICCUEM2025/paper/view/2942>. (Acessado a 19 de Novembro de 2025).
- Southworth, J. A., Randolph, J. C., Habeck, M., Doering, O. C., Pfeifer., R. A., Rao, D. G., Johnston, J. J. (2000). Consequences of Future Climate Change and Changing Climate Variability on Maize Yields in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 82, 139 – 158. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00223-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00223-1).
- Taniwaki, M. H., Silva, N. D. A. (2001). Fungos em alimentos: ocorrência e detecção. Campinas, Núcleo de Microbiologia / ITAL, 82p.
- Tirando, M. C., Clarke, R., Jaykus, L. A., McQuatters-Gollop, A., Frank, J. M. (2010). Climate change and food safety: A review. *Food Research International*. 43, 1745 – 1765. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.07.003>.
- Tolentino, A. S., Toco, E., Matusse, C., Santos, J., Venâncio, A., Bila, J., Macuamule, C., Rodrigues, P. (2025). Toxigenic fungi from Mozambique maize, peanuts and rice: What is the associated risk? *Livro de Resumos da International Commission on Penicillium and Aspergillus Workshop 2025, International Commission on Food Mycology*, Utrecht, Países Baixos. Disponível em: <http://mycotox-palop.esa.ipb.pt/eventos/>. (Acessado a 17 de Novembro de 2025).

- Trindade, W. C. F. (2019). Modelagem de distribuição das formações vegetais do estado do paraná: passado, presente e futuro, Dissertacao de Mestrado. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Brasil.
- USAID. (2021). Avalia o da rela o entre a exposi o   aflatoxina e a desnutri o cr nica em crianças de 6 a 59 meses em 10 distritos na província de Nampula, Moçambique. Relatório do estudo submetido   USAID Moçambique. Tufts University, Universidade L rio, ANSA, Instituto Nacional de Saúde, Hospital Central de Nampula, Instituto Nacional de Estatística. Moçambique.
- Valmorbida, R. (2016). Fungos e Micotoxinas em Grãos de Milho (*Zea mays L.*) e seus Derivados Produzidos no Estado de Rondônia, Regiao Norte do Brasil. Disserta o (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Agrárias. 151 p.
- Viagem, S. J. (2008). Impacto das Mudanças Climáticas Globais sobre a Agricultura na Bacia do Limpopo. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Maputo. Universidade Eduardo Mondlane.
- Viagem, S. J. (2013). Simula o do Impacto das Mudanças Climáticas sobre a Agricultura Irrigada da Região de Sussundenga – Moçambique. Disserta o de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre.
- Vilela, E. R., Juste, E. S. G. J. (1987): Tecnologia da farinha de mandioca. Informe Agropecuário. 145 (13), 60-62. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000400021>.
- Wagacha, J. M., Muthomi, J. W. (2008). Mycotoxin problem in Africa: Current status, implications to food safety and health and possible management strategies. International Journal of Food Microbiology. 124 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.01.008>.
- Warren, D. L., Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological Applications, 21 (2), 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>.
- Wu, F. (2004). Mycotoxin risk assessment for the purpose of setting international regulatory standards. Environmental Science & Technology. 38 (15), 4049-4055. <https://doi.org/10.1021/es035353n>.
- Wu, F. (2015). Global impacts of aflatoxin in maize: trade and human health. World Mycotoxin Journal. 8 (2), 137-42. <https://doi.org/10.3920/WMJ2014.1737>.

- Wutke, E. B. Arruda, F. B., Fancelli, A. L., Pereira, J. C. V. N. A., Sakai, E., Fujiwara, M., Ambrosano, G. M. B. (2000). Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa. 24 (3), 621-633. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1802/180218342015.pdf>? (Acessado a 13 de Agosto de 2025)
- Ximba, S. P. F., Tshabalala, J., Gubba, A., Jooste, A. E. C. (2022). Monitoring the distribution of banana bunchy top virus in South Africa: A country-wide survey. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129, 725–736. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00588-44o>.
- Zorzete, P. (2010). Fungos, micotoxinas e fitoalexina em variedades de amendoim do plantio ao armazenamento. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Instituto de Ciências Biomédicas. São Paulo.
- Zucula, C. V. (2011). Avaliação in vitro da actividade antifúngica de extractos de plantas *Kigelia Africana*, *Combretum Molle* e *Trichilia Emetica* para o controlo de fitopatógenos. Trabalho de Licenciatura (Monografia). Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.

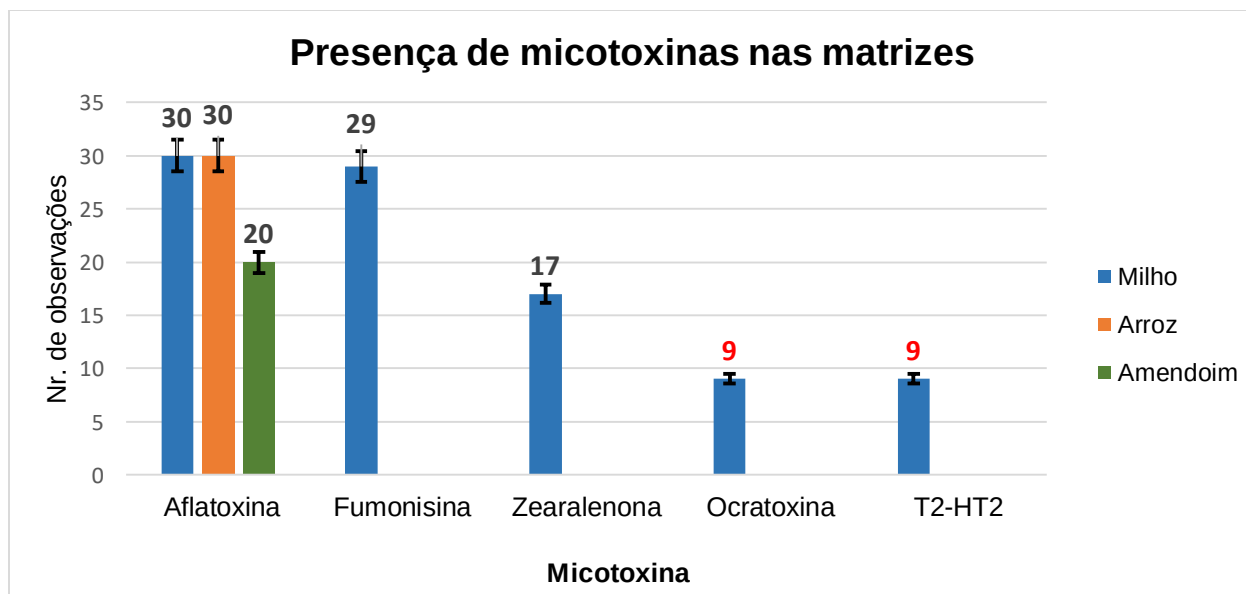
ANEXOS

Anexo 1: Identificação dos fungos toxigénicos presentes nas diferentes amostras das culturas testadas na província de Gaza



Fonte: Dias *et al.*, 2023; Tolentino *et al.*, 2025.

Anexo 2: Identificação das micotoxinas presentes nas culturas na província de Gaza



Fonte: Matusse *et al.*, 2024.

Anexo 3: Ficha de levantamento das coordenadas geográficas (Reconstituição)



FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL

DEPARTAMENTO DE PROTECÇÃO VEGETAL

Ficha de levantamento das coordenadas geográficas

Província:_____ Distrito:_____ Tipo de área: _____

Nome do observador:_____ Cultura:_____

Data ____/____/____ Topografia: _____ Tipo de Solo *:_____

Observações:_____

Nr do ponto	Latitude	Longitude	Altitude	Posto administrativo	Localidade
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Tipo de área:

1. Campo agrícola;
2. Residencial;
3. Mercado local;
4. Outro (descrever).

Topografia:

1. Plana;
2. Ondulada;
3. Montanhosa;
4. Outro (descrever).

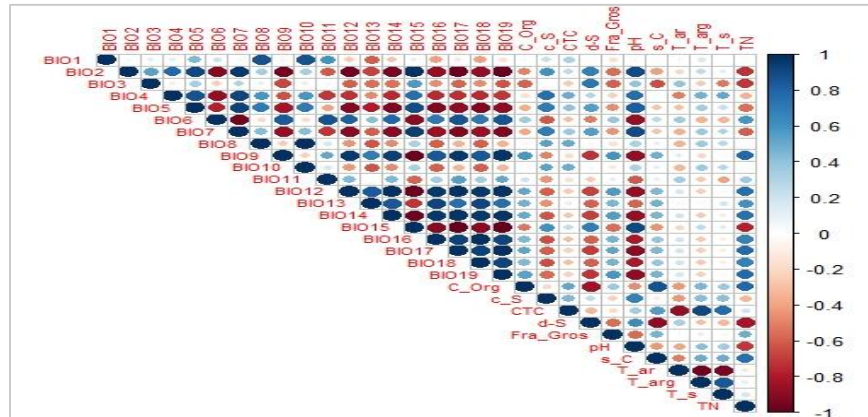
Solo:

1. Arenoso;
2. Argiloso;
3. Limoso;
4. Outro (descrever).

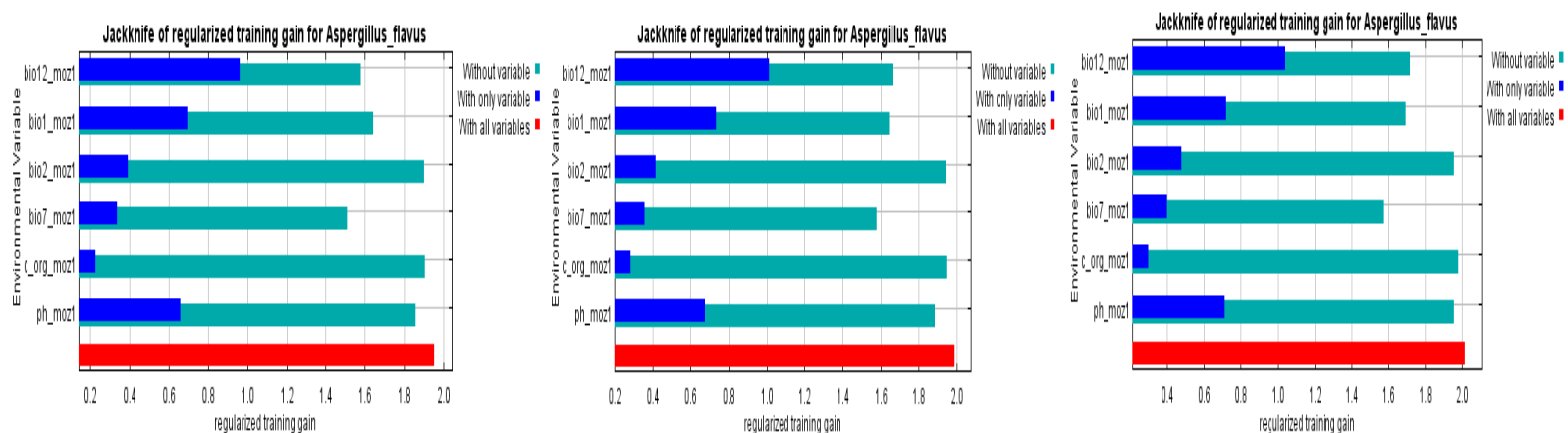
Anexo 4: Levantamento das coordenadas geográficas dos pontos de amostragem.

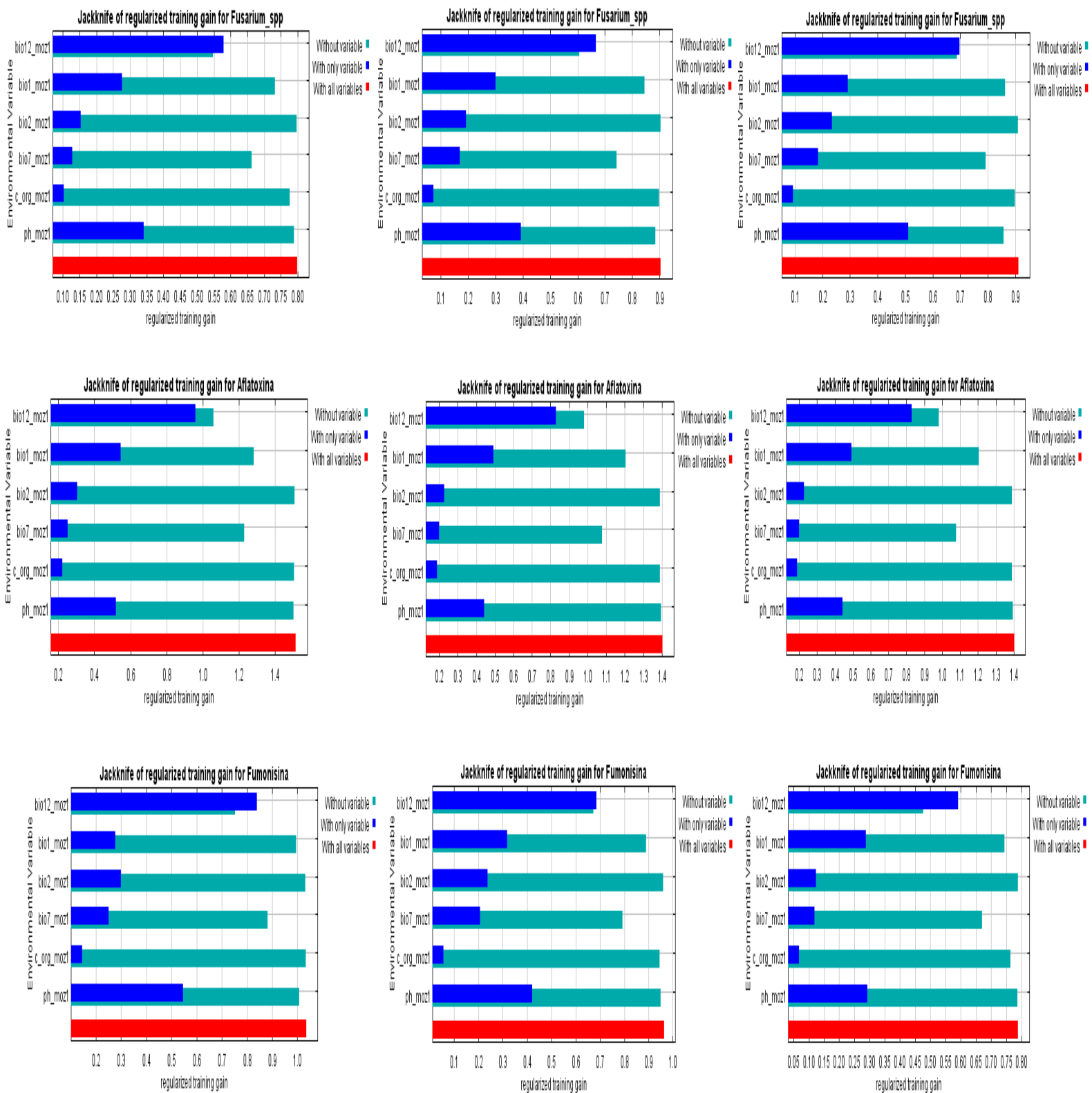


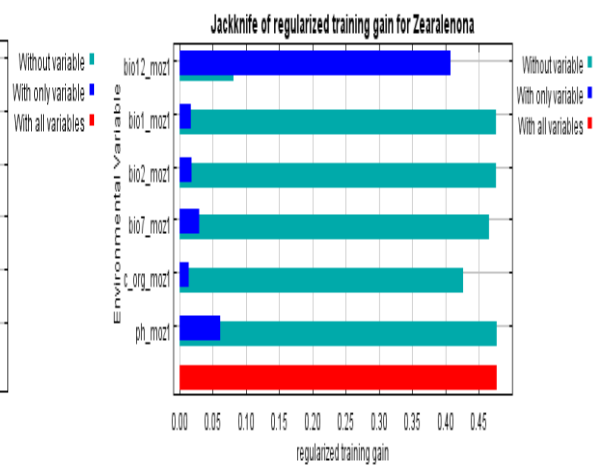
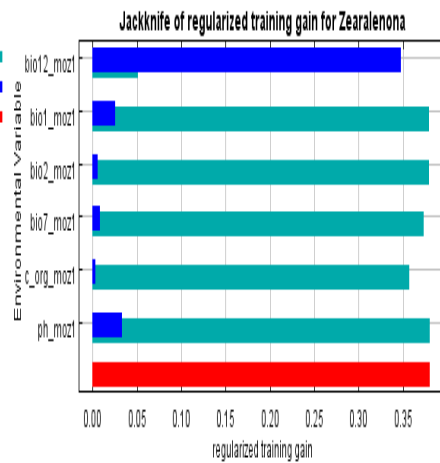
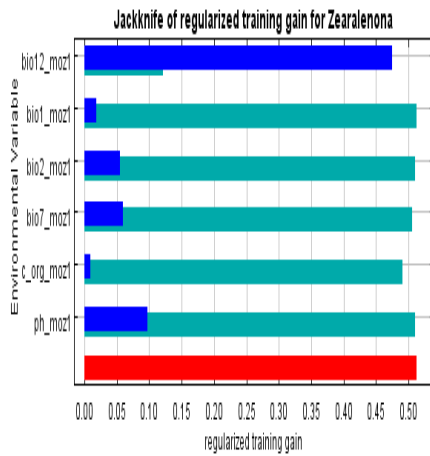
Anexo 5: Representação gráfica da matriz de correlação de Pearson no programa RStudio.



Anexo 6: Gráficos da avaliação da contribuição da variáveis ambientais na modelagem com base no teste de Jeckknife (Primeiro – Actual; Segundo – RCP 4.5 e Terceiro – 8.5).







Anexo 7: Área sob a curva ROC (Receiver operating characteristic). (Primeiro – Actual; Segundo – RCP 4.5 e Terceiro – 8.5).

