



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia de Alimentos

LETÍCIA DOS SANTOS LOPES

**AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCOS DE FUMONISINA EM MILHO  
PRODUZIDO EM DIFERENTES REGIÕES DO BRASIL: INFLUÊNCIA DAS  
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

CAMPINAS

2019

LETÍCIA DOS SANTOS LOPES

Avaliação Quantitativa de Riscos de Fumonisina em Milho Produzido em Diferentes Regiões  
do Brasil: Influência das Condições Climáticas

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Alimentos da Universidade  
Estadual de Campinas como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título de  
Mestra em CIÊNCIA DE ALIMENTOS.

Orientador: Prof. Dr. Anderson de Souza Sant'Ana

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA  
ALUNA LETÍCIA DOS SANTOS LOPES E  
ORIENTADA PELO PROF. DR. ANDERSON DE  
SOUZA SANT'ANA.

CAMPINAS

2019

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1642-8186>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Engenharia de Alimentos  
Claudia Aparecida Romano - CRB 8/5816

L881a Lopes, Letícia dos Santos, 1978-  
Avaliação quantitativa de riscos de fumonisina em milho produzido em diferentes regiões do Brasil : influência das condições climáticas / Letícia dos Santos Lopes. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Anderson de Souza Sant'Ana.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Micotoxinas. 2. Segurança alimentar. 3. Probabilidade. 4. Risco. 5. Clima. I. Sant'Ana, Anderson de Souza. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Quantitative evaluation of fumonisin risk in corn produced in different regions of Brazil : influence of climate conditions

**Palavras-chave em inglês:**

Mycotoxins

Food security

Probability

Risk

Climate

**Área de concentração:** Ciência de Alimentos

**Titulação:** Mestra em Ciência de Alimentos

**Banca examinadora:**

Anderson de Souza Sant'Ana [Orientador]

Marina Venturini Copetti

Maria Antonia Calori Domingues

**Data de defesa:** 25-02-2019

**Programa de Pós-Graduação:** Ciência de Alimentos

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Anderson de Souza Sant'Ana  
(FEA/UNICAMP - Orientador)

---

Profa. Dra. Marina Venturini Copetti  
(Universidade Federal de Santa Maria - Titular)

---

Profa. Dra. Maria Antonia Calori Domingues  
(ESALQ/USP - Titular)

A ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Por todo esforço que eu fiz para conseguir concluir, dedico esse trabalho ao meu amado pai que, com certeza, está sempre ao meu lado torcendo e vibrando com as minhas conquistas e me amparando nas dificuldades, de onde ele estiver.

## AGRADECIMENTOS

Aos bons espíritos daqui e de lá que estiveram me auxiliando, especialmente nos últimos anos, em que vivi o momento mais difícil da minha vida.

Ao meu sobrinho, afilhado e amado Lucas que, apesar de tão pequenino em tamanho, me deu uma força tão grande com seu jeito alegre e risadas gostosas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson S. Sant'Ana, pelos ensinamentos e auxílio que muito precisei, mas principalmente pela paciência e compreensão.

À Fernanda Ávila, amiga muito especial, que mesmo com quase nenhuma convivência e nos conhecendo há pouco tempo, foi extremamente importante por sua sabedoria, serenidade e palavras de força e apoio.

Aos colegas do LMQA, em especial àqueles que “incomodei” um pouco mais e me deram preciosa ajuda, Mari, Syllas, Luisa, Fernanda e Ana.

À Verônica, que me deu uma baita ajuda e fez esse trabalho acontecer. Muitíssimo obrigada!

Ao meu amor, Allan, por ter chegado trazendo um pouco de cor à vida que estava tão cinza. Obrigada pela paciência nos dias mais turbulentos, pelo apoio e incentivo e por me fazer acreditar que eu era capaz.

À “vó” Durva, pelo seu bom humor, me proporcionando momentos de descontração.

À minha sogra, Maria Cecília, e ao Braz, por terem me acolhido com tanto carinho.

Ao Departamento de Ciência de Alimentos (Faculdade de Engenharia de Alimentos) da Unicamp. Tenho um imenso orgulho de fazer parte dessa universidade.

À Andrea Ferrari, da secretaria de Pós-Graduação do DCA, pela solicitude e presteza em me atender à distância.

À minha psicóloga, Cristina, pelo auxílio durante esse período tão dolorido.

Ao SAPPE (Serviço de Assistência Psicológica e Psiquiatra ao Estudante) da Unicamp por me proporcionar tratamento gratuito e de qualidade com a psiquiatra Dra. Tânia M. V. de Mello.

À Embrapa, pela oportunidade de aprimorar os meus conhecimentos.

À minha mãe, pelo incentivo, preocupação e amor de sempre.

Ao meu pai, que vai estar vivo dentro de mim para todo o sempre. Que privilégio ter sido tua filha. Meu profundo agradecimento por ter sido um pai tão especial. Um dia nos reencontraremos!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“A morte não é nada.  
Eu somente passei para o outro lado do Caminho.  
Eu sou eu, vocês são vocês.  
O que eu era para vocês, eu continuarei sendo.  
Me dêem o nome que vocês sempre me deram,  
falem comigo como vocês sempre fizeram.  
Vocês continuam vivendo no mundo das criaturas,  
eu estou vivendo no mundo do Criador.  
Não utilizem um tom solene ou triste, continuem a  
rir daquilo que nos fazia rir juntos.  
Rezem, sorriam, pensem em mim.  
Rezem por mim.  
Que meu nome seja pronunciado como sempre foi,  
sem ênfase de nenhum tipo.  
Sem nenhum traço de sombra ou tristeza.  
A vida significa tudo o que ela sempre significou, o  
fio não foi cortado.  
Porque eu estaria fora de seus pensamentos,  
agora que estou apenas fora de suas vistas?  
Eu não estou longe, apenas estou  
do outro lado do Caminho...  
Você que aí ficou, siga em frente,  
a vida continua, linda e bela  
como sempre foi.”*

*(Santo Agostinho)*

## RESUMO

O milho é um dos grãos mais cultivados do mundo por conter alto valor nutritivo, sendo o principal produto destinado à alimentação animal. O Brasil é um dos principais produtores de milho no mundo. No entanto, a contaminação dos grãos com fungos toxigênicos tem sido motivo de preocupação para a agricultura, por apresentarem alto risco para a produção animal e à segurança alimentar, causando perdas econômicas. As fumonisinas são toxinas produzidas por fungos do gênero *Fusarium*, especialmente por *Fusarium verticillioides* e são as principais invasoras dos grãos de milho no campo, desenvolvendo-se rapidamente dependendo das condições climáticas. Os níveis de fumonisinas no milho são bastante influenciados por fatores ambientais como temperatura, umidade e precipitação durante os períodos de pré-colheita e colheita. Nesse estudo, determinou-se a probabilidade de ocorrência de fumonisinas no milho nos estados de maior produção no Brasil, associando às condições do clima enquanto permanece no campo, bem como os níveis de concentração estarem acima do limite máximo de 5µg/g estabelecido pela ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). Os dados foram analisados através da análise quantitativa de riscos, utilizando o método de amostragem de Monte Carlo, realizada no software @Risk. Os resultados indicaram que há uma forte correlação entre os níveis de contaminação de fumonisinas e a região geográfica avaliada por diferentes características climáticas, com a temperatura tendo principal influência. Os estados localizados ao sul do País apresentaram maiores riscos de ocorrência e níveis de concentração de fumonisinas no milho, devido ao clima temperado, com temperatura média menor e maiores índices de umidade relativa e precipitação, em relação às zonas mais ao centro, de clima tropical mais seco e temperaturas mais elevadas.

Palavras-chave: micotoxinas; segurança alimentar; probabilidade; risco; clima.

## ABSTRACT

Corn is one of the most cultivated grains in the world because it contains high nutritional value and is the main product for animal feed. Brazil is one of the main corn producers in the world. However, contamination of grains with toxigenic fungi has been a concern for agriculture because it poses a high risk to animal production and food safety, causing economic losses. Fumonisin are toxins produced by fungi of the genus *Fusarium*, especially by *Fusarium verticillioides* and are the main invaders of corn grains in the field, developing rapidly depending on the climatic conditions. Fumonisin levels in corn are strongly influenced by environmental factors such as temperature, humidity, and precipitation during the pre-harvest and harvest periods. In this study, the probability of occurrence of fumonisins in corn in the states of greatest production in Brazil was determined, associating with the climate conditions while it remains in the field, as well as the concentration levels above to the maximum limit of 5µg/g established by ANVISA (National Health Surveillance Agency). The data were analyzed through the quantitative risk analysis, using the Monte Carlo sampling method, performed in @Risk software. The results indicated that there is a strong correlation between fumonisins contamination levels and the geographical region evaluated by different climatic characteristics, with temperature having the main influence. The states located in the south of the country presented higher risks of occurrence and concentration levels of fumonisins in corn, due to the temperate climate with lower average temperature and higher indices of relative humidity and precipitation, in relation to the more central zones of tropical climate dry and higher temperatures.

Keywords: mycotoxins; food security; probability; risk; climate.

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Limites máximos de fumonisinas recomendados ao consumo humano para alimentos à base de milho nos EUA. .... | 31 |
| Tabela 2 - Limites máximos tolerados para fumonisinas em milho e derivados no Brasil.....                             | 31 |
| Tabela 3 - Limites máximos de fumonisina recomendados ao consumo animal nos EUA .....                                 | 32 |
| Tabela 4 - Descrição de distribuições de probabilidade .....  | 48 |
| Tabela 5 - Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2017 .....   | 54 |
| Tabela 6 - Modelo matemático para a produção de fumonisina em milho .....   | 56 |
| Tabela 7 - Modelo de análise quantitativa do risco de ocorrência de fumonisina no milho no Brasil.....                | 58 |
| Tabela 8 - Período do milho em campo, segundo o ZARC.....   | 59 |
| Tabela 9 - Médias das variáveis climáticas .....  | 65 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Classificação climática de Köppen-Geiger do Brasil .....   | 53 |
| Figura 2 - Distribuição das variáveis climáticas da região Sul.....   | 61 |
| Figura 3 - Distribuição das variáveis climáticas de Minas Gerais .....  | 62 |
| Figura 4 - Distribuição das variáveis climáticas do Centro-Oeste .....  | 63 |
| Figura 5 - Distribuição das variáveis climáticas do Paraná.....   | 64 |
| Figura 6 - Temperatura média (A) e Precipitação total (B) anuais do Brasil em 2017.....                                     | 65 |
| Figura 7 - Distribuições sobrepostas de temperatura e umidade relativa para a 1ª safra .....                                | 66 |
| Figura 8 - Distribuições sobrepostas de temperatura e umidade relativa da 2ª safra .....                                    | 67 |
| Figura 9 – Sobreposição das distribuições acumuladas de probabilidades da concentração de fumonisina no Sul e MG.....       | 68 |
| Figura 10 - Sobreposição das distribuições acumuladas de probabilidades da concentração de fumonisina no CO e PR.....       | 68 |
| Figura 11 - Distribuições de probabilidade da concentração de fumonisina para a 1ª safra, na região Sul (A) e MG (B).....   | 70 |
| Figura 12 - Altimetria do Brasil .....  | 71 |
| Figura 13 – Distribuições de probabilidade comparando as concentrações de fumonisina nos cenários avaliados - 1ª safra..... | 72 |
| Figura 14 – Distribuições de probabilidade comparando as concentrações de fumonisina nos cenários avaliados - 2ª safra..... | 73 |
| Figura 15 – Gráfico de Tornado para as regiões avaliadas na 1ª safra.....   | 74 |
| Figura 16 – Gráfico de Tornado para as regiões avaliadas na 2ª safra.....   | 74 |
| Figura 17 – Gráfico de Radar para as regiões avaliadas na 1ª safra.....   | 74 |
| Figura 18 – Gráfico de Radar para as regiões avaliadas na 2ª safra.....   | 75 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>15</b> |
| 1.1 OBJETIVO GERAL .....  | 18        |
| <b>1.1.1 Objetivos Específicos.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>19</b> |
| 2.1 MILHO.....  | 19        |
| <b>2.1.1 Produção no Brasil .....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2.1.2 Plantio.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2.1.3 Colheita .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>2.1.4 Clima .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.1.5 Perdas na produtividade.....</b>   | <b>24</b> |
| <b>2.1.6 Perdas provocadas por fungos .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.1.7 Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC).....</b>   | <b>26</b> |
| <b>3 MICOTOXINAS NO MILHO .....</b>   | <b>28</b> |
| 3.1 FUMONISINAS .....   | 29        |
| 3.2 FATORES CLIMÁTICOS QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE FUMONISINAS NO MILHO .....  | 33        |
| <b>4 ANÁLISE DE RISCO .....</b>   | <b>36</b> |
| 4.1 PRINCIPAIS CONCEITOS.....   | 38        |
| <b>4.1.1 Avaliação de Risco.....</b>  | <b>39</b> |
| 4.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO .....   | 41        |
| 4.3 MÉTODO DE AMOSTRAGEM DE MONTE CARLO .....   | 45        |
| <b>4.3.1 Distribuições de Probabilidade .....</b>   | <b>47</b> |
| 4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....   | 51        |
| <b>5 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>52</b> |
| 5.1 FATORES CLIMÁTICOS DAS DIFERENTES REGIÕES PRODUTORAS DE MILHO .....   | 52        |
| 5.2 MODELO DE AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCOS DA CONTAMINAÇÃO DO MILHO POR FUMONISINAS SOB A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ..... | 55        |
| 5.3 CENÁRIOS.....   | 59        |
| <b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>60</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.1 FATORES CLIMÁTICOS QUE AFETAM A INCIDÊNCIA E A PRODUÇÃO DE FUMONISINAS NAS PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE MILHO..... | 60        |
| 6.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA CONTAMINAÇÃO DO MILHO POR FUMONISINAS.....    | 67        |
| <b>6.2.1 Concentração de Fumonisinas nas Principais Regiões Produtoras de Milho na 1ª Safra .....</b>                      | <b>69</b> |
| <b>6.2.2 Concentração de fumonisinas nas principais regiões produtoras de milho na 2ª safra (safrinha).....</b>            | <b>71</b> |
| <b>6.2.3 Cenários: Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) .....</b>   | <b>72</b> |
| 6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....  | 73        |
| <b>7 CONCLUSÃO.....</b>  | <b>77</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>78</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>89</b> |
| <b>ANEXO A – ESTUDOS QUE AUXILIARAM NA IDENTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE FUMONISINAS E O CLIMA .....</b>                      | <b>90</b> |
| <b>ANEXO B – TEMPERATURA E UMIDADE MENSAIS DE 2017 NO BRASIL.....</b>  | <b>94</b> |
| <b>ANEXO C – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.....</b>  | <b>95</b> |
| <b>ANEXO D – TIPOS DE CLIMA NO MUNDO .....</b>   | <b>96</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O milho, oriundo da América Central, é um dos cereais mais cultivados, por produzir grãos de elevado valor nutritivo. É muito utilizado na alimentação humana e, principalmente, animal, sendo que esta última representa cerca de 70% do seu destino (DUARTE; MATTOSO; GARCIA, 2018).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, com uma produção acima de 95 milhões de toneladas na safra 2016/2017, e o segundo lugar no ranking de países exportadores do grão (CONAB, 2018; USDA, 2018).

À medida que o Brasil assume maior participação no suprimento de milho, é natural que o nível de exigência se intensifique. Com uma alta demanda, se faz necessário garantir a produção de grãos de boa qualidade para atender aos mercados interno e externo. Entretanto, a ocorrência de doenças tem se tornado um grande limitador da produtividade, sendo um dos principais fatores as condições favoráveis do clima brasileiro (OLIVEIRA et al., 2004). A elevada contaminação de grãos com fungos toxigênicos tem sido motivo de preocupação de agentes envolvidos no agronegócio. Essas substâncias tóxicas, quando presentes no milho, apresentam grande risco para a produção animal e para a segurança alimentar.

Alimentos elaborados à base de milho podem afetar a saúde humana pela transferência, direta ou indireta, das micotoxinas para a mesa do consumidor, predispondo-o a enfermidades. Quando presentes no milho utilizado na nutrição animal, podem prejudicar o desempenho animal, afetando ainda seu bem-estar e saúde, e tornando o custo de produção mais elevado (FREIRE et al., 2007).

De acordo com o relatório anual do *Rapid Alert System for Food and Feed* (RASFF), em 2016, as micotoxinas foram o principal perigo identificado nas notificações de rejeição de fronteiras da União Europeia. Estudos baseados na rejeição de alimentos e ração animal excedendo os limites da legislação indicam que US\$ 50 milhões são gastos anualmente em pesquisas relacionadas às micotoxinas (ROBENS; CARDWELL, 2003). Estima-se que as perdas da indústria de milho dos Estados Unidos poderiam exceder as centenas de milhões de dólares devido à contaminação e o *Food and Drug Administration* (FDA) estimou que o custo médio anual com perdas de culturas pelas micotoxinas (aflatoxinas, fumonisinas e desoxinivalenol) é de US\$ 932 milhões (CAST, 2003; BINDER et al., 2007, WU, 2007).

Sendo a contaminação do milho por fungos e micotoxinas dependente do clima, Wu et al. (2011) afirmam que, no futuro, essas perdas podem aumentar devido às mudanças climáticas esperadas. Fatores como esse têm sido tema de muitos estudos por ser um

reconhecido risco na ocorrência de micotoxinas. Esforços têm sido feitos por instituições e organizações, nacionais e internacionais, a fim de integrar ações e estratégias que minimizem o risco e os efeitos danosos à saúde do consumidor. Desde que foram descobertas, há mais de 50 anos, ainda não foi encontrado um método satisfatório de prevenção da contaminação em produtos agrícolas (IAMANAKA; OLIVEIRA; TANIWAKI, 2013).

No Brasil, o agronegócio representa cerca de 45% das exportações, sendo responsável pelo superávit da balança comercial do País (AGROSTAT, 2018). Para que os problemas oriundos das micotoxinas não restrinjam o crescimento das exportações do agronegócio nacional, a pesquisa precisa avançar. Mallmann, Dilkin e Mallmann (2014) afirmam que o monitoramento é primordial no gerenciamento do risco, proporcionando a tomada de decisões estabelecida em critérios técnicos. Dessa forma, tornam-se necessários estudos que visam tecnologias acessíveis para a prevenção, detecção e descontaminação do milho e outros produtos agrícolas.

Nas próximas décadas, a agricultura brasileira demandará sistemas de inteligência cada vez mais sofisticados para apoiar a tomada de decisão. Ampliar a capacidade de antecipação de desafios e riscos será essencial para fortalecer o planejamento da agricultura brasileira em bases bem informadas e sustentáveis.

Uma importante ferramenta que vem sendo utilizada nas políticas públicas de controle da segurança alimentar é a metodologia de análise de riscos. Seu desenvolvimento veio da necessidade de se obter estimativas mais precisas e confiáveis nas avaliações de riscos da qualidade e segurança dos alimentos (ROBERTS; JENSEN; UNNEVEHR, 1995). Sant'Ana e Franco (2010) afirmam que a análise de risco em alimentos e, particularmente, a avaliação do risco, é uma ferramenta de extrema importância. Seus princípios e técnicas, que auxiliam na avaliação de perigos e na tomada de medidas específicas, transparentes e coerentes, permitem o diagnóstico de problemas e a definição de soluções mais específicas e eficientes, contribuindo para a produção de alimentos mais seguros (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008). No entanto, é de suma importância a capacitação e a constante atualização dos profissionais envolvidos em relação aos conceitos e métodos de análise de risco. É necessário, também, sensibilizar a indústria e os consumidores para a importância do processo, incentivando sua participação e adesão às decisões de gerenciamento para a minimização dos riscos (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

A ocorrência de micotoxinas é motivo de preocupação em nível mundial, mas estudos dedicados no avanço do conhecimento dos fatores de risco ainda não foram suficientes para se evidenciar uma tendência de queda na contaminação (BATTILANI, 2016).

Wu et al. (2011) enfatizam a importância de se estudar modelos de predição relacionais entre clima e toxinas. Segundo Van Der Fels-Klerx, Liu e Battilani (2016), muitos esforços têm sido investidos no desenvolvimento desses modelos para prever a contaminação por micotoxinas na colheita em várias culturas, com dados meteorológicos como entrada principal ou única, permitindo um melhor planejamento dos envolvidos na produção agrícola. Com melhores informações e conhecimento dos fatores de riscos, produtores são capazes de se antecipar sobre futuras ocorrências de doenças fúngicas e incidências de contaminação, e estratégias de curto e longo prazo podem ser estabelecidas para o controle de micotoxinas, garantindo melhor viabilidade econômica e, principalmente, alimentos mais seguros. No entanto, Battilani (2016) afirma que o número de modelos preditivos ainda é baixo e concorda que mais pesquisas precisam ser realizadas. A principal dificuldade se dá pela escassez de dados de campo georreferenciados. Cita, ainda, a necessidade de que os grupos de pesquisa se unam a fim de comparar e poder validar seus modelos.

Assim, destaca-se a grande importância que existe no controle das micotoxinas para a segurança de toda cadeia alimentar, através do monitoramento dos riscos de sua ocorrência no País. Considerando-se a relevância da análise de risco na gestão da segurança dos alimentos e o pouco conhecimento sobre o assunto, este estudo objetiva determinar a probabilidade de contaminação do milho por fumonisinas, através da análise quantitativa de risco - dada sua importância pela prevalência, níveis de produção e toxicidade - do grão de milho produzido nas principais regiões do Brasil, associada às condições climáticas no período de campo. Contudo, esse trabalho busca contribuir para a redução dos níveis de contaminação do milho por substâncias tóxicas provenientes de fungos, denominadas fumonisinas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a probabilidade de contaminação, por fumonisinas, do milho produzido em diferentes regiões do Brasil.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- a) coletar dados dos fatores climáticos das diferentes regiões produtoras de milho;
- b) coletar dados de literatura referente a fatores que afetam a incidência e a produção de fumonisinas no milho;
- c) construir um modelo de Análise Quantitativa de Riscos para avaliar a influência das condições climáticas na probabilidade de contaminação do milho por fumonisinas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MILHO

O milho (*Zea mays* L.), espécie da família das gramíneas, teve origem nas Américas, possivelmente no México, América Central ou Sudoeste dos Estados Unidos. Com a descoberta da América e as grandes navegações do século XVI, foi levado para a Europa e cultivado em jardins até que seu valor alimentício se tornasse conhecido. No Brasil, os índios tinham o cereal como o principal ingrediente de sua dieta (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000; ABIMILHO, 2018).

O milho é uma planta robusta e ereta, com um a quatro metros de altura, produtora de grãos e, seu nome, de origem indígena caribenha, significa “sustento da vida” (MAGALHAES; SOUZA, 2015).

O milho é um dos alimentos mais nutritivos que existem. Puro ou como ingrediente de outros produtos, é uma importante fonte energética para o homem, principalmente em populações de baixa renda, como o nordeste do Brasil, que tem no milho um elemento básico para sua culinária (DUARTE; MATTOSO; GARCIA, 2018). Ao contrário do trigo e do arroz, que são refinados durante seus processos de industrialização, o milho conserva sua casca, que é rica em fibras, fundamental para a eliminação das toxinas do organismo humano. Além das fibras, o grão de milho é constituído de carboidratos, proteínas, vitaminas (complexo B), sais minerais (ferro, fósforo, potássio, cálcio), óleo e grandes quantidades de açúcares, gorduras, celulose e calorias. Cada 100 gramas do alimento têm cerca de 360 Kcal, sendo 70% de glicídios, 10% de protídeos e 4,5% de lipídios (ABIMILHO, 2018).

De acordo com dados divulgados pela Agência Embrapa de Informação Tecnológica, o uso do milho em grão como alimentação animal representa a maior parte do consumo desse cereal, isto é, cerca de 70% no mundo (DUARTE; MATTOSO; GARCIA, 2018). Nos Estados Unidos, cerca de 50% são destinados a esse fim, enquanto que no Brasil varia de 60% a 80%. De todo o milho destinado à produção de ração no país, estima-se que 59% é direcionado ao setor avícola, 26% à suinocultura, 8% à pecuária e 7% é usado para ração de outros animais (ABIMILHO, 2018).

A Associação Brasileira das Indústrias do Milho (ABIMILHO, 2018) estima que somente 15% da produção nacional é destinada ao consumo humano e, ainda assim, de maneira indireta na composição de outros produtos. O aumento do consumo de milho na alimentação

da população não é apenas uma questão comercial, mas, antes de tudo, uma solução social para um país com imensas áreas cultiváveis e sérios problemas de desnutrição.

### **2.1.1 Produção no Brasil**

Com uma produção aproximada de 1,0 bilhão de toneladas em 2017, a maior da história, o milho é o grão mais produzido no mundo (USDA, 2018). O Brasil ocupa o terceiro lugar na produção mundial, com cerca de 97,8 milhões de toneladas de grãos produzidos na safra 2016/2017, ranking liderado pelos Estados Unidos, seguido da China. É o segundo maior cultivo do País, atrás apenas da soja (CONAB, 2018).

Cultivado em praticamente todo o território nacional, cerca de 90% da produção concentra-se nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul (50%, 13% e 28%, respectivamente). Este cenário vem se alterando ao longo dos anos, pois até a safra 2010/2011, a região Sul tinha a maior participação na produção nacional (38%). Desde então, a região Centro-oeste vem se destacando na produção do milho brasileiro, devido à utilização de alta tecnologia e disponibilidade de terras (CONAB, 2018).

A produção no Brasil é comandada pelo Mato Grosso, que colheu quase 30 milhões de toneladas na safra 2016/2017, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018). Esse volume corresponde a praticamente um terço de toda a produção nacional. Entre os principais estados produtores estão o Paraná (17,8 milhões de toneladas), Mato Grosso do Sul (9,9 milhões de toneladas), Goiás (9,6 milhões de toneladas) e Minas Gerais (7,5 milhões de toneladas). Na lista de maior produtividade, os que se sobressaem são Santa Catarina (136 sacas/ha), Rio Grande do Sul (125 sacas/ha) e Distrito Federal (122 sacas/ha). De acordo com a CONAB (2017), a produtividade média do País na safra 2016/2017 foi de 93 sacas/ha (5.560 kg/ha). Em relação à colheita de 2015/2016, houve um aumento de 33% na produtividade e a produção nacional aumentou em 47%.

No quesito exportação, o Brasil enviou para outros países 29,3 milhões de toneladas de milho em 2017, o que gerou US\$ 4,6 bilhões em receita, valor 24% superior ao ano anterior, segundo o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (BRASIL, 2018b).

### **2.1.2 Plantio**

Cultivado em regiões tropicais e subtropicais, com pequenas expansões em zonas temperadas do Planalto Meridional, o milho é uma das culturas com distribuição geográfica

mais abrangente do País. O Brasil é dividido em quatro grandes macrorregiões homogêneas de cultivo do milho, que se diferenciam por fatores como altitude, latitude e clima. A região subtropical é formada pelo RS, SC e sul do PR; região de transição, formada pelo norte e oeste do PR, sul de SP, sul do MS e sul de MG; região tropical, formada pelas regiões centro e norte de SP, MG, TO, norte do MS, MT, oeste da BA, parte dos estados do MA e do PI, RJ e ES; e a região Nordeste (CRUZ et al., 2002; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

A produção de milho no Brasil é caracterizada pelo plantio em duas épocas: primeira safra (safra de verão) e segunda safra (safrinha). Os plantios de verão são realizados em todos os estados, na época tradicional, durante o período chuvoso, que ocorre no final de Agosto na região Sul e entre os meses de Outubro e Novembro nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Na região Nordeste, esse período ocorre no início do ano. A segunda safra é predominante na região Centro-Oeste e nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais e o plantio se dá geralmente de janeiro a março ou até meados de abril. (PEREIRA FILHO, 2015).

O plantio de uma lavoura, processo de cerca de 120 a 130 dias, deve ser muito bem planejado, pois determina o seu sucesso ou insucesso. A época de semeadura refere-se ao período em que a cultura tem maior probabilidade de se desenvolver em condições edafoclimáticas favoráveis, que são variáveis em cada região agroclimática, influenciando muito na tomada de decisão. Nas condições tropicais, devido a menor variação da temperatura e do comprimento do dia, a distribuição de chuvas é que, geralmente, determina a melhor época de plantio (MANTOVANI et al., 2015b; GUIMARÃES; LANDAU, 2015).

Por ser plantado no final da época recomendada, o milho safrinha tem sua produtividade bastante afetada pelo regime de chuvas e por fortes limitações de radiação solar e temperatura na fase final de seu ciclo. Além disso, como o milho safrinha é plantado após uma cultura de verão, a sua data de plantio depende da época do plantio dessa cultura e de seu ciclo. Quanto mais tarde for o plantio, menor será o potencial e maior o risco de perdas por seca e/ou geadas (SANS; GUIMARÃES, 2006).

### **2.1.3 Colheita**

O ponto de maturidade fisiológica caracteriza o momento ideal para a colheita, ou ponto de máxima produção. Quando a colheita é realizada logo após essa fase, com 30 a 38% de umidade, podendo variar entre híbridos, propicia o mais alto rendimento de grãos. No entanto, o grão não está, ainda, em condições de ser colhido e armazenado com segurança, uma vez que deveria estar com 13 a 15% de umidade para evitar problemas com a armazenagem,

requerendo a secagem complementar por métodos artificiais, com excessivo consumo de energia e a com possibilidade de comprometer sua qualidade, provocando-lhes quebras e trincas, tornando-os mais vulneráveis a serem atacados por insetos (MANTOVANI et al., 2015a; MAGALHAES; SOUZA, 2015).

Uma característica positiva dos grãos é a possibilidade de, após a colheita, serem armazenados por longo período de tempo, sem perdas significativas da qualidade, desde que sejam adotadas corretamente as práticas de colheita, limpeza, secagem, combate a insetos e prevenção de fungos (MANTOVANI et al., 2015a).

É importante destacar que todo procedimento realizado no milho colhido não aumentará sua qualidade pós-colheita, mantendo, no máximo, a qualidade obtida durante o processo de produção no campo (MANTOVANI et al., 2015a)

#### **2.1.4 Clima**

O clima é o principal fator responsável pelas perdas e insucessos das safras agrícolas no Brasil. Estudos entre as condições meteorológicas e a produção agrícola apontam que esses fatores estão altamente correlacionados. Em geral, as condições hídricas são as que mais afetam a produção das lavouras (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Segundo Gurgel (2007), o período de tempo e as condições climáticas em que a cultura é submetida constituem-se em fatores preponderantes para a qualidade da produção, independentemente da tecnologia aplicada. Dentre os elementos do clima que interferem na atividade agrícola, a temperatura e a precipitação pluvial são os mais importantes.

No Brasil, a observância do zoneamento climático da cultura é indispensável e reduz significativamente os riscos causados por baixas temperaturas (inclusive geadas), quando respeitada a delimitação de zonas e épocas de cultivo (BERGAMASCHI; MATZENAUER 2014). A seguir, serão descritas características importantes dos principais fatores climáticos para a cultura do milho.

##### **2.1.4.1 Temperatura**

A temperatura possui uma relação direta com o desempenho da cultura do milho, uma vez que a temperatura da planta é basicamente a mesma do ambiente que a envolve.

A temperatura ideal do solo deve estar entre 25 e 30°C. Quando inferior a 10°C ou superior a 40°C, pode causar prejuízo sensível à germinação. Temperatura média diária inferior

a 19°C no verão e a 12,8°C durante a noite não são recomendadas para a produção de milho. Por outro lado, temperaturas noturnas superiores a 24°C proporcionam um aumento da respiração, ocasionando uma diminuição da taxa de fotossimilados (compostos resultantes da fotossíntese) e uma conseqüente redução da produção, além de provocar senescência precoce das folhas. Por fim, temperaturas inferiores a 15°C retardam a maturação dos grãos (MANTOVANI et. al, 2015b).

Afetando diretamente na temperatura diurna e noturna, a altitude tem efeito tanto na fotossíntese quanto na respiração. Para as condições brasileiras, o milho plantado em maiores altitudes apresenta maior número de dias para atingir o pendoamento, aumentando o ciclo e apresentando maior rendimento de grãos (MANTOVANI et. al, 2015b).

#### 2.1.4.2 Umidade do solo

O milho é uma cultura muito exigente em água, consumindo cerca de 600 mm durante todo seu ciclo. Apesar disso, pode ser cultivado em regiões onde as precipitações vão de 250 mm até 5.000 mm anuais.

Sendo sensível ao déficit hídrico, o milho é uma das culturas mais afetadas pela variabilidade no regime pluviométrico, podendo ocasionar danos em todas as fases (MANTOVANI et. al, 2015b).

Bergamaschi e Matzenauer (2014) estudaram a relação entre o rendimento de grãos de milho e a quantidade de chuva em diferentes períodos do ciclo no Rio Grande do Sul e concluíram que a chuva exerce grande influência no rendimento dos grãos do milho.

#### 2.1.4.3 Fotoperíodo

Segundo Mantovani et al. (2015b), dentre os componentes climáticos que podem afetar a produtividade do milho, está o fotoperíodo, representado pelo número de horas de luz solar. No entanto, o fotoperíodo é um fator climático praticamente insignificante nas condições brasileiras, já que não apresenta muitas variações de ano para ano.

#### 2.1.4.4 Radiação solar

Esse é um dos parâmetros de extrema importância para a planta de milho, capaz de inibir o processo fotossintético, impedindo a planta de expressar o seu máximo potencial produtivo.

O milho é uma planta altamente eficiente na utilização da luz. Uma redução de 30 a 40% da intensidade luminosa, por períodos longos, atrasa a maturação dos grãos ou pode ocasionar até mesmo queda na produção (MANTOVANI et. al, 2015b).

As informações e dados relacionados às condições climáticas que afetam a produtividade do milho, tratados nos itens 2.1.4.1 a 2.1.4.4 deste trabalho, tiveram como referência um importante documento de estudo realizado pela Embrapa Milho e Sorgo, Mantovani et al (2015b).

#### 2.1.5 Perdas na produtividade

Para garantir a qualidade, os grãos devem ser classificados pelos níveis de impurezas toleráveis. A classificação do milho é feita com base em normas ditadas pela Instrução Normativa nº 60/2011 do MAPA (BRASIL, 2011). Além de determinar a qualidade do produto, visa também garantir a comercialização por preço justo. Assim, paga-se mais por um produto de melhor qualidade e penaliza-se o de qualidade inferior (MANTOVANI et al., 2015a).

O milho, segundo a sua qualidade, é classificado em Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, sendo os níveis de tolerância máxima de matérias estranhas de 1,0%, 1,5% e 2,0%, respectivamente. Será desclassificado todo o milho que apresentar: mau estado de conservação, aspecto generalizado de mofo e/ou fermentação, sementes de mamona ou outras que possam ser prejudiciais à utilização normal do produto, ou, ainda, odor estranho de qualquer natureza, impróprio ao produto, prejudicial à sua utilização (MANTOVANI et al., 2015a).

O lucro do agricultor está diretamente associado aos bons resultados da produção e produtividade da lavoura. Os principais fatores responsáveis pela baixa produtividade são os atrasos no plantio e na colheita.

Mantovani et al., (2015b) explicam que o atraso na época de plantio resulta em redução no ciclo da cultura e no rendimento de grãos, dificultando também o controle de pragas e plantas daninhas, além de aumentar a ocorrência e a severidade de doenças. Da mesma forma,

fatores como insetos, pássaros, chuva e ventos contribuem para aumentar as perdas pelo atraso na colheita.

O tempo de permanência do milho no campo por período prolongado varia de região para região, dependendo das condições climáticas. A ocorrência de chuva na pré-colheita, com a conseqüente penetração de água na espiga, é a principal causa de perdas. Assim, é importante que o produtor observe a época correta para a semeadura, conforme zoneamento agrícola da região, para garantir a produção e evitar problemas na época da colheita (SANS; GUIMARÃES, 2006).

Nas regiões Sul e Sudeste, as perdas na pré-colheita são maiores, havendo dados de pesquisa indicando taxas de 4 a 5%, especialmente em locais onde a umidade relativa é muito alta, em função das chuvas no período da colheita, e onde o milho não é colhido mecanicamente. Nas regiões onde normalmente não chove no período que antecede a colheita, como na segunda safra no Centro-Oeste, o grão colhido é, geralmente, de excelente qualidade, e as perdas no período da pré-colheita são pequenas. (MANTOVANI et al., 2015a).

Lanza et al. (2014) afirmam que, no Brasil, a ocorrência de doenças tem se tornado um grande limitador da produtividade em função das condições apresentadas pelo clima tropical úmido.

### **2.1.6 Perdas provocadas por fungos**

A presença de microrganismos nos grãos de milho, em especial de fungos toxigênicos, acarreta em perdas econômicas e riscos à saúde humana e animal, uma vez que metabólitos tóxicos podem ser produzidos (CRUZ, 2010). A maior incidência de grãos ardidos, causados, principalmente, pelos fungos presentes no campo, pode ocorrer em épocas e regiões mais úmidas, ou em regiões e épocas em que a colheita coincide com o período chuvoso (MANTOVANI et al., 2015a).

Os fungos de campo são aqueles que atacam os grãos antes da colheita, como *Fusarium*, e requerem grãos com alta umidade (acima de 20%) para se multiplicarem. Com a capacidade de viverem associados a grãos com teor de umidade mais baixo (entre 13 e 13,5%) e temperaturas mais elevadas (25°C), os fungos de armazenamento, como *Aspergillus* e *Penicillium*, contaminam os grãos após a colheita (MANTOVANI et al., 2015a).

Os fungos estão sempre presentes nos grãos armazenados, constituindo, juntamente com os insetos, as principais causas de deterioração e perdas constatadas durante esse processo. Propagados por esporos, um dos principais agentes disseminadores são os insetos-pragas de

grãos. Os principais fatores que afetam a atividade dos fungos nos grãos armazenados são: umidade, temperatura, taxa de oxigênio, danos mecânicos, impurezas e ataque de insetos (MANTOVANI et al., 2015a).

### **2.1.7 Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)**

O clima é um fator da natureza que não pode ser controlado pelo homem. Dependente do clima, a agricultura é uma atividade muito sujeita a riscos, cujos efeitos negativos acarretam sérios danos à sociedade, desde a segurança alimentar até crises econômicas. Com a contribuição da ciência e da incorporação da alta tecnologia no campo, a agricultura moderna tem desenvolvido ferramentas capazes de auxiliar na redução dos riscos, que passaram a ser quantificados através de cálculos probabilísticos (SANTOS, MARTINS; 2016).

Dentro desse contexto, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) é uma metodologia desenvolvida como instrumento de política e gestão agrícola, que tem como objetivo minimizar os riscos da ocorrência de eventos climáticos adversos na lavoura e identificar a melhor época de plantio das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares, de acordo com as portarias divulgadas anualmente no Diário Oficial da União para a vigência na safra indicada (BRASIL, 2018a).

Foi criada pelo MAPA, em 1996, para apoiar o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO) na redução dos riscos de perdas na agricultura brasileira. Atualmente, relaciona-se, também, com o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária da Agricultura Familiar (Proagro Mais) e o Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR) (SANTOS, MARTINS; 2016; BRASIL, 2017).

A metodologia é desenvolvida em função de parâmetros climáticos que influenciam o desenvolvimento e a produtividade das lavouras, como precipitação pluviométrica, temperatura, *déficit* hídrico, ocorrências de geadas e granizos, disponibilidade de água no solo, evapotranspiração real e potencial, estiagem agrícola e veranicos. Juntas, essas informações integram modelos agrometeorológicos de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura, através de bases de dados de clima e solo, técnicas de análise de decisão e ferramentas de geoprocessamento, que disponibilizam os resultados espacializados sob a forma de mapas. Os resultados indicam os períodos de plantio mais favoráveis para a cultura de interesse e localidade selecionada, considerando o risco de ocorrência de fracasso (sinistro) com níveis de 20%, 30% e 40% de probabilidade, ou de sucesso, com chance de 80, 70 e 60%.

Até o momento, o ZARC conta com o zoneamento de 44 culturas em todo território nacional. A técnica é de fácil entendimento e adoção pelos produtores rurais, agentes financeiros e demais usuários. O acesso pode ser feito pelo site do Agritempo<sup>1</sup> ou pelo MAPA, por meio do Sistema de Zoneamento Agrícola de Risco Climático<sup>2</sup> (SISZARC) (SANTOS, MARTINS; 2016).

Responsável pela metodologia, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) também responde pela execução dos serviços técnicos. A condução e divulgação do ZARC é atribuição da Coordenação-Geral de Zoneamento Agrícola do MAPA.

A normatização do ZARC ocorre por meio de portarias do MAPA, divulgadas anualmente no Diário Oficial da União, para a vigência na safra indicada, onde se encontra um resumo do estudo, a lista de cultivares indicadas para cada região e a relação de municípios com os respectivos calendários de plantio. As instruções normativas e as portarias do zoneamento encontram-se no site do ministério<sup>3</sup>.

Desde a implantação do zoneamento agrícola no setor agropecuário brasileiro, resultados como a queda dos índices de perdas agrícolas e a rentabilidade positiva têm sido os pontos fortes do programa, através da diminuição das perdas provocadas por eventos climáticos e o aumento da produtividade das lavouras, além da recuperação do Proagro (EMBRAPA, 2008).

O aprimoramento da metodologia é um dos objetivos futuros do ZARC com modelos que permitam a classificação mais detalhada dos riscos envolvidos na atividade agropecuária, mediante a sofisticação dos processos de modelagem, estudos de previsão de safra e a incorporação de cenários de mudanças climáticas sobre as culturas agrícolas.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>

<sup>2</sup> Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/sisZARC>

<sup>3</sup> Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/portarias>

### 3 MICOTOXINAS NO MILHO

Micotoxinas são substâncias tóxicas, resultantes do metabolismo secundário de fungos filamentosos, produzidas quando o fungo atinge a maturidade (FREIRE et al., 2007). O termo micotoxina é derivado da palavra grega “*mykes*”, que significa fungo, e do latim “*toxican*”, que significa toxinas, e é utilizado, principalmente, para fungos de alimentos e de rações (FREIRE et al., 2007; IAMANAKA; OLIVEIRA; TANIWAKI, 2013).

Segundo Pimentel et al. (2012), cerca de 45% do milho produzido no Brasil é contaminado com micotoxinas; a FAO estimou que até 25% dos alimentos estejam contaminados em todo o mundo (WHO, 1999). A ocorrência de micotoxinas no milho e nos produtos à base de milho tem sido reportada por vários autores, principalmente em estudos relacionados à aflatoxinas e fumonisinas (MACHINSKI JR.; VALENTE SOARES, 2000; VAN DER WESTHUIZEN et al., 2003; BITTENCOURT et al., 2005; CRUZ, 2010; SCUSSEL et al., 2014)

A contaminação do grão de milho e outros produtos agrícolas por micotoxinas tem provocado grandes perdas econômicas em toda a cadeia produtiva agrícola. Micotoxinas afetam o agronegócio, interferindo nas exportações e reduzindo a produção animal e agrícola. Nos países em desenvolvimento, o problema é ainda mais sério, pois são selecionados para exportação os produtos de melhor qualidade. No mercado interno são vendidos e consumidos os de qualidade inferior, que apresentam níveis de micotoxinas superiores aos permitidos nos países importadores, expondo a população a riscos evidentes para a saúde. Através da interposição de barreiras tarifárias, a não aceitação do produto contaminado pelo mercado internacional gera prejuízos econômicos para o agronegócio (FREIRE et al., 2007).

A contaminação por micotoxinas se torna um grave problema para as transações de comércio internacional, principalmente para países da União Europeia e os Estados Unidos, que possuem legislações rigorosas para os contaminantes nos grãos. Com limites mais estritos impostos pela Comissão Europeia, em 2006, muitos países também têm tornado mais rigorosa a legislação para a presença dessas substâncias químicas (MEDINA et al., 2017).

Presentes em vários tipos de alimentos, como milho, amendoim e trigo, as micotoxinas podem entrar na cadeia alimentar humana diretamente, através do consumo de cereais, oleaginosas e derivados, ou indiretamente, por meio do consumo de alimentos produzidos por animais que se alimentam com rações contaminadas (MOLIN; VALENTINI, 1999).

Considerando que o milho e outros cereais são a base da dieta animal, a contaminação da ração por essas toxinas provoca alterações patológicas e implicações no desempenho zootécnico, causando grande impacto econômico na produção animal e perdas consideráveis no sistema de produção (MAZIERO; BERSOT, 2010; MALLMANN; DILKIN; MALLMANN, 2014).

Micotoxicoses são graves efeitos na saúde humana e animal causados pela ingestão de alimentos que contenham micotoxinas (MAZIERO; BERSOT, 2010). Podem causar prejuízos no desempenho como redução no ganho de peso, menor produção de ovos e leite, menor eficiência reprodutiva e maior suscetibilidade ao estresse. Além de aumentarem o custo de produção, afetam ainda o bem-estar dos animais. Na saúde humana, estudos têm contribuído com a associação entre as micotoxinas e o câncer de fígado, especialmente em pessoas cronicamente infectadas pelo vírus da hepatite B, indicando também uma possível relação no câncer de esôfago e nos defeitos do tubo neural, embora não se tenha nenhuma conclusão definitiva até o momento. O comprometimento do crescimento infantil também tem sido objeto de estudos da exposição a essas substâncias tóxicas (PITT et al., 2012).

A presença das micotoxinas representa um risco potencial ao desenvolvimento do agronegócio brasileiro. O foco nas micotoxinas tem sido uma questão prioritária da FAO (*Food and Agriculture Organization of United Nations*) e da OMS (Organização Mundial da Saúde), em função dos impactos toxicológicos significativos na saúde humana e animal. Com o avanço das pesquisas, ficou provado que essas substâncias possuem propriedades extremamente tóxicas. Assim, cada vez mais, as micotoxinas vêm recebendo espaço no cenário mundial, algumas de maior importância, como as fumonisinas.

### 3.1 FUMONISINAS

As fumonisinas são toxinas produzidas por diversas espécies de fungos do gênero *Fusarium*, especialmente por *Fusarium verticillioides*. Encontradas em todo o mundo, são as principais invasoras dos grãos de milho no campo e estão associadas à contaminação de mais de 90% do milho no Brasil (POZZI et al., 2002; LANZA et al., 2014).

Mais de dez tipos de fumonisinas foram isoladas e caracterizadas, dividindo-as em quatro grupos, denominados de fumonisinas das séries A, B, C e P (RHEEDER; MARASAS; VISMER, 2002). As toxinas da série B (FB1, FB2 e FB3) são as principais produzidas na natureza. A mais prevalente delas no milho é a FB1, que representa aproximadamente 70% da

contaminação total das fumonisinas detectadas e é considerada a mais tóxica (MUSSER; PLATTNER, 1997; THIEL et al., 1997; CRUZ, 2010).

Os efeitos das fumonisinas na saúde humana são ainda desconhecidos. Atualmente, não há evidências de que as fumonisinas causem efeitos adversos à saúde em humanos. Entretanto, estudos na região de Transkei, África do Sul, mostraram correlação positiva entre a fumonisinas no milho e a incidência de câncer esofágico (SCAFF; SCUSSEL, 2004). Correlações semelhantes foram relatadas na China, Itália e Irã (SUN et al., 2007; KIMANYA et al., 2009; PATERSON; LIMA, 2010). Porém, até o momento, os estudos realizados demonstraram apenas associações inconclusivas da relação direta entre a contaminação por fumonisinas e o câncer humano em qualquer órgão (WHO, 2001; IARC, 2002). A limitação se deve pela falta de condições controladas, principalmente pelo confundimento entre fatores de risco, como, por exemplo, o consumo de álcool, não permitindo conclusões definitivas sobre o impacto das fumonisinas na ocorrência do câncer em humanos (FDA, 2000).

Por outro lado, as fumonisinas estão associadas a uma variedade de efeitos adversos à saúde animal. Entre os animais domésticos, os cavalos são as espécies mais sensíveis às fumonisinas (GIANNITTI et al., 2011), responsáveis pela ocorrência de leucoencefalomalácia (LEME), uma intoxicação que acomete o sistema nervoso central dos equinos. O consumo de apenas 10 ppm (partes por milhão) durante 30 dias já pode ocasionar a morte do animal (VINCELLI; PARKER, 2002). Suínos também são afetados pelo consumo de fumonisinas, sendo que o milho contaminado com 5 ppm pode causar anorexia (VOSS; SMITH; HASCHEK, 2007), enquanto que edema pulmonar ocorre pelo consumo de alimentos contaminados em níveis acima de 92 ppm. A morte geralmente ocorre em 48 horas depois de consumir a ração infectada (AHANGARKANI; ROUHI; AZIZI, 2014).

A Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer (IARC) classificou as fumonisinas como uma toxina do grupo 2B, considerada possivelmente carcinogênica para humanos. De acordo com a FDA (*Food and Drug Administration*, 2000), o nível máximo de fumonisinas recomendado na alimentação humana é de 2.000 a 4.000 µg/kg (de acordo com determinados produtos à base de milho), conforme Tabela 1, baseado em avaliações realizadas em animais.

Tabela 1 - Limites máximos de fumonisinas recomendados ao consumo humano para alimentos à base de milho nos EUA.

| <b>Produto</b>  | <b>Fumonisinas Totais<br/>(FB<sub>1</sub>+FB<sub>2</sub>+FB<sub>3</sub>, µg/kg)</b> |
|---|---|
| Produtos de grãos de milho                                  | 2.000   |
| Produtos de milho (integral e sem germen) triturados a seco | 4.000   |
| Farelo de milho   | 4.000   |
| Milho destinado à farinha                                   | 4.000   |
| Milho destinado à pipoca                                    | 3.000   |

Fonte: FDA (2000).

No Brasil, a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) estabelece limites máximos de fumonisinas (FB<sub>1</sub>+FB<sub>2</sub>) em milho e seus derivados (Tabela 2).

Tabela 2 - Limites máximos tolerados para fumonisinas em milho e derivados no Brasil.

| <b>Alimento</b>   | <b>LMT (µg/kg)</b> |
|---|--------------------|
| Milho de pipoca   | 2.000              |
| Alimentos à base de milho para alimentação infantil (lactentes e crianças de primeira infância) | 200                |
| Milho em grão para posterior processamento  | 5.000              |
| Farinha de milho, creme de milho, fubá, flocos, canjica, canjiquinha                            | 1.500              |
| Amido de milho e outros produtos à base de milho  | 1.000              |

Fonte: ANVISA (2011).

Visando reduzir a exposição às fumonisinas, que podem ser encontradas em produtos de milho destinados ao consumo humano e animal, o FDA (2000) recomenda também níveis toleráveis para a alimentação animal (Tabela 3).

Tabela 3 - Limites máximos de fumonisinas recomendados ao consumo animal nos EUA

| <b>Produtos de milho destinados à alimentação de:</b>                  | <b>Fumonisinas Totais (µg/kg)</b> |
|--|-----------------------------------|
| Equínos e coelhos  | 5.000 *                           |
| Suínos e bagres  | 20.000 **                         |
| Matrizes de ruminantes, aves e mink                                    | 30.000 **                         |
| Ruminantes > 3 meses de idade para abate e mink para produção de peles | 60.000 **                         |
| Aves para abate  | 100.000 **                        |
| Outras espécies ou classes de animais de produção e pets               | 10.000 **                         |

\* Não mais que 20% da dieta  
 \*\* Não mais que 50% da dieta

Fonte: FDA (2000).

A ocorrência de fumonisinas em milho e em produtos derivados tem sido relatada em vários estudos realizados no Brasil. Queiroz et al. (2009) analisaram 3.751 amostras de grãos de milho que apresentaram uma positividade de 40,6% para fumonisinas FB1 + FB2. Oliveira et al. (2016) observaram a presença de fumonisinas (FB1+FB2) em 100% das amostras de milho analisadas, sendo que 5 a 12,5% estavam acima do limite máximo de tolerância, segundo a legislação brasileira. Concentrações acima do limite permitido também foram encontradas por De Cezaro et al. (2012) em 77,3% das amostras de milho, sendo 88,3% delas positivas para as fumonisinas FB1 e FB2. As fumonisinas B1 e B2 foram encontradas em 40 e 44 amostras, respectivamente, dentre as 81 amostras de alimentos à base de milho comercializados na cidade de Campinas, São Paulo (MACHINSKI JR.; VALENTE SOARES, 2000). Amostras de farinha de milho, fubá e pipoca foram analisadas e apresentaram alta prevalência de contaminação por FB1, 76%, 100% e 82%, respectivamente (BITTENCOURT et al., 2005; BORDIN et al., 2014).

Uma vez que as fumonisinas são termoestáveis, não sendo removidas por processamento industrial, a melhor estratégia para o controle da contaminação é impedir a infecção e a produção no campo e durante o armazenamento (ONO et al., 2011).

### 3.2 FATORES CLIMÁTICOS QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE FUMONISINAS NO MILHO

O milho, como outros cereais, é naturalmente contaminado por fungos toxigênicos. Essa infecção ocorre, principalmente, na fase final de desenvolvimento e maturação do milho, e desenvolve-se rapidamente dependendo das condições climáticas (CRUZ, 2010). Alguns destes fungos são mais favorecidos pelas condições ambientais do campo, outros se desenvolvem melhor nas condições obtidas durante o armazenamento.

A contaminação do milho por micotoxinas é, geralmente, um processo que pode iniciar no campo, aumentar durante a colheita e a secagem, e continuar no armazenamento. A extensão da contaminação varia com a localização geográfica, práticas agrônômicas e de armazenamento e a vulnerabilidade das plantas à invasão de fungos durante todas as fases de crescimento, armazenamento e processamento (FDA, 2000).

Os níveis de fumonisinas no milho são bastante influenciados por fatores ambientais como temperatura, umidade e precipitação durante os períodos de pré-colheita e colheita (SHELBY; WHITE; BAUSKE, 1994). Níveis altos de fumonisinas estão associados a climas mais quentes e secos, seguidos de períodos de alta umidade (BACON; NELSON, 1994; MILLER, 2001). Certas condições, como o estresse hídrico, a temperatura máxima durante o dia, a temperatura mínima durante a noite, a chuva durante o crescimento e a colheita, podem aumentar os níveis de infecção e a colonização sistêmica do fungo (AHANGARKANI; ROUHI; AZIZI, 2014). Além disso, os níveis de fumonisinas no milho podem aumentar sob condições impróprias de armazenamento. Por exemplo, o crescimento ideal de fungos que levam ao aumento dos níveis de fumonisinas pode ocorrer quando o teor de umidade durante o armazenamento é de 18 a 23% (BACON; NELSON, 1994).

No Brasil, existem condições climáticas propícias para o crescimento de todo tipo de fungos produtores de micotoxinas. Pereira, Carvalho e Prado (2002) afirmam que para os fungos se desenvolverem e produzirem micotoxinas são necessárias condições favoráveis de umidade, temperatura, pH e composição química do alimento. Vários estudos apontam temperatura e umidade como os principais fatores climáticos que influenciam o desenvolvimento de doenças em cereais por *Fusarium* (DOOHAN; BRENNAN; COOKE, 2003). Precipitação e radiação solar também estão entre importantes fatores climáticos que contribuem para a contaminação fúngica, pois afetam diretamente a produção de matéria seca e de grãos (SANS; GUIMARÃES, 2006; PATERSON; LIMA, 2010).

Marín et al. (1998) afirmam que a faixa de temperatura ótima para o crescimento de *F. verticillioides* situa-se entre 22,5 a 27,5°C, com atividade de água (*Aw*) mínima de 0,98. Silva, Cota e Costa (2015) corroboram com essa informação, indicando que os fungos do gênero *Fusarium spp.* têm uma faixa de temperatura ótima entre 20 e 25°C. Contudo, suas toxinas são produzidas em condições de baixas temperaturas, o que indica que esses fungos produzem as toxinas quando submetidos a choque térmico, principalmente com alternância das temperaturas diurna e noturna. A temperatura ideal para o crescimento de *F. moniliforme* e produção de FB1 é de 25 a 30°C e *Aw* de 0,98 (WARFIELDM; GILCHRIST, 1999; FANDOHAN et al., 2003; SORIANO; DRAGACCI, 2004), enquanto que pH igual a 2 e *Aw* de 0,50 são geralmente necessários para a produção de fumonisinas (MILLER, 2001).

Fatores associados com a contaminação do milho por fumonisinas foram avaliados por Atukwase, Kaaya e Muyanja (2009), que encontraram altos níveis em zona de alta altitude. Este fato foi atribuído às condições ambientais predominantes na região de clima subtropical, caracterizado por chuvas relativamente altas (750 a 900 mm), alta umidade (86 a 90%) e temperaturas relativamente baixas (12 a 24°C) durante a época de produção do milho. O milho produzido na zona de altitude alta apresentou teor de fumonisinas significativamente maior do que o milho das zonas de altitude média. Esta região tem clima tropical e a estação de produção do milho é caracterizada por chuvas mensais relativamente baixas (60 a 150 mm), baixa umidade (60 a 78%) e altas temperaturas (17 a 34°C).

Várias pesquisas na Zâmbia mostraram que os níveis mais altos de fumonisinas ocorreram em climas secos, altas temperaturas (30°C) e moderadas a altas taxas de chuvas (800 a 1.300 mm) no estágio de crescimento (FANDOHAN et al., 2003; SCHJØTH; VISCONTI; SUNDHEIM, 2009). Em 2000, a FDA informou que os níveis de fumonisinas no milho em condições de calor e seca e períodos de umidade são os mais altos (BRUNS, 2003; FANDOHAN et al., 2003; LIU et al., 2005).

Ono et al. (1999), em estudo realizado no estado do Paraná, encontraram que a combinação de alta umidade relativa e temperatura foram fundamentais para o crescimento do fungo e a subsequente contaminação com micotoxinas no campo. Modelando a produção de FB1 em função da *Aw*, Marín et al. (1999), descobriram que a concentração de FB1 aumentava com o aumento da *Aw* e era ótima em uma faixa de 15 a 30°C.

Em anos chuvosos, onde a colheita dos grãos é dificultada pelo excesso de umidade, há maiores tendências de altas contaminações. O controle de pragas, na lavoura e na armazenagem, é imprescindível para manter a sanidade dos grãos (MALLMANN; DILKIN; MALLMANN, 2014).

O clima brasileiro oferece boas condições para que essas toxinas estejam presentes nos grãos, já que as fusariotoxinas são produzidas, na sua maioria, sob alta umidade e em temperaturas de aproximadamente 20 a 26°C (ORSI et al., 2000). Ainda, condições climáticas adversas durante o ano podem acarretar altos níveis de fumonisinas no milho, indicando a importância de avaliar o risco de ocorrência dessas substâncias tóxicas no grão produzido no País.

## 4 ANÁLISE DE RISCO

A segurança do alimento visa o controle da qualidade e a inocuidade do alimento em toda a cadeia alimentar, através do estabelecimento de limites de concentração de agentes patogênicos nos alimentos. Assim, medidas sanitárias e de higiene eficazes são aplicadas durante a produção e o alimento é considerado seguro quando não representa riscos ao consumidor (ROQUE-SPECHT; CASTRO; FIOD NETO, 2007; SANT'ANA, 2007; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

Consumidores mais conscientes têm procurado cada vez mais por alimentos mais saudáveis e que não tragam riscos à saúde (ROQUE-SPECHT; CASTRO; FIOD NETO, 2007). Algumas das principais ferramentas de gestão da segurança alimentar são as Boas Práticas de Fabricação (BPF), os Procedimentos Operacionais Padronizados (POP) e o Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) (SEBRAE, 2018).

O sistema APPCC, muito utilizado pela indústria de alimentos, é bastante limitado. Por ser uma análise qualitativa, não é possível fazer estimativas de probabilidades dos riscos associados à etapa que está sendo avaliada (LAMMERDING; MCKELLAR, 2004; SANT'ANA, 2007).

A fim de garantir a segurança dos alimentos, pesquisadores, órgãos governamentais e indústrias têm buscado o desenvolvimento de diversas metodologias e ferramentas para auxiliar na identificação e na quantificação dos riscos nos alimentos. Uma dessas ferramentas é a análise de riscos, que tem ampla aplicação e foi desenvolvida para proporcionar processos decisórios mais rápidos, estruturados e cientificamente embasados (WHITING; BUCHANAN, 1997).

A análise de risco auxilia os gerentes de agências reguladoras com informações para tomadas de decisões relacionadas à segurança dos alimentos, colaborando para a proteção da saúde do consumidor e para o comércio internacional (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

Através da análise de risco, diferentes pontos de controle podem ser identificados em toda a cadeia alimentar, bem como quais ações devem ser tomadas. Além disso, é possível identificar os custos e benefícios de cada ação, permitindo um gerenciamento mais eficiente dos riscos (FAO; WHO, 2006).

Segundo Dennis et al. (2008), uma análise de risco possibilita identificar um problema, avaliar sua gravidade, considerar as alternativas de gestão possíveis, selecionar e implementar as alternativas mais adequadas e, por fim, avaliar seu impacto.

De forma mais ampla, a análise de risco é um processo lógico, estruturado e consistente, para fornecer informações sobre o risco de introdução, estabelecimento e difusão de doenças, estimando o seu impacto econômico e suas consequências para a saúde pública e animal (OIE, 2006).

Uma diretriz publicada pela FAO estabelece a análise de risco como uma componente chave do plano de *Food Safety Emergency Response* (FSER) (FAO; WHO, 2011), com o objetivo de dar suporte durante emergências em sistemas de controle de alimentos. O principal resultado dessas políticas em segurança do alimento é definir o nível aceitável de um risco microbiano, que anteriormente era expresso como um nível "tão baixo quanto razoavelmente possível" (PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013).

Em sua revisão literária, Santos et al. (2014) enfatizam a importância da análise de risco como uma ferramenta que facilita a tomada de decisão, sendo utilizada em diversas áreas do conhecimento, como engenharia, medicina, segurança dos alimentos e medicina veterinária.

Em geral, uma análise de risco em grande escala requer uma equipe multidisciplinar que deve ser formada por profissionais e especialistas de diversas áreas, como microbiologia, epidemiologia, tecnologia de alimentos, química, estatística, entre outras. É também importante a participação dos responsáveis pelas ações de controle e formadores de opinião com poder de decisão, chamados de *Stakeholders* (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008; PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013)

No Brasil, ainda poucas análises de riscos têm sido realizadas por órgãos do governo, como por exemplo, o MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), e há ainda poucos trabalhos na área (SANTOS et al., 2014).

Em contrapartida, a metodologia tem sido cada vez mais utilizada por governos internacionais. Nos EUA, os órgãos responsáveis pela fiscalização e inspeção de produtos de origem animal (USDA/FSIS) e alimentos (DHHS/FDA) têm utilizado a ferramenta como método para auxiliar nas decisões sobre questões de segurança dos alimentos, internas e externas (DENNIS et al., 2008), sendo que o desenvolvimento da análise de risco é cada vez mais parte do processo de elaboração de novas regulamentações para a segurança alimentar. (BUCHANAN; 2004). Na Europa, o órgão envolvido na coordenação e condução de análises de risco requeridas pela Comissão Europeia é o *European Food Safety Authority* (EFSA).

#### 4.1 PRINCIPAIS CONCEITOS

A análise de risco pode ser descrita como uma abordagem iterativa, realizada em várias etapas, e interativa, porque requer a participação de todos os envolvidos. Deve apresentar consistência e ser um processo aberto, transparente e totalmente documentado (CAC, 2018; LAMMERDING, 1997).

É uma metodologia formada por três componentes com objetivos distintos, mas fortemente vinculados: avaliação do risco, gestão do risco e comunicação do risco (LAMMERDING, 1997; BUCHANAN, 2004; CAC, 1999).

O primeiro deles, a avaliação de risco, tem por objetivo avaliar cientificamente a probabilidade de ocorrência e a gravidade de efeitos adversos à saúde, conhecidos ou potenciais, resultantes da exposição humana a riscos alimentares. Engloba quatro etapas: identificação do perigo; caracterização do perigo; avaliação da exposição; caracterização do risco (LAMMERDING, 1997; CAC, 1999).

A gerência de risco é o processo de tomada de decisão que se baseia, principalmente, nos resultados de uma avaliação de risco. É nessa etapa que são realizadas as decisões de controle dos riscos, desenvolvendo ações ou políticas e implementando-as (BUCHANAN, 2004; GUILHERME, 2005).

A comunicação de risco é definida como a troca de informações e de opiniões, relacionada à avaliação e gestão do risco, entre avaliadores, gestores, indústria, consumidores e outros interessados, permitindo que os processos de avaliação e gestão sejam efetivamente realizados (BUCHANAN, 2004; GUILHERME, 2005)

Segundo Buchanan (2004), juntamente com a instituição americana FDA, uma análise de risco é boa e suficiente quando é capaz de responder à questão formulada inicialmente. Sua complexidade se dá conforme a complexidade do risco, a disponibilidade de dados e do conhecimento científico e, mais importante, a complexidade das questões feitas pelos gestores de risco. Esforços devem ser feitos para apresentar os resultados de uma forma acessível aos diferentes grupos, principalmente aos tomadores de decisão. É preciso que os dados e sua coleta tenham qualidade e precisão suficientes para minimizar a incerteza na estimativa de risco (JOUVE, 2002).

#### 4.1.1 Avaliação de Risco

A avaliação de risco é o componente científico central da análise de riscos e foi desenvolvida para suprir a necessidade de informações para tomadas de decisões que visam à proteção da saúde. É um processo científico para estimar o risco, através da probabilidade de ocorrência, de um efeito adverso à saúde, conhecido ou potencial, resultante da exposição a um perigo (GUILHERME, 2005; SANT´ANA, 2007; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008). Seu principal objetivo é auxiliar os gestores de risco, com dados científicos, na compreensão da natureza e extensão do risco em segurança alimentar e para o planejamento de ações de mitigação, controle ou de prevenção, quando necessário. Deve ser objetiva, estruturada e sistemática, e seguir critérios e metodologia científicos (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008; CAC, 1999).

O *Codex Alimentarius* (CAC, 1999) divide a avaliação de riscos em quatro etapas: identificação do perigo, caracterização do perigo, avaliação da exposição e caracterização do risco. Dubugras e Pérez-Gutiérrez (2008) afirmam que não é um modelo fixo, pois, após a identificação do perigo, a ordem das demais etapas é definida de acordo com as hipóteses e os dados obtidos e, quando necessário, alguma etapa deve ser reavaliada e repetida. Para um melhor entendimento, cabe aqui destacar dois conceitos importantes:

- a) perigo (*hazard*): agente biológico, químico ou físico, ou propriedade do alimento com potencial de causar um efeito adverso à saúde;
- b) risco (*risk*): é a probabilidade da ocorrência de um evento adverso à saúde e da gravidade desse efeito, causado por um perigo (ou perigos) existente no alimento (CAC, 2018; GUILHERME, 2005; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008; FAO; WHO, 2009).

A primeira fase da avaliação de riscos é a identificação do perigo, ou seja, a determinação do seu objetivo. Tem por finalidade identificar os agentes potencialmente nocivos à saúde presentes em um determinado alimento ou grupo de alimentos (CAC, 2018), que podem ser de origem física, química ou microbiológica. Devido sua importância, essa fase deve ser realizada criteriosamente (ROQUE-SPECHT; CASTRO; FIOD NETO, 2007; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008; CAC, 1999).

Na etapa de caracterização do perigo, o objetivo é avaliar a extensão do efeito adverso à saúde associado ao perigo que foi identificado na fase anterior. Nessa fase, quando necessário, limites de ingestão são estabelecidos, isto é, uma ingestão diária aceitável ou tolerável dos agentes nocivos (GUILHERME, 2005; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

A avaliação da exposição consiste em uma análise quantitativa e/ou qualitativa que determina a relação entre a exposição a um perigo sob certas condições e o efeito adverso. Indica a quantidade do perigo e o grau de exposição aos agentes patogênicos que a população pode estar exposta (GUILHERME, 2005; ROQUE-SPECHT; CASTRO; FIOD NETO, 2007).

Por último, a caracterização do risco é a integração dos resultados dos passos anteriores (caracterização do perigo e avaliação da exposição), a fim de gerar uma estimativa do risco. Segundo a definição do Codex (2018), a caracterização do risco é a estimativa qualitativa e/ou quantitativa da probabilidade da ocorrência e da gravidade de um efeito adverso, conhecido ou potencial, em uma determinada população, incluindo as incertezas a esta associada. Essa etapa é quando as perguntas levantadas pelo gestor de risco são respondidas e servem de base para as tomadas de decisões (CAC, 1999).

Um princípio fundamental é que a avaliação de risco deve estar baseada em dados científicos de qualidade (acurácia e confiabilidade), que podem ser quantitativos e/ou qualitativos, coletados e analisados de forma adequada através de uma metodologia validada (JOUVE, 2002; BUCHANAN, 2004; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008). As fontes de informação devem ser documentadas e podem ser (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008):

- a) estudos publicados na literatura científica;
- b) relatórios nacionais e internacionais realizados por órgão e/ou entidade governamental;
- c) pesquisas realizadas pela indústria;
- d) pesquisas sobre surtos de doenças;
- e) consulta de grupos de especialistas, quando não se dispuser de conjuntos de dados específicos.

Os resultados de uma avaliação de risco podem ser qualitativos ou quantitativos. No primeiro, o resultado é expresso em escalas descritivas/categóricas, utilizando termos como

“alto”, “médio” ou “baixo”. A avaliação quantitativa é uma análise matemática de dados numéricos, baseada em modelos matemáticos (e probabilísticos), que produz uma expressão numérica do risco, através de estimativas pontuais ou distribuições de probabilidades, oferecendo uma noção mais precisa da ocorrência de um evento adverso (LAMMERDING, 1997, 2004; JOUVE, 2002).

No Brasil, Santos et al. (2014) afirmam que a maioria das avaliações de risco realizadas na área de segurança alimentar e saúde animal são qualitativas, pois os processos são mais rápidos, simples e fáceis, além de serem mais facilmente entendidos pelos gestores de riscos e, principalmente, continuam sendo a única opção quando dados, tempo ou outros recursos são limitados. No entanto, os resultados obtidos deste processo são insuficientes, pois não fornecem informações de quais ações devem ser priorizadas. (JOUVE, 2002; SANT’ANA; FRANCO, 2010).

Em ambos os casos, a ênfase dada é na descrição da incerteza e na variabilidade da informação usada na estimativa de risco. Porém, uma escala numérica de medida é geralmente mais informativa do que uma escala qualitativa (LAMMERDING, 1997; FAO; WHO, 2009). O desenvolvimento da abordagem quantitativa é bastante encorajado, em função de proporcionar mais transparência na percepção do risco, permitindo comparações entre processos ou entre a efetividade de diferentes ações de controle, por exemplo (JOUVE, 2002). Assim, as avaliações quantitativas são desejáveis, pois há uma base mais sólida para as tomadas de decisões. Entretanto, a dificuldade para a realização desse tipo de análise é sua complexidade, já que demanda um tempo maior quando comparado com a análise qualitativa. A falta de dados e/ou a falta de habilidade para lidar com as ferramentas matemáticas e computacionais requeridas para o desenvolvimento desses modelos de riscos é um fator limitante que impossibilita, às vezes, a sua realização (FAO; WHO, 2009; SANTOS et al., 2014).

## 4.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO

Uma avaliação quantitativa de riscos pode ser realizada através de dois métodos: determinista ou probabilístico (FAO; WHO, 2009).

A avaliação é determinística quando estimativas pontuais são usadas para descrever as variáveis do modelo, como a média ou o percentil dos dados medidos como dados de entrada (LAMMERDING, 1997; PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013).

Os modelos determinísticos usam um único parâmetro de entrada para cada conjunto de dados e não incluem aleatoriedade ou probabilidade em sua estimativa, ignorando variabilidades e incertezas (JOUVE, 2002; LAMMERDING; MCKELLAR, 2004). Nessa abordagem, é possível analisar apenas cenários individuais, que pode ser um cenário de pior caso, de melhor caso ou de caso médio, dependendo do parâmetro estimado (PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013). Por exemplo, o 95° percentil poderia ser uma estimativa da concentração média (CFU/g) de *Salmonella* em carne moída num cenário de pior caso. (LAMMERDING; MCKELLAR, 2004).

O enfoque probabilístico fornece uma descrição matemática do processo da transmissão de riscos desde a produção ao consumo de um alimento, sendo possível criar e analisar diferentes cenários de risco. A análise probabilística (estocástica) utiliza distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias inseridas no modelo, com base em dados experimentais ou conhecimento de especialistas, que representam incerteza e variabilidade. Isso requer um modelo matemático e o resultado é expresso por uma distribuição de probabilidade do risco (JOUVE, 2002; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

Um exemplo dessa abordagem pode ser dado pela avaliação da ocorrência de um patógeno em uma porção do alimento, ou seja, a probabilidade de que uma porção selecionada aleatoriamente esteja contaminada com o patógeno, no qual o resultado seria uma distribuição de probabilidade da concentração do patógeno nas porções do alimento que estão contaminadas e que, posteriormente, seria analisado e interpretado pelos gestores de risco. Embora considerado complexo, tal enfoque fornece avaliações mais profundas do risco estudado e é bastante representativo do mundo real (FAO; WHO, 2009)

Através dos dois métodos, é possível se obter informações que auxiliam na tomada de decisão. Porém, o método probabilístico é uma estimativa mais completa, pois todos os cenários possíveis são considerados nas distribuições de probabilidade, e também leva em conta a variabilidade e a incerteza. Vários estudos probabilísticos de avaliação de risco têm sido publicados nos últimos anos (SANT'ANA; FRANCO; SCHAFFNER, 2012; LEE et al., 2015; CAMPAGNOLLO et al., 2018).

Como qualquer análise de previsão, a mensuração de riscos envolve um nível de desconhecimento sobre as informações, gerando incertezas (FAO; WHO, 2005). Incertezas e variabilidades devem ser consideradas na tomada de decisão pelo gestor de risco, pois são indicações quantitativas da qualidade do risco estimado, sugerindo a confiabilidade e o quanto a estimativa representa o risco real. Observando o grau de incerteza dos métodos de avaliação do risco e a variabilidade dos fatores, o gerenciamento é capaz de avaliar se a caracterização

está próxima da realidade, para definir a probabilidade de ocorrência do fenômeno em termos numéricos (DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

A incerteza pode ser definida como a possibilidade de haver erro ao se fazer um cálculo ou extrair uma medida. É uma característica associada ao desconhecido, em muitos casos, há incertezas porque não existem dados suficientes ou a informação científica não está disponível, ou ainda, pois os fenômenos avaliados não são conhecidos suficientemente. Em avaliações quantitativas de risco, pode haver incerteza de parâmetro, incerteza de modelo e incerteza de cenário, ou seja, o erro pode ocorrer em qualquer uma das etapas, como na determinação de variáveis, no uso de métodos para resolução de problemas ou até mesmo na tomada de decisão. Na incerteza, a estimativa é feita, porém existe uma possibilidade de erro. No entanto, esse erro pode ser diminuído em futuras avaliações de risco que podem ser aperfeiçoadas através da obtenção de mais dados de alta qualidade, de medidas experimentais adicionais ou por pesquisas mais focadas (JOUVE, 2002; LAMMERDING; MCKELLAR, 2004; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

A variabilidade é uma característica do fenômeno que pode diferir de uma observação para outra. A variabilidade é importante, pois reflete o fato de indivíduos diferentes estarem sujeitos a diferentes exposições e riscos, e diferentes métodos de manipulação de alimentos produzirem níveis diferentes de risco. Por exemplo, as pessoas consomem quantidades diferentes de um alimento e o nível de um perigo presente em um alimento pode variar também de uma porção para outra. Certo grau de variabilidade entre indivíduos, animais, bactérias ou plantas sempre irá existir e nem sempre é possível obter informação a respeito dessa variação. A variabilidade nos fatores de entrada resulta em variabilidade no risco. (VOYSEY; JEWELL; STRINGER, 2002; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008; FAO; WHO, 2009).

Em resumo, os termos variabilidade e incerteza, embora possam ser facilmente confundidos, descrevem fenômenos distintos. A incerteza representa uma falta de conhecimento sobre o evento, assim, quando novas informações surgem, ela pode ser diminuída. Já a variabilidade representa a heterogeneidade de um fenômeno bem caracterizado e não pode ser reduzida com medições posteriores (VOSE, 2008). A redução do risco, quando o resultado está sendo influenciado pela incerteza em um parâmetro, pode ser feita realizando mais pesquisas e/ou coleta de dados para melhor entender o fator, e, assim, refazer a avaliação. No caso da variabilidade, é indicado que se faça melhor controle do processo para reduzir o risco (SANT'ANA, 2007).

Assim, em relação a essas duas componentes, os modelos quantitativos de risco podem ser classificados de duas formas: de primeira ou segunda ordem (HOFFMAN; HAMMONDS, 1994). Nos modelos de primeira ordem (unidimensionais), não há separação entre as duas componentes, sendo que a variabilidade e incerteza são expressas por uma única distribuição de probabilidade. Nos modelos de segunda ordem (bidimensionais), a variabilidade é explicada pelos valores de cada distribuição de probabilidade, enquanto a incerteza é considerada como um conjunto de distribuições de probabilidade. Nauta (2000) enfatizou a necessidade de separar a variabilidade da incerteza e, segundo Pérez-Rodríguez e Valero (2013), modelos de segunda ordem são preferidos, pois o processo de tomada de decisão é substancialmente beneficiado por essa abordagem, auxiliando melhor o gestor de risco. No entanto, estudos fazendo uso de modelos de segunda ordem ainda são escassos, principalmente pela necessidade de se obter dados de alta qualidade e técnicas de simulação mais sofisticadas (NAUTA, 2000; PÉREZ-RODRÍGUEZ et al., 2007; OTTOSON et al., 2011). Ainda assim, Sant'Ana e Franco (2010) esclarecem que a variabilidade deve ser sempre considerada numa avaliação quantitativa de risco e a incerteza reduzida tanto quanto possível.

Inevitavelmente, o processo de selecionar e analisar dados e modelos que melhor auxiliem os gestores de riscos envolve um julgamento subjetivo. No entanto, recomendações são dadas pela FAO: (i) avaliar o quão bem o modelo é suportado pelos dados disponíveis; (ii) quão eficazes são os resultados no auxílio aos tomadores de decisão e (iii) quantas suposições foram feitas na criação do modelo e a robustez dessas premissas (FAO; WHO, 2009).

Após a definição do modelo quantitativo de risco, é necessário que se realize uma validação para avaliar a sua acurácia antes de aplicar e fundamentar a tomada de decisão. A validação é, então, o processo de avaliação de um modelo de risco que examina a sua precisão em relação a dados reais, podendo ser realizada pela comparação da estimativa do modelo com dados de estudos epidemiológicos, como estudos de coorte e de caso-controle. No entanto, há uma necessidade crucial de que esses dados estejam disponíveis e sejam de alta qualidade, garantindo uma validação precisa e, conseqüentemente, melhores estimativas dos riscos. Assim, os modelos não podem ser usados com confiança até que sua validação seja feita. No entanto, apesar de ser bastante aconselhável, essa atividade nem sempre é uma prática (JOUVE, 2002; SANT'ANA, 2007; DUBUGRAS; PÉREZ-GUTIÉRREZ, 2008).

Contudo, a avaliação de risco não encerra a questão da segurança do alimento. O processo deve estar em constante atualização, pois os programas de vigilância podem apontar novos perigos e pesquisas científicas podem gerar novos dados que modifiquem os resultados da análise.

### 4.3 MÉTODO DE AMOSTRAGEM DE MONTE CARLO

Uma das alternativas para minimizar a incerteza e a variabilidade em uma avaliação quantitativa de riscos é a obtenção de mais dados e de melhor qualidade. Entretanto, essa tarefa, às vezes, pode não ser possível e é preciso, então, buscar outros caminhos. O principal deles é trabalhar com distribuições de probabilidade que representem os parâmetros. Elas podem ser construídas a partir de dados empíricos, conhecimento próprio sobre o fenômeno ou opiniões de especialistas (JOUVE, 2002; LAMMERDING; MCKELLAR, 2004).

As técnicas mais utilizadas de avaliação de incerteza e variabilidade em um modelo probabilístico de avaliação de risco compreendem métodos numéricos, onde diversos tipos de distribuições de probabilidade podem ser aplicadas (PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013). Uma abordagem analítica probabilística chamada simulação de Monte Carlo pode ser usada para gerar essas distribuições de probabilidades.

A análise de Monte Carlo é um método numérico que permite o uso de diversos tipos de distribuições de probabilidade, onde as variáveis podem ter diferentes probabilidades. A técnica envolve a amostragem aleatória de cada distribuição de probabilidade no modelo, a fim de produzir um grande número de cenários (iterações) (LAMMERDING, 1997; JOUVE, 2002; PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013). Essa abordagem resulta em uma estimativa de risco mais realista, incorporando a variabilidade inerente e as incertezas existentes nos dados e nos modelos usados para descrever a situação de risco (LAMMERDING, 1997). Apesar de ser uma metodologia complexa e que exige conhecimentos matemáticos e estatísticos, vem se tornando a abordagem preferencial entre avaliadores e gestores de risco, principalmente pela existência de softwares comerciais, o que permite uma fácil aplicação por usuários não tão familiarizados com métodos numéricos (PÉREZ-RODRÍGUEZ; VALERO, 2013).

A simulação de Monte Carlo permite a entrada de distribuições de probabilidade para cada variável inserida no modelo de risco. Nesse processo de simulação, amostras aleatórias são selecionadas de cada distribuição de probabilidade de entrada do modelo. A seleção de valores das distribuições de probabilidade é chamada amostragem, e cada cálculo é chamado de iteração. Geram-se conjuntos de amostras e os resultados de cada iteração são computados, geralmente na forma de uma função densidade de probabilidade. A cada iteração, um valor amostral é estimado para cada parâmetro do modelo, produzindo um novo cenário. Este procedimento é feito centenas ou milhares de vezes e registra-se cada resultado, sendo que os valores mais prováveis são selecionados com mais frequência que os menos prováveis. O resultado de todo esse processo é uma distribuição de probabilidade do risco e reflete a incerteza

e a variabilidade nos dados usados na análise (LAMMERDING, 1997; LAMMERDING; MCKELLAR, 2004; SANT'ANA; FRANCO, 2010; PALISADE, 2018).

A fim de garantir um modelo com estimativas precisas e confiáveis, o número de iterações a serem executadas deve ser bem estabelecido. Este deve ser suficiente para produzir estimativas fidedignas e minimizar o tempo de geração do modelo de risco. À medida que se aumenta a quantidade de iterações, as distribuições de probabilidade vão se tornando mais estáveis até que elas alcancem a convergência. Assim, o número de iterações necessárias depende do modelo que está sendo simulado e das distribuições de probabilidade envolvidas. Modelos mais complexos com distribuições altamente assimétricas necessitarão de mais iterações do que modelos mais simples. (PALISADE, 2018; SANT'ANA, 2007).

Há uma variedade de softwares dedicados à simulação de Monte Carlo, que simplificam a aplicação da técnica e facilitam o processo de avaliação de risco. A seguir serão listados alguns disponíveis e recomendados por CAST (2006):

- a) @Risk (Palisade Co, USA);
- b) Crystal Ball (Decisioneering Inc., USA);
- c) Analytica (Lumina, USA): utiliza diagramas de influência;
- d) WinBUGS<sup>4</sup>: modelos estatísticos bayesianos utilizando métodos de Monte Carlo via cadeias de Markov (*Markov chain Monte Carlo-MCMC*). É gratuito e tem uma versão de código aberto (OpenBUGS);
- e) CREMe<sup>5</sup>: usado para modelagem dose-resposta, principalmente para avaliar a exposição a produtos químicos;
- f) Mathematica (Wolfram Research, Inc., USA) e Matlab (The MathWorks, Natick, USA): linguagens de programação matemática de alta tecnologia e capacidade de simulação;
- g) R<sup>6</sup>, SAS (SAS Institute Inc., USA) e S-Plus (Insightful Corp., USA): eficientes linguagens de programação estatística. O R é de código aberto e gratuito.

Segundo Sant'Ana e Franco (2010), @Risk (Palisade Co., USA) e Crystal Ball (Decisioneering Inc., USA) são as ferramentas mais utilizadas pela facilidade de operação, ambas são *add-in* do Microsoft Excel.

---

<sup>4</sup> Disponível em: [www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/welcome.shtml](http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/welcome.shtml)

<sup>5</sup> Disponível em: [www.cremesoftware.com](http://www.cremesoftware.com)

<sup>6</sup> Disponível em: [www.R-project.org](http://www.R-project.org)

Embora a modelagem de Monte Carlo seja relativamente simples de entender e implementar, e é, de longe, a técnica mais amplamente utilizada, alguns cuidados devem ser tomados. Apesar da facilidade de uso de alguns desses softwares, é necessário um completo entendimento da situação que está sendo modelada, bem como uma base das funções de distribuição de probabilidade utilizadas nas variáveis de entrada (LAMMERDING, 1997).

#### **4.3.1 Distribuições de Probabilidade**

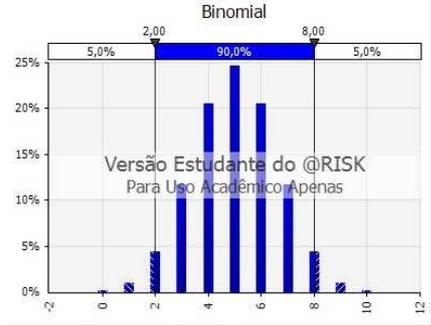
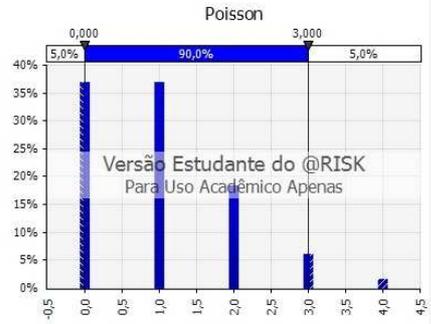
Segundo Vose (2008), a precisão de uma análise de risco depende muito do uso adequado das distribuições de probabilidade para representar a incerteza e a variabilidade do problema com acurácia. A legitimidade da distribuição de probabilidade do risco (saída) depende totalmente das distribuições das variáveis de entrada, que devem ser tão realistas quanto possível. Ainda, o autor indica que uma falha muito comum em modelos de análise de risco é a escolha incorreta dessas distribuições de probabilidade, principalmente pelo desconhecimento dos fundamentos de probabilidade.

Voysey, Jewell e Stringer (2002) enfatizam que a escolha dessas distribuições é uma importante tarefa e deve ser baseada em suas propriedades, simétrica ou assimétrica, truncada ou não, e se valores extremos (*outliers*) devem ser permitidos. A maioria dos softwares estatísticos, anteriormente citados, oferece uma ampla variedade de distribuições de probabilidade a serem atribuídas aos dados de entrada. Dessa forma, a escolha deve ser feita com cautela, pois pode ser bastante confusa (VOSE, 2008).

Vose (2008) classifica as distribuições estatísticas em 4 grupos: discreta e contínua, limitada e ilimitada, paramétrica e não paramétrica e univariada e multivariada. As distribuições mais comuns aplicadas à análise de riscos estão apresentadas na Tabela 4 (VOSE, 2000; LAMMERDING; FAZIL; PAOLI, 2001; FORBES et al., 2010; PALISADE, 2016).

Tabela 4 - Descrição de distribuições de probabilidade

(continua)

| Distribuição | Descrição e formato   |
|--------------|---|
| Binomial     | <p>É uma distribuição discreta que retorna apenas valores inteiros maiores ou iguais a zero. Modela o risco de eventos, isto é, a ocorrência ou não de um evento, denominados de sucessos e fracassos.</p>    |
| Poisson      | <p>É uma distribuição de probabilidade discreta, cuja a variável aleatória (número de eventos) só pode assumir valores discretos (0, 1, 2, 3...). Modela o número de eventos observados em um período.</p>   |
| Beta         | <p>Distribuição contínua que descreve a incerteza da probabilidade de ocorrência de um evento restrito a ocorrer dentro de um intervalo definido por um valor mínimo e máximo. Na avaliação de riscos, pode ser usada para modelar a prevalência de patógenos.</p>    |
| Exponencial  | <p>Descreve o tempo de espera para a primeira ocorrência de um processo que é contínuo no tempo e de intensidade constante, ou o intervalo de tempo entre as ocorrências de um evento. É usada na teoria das filas para modelar, por exemplo, o tempo de espera até um atendimento ou até a falha de um sistema.</p>  |

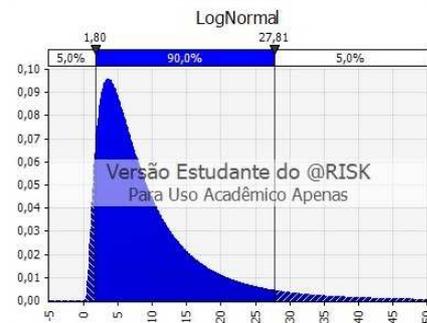
(continuação)

## Distribuição

## Descrição e formato

## LogNormal

É a distribuição de probabilidade contínua de uma variável aleatória, cujo logaritmo natural segue uma distribuição normal. É uma distribuição de números reais positivos. Pode ser usada para descrever a concentração de microrganismos nos substratos, por exemplo.



## Gama

Relacionada às distribuições Exponencial e Poisson, representa a distribuição de tempos entre chegadas para diferentes eventos de um processo Poisson.



## Normal

É uma distribuição contínua, das mais importantes e conhecidas na teoria da probabilidade, utilizada em diversos campos de estudo. A distribuição é simétrica em torno da média e a curva é determinada em torno do desvio padrão, os valores centrais são os de maior probabilidade de ocorrência.



## Triangular

Uma distribuição contínua utilizada, geralmente, quando não se tem informação suficiente sobre os dados. Requer somente uma estimativa dos valores mínimo, máximo e mais provável que a variável pode assumir. Muito usada pelos avaliadores de riscos, devido à sua propriedade intuitiva na definição dos parâmetros.



(conclusão)

## Distribuição

## Descrição e formato

Uniforme

Todos os valores têm a mesma probabilidade de ocorrência e requer estimativas apenas dos valores mínimo e máximo que a variável pode assumir, sendo utilizada somente quando poucos dados estão disponíveis ou não existem. Por considerar mesma probabilidade para todos os valores, não é uma boa representação da realidade. No entanto, é extremamente importante, pois é usada por algoritmos de números aleatórios como um primeiro passo para gerar amostras de outras distribuições.



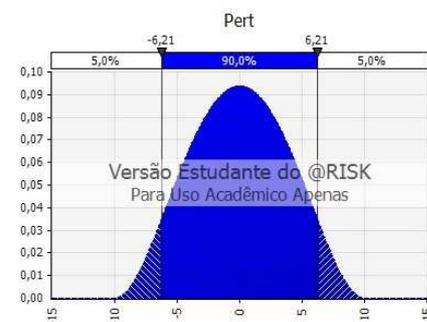
## Weibull

É uma distribuição contínua que modela o tempo até a ocorrência de um evento, onde a probabilidade de ocorrência muda com o tempo. Um exemplo de sua aplicação pode ser o aumento da quantidade de toxina produzida por um microrganismo com o passar do tempo e consequente aumento da probabilidade de uma toxinfecção alimentar.



## Pert

É a distribuição PERT (*Program Evaluation and Review Technique-Program de Avaliação e Revisão Técnica*) é muito similar à distribuição Triangular, pois requer os mesmos parâmetros. Porém, os valores que se encontram entre o valor mais provável e os dois extremos têm maior probabilidade de ocorrência do que na distribuição triangular,



---

isto é, os extremos não são tão enfatizados, resultando em cerca de 10% menos incerteza, em comparação à triangular.

---

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

#### 4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma das principais vantagens da modelagem de Monte Carlo é a capacidade de determinar quais variáveis do modelo estão fortemente correlacionadas com os dados de saída, ou seja, com o risco avaliado (LAMMERDING; FAZIL; PAOLI, 2001). Sendo que, muitas vezes, a identificação dos fatores de maior influência no risco é mais importante do que a própria estimativa de risco. Se uma avaliação de risco deve auxiliar nas decisões do gerenciamento de risco, a caracterização desse risco deve identificar os fatores que mais o influenciam (VOYSEY; JEWELL; STRINGER, 2002).

Assim, análises adicionais podem ser realizadas para estimar a importância relativa de cada fator de entrada, identificando os fatores que mais influenciam no resultado do risco. A identificação e a descrição desses fatores geralmente são feitas pela análise de sensibilidade, que é o processo de determinação dos coeficientes de sensibilidade. Seu principal objetivo é identificar as variáveis que mais afetam a magnitude do risco (LAMMERDING, 1997; VOYSEY; JEWELL; STRINGER, 2002; JOUVE, 2002). A maneira mais comum de visualizar os resultados de uma análise de sensibilidade é pelo gráfico de tornado, que mostra com clareza a influência dos parâmetros de entrada do modelo sobre o parâmetro de saída estimado (SANT'ANA; FRANCO, 2010).

Assim, é possível perceber que a simulação de Monte Carlo possui uma série de vantagens em relação à análise determinística (estimativa de um único ponto). Seus resultados mostram não apenas o que poderia ocorrer como também a probabilidade de ocorrência de determinado evento. Na simulação de Monte Carlo é possível identificar quais *inputs* tem o maior efeito nos resultados finais. Permite modelar variáveis de entrada correlacionadas, representando, assim, a realidade do fenômeno. Por fim, a visualização de diferentes resultados e suas chances de ocorrência através de gráficos é bastante importante para as próximas etapas da análise de risco, que são o gerenciamento e a comunicação do risco (PALISADE, 2018).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 FATORES CLIMÁTICOS DAS DIFERENTES REGIÕES PRODUTORAS DE MILHO

O cultivo do milho no Brasil está dividido em duas safras, com principais regiões de produção diferentes em cada uma delas. Na 1ª safra (2016/2017), com 65% do total produzido, destacam-se os 3 estados da região Sul (RS, SC, PR) e MG. A 2ª safra, também chamada de safrinha, vem crescendo sua produção ao longo dos anos, sendo que desde a safra 2011/2012 representa uma fatia maior na produção em relação à 1ª safra. Responsáveis por 76% da colheita na 2ª safra estão 3 estados, MT, PR e MS (CONAB, 2017). Esse cenário de cultivo do milho serviu de base para os modelos de risco simulados nesse trabalho.

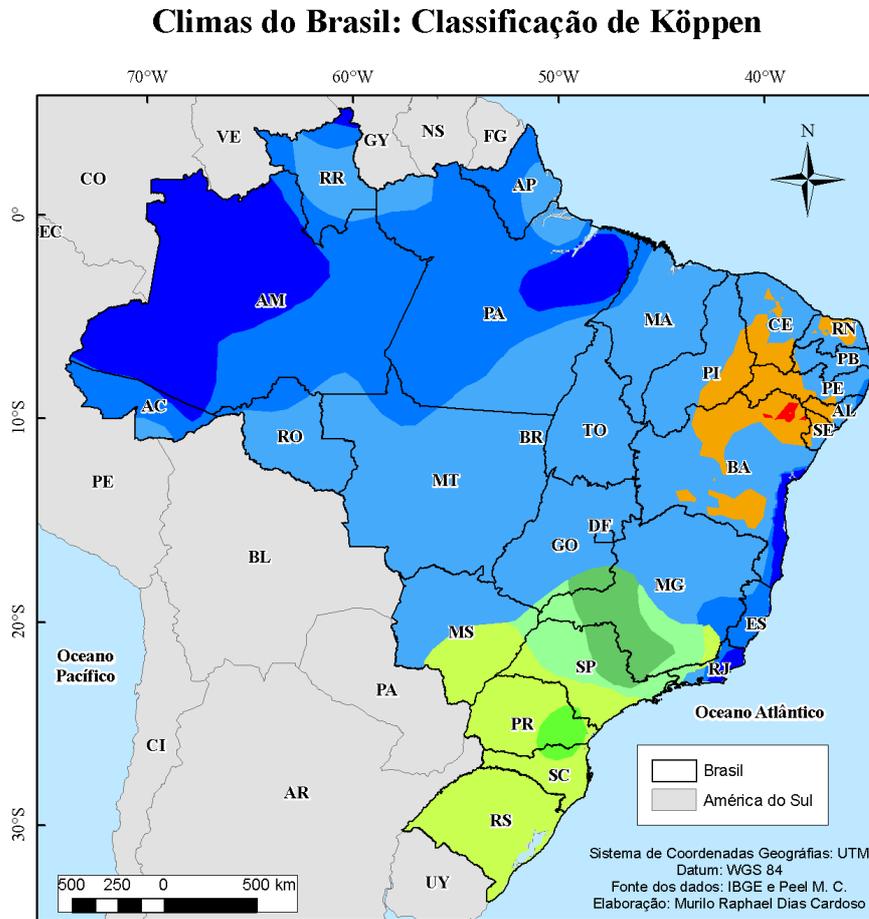
Com a finalidade de conhecer o comportamento da contaminação de fumonisinas nas duas safras e obter estimativas de risco bem representativas dos diferentes tipos climáticos, as probabilidades de ocorrência e os níveis de contaminação do milho por fumonisinas foram estimados dentro de 4 perspectivas, 2 em cada safra.

De acordo com a classificação climática de Köppen<sup>7</sup>, os estados da região Sul do País estão categorizados dentro do mesmo tipo climático (Figura 1). Dessa forma, o modelo de risco para a 1ª safra foi realizado com 2 conjuntos de dados, um para a região Sul e outro para o estado de MG, pois pertence à outra categoria climática. Da mesma maneira procedeu-se na 2ª safra, sendo PR *versus* MT e MS em conjunto.

---

<sup>7</sup> Mais conhecida por classificação climática de Köppen, é o sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia (ALVARES et al., 2013).

Figura 1 - Classificação climática de Köppen-Geiger do Brasil



**Classificação Climática: Köppen**

|  |   |
|--|---|
| <span style="color: blue;">■</span> Af - Clima tropical úmido ou Clima Equatorial                          | <span style="color: lightgreen;">■</span> Cfa - Clima temperado úmido com Verão quente                  |
| <span style="color: blue;">■</span> Am - Clima de monção   | <span style="color: lightgreen;">■</span> Cfb - Clima temperado úmido com Verão temperado               |
| <span style="color: lightblue;">■</span> Aw - Clima Tropical com Estação seca no inverno                   | <span style="color: lightgreen;">■</span> Cwa - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão quente   |
| <span style="color: orange;">■</span> BSh - Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude         | <span style="color: darkgreen;">■</span> Cwb - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão temperado |
| <span style="color: red;">■</span> BWh - Clima das regiões desérticas quentes de baixa latitude e altitude |   |

Fonte: Cardoso (2018b)

Os dados climáticos foram extraídos do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa), que é um banco de dados de apoio às atividades de ensino e pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), responsável por coletar e disponibilizar dados de seus estudos climáticos. Armazenadas desde 1961, séries históricas de dados meteorológicos são disponibilizadas das 265 estações meteorológicas convencionais da rede de estações do INMET, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial. A base de dados disponibiliza 17 variáveis de todo o território brasileiro. Para esse trabalho, foram utilizadas 8 delas:

- a) insolação (horas);
- b) nebulosidade (décimos);
- c) número de dias de precipitação
- d) precipitação total (mm);
- e) temperatura máxima (°C);
- f) temperatura média (°C);
- g) temperatura mínima (°C);
- h) umidade relativa (%).

A amostra coletada consistiu de dados mensais de um período de 10 anos (2008 a 2017) de todas as estações meteorológicas disponíveis para os estados objetos desse estudo. Com isso, vale destacar que uma das limitações do modelo de risco que está sendo proposto aqui, é o fato de que as estações meteorológicas selecionadas não se limitam às regiões de maior produção dentro de cada estado avaliado, pois abrangem todo o espaço territorial da unidade federativa.

Os meses selecionados seguiram o Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2017 (CONAB, 2018), período em que o milho se encontra no campo (Tabela 5).

Tabela 5 - Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2017<sup>8</sup>

| SAFRA | REGIÃO | PRIMAVERA |     |     | VERÃO            |          |     | OUTONO   |          |     | INVERNO |         |     |
|-------|--------|-----------|-----|-----|------------------|----------|-----|----------|----------|-----|---------|---------|-----|
|       |        | OUT       | NOV | DEZ | JAN              | FEV      | MAR | ABR      | MAI      | JUN | JUL     | AGO     | SET |
| 1     | RS     | Plantio   |     |     | Plantio/Colheita | Colheita |     |          | Colheita |     |         | Plantio |     |
|       | SC     | Plantio   |     |     | Plantio/Colheita | Colheita |     |          | Colheita |     |         | Plantio |     |
|       | PR     | Plantio   |     |     | Colheita         |          |     | Colheita |          |     | Plantio |         |     |
|       | MG     | Plantio   |     |     | Colheita         |          |     | Colheita |          |     | Plantio |         |     |
| 2     | MT     | Plantio   |     |     | Colheita         |          |     | Colheita |          |     | Plantio |         |     |
|       | MS     | Plantio   |     |     | Colheita         |          |     | Colheita |          |     | Plantio |         |     |
|       | PR     | Plantio   |     |     | Colheita         |          |     | Colheita |          |     | Plantio |         |     |

Fonte: CONAB (2018)

<sup>8</sup> Legenda:

■ Plantio ■ Colheita ■ Plantio/Colheita

## 5.2 MODELO DE AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCOS DA CONTAMINAÇÃO DO MILHO POR FUMONISINAS SOB A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

O modelo de avaliação quantitativa de risco de fumonisinas em milho foi construído para o período de campo (plantio e colheita), tempo médio de 120 dias em que a planta permanece sob diferentes condições climáticas.

O objetivo foi estimar a probabilidade de contaminação do milho, por fumonisinas, nas principais regiões produtoras, associada às condições climáticas favoráveis à produção dessa toxina. Foi avaliada, também, a probabilidade da concentração ultrapassar os limites toleráveis estabelecidos pela ANVISA.

Para a construção do modelo de risco, foi necessária uma vasta pesquisa na literatura para encontrar uma relação entre a ocorrência de fumonisinas no milho de campo e as variáveis climáticas (ANEXO A).

Bernd et al. (2008) desenvolveram modelos matemáticos para prever a produção de fumonisinas, em função de temperatura e umidade, em amostras de grãos de milho. Estudos indicam que esses são os principais fatores que contribuem para a produção dessas toxinas no milho, além de precipitação e radiação solar (PEREIRA; CARVALHO; PRADO, 2002; DOOHAN; BRENNAN; COOKE, 2003; SANS; GUIMARÃES, 2006; PATERSON; LIMA, 2010).

Para que o modelo desenvolvido por Bernd et al. (2008) pudesse ser aplicado ao modelo de risco aqui proposto, foi necessário realizar uma transformação dos valores de umidade para se obter a umidade relativa do ambiente, visto que a equação foi ajustada com o teor de água do milho.

Assim, identificou-se a umidade de equilíbrio como uma conversão adequada, considerando que ela corresponde ao teor de água (umidade) que o produto alcançará ao ser exposto ao ar, com valores de temperatura e umidade relativa conhecidos. Conforme Navarro e Noyes (2011), a equação de Henderson e a de Chung-Pfost são as que melhor expressam o teor de umidade de equilíbrio de grãos, e modificações empíricas melhoraram substancialmente essas equações, tornando-as aplicáveis em faixas mais amplas de temperaturas e umidades relativas. Com isso, o ajuste foi realizado pela equação de Henderson Modificada (Equação 1), onde a Umidade de Equilíbrio ( $U_e$ ) é calculada em função da temperatura ( $T$ , °C) e umidade relativa (UR, %) do ar; e das constantes K, C e N que são definidas para cada tipo de grão. Para

o milho, os valores são  $8,6541 \times 10^{-5}$ , 49,81 e 1,8634, respectivamente (PFOST; RENGIFO; SAUER, 1976 apud NAVARRO; NOYES, 2011).

Equação 1 - Equação de Henderson Modificada

$$U_e = \left[ -\frac{\ln(1 - UR)}{K(T + C)} \right]^{\frac{1}{N}}$$

Segundo Almeida et al. (2005), independente de como o fungo penetre na planta, condições climáticas serão necessárias para que a colonização prossiga. Ottoni (2008) identificou que a alta incidência de *Fusarium spp.* não está diretamente associada a altos níveis de fumonisinas e Silva et al. (2017) também concluíram que a maior concentração de fumonisinas nos grãos não pode ser explicada por diferenças nos níveis de infecção fúngica. Assumiu-se, então, que o fungo já estaria presente na planta.

Com isso, a relação entre as condições climáticas e a produção de fumonisinas foi inserida no modelo de risco pela equação de regressão estimada por Bernd et al. (2008) para fumonisinas totais. Os parâmetros e respectivos coeficientes podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Modelo matemático para a produção de fumonisinas em milho<sup>9</sup>

| Termo do modelo   | Coeficiente    | Significância |
|-------------------|----------------|---------------|
| Constante         | 4,473 ± 1,435  | *             |
| $X_1$             | 3,900 ± 1,310  | *             |
| $X_2$             | 1,581 ± 1,647  | NS            |
| $X_3$             | -5,374 ± 1,310 | *             |
| $X_3^2$           | 3,701 ± 1,944  | NS            |
| $X_1^2 \cdot X_2$ | -3,645 ± 2,017 | NS            |
| $X_1 \cdot X_3$   | -5,065 ± 1,605 | *             |
| $X_2 \cdot X_3$   | -3,465 ± 1,31  | *             |
| $X_2 \cdot X_3^2$ | 3,141 ± 2,017  | NS            |

Fonte: Bernd et al. (2008)

<sup>9</sup> Legenda: NS = não significativo; \* =  $p < 0,05$ ;  $X_1$  = umidade;  $X_2$  = inóculo;  $X_3$  = temperatura.

O modelo de avaliação quantitativa de riscos de fumonisinas no milho em condições de campo foi construído em uma planilha de Excel (Microsoft, Redmond / WA, versão 2016). Através da amostragem de Monte Carlo, foram realizadas simulações com 50.000 iterações utilizando o software @Risk (Palisade Corporation, Ithaca / NY, versão Estudante 7.5).

As distribuições estatísticas das variáveis do modelo de risco foram definidas pela ferramenta de ajuste de distribuição do @Risk. Para definir a distribuição com melhor ajuste dos dados, foram utilizados os testes de AIC (Critério de informação de Akaike) e BIC (Critério de informação bayesiano), fortemente recomendados por Palisade (2016). As estatísticas de AIC e BIC são calculadas com base no logaritmo da função de verossimilhança e consideram o número de parâmetros, sendo que a escolha leva em conta a distribuição com menos parâmetros a serem ajustados.

Cabe ressaltar que uma seleção de modelos não é precisa, pois os modelos construídos são aproximações da realidade. A escolha deve ser pelo melhor modelo, dentre aqueles que foram ajustados, para explicar o fenômeno em estudo.

A Tabela 7 apresenta o modelo de risco proposto nesse trabalho, onde é possível verificar as distribuições estatísticas e equações incluídas na análise.

Tabela 7 - Modelo de análise quantitativa do risco de ocorrência de fumonisinas no milho no Brasil.

| Variável (Input)                           | Localidade/<br>Cenário | Distribuição de probabilidade   |
|--|------------------------|---|
| Umidade de Equilíbrio<br>(X <sub>1</sub> ) | Sul                    | =RiskLoglogistic(-13,266;33,847;23,57)  |
|  | ZARC                   | =RiskLoglogistic(1,3939;18,739;14,473)  |
|  | MG                     | =RiskWeibull(3,2714;10,003;RiskShift(8,1129)  |
|  | ZARC                   | =RiskLogistic(17,5546;1,5067)   |
|  | CO                     | =RiskWeibull(3,9121;12,885;RiskShift(7,3067)  |
|  | ZARC                   | =RiskLoglogistic(-5,2782;25,381;17,985)   |
|  | PR                     | =RiskLoglogistic(-5,5077;26,493;14,532)   |
|  | ZARC                   | =RiskLoglogistic(10,154;10,571;6,6337)  |
| Inóculo (X <sub>2</sub> )                  | Todas                  | Presença = 1  |
| Temperatura do ar (X <sub>3</sub> )        | Sul                    | =RiskBetaGeneral(3,2161;2,2348;6,7751;27,641)   |
|  | ZARC                   | =RiskKumaraswamy(4,802;2,9843;5,8551;27,743)  |
|  | MG                     | =RiskWeibull(6,828;17,108;RiskShift(6,7531)   |
|  | ZARC                   | =RiskNormal(23,9824;1,9902)   |
|  | CO                     | =RiskExtvalueMin(25,4927;1,512)   |
|  | ZARC                   | =RiskExtvalueMin(25,7514;1,3461)  |
|  | PR                     | =RiskBetaGeneral(2,2125;2,0638;10,368;27,509)   |
|  | ZARC                   | =RiskKumaraswamy(2,2352;1,8954;12,724;27,354)   |
| Equação de produção de fumonisinas (Y)     |                        | = $4,47 + 3,9X_1 + 1,58X_2 - 5,37X_3 + 3,70X_3^2 - 3,64X_1^2X_2 - 5,06X_1X_3 - 3,46X_2X_3 + 3,14X_2X_3^2$ |
| Concentração de fumonisinas (µg/g)         |                        | = RiskOutput( )+Y   |
| Acima do LMT                               |                        | = Se (Concentração de fumonisinas>5;1;0)  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A identificação das variáveis na magnitude do risco de ocorrência da contaminação do milho por fumonisinas foi identificada e quantificada pela Análise de sensibilidade.

### 5.3 CENÁRIOS

Os cenários avaliados levaram em conta o Zoneamento Agropecuário de Risco Climático (ZARC) com taxas bastante conservadoras de probabilidade, considerando os decêndios<sup>10</sup> de plantio mais prováveis (80%) de se obter os melhores rendimentos na produção do milho, estimados para as duas safras (1 e 2) no ano 2017/2018. Como o ZARC indica o melhor período de plantio, também foram considerados os meses de colheita, assim como nos modelos anteriores. Para isso, levou-se em conta o período médio de 120 dias do grão no campo. Na Tabela 8, estão apresentados os meses inseridos para cada região.

Tabela 8 - Período do milho em campo, segundo o ZARC<sup>11</sup>

| SAFRA | REGIÃO | PRIMAVERA |     |     | VERÃO |     |     | OUTONO |     |     | INVERNO |     |     |
|-------|--------|-----------|-----|-----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|---------|-----|-----|
|       |        | OUT       | NOV | DEZ | JAN   | FEV | MAR | ABR    | MAI | JUN | JUL     | AGO | SET |
| 1     | RS     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |
|       | SC     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |
|       | PR     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |
|       | MG     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |
| 2     | MT     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |
|       | MS     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |
|       | PR     |           |     |     |       |     |     |        |     |     |         |     |     |

Fonte: ZARC (2018)

<sup>10</sup> Períodos de dez dias, sendo de 1° a 10 de janeiro o primeiro decêndio, de 11 a 20 de janeiro, o segundo e assim sucessivamente até o último, de 21 a 31 de dezembro, totalizando 36 períodos.

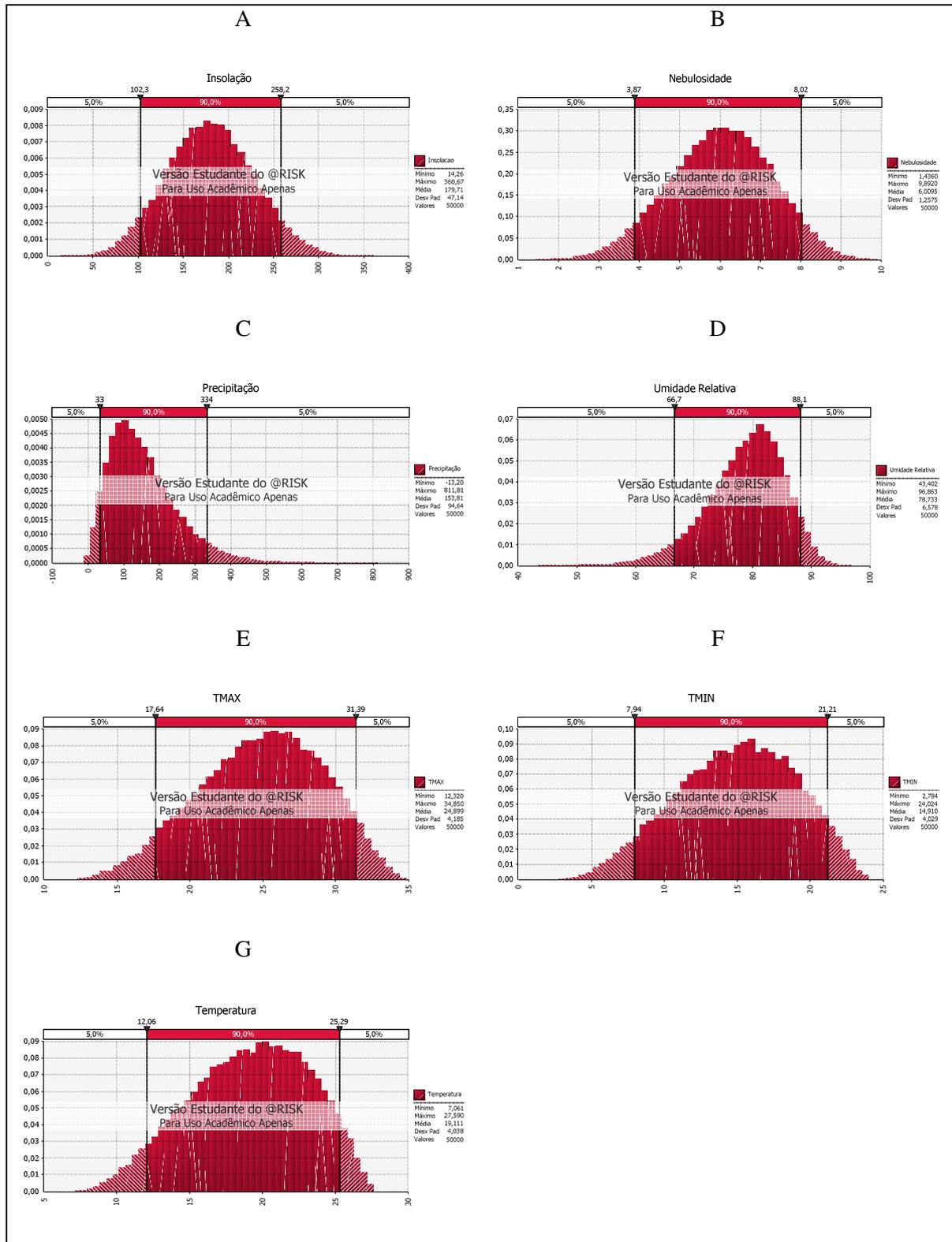
<sup>11</sup> Legenda:

■ Plantio ■ Colheita

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 FATORES CLIMÁTICOS QUE AFETAM A INCIDÊNCIA E A PRODUÇÃO DE FUMONISINAS NAS PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE MILHO.**

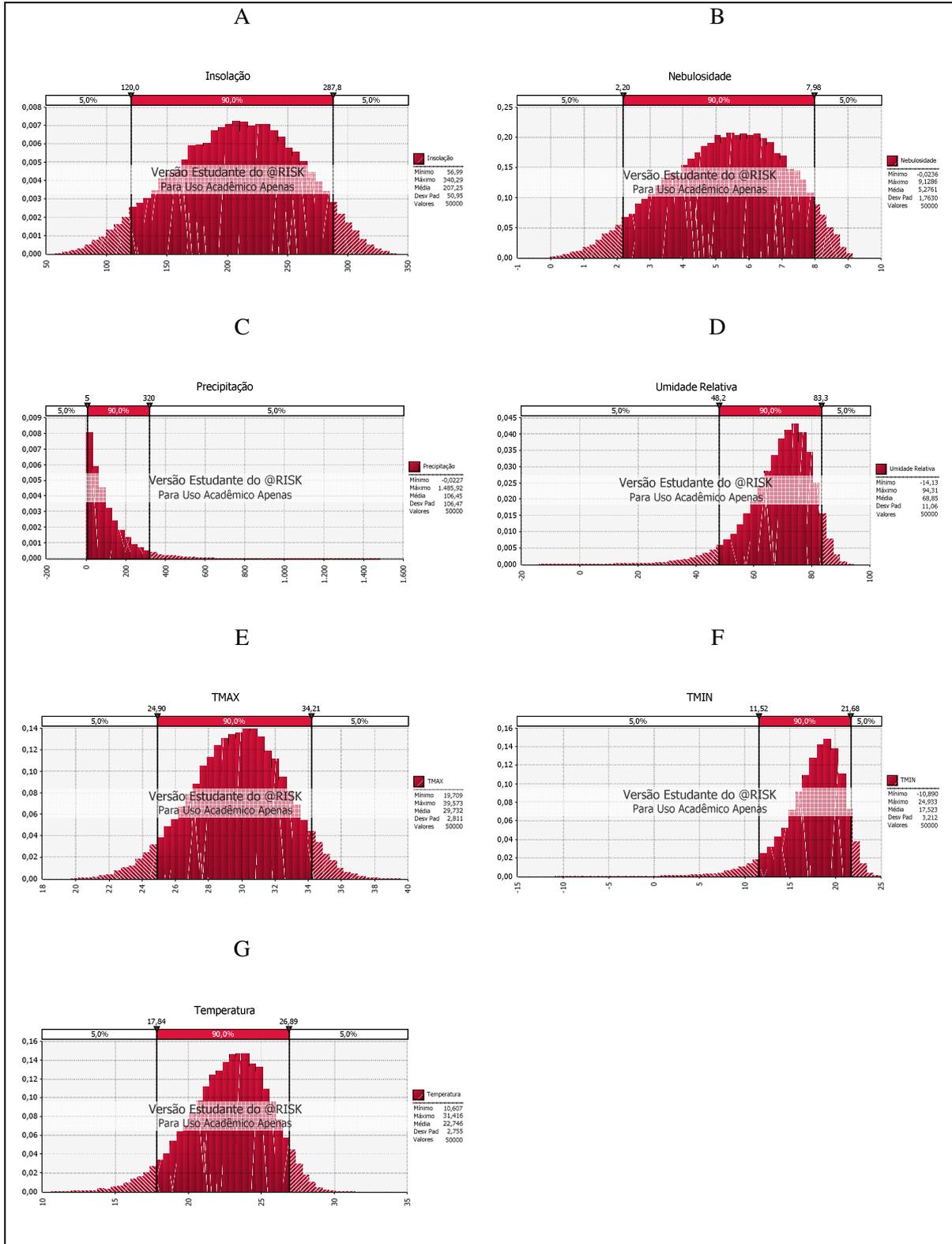
As distribuições de probabilidade estimadas para as variáveis climáticas são apresentadas nas Figuras 2 a 5, e os valores médios reais das mesmas variáveis, na Tabela 9. As informações são referentes aos meses das fases de plantio e colheita para 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> safras, dados utilizados no modelo de risco. Uma melhor interpretação das diferentes características do clima pode ser feita observando a Figura 6, onde mapas mostram como os principais fatores se distribuíram durante o ano de 2017 nas regiões de estudo. Também é possível observar a distribuição ao longo dos meses no Anexo B e as estatísticas descritivas das variáveis climáticas estão disponibilizadas no Anexo C.

Figura 2 - Distribuição das variáveis climáticas da região Sul<sup>12</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

<sup>12</sup> Legenda: insolação (A), nebulosidade (B), precipitação (C), umidade relativa (D), temperatura máxima (E), mínima (F) e média (G).

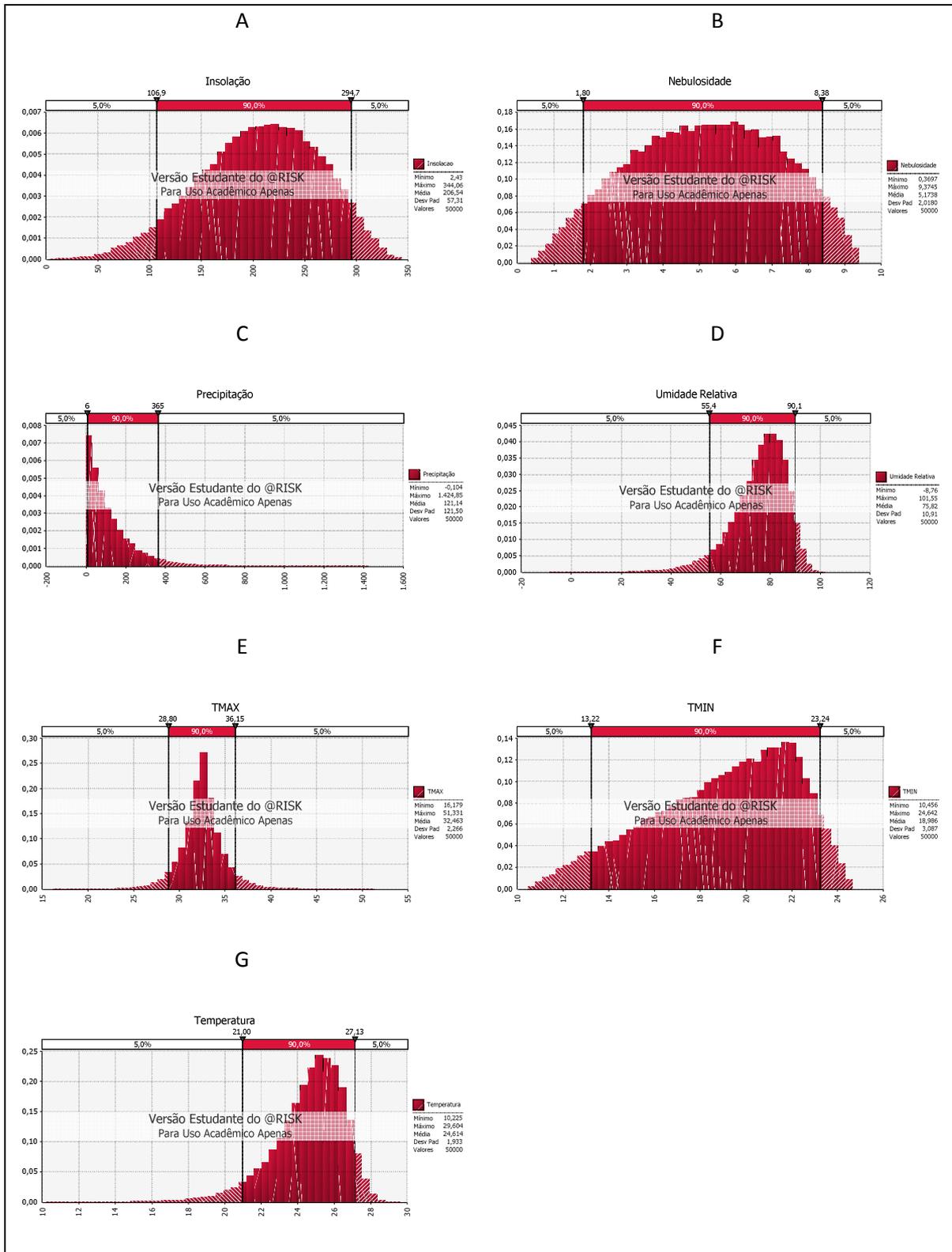
Figura 3 - Distribuição das variáveis climáticas de Minas Gerais<sup>13</sup>



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

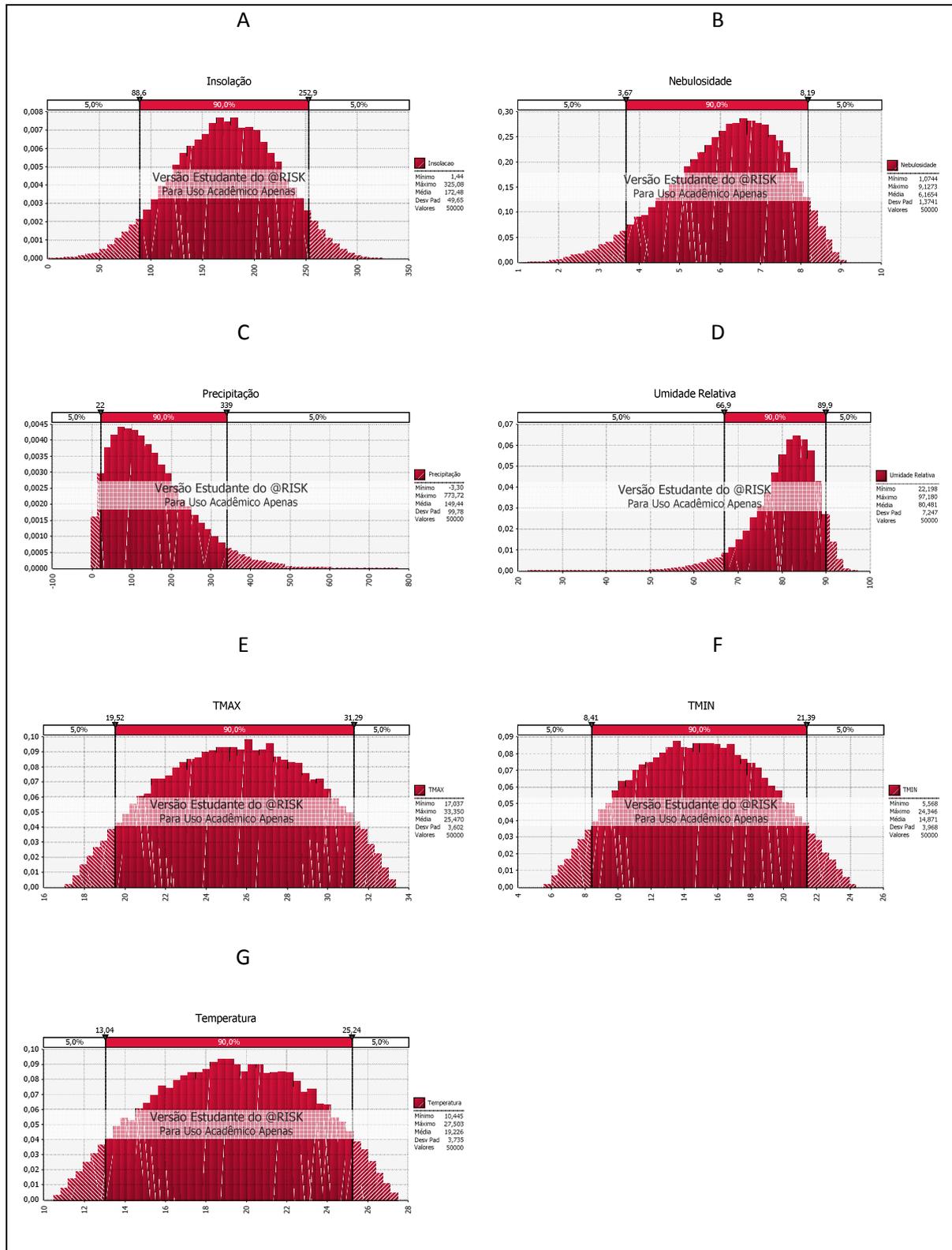
<sup>13</sup> Legenda: insoiação (A), nebulosidade (B), precipitação (C), umidade relativa (D), temperatura máxima (E), mínima (F) e média (G).

Figura 4 - Distribuição das variáveis climáticas do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul em conjunto<sup>14</sup>



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

<sup>14</sup> Legenda: insolação (A), nebulosidade (B), precipitação (C), umidade relativa (D), temperatura máxima (E), mínima (F) e média (G).

Figura 5 - Distribuição das variáveis climáticas do Paraná<sup>15</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

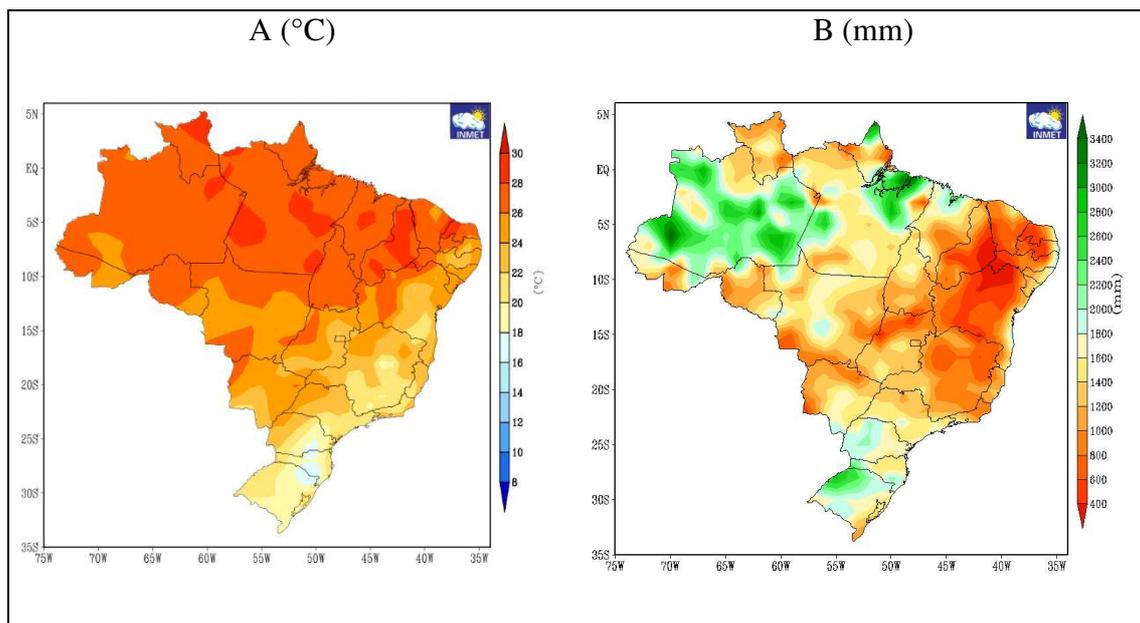
<sup>15</sup> Legenda: insolação (A), nebulosidade (B), precipitação (C), umidade relativa (D), temperatura máxima (E), mínima (F) e média (G).

Tabela 9 - Médias das variáveis climáticas<sup>16</sup>

| Média           | IT    | NEB | NDP  | PT    | TMAX | TMED | TMIN | UR   |
|-----------------|-------|-----|------|-------|------|------|------|------|
| <b>1ª Safra</b> |       |     |      |       |      |      |      |      |
| Sul             | 179,6 | 6,0 | 12,1 | 154,0 | 24,9 | 19,1 | 14,9 | 78,8 |
| MG              | 207,2 | 5,3 | 9,4  | 106,9 | 29,7 | 22,7 | 17,5 | 68,8 |
| <b>2ª Safra</b> |       |     |      |       |      |      |      |      |
| MT/MS           | 206,1 | 5,2 | 9,2  | 120,5 | 32,3 | 24,6 | 19,2 | 75,7 |
| PR              | 172,9 | 6,4 | 12,5 | 155,5 | 26,1 | 19,8 | 15,4 | 79,9 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 6 - Temperatura média (A) e Precipitação total (B) anuais do Brasil em 2017



Fonte: INMET (2018)

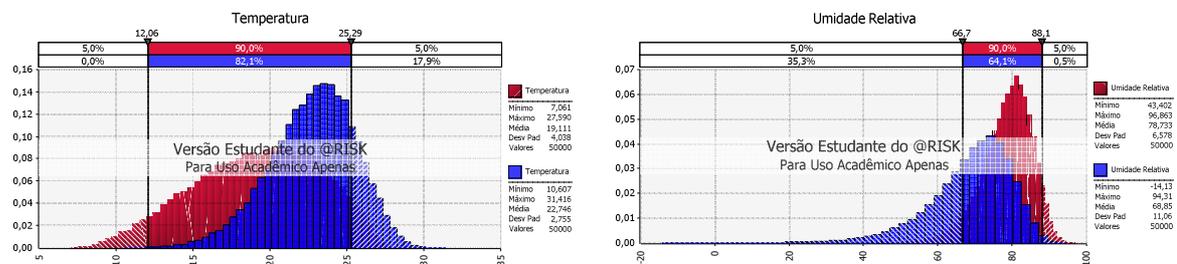
Como já mencionado anteriormente, as regiões avaliadas nesse estudo pertencem a dois tipos climáticos distintos. De forma geral, a região Sul se caracteriza por um clima temperado e as demais são identificadas por um clima tropical.

<sup>16</sup> Legenda: IT= Insolação total; NEB= Nebulosidade; NDP= N<sup>o</sup> de dias de precipitação; PT= Precipitação total; TMAX= Temperatura máxima; TMED= Temperatura média; TMIN= Temperatura mínima; UR= Umidade relativa.

Esses aspectos distintos podem ser vistos nos gráficos de temperatura e precipitação médias anuais, onde se observa que a região Sul possui temperaturas mais baixas e maior volume de chuva. Ao contrário, o estado de MG se apresenta com os menores índices pluviométricos e o MT/MS, com as mais altas temperaturas. O mesmo comportamento foi observado nos dados climáticos selecionados para inserção no modelo de risco. Comparando Sul e MG, nota-se que há diferença entre as distribuições das variáveis, sendo que a região Sul tem níveis de insolação mais baixos, por consequência, mais nebulosidade (Figura 2). Observa-se, também, comportamentos distintos entre as temperaturas, e chama ainda mais atenção os menores níveis de precipitação em MG (Figura 3). A comparação entre MT/MS e PR é bastante semelhante em todos os fatores climáticos (Figuras 4 e 5).

Nas Figuras 7 e 8, a visualização se torna mais fácil quando se apresenta as distribuições da região Sul e MG sobrepostas, para temperatura e umidade relativa do ar. Nota-se que MG (em azul) é um estado mais quente e seco em relação à região Sul (em vermelho), com temperaturas mais elevadas, menor índice pluviométrico e, conseqüentemente, menor umidade relativa. Além disso, a região Sul possui, em média, mais dias chuvosos, ocasionando maior nebulosidade e menores níveis de insolação.

Figura 7 - Distribuições sobrepostas de temperatura e umidade relativa para a 1ª safra<sup>17</sup>

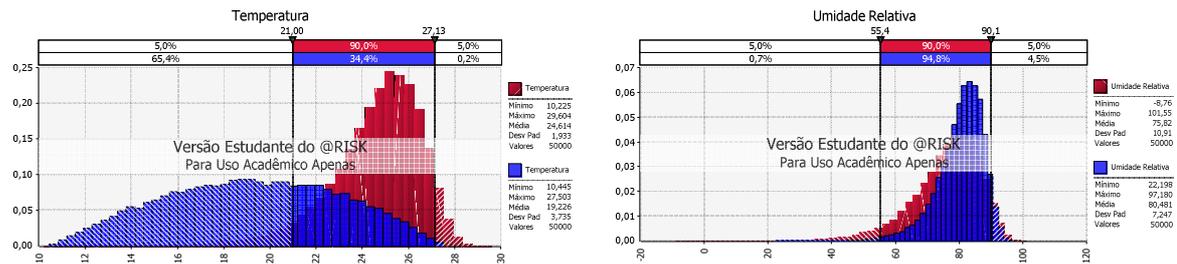


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Na 2ª safra, a comparação também se dá entre locais de clima temperado e tropical, por esse motivo já se esperava aspectos semelhantes aos observados na 1ª safra. A diferença fica por conta da região de MT/MS, que é ainda mais quente (Figura 8).

<sup>17</sup> A região Sul está marcada em vermelho e MG em azul.

Figura 8 - Distribuições sobrepostas de temperatura e umidade relativa da 2ª safra<sup>18</sup>



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

## 6.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA CONTAMINAÇÃO DO MILHO POR FUMONISINAS

Os resultados das simulações dos modelos de riscos se encontram nas Figuras 9 e 10, que apresentam as distribuições de probabilidades cumulativas sobrepostas dos níveis de concentração de fumonisinas nas safras 1 e 2, respectivamente.

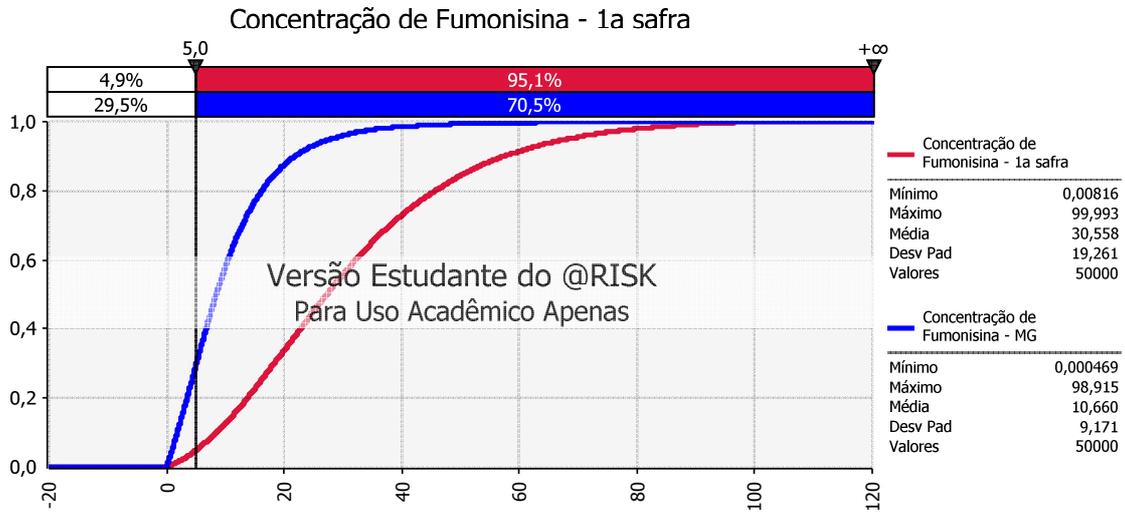
Observa-se que a probabilidade de haver contaminação acima do LMT ( $\mu\text{g/g} > 5^{19}$ ) estipulado pela ANVISA nos principais estados produtores é bastante alta nas duas safras, atingindo valores superiores a 90%. No entanto, quando se avalia cada safra em separado, percebe-se diferenças entre as localizações geográficas, tanto em valores prováveis quanto em valores médios de concentração.

Tanto para a primeira quanto para a segunda safra, as regiões localizadas ao sul do País apresentaram taxas bem mais elevadas em relação aos estados mais ao centro. Outros estudos também identificaram diferenças nos níveis de fumonisinas relacionados às diferentes regiões e suas condições climáticas (ONO et al., 1999; DE LA CAMPA et al., 2005; ATUKWASE; KAAYA; MUYANJA, 2009; SILVA et al., 2017).

<sup>18</sup> A região MT/MS está em vermelho e a PR em azul.

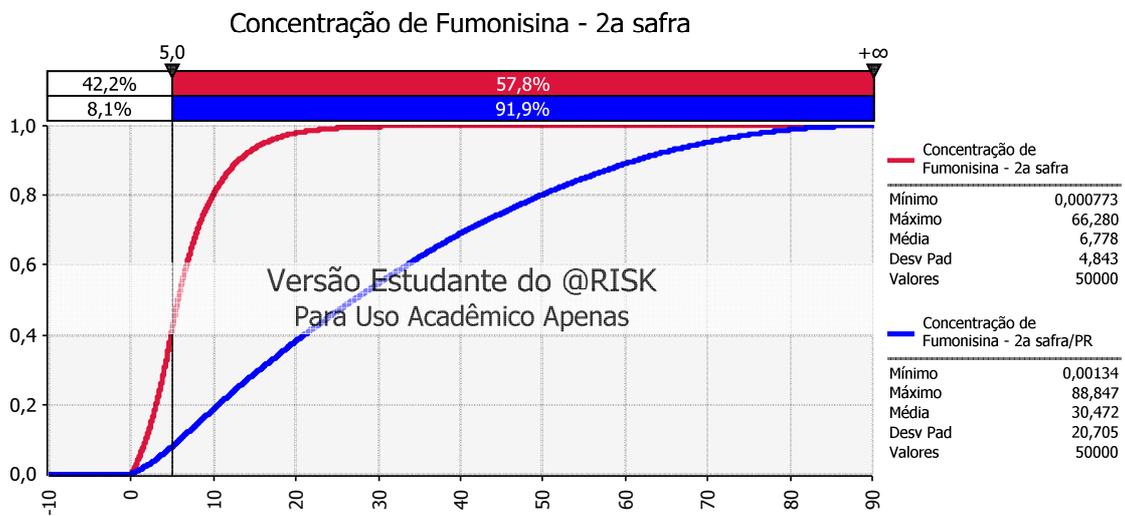
<sup>19</sup>  $1 \mu\text{g/g} = 1.000 \mu\text{g/kg}$

Figura 9 – Sobreposição das distribuições acumuladas de probabilidades da concentração de fumonisinas no Sul e MG<sup>20</sup>



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 10 - Sobreposição das distribuições acumuladas de probabilidades da concentração de fumonisinas no MT/MS e PR<sup>21</sup>



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

De La Campa et al. (2005) desenvolveram um modelo para prever as concentrações de fumonisinas na colheita e os resultados mostraram que os efeitos de localidade explicaram a maior variabilidade na fumonisinas (47%), seguida do dano por inseto (17%), híbrido (14%) e Bt (11%), ou seja, os efeitos devido a diferenças no clima foram muito mais influentes na

<sup>20</sup> Legenda: Sul em vermelho, MG em azul

<sup>21</sup> Legenda: MT/MS em vermelho, PR em azul

produção de fumonisinas do que o nível de danos causados por insetos, híbridos ou Bt. Com isso, concluíram que as diferentes condições ambientais foram os principais fatores de interferência nas concentrações finais de fumonisinas no grão na colheita.

Atukwase, Kaaya e Muyanja (2009) observaram uma correlação significativa positiva ( $r = 0,36$ ,  $p < 0,01$ ) entre os níveis de fumonisinas e a zona agroecológica. Da mesma forma, em um estudo comparativo em três áreas da Costa Rica, Viquez, Castell-Perez e Shelby (1996) concluíram que a contaminação por fumonisinas dependia da área geográfica e da época de colheita.

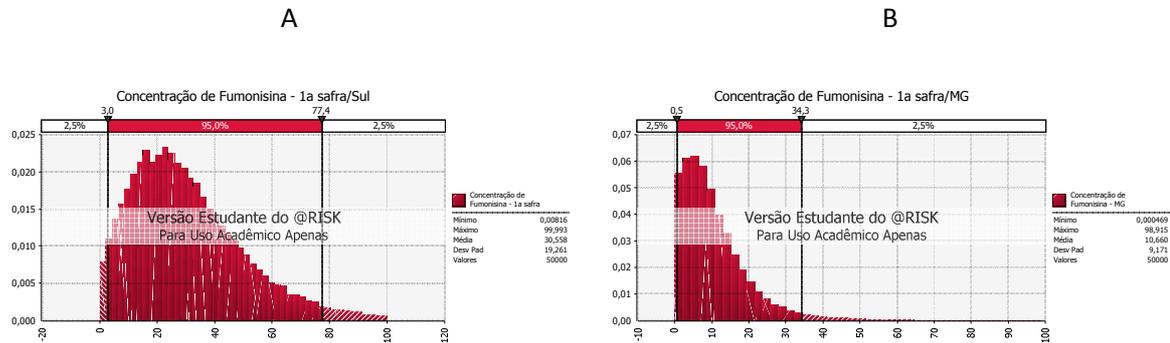
### **6.2.1 Concentração de Fumonisinas nas Principais Regiões Produtoras de Milho na 1ª Safra**

Nos resultados encontrados para as principais regiões produtoras de milho na 1ª safra, foi possível identificar que na região Sul é altamente provável (95%) a ocorrência de níveis acima do LMT, com concentração média de  $31 \mu\text{g/g}$ . Estudos realizados obtiveram 100% de positividade nas amostras analisadas, com concentrações variando de  $0,02$  a  $66,27 \mu\text{g/g}$ , nos 3 estados da região Sul (ONO et al., 2000; VAN DER WESTHUIZEN et al., 2003; DA SILVA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2016; SILVA et al., 2017). Resultados semelhantes também foram encontrados por Oliveira et al. (2016) com incidência média de 9,5% dentro do LMT para a mesma localidade, ou seja, 90,5% acima do limite máximo.

No estado de MG, segundo maior produtor do grão na 1ª safra, a probabilidade de contaminação acima do limite máximo diminui para 70,5% e a concentração média é em torno de  $11 \mu\text{g/g}$ .

A Figura 11 apresenta as distribuições de probabilidade para cada localidade, onde o comportamento da concentração de fumonisinas pode ser visto separadamente. Com intervalo de confiança (95%) variando de  $3,0$  a  $77,4 \mu\text{g/g}$  é bem perceptível que a região Sul apresenta níveis mais elevados dessa toxina em relação à Minas Gerais, que está num intervalo de  $0,5$  a  $34,3 \mu\text{g/g}$ , sendo sua distribuição bem mais concentrada à esquerda.

Figura 11 - Distribuições de probabilidade da concentração de fumonisinas para a 1ª safra, na região Sul (A) e MG (B).



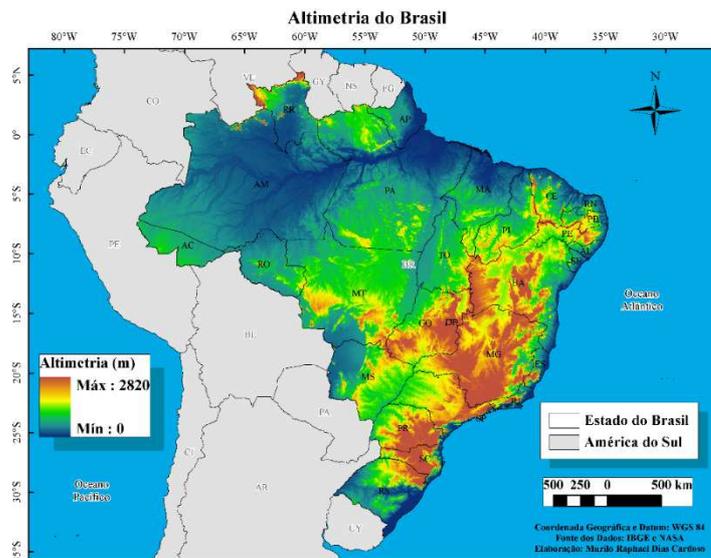
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para a alimentação animal, esses índices são bastante preocupantes, principalmente para equinos e coelhos, que são os mais susceptíveis, pois apresentam limite tolerável equivalente ao estipulado para a saúde humana, como já exibido na Tabela 3.

Como já foi verificado, a região Sul apresenta clima temperado úmido com verão quente e MG possui clima tropical com estação seca no inverno. Assim, entende-se que as diferenças nos níveis de contaminação entre as duas regiões podem ser explicadas pelas condições climáticas de cada uma delas, sendo que o comportamento climático durante o período do milho no campo segue o mesmo padrão.

Segundo Atukwase, Kaaya e Muyanja (2009), zonas de maior altitude apresentam maiores níveis de contaminação por fumonisinas. Apesar de MG e os estados do Sul estarem localizados em zonas de altitude semelhantes (Figura 12), a região Sul tem características que favorecem a produção da toxina com maior índice de chuvas, alta umidade e temperaturas relativamente baixas. Além disso, Ryu, Hanna e Bullerman (1999) observaram que maior produção de fumonisinas foi obtida a partir de amostras cultivadas a temperaturas cíclicas de 10 e 25°C (intervalos de 12 horas), comportamento que ocorre na região Sul com maior amplitude térmica. Um tempo maior de cultura também pode ser outro fator associado aos elevados níveis na região Sul, onde o milho permanece mais tempo no campo, pois um longo período de produção faz com que o grão esteja exposto por mais tempo à infecção por *Fusarium* e à subsequente contaminação por fumonisinas, além das condições ambientais predominantes (DILKIN et al., 2002; ATUKWASE; KAAYA; MUYANJA, 2009).

Figura 12 - Altimetria do Brasil



Fonte: Cardoso (2018a)

### 6.2.2 Concentração de fumonisinas nas principais regiões produtoras de milho na 2ª safra (safrinha)

Os resultados obtidos na análise de riscos para os principais estados produtores da 2ª safra de milho apresentam-se semelhantes aos encontrados na 1ª safra, quando avaliadas as diferenças no clima dessas localidades. As principais diferenças encontradas aqui estão relacionadas às respostas de MT e MS, estados que fazem parte da zona Centro-Oeste e apresentaram menor chance de contaminação acima do limite, com cerca de 58%, e nível de concentração médio de 6,8  $\mu\text{g/g}$ . Não surpreende o fato de que o estado do PR apresente uma alta probabilidade de contaminação (92%), bem como alta taxa de concentração (30  $\mu\text{g/g}$ ), dado que ele faz parte da região Sul do País (Figura 10).

De clima tropical, a região CO, onde se localizam os estados de MT e MS, se caracteriza por elevadas temperaturas e menores índices de precipitação e umidade. Esses aspectos podem ser atribuídos aos menores níveis de contaminação encontrados na análise de riscos. Dilkin et al. (2002) encontraram temperatura ótima para a produção da toxina inferior às relatadas em outros estudos e verificaram que baixas concentrações dessas toxinas foram produzidas a 30°C, provavelmente devido ao lento crescimento do fungo. De La Campa et al. (2005) observaram que os efeitos da chuva foram negados por temperaturas superiores a 34°C.

Estudos identificaram que o milho cultivado em zona de altitude média apresenta produção de fumonisinas significativamente menor do que o milho das zonas de alta altitude

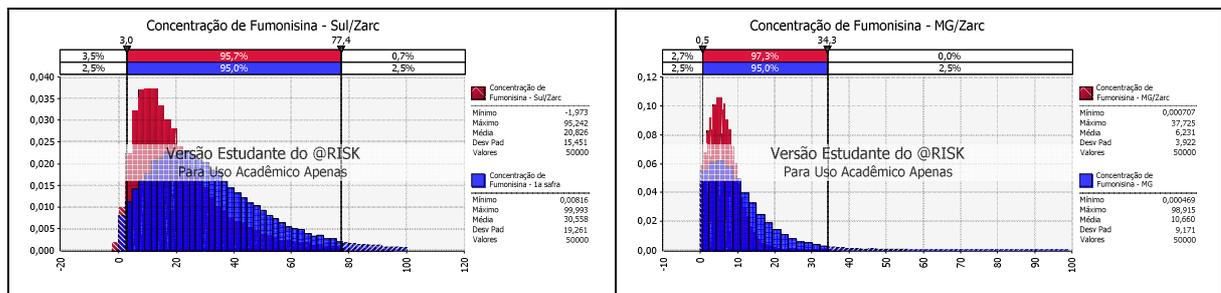
(ATUKWASE; KAAYA; MUYANJA, 2009). Diferenças em relação a altimetria das localidades também foram achados desse trabalho e podem justificar as menores concentrações estimadas pela análise de riscos para a região CO, que se localiza em zona de menor altitude em relação às demais regiões (Figura 12).

Sans e Guimarães (2006) corroboram com essa questão, afirmando que as baixas altitudes são mais favoráveis ao cultivo da safrinha nas regiões ao sul do País, principalmente pelo risco de geada em áreas mais elevadas (>600m).

### 6.2.3 Cenários: Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)

Os gráficos de distribuições sobrepostas da 1ª safra (Figura 13) indicam que o cultivo na melhor época não foi capaz de diminuir a incidência na região de maior risco (Sul). No entanto, observando a curva estimada para o ZARC (vermelha), percebe-se que ela está concentrada à esquerda, indicando que os níveis médios de contaminação diminuíram, em média, 32% (de 30,5 para 20,8  $\mu\text{g/g}$ ). O mesmo foi observado no estado de MG, com nível médio de infecção 42% menor.

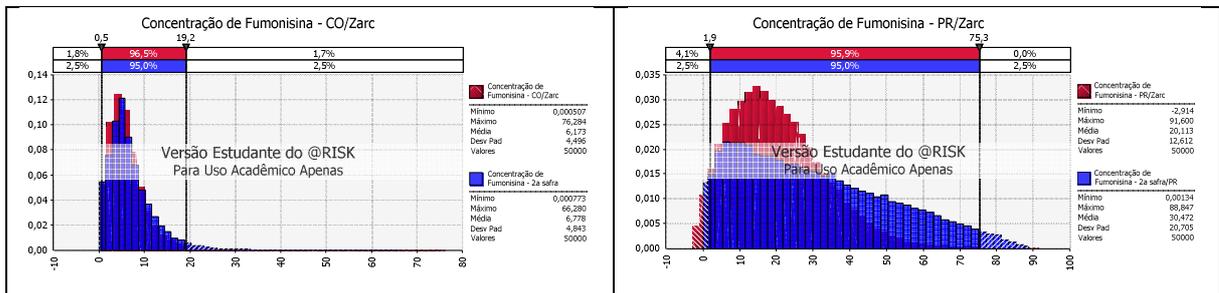
Figura 13 – Distribuições de probabilidade comparando as concentrações de fumonisinas nos cenários avaliados - 1ª safra



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Interpretando as distribuições estimadas para a 2ª safra (Figura 14), tem-se que não houve diferenças de incidência e níveis de contaminação na região CO, quando foi considerada a melhor época de cultivo pelo ZARC. O estado do PR teve comportamento similar à região Sul na 1ª safra, onde não foi identificada redução na probabilidade de contaminação, mas apresentou queda nos níveis médios de contaminação.

Figura 14 – Distribuições de probabilidade comparando as concentrações de fumonisinas nos cenários avaliados - 2ª safra.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Os resultados das simulações da análise de riscos mostraram diferenças entre os níveis de contaminação quando foi considerada a melhor época de cultivo do milho indicada pelo ZARC, especialmente na região Sul, onde o modelo estimou maiores quantidades de produção de fumonisinas. Sans e Guimarães (2006) afirmam que o plantio do milho na época adequada proporciona maior lucro ao agricultor, com melhores rendimentos de produção, não tendo nenhum efeito sob o custo de produção.

### 6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

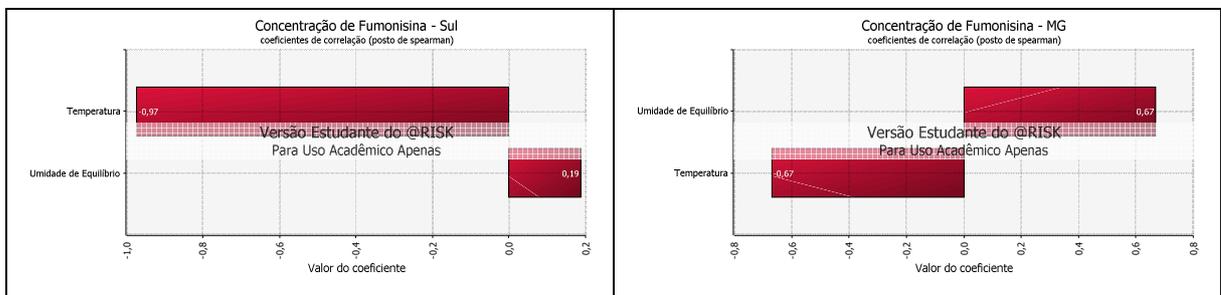
Acredita-se que os fatores climáticos mais relevantes para a produção de toxinas sejam temperatura, umidade e precipitação (VAN DER FELS-KLERX; BURGERS; BOOIJ, 2010; BATTILANI; LEGGIERI, 2015). Os resultados encontrados nesse estudo mostram fortemente essa relação.

Gráficos de Tornado demonstram a correlação entre as variáveis independentes (temperatura e umidade de equilíbrio) e a variável resposta (concentração de fumonisinas), indicando quais exercem maior influência no risco. Assim, as Figuras 15 e 16 mostram que a temperatura foi a variável que mais contribuiu na magnitude do risco, sendo inversamente proporcional ( $r_s < 0$ )<sup>22</sup>, ou seja, à medida que há um aumento na temperatura, há uma tendência de menor nível de concentração de fumonisinas. Em todos os cenários, observa-se que há uma correlação inversa entre a temperatura e o nível de concentração de fumonisinas, confirmando que regiões de temperaturas mais baixas são mais vulneráveis à contaminação do milho por essas substâncias tóxicas. Os gráficos de radar (Figura 17 e 18) enfatizam ainda mais essa relação quando se percebe que a linha em vermelho (temperatura) decresce muito mais rápido

<sup>22</sup>  $r_s$ : coeficiente de correlação de Spearman

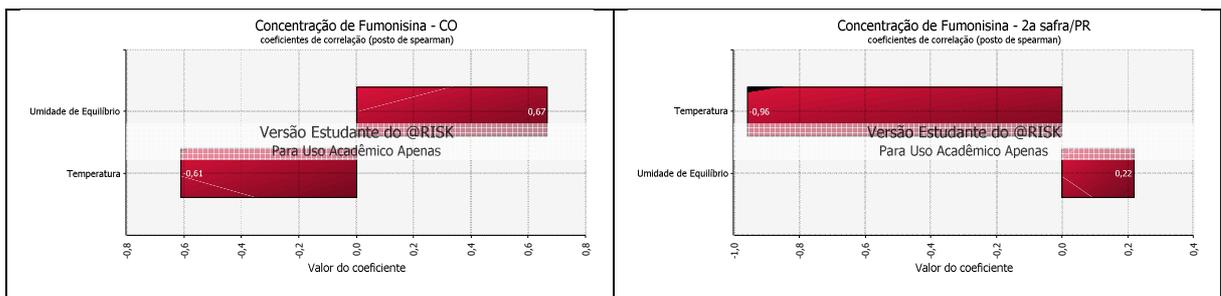
do que a umidade de equilíbrio (linha azul), demonstrando que a grandeza do risco se altera principalmente em função da temperatura. Nos locais com características climáticas mais favoráveis à produção de fumonisinas, esse comportamento se destaca, confirmando a influência da temperatura nos níveis de contaminação. Resultados do estudo de Martínez et al. (2010) também apontaram forte correlação entre a união de precipitação e umidade e a produção de fumonisinas no milho e concluíram que, com ação na infecção do fungo, a combinação dessas variáveis seria a principal responsável e explicaria os diferentes níveis de contaminação com fumonisinas no grão de milho na colheita.

Figura 15 – Gráfico de Tornado para as regiões avaliadas na 1ª safra



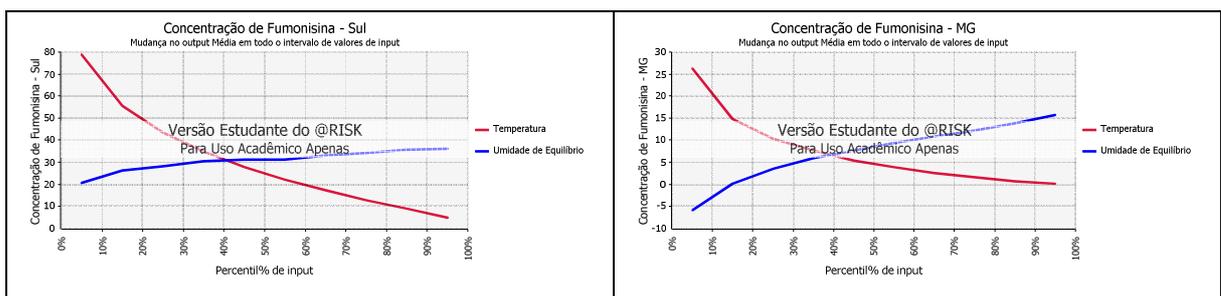
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 16 – Gráfico de Tornado para as regiões avaliadas na 2ª safra



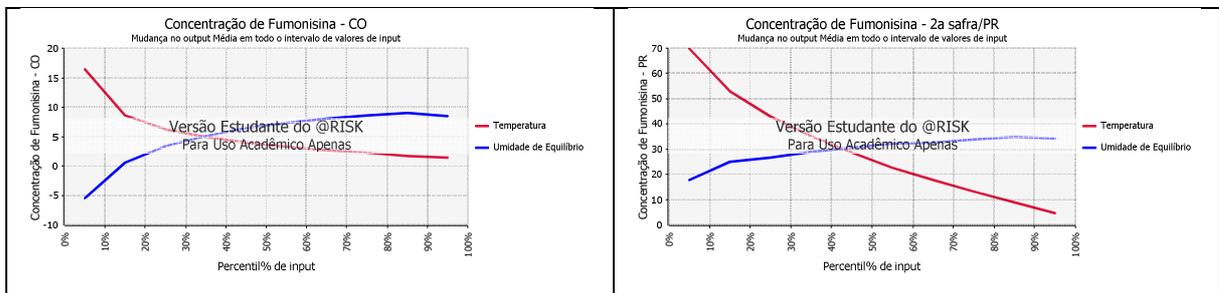
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 17 – Gráfico de Radar para as regiões avaliadas na 1ª safra



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 18 – Gráfico de Radar para as regiões avaliadas na 2ª safra



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Analisando a ocorrência de fumonisinas em nível mundial, Wu et al. (2011) esclarecem que, na América do Norte, o risco de fumonisinas é maior no Texas e nos estados do sudeste dos Estados Unidos (EUA), em comparação com áreas centrais, e são as micotoxinas mais comuns nos estados do chamado *Corn Belt* (cinturão do milho) - Nebraska, Kansas, Iowa, Illinois, Indiana e Ohio. Na Europa, o risco de fumonisinas é maior na Itália, na Espanha e no sul da França, e na Ásia ocorre ao ao norte do Trópico de Câncer.

Ao se identificar os tipos climáticos, verifica-se que essa análise se assemelha aos resultados encontrados aqui. Nos EUA, a predominância do clima na região de maior risco é subtropical úmido, com características similares à região Sul do Brasil, onde foram encontrados os maiores níveis de contaminação. O mesmo ocorre na Ásia, com áreas de climas temperados e frios. Na Europa, destaca-se climas mediterrâneo, de invernos chuvosos e verões secos e oceânico, com chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo de todo o ano, e verão bastante úmido (Anexo D). No entanto, Wu et al. (2011) citam a ocorrência de fumonisinas nas Américas Central e Sul mais representativas nas áreas de produção de milho com menor elevação. E na África, segundo eles, todas as áreas produtoras de milho estão em risco de contaminação, conforme a altitude.

Ao contrário dos resultados analisados nesse estudo, Lanza et al. (2014), não encontraram evidências da relação entre o nível de produção de fumonisinas e a área geográfica, com níveis variando de 10 a 2390 µg/g.

Em síntese, é fato a importância de se trabalhar na redução dos níveis de contaminação do milho brasileiro por fumonisinas. Estudos têm sido feitos no sentido de melhor definir e estabelecer a época de plantio mais adequada, de acordo com as características climáticas mais favoráveis para o melhor rendimento e produtividade do grão, sendo que não se tem controle sobre os fatores da natureza.

Com os resultados aqui encontrados, espera-se poder contribuir no avanço do entendimento das condições que atuam na produção de fumonisinas no milho produzido no País. Não sendo capaz de eliminar totalmente a produção de toxinas, é necessário minimizar tanto quanto possível a sua ocorrência, auxiliando na prevenção de alimentos contaminados.

No entanto, não se tem a pretensão de esgotar as possibilidades de análise e interpretação dos dados. É importante dar continuidade ao aprimoramento dos modelos aqui estudados, com dados mais detalhados, novos cenários, entre outros. Além disso, Van Der Fels-Klerx, Liu e Battilani (2016) afirmam que há uma necessidade de se avaliar os impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar, pois ainda há um pequeno número de estudos quantitativos realizados, todos concentrados na Europa.

Em relação ao Brasil, essa questão se torna bastante importante, visto que os maiores aumentos de temperatura na produção agrícola são esperados em zonas temperadas de média a alta latitude. Estima-se, também, que uma elevação de temperatura superior a 3°C possa ocasionar efeito contrário, com a redução da produção mundial, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, perfis do clima do País (IPCC, 2007).

## 7 CONCLUSÃO

A análise quantitativa de riscos possibilitou identificar que, nos estados de maior produção de milho na primeira safra, a maior incidência e contaminação estão na região Sul do País, onde as temperaturas são mais baixas, com maior índice pluviométrico, sendo, assim, um local mais úmido. O mesmo ocorre na segunda safra, com o estado do PR apresentando as mesmas características climáticas que elevam a produção da toxina.

Com isso, tem-se que os locais onde é menos provável a ocorrência de fumonisinas no milho são os de clima mais quente e umidade relativa mais baixa. Nos estados do Centro-Oeste, aqui estudados, e Minas Gerais, o modelo de risco estimou menor probabilidade de haver contaminação em níveis superiores aos permitidos pela legislação.

A análise de cenários revela a enorme importância de que o cultivo do milho ocorra nas épocas mais favoráveis indicadas pelo ZARC, e a conseqüente influência dos fatores climáticos na produção de fumonisinas. Apesar dos resultados demonstrarem que o cultivo na melhor época não foi capaz de diminuir a probabilidade de contaminação, houve uma redução significativa na produção de fumonisinas quando esse período foi avaliado, com níveis médios de concentração até 42% menores.

Os resultados desse estudo permitem concluir que as condições climáticas exercem forte influência na incidência e níveis de concentração de fumonisinas no milho produzido nas principais regiões produtoras do grão no Brasil.

A temperatura é a variável mais fortemente correlacionada com a variável resposta, indicando que temperaturas baixas, associadas com a alta umidade relativa do ar, aumentam a probabilidade de contaminação, acarretando maiores níveis de produção de fumonisinas.

Contudo, comprova-se que é importante conhecer os fatores de risco que influenciam na incidência e na contaminação de fumonisinas no milho. A agricultura precisa estar consciente de que a chance de sucesso da produção do grão depende de um planejamento eficiente da época de cultivo, principalmente em relação às condições climáticas a que está sujeito, a fim de minimizar os riscos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIMILHO. Associação Brasileira das Indústrias de Milho. Disponível em: [www.abimilho.com.br](http://www.abimilho.com.br). Acesso: 16 jun. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **RDC N° 07**: Dispõe sobre limites máximos tolerados (LMT) para micotoxinas em alimentos. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2968262/RDC\\_07\\_2011\\_COMP.pdf/afe3f054-bc99-4e27-85c4-780b92e2b966](http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2968262/RDC_07_2011_COMP.pdf/afe3f054-bc99-4e27-85c4-780b92e2b966)>. Acesso em: 23 ago. 2018.
- AGROSTAT. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2018. Disponível em: <http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 17 ago 2018.
- AHANGARKANI, F.; ROUHI, S.; AZIZI, I. G. A review on incidence and toxicity of fumonisins. **Toxin Reviews**, v. 33, p. 95–100, 2014.
- ALMEIDA, A. P. DE et al. Milho recém-colhido no Brasil: interação da microbiota fúngica, fatores abióticos e ocorrência de fumonisinas. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 64, n. 1, p. 1–9, 2005.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVARES, C. A.; SOARES, P. R. C.; SENTELHAS, P. C.; JANKOWSKY, I. P. Zoneamento da umidade de equilíbrio mensal de painéis e madeira maciça no Brasil. **Circular Técnica IPEF**. v. 211, p. 1-13, 2017.
- ATUKWASE, A.; KAAYA, A. N.; MUYANJA, C. Factors associated with fumonisin contamination of maize in Uganda. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 89, n. 14, 2009.
- BACON, C. W.; NELSON, P. E. Fumonisin Production in Corn by Toxigenic Strains of *Fusarium Moniliforme* and *Fusarium Proliferatum*. **Journal of Food Protection**, v. 57, n. 6, p. 514–521, 1994.
- BATTILANI, P. Recent advances in modeling the risk of mycotoxin contamination in crops. **Current Opinion in Food Science**, v. 11, 2016.
- BATTILANI, P.; LEGGIERI, M. C. Predictive modelling of aflatoxin contamination to support maize chain management. **World Mycotoxin Journal**, v. 8, n. 2, p. 161–170, 2015.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p. Disponível em: [http://www.emater.tche.br/site/arquivos/milho/O\\_Milho\\_e\\_o\\_Clima.pdf](http://www.emater.tche.br/site/arquivos/milho/O_Milho_e_o_Clima.pdf)>. Acesso em: 7 ago. 2018.
- BERND, L. P. et al. Modelagem matemática para fumonisinas em milho e perfil cromatográfico de metabolitos produzidos por *Fusarium verticillioides*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 2, p. 361–378, 2008.

- BINDER, E. M. et al. Worldwide occurrence of mycotoxins in commodities, feeds and feed ingredients. **Animal Feed Science and Technology**, v. 137, n. 3–4, p. 265–282, 2007.
- BITTENCOURT, A. B. F. et al. Mycotoxin occurrence in corn meal and flour traded in São Paulo, Brazil. **Food Control**, v. 16, n. 2, p. 117–120, 2005.
- BORDIN, K. et al. Assessment of dietary intake of fumonisin B1 in São Paulo, Brazil. **Food Chemistry**, v. 155, p. 174–178, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 60** de 22/12/2011, D.O.U. 23/12/2011, Brasília/DF.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Gestão de riscos. Risco agropecuário. **Zoneamento agrícola**. 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Assuntos. Gestão de riscos. Risco agropecuário. **Portarias**. 2018a. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/portarias>>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Comércio exterior. Estatísticas de comércio exterior. **Balança comercial brasileira**: acumulado do ano. 2018b. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/balanca-comercial-brasileira-acumulado-do-ano>>. Acesso em: 19 out. 2018.
- BRUNS, H.A. Controlling aflatoxin and fumonisin in maize by crop management. **Journal of Toxicology: Toxin Reviews**, v. 22, p. 153–173, 2003.
- BUCHANAN, R. L. Principles of risk analysis as applied to microbial food safety concerns. **Mitt. Lebensm. Hyg.**, v. 95, p. 6–12, 2004.
- CAMPAGNOLLO, F. B. et al. Quantitative risk assessment of *Listeria monocytogenes* in traditional Minas cheeses: The cases of artisanal semi-hard and fresh soft cheeses. **Food Control**, v. 92, p. 370–379, 2018.
- CARDOSO, M. **Mapa altimétrico do Brasil**. 2018a. Disponível em: <<https://murilocardoso.com/2012/03/05/mapas-mapa-altimetrico-do-brasil/>>. Acesso em: 23 nov 2018.
- CARDOSO, M. **Mapa de Clima do Brasil na Classificação Climática de Köppen**. 2018b. Disponível em: <<https://murilocardoso.com/2012/01/20/mapas-classificacao-climatica-de-koppen-do-mundo-e-do-brasil/>>. Acesso em: 23 nov 2018.
- CAST Report. 2003. **Mycotoxins: risks in plant, animal, and human systems**. In: J.L. Richard, G.A. Payne (Eds.), Council for Agricultural Science and Technology Task Force Report No. 139, Ames, Iowa, USA. ISBN 1-887383-22-0.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION - CODEX. **Principles and Guidelines for the Conduct of Microbiological Risk Assessment**. CAC/GL – 30. Rome, 1999. Disponível em: <<http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/guidelines>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION - CODEX. **Procedural Manual of the Codex Alimentarius Commission 26th edition**; 2018; Rome. Rome: FAO; 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/i8608en/I8608EN.pdf>>. Acesso em 3 mar 2018.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2018. **Série Histórica das Safras**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 10 jul 2018.

\_\_\_\_\_. **Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2017**. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/outras-publicacoes/item/download/21099\\_79625cc8ceb43fb85f49cea4961b0ea6](https://www.conab.gov.br/outras-publicacoes/item/download/21099_79625cc8ceb43fb85f49cea4961b0ea6)>. Acesso em: 25 jul 2018.

COUNCIL FOR AGRICULTURAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (CAST). 2006. Using Risk Analysis to Inform Microbial Food Safety Decisions. Issue Paper 31. CAST, Ames, Iowa.

CRUZ, J. C. et al. **Cultivo do milho: cultivares**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, 55).

CRUZ, J. V. da S. **Ocorrência de aflatoxinas e fumonisinas em produtos à base de milho e milho utilizado como ingrediente de ração para animais de companhia, comercializados na região de Pirassununga, Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Qualidade e Produtividade Animal) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2010. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74131/tde-29092010-141119/publico/DO5525151.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

DA SILVA, R. A. et al. Inquérito sobre o consumo de alimentos possíveis de contaminação por micotoxinas na ingesta alimentar de escolares. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 31, n. 2, 2007.

DE CEZARO, L. A. et al. Análise de Fumonisinas (B1 e B2) em Milho por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência Acoplada a Espectrometria de Massas Sequencial (Lc- Ms/Ms). In: 26a Jornada Acadêmica Integrada da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria). **Anais...**, 2012.

DE LA CAMPA, R. et al. Modeling effects of environment, insect damage, and Bt genotypes on fumonisin accumulation in maize in Argentina and the Philippines. **Mycopathologia**, v. 159, n. 4, p. 539–552, 2005.

DENNIS, S. B.; KAUSE, J.; LOSIKOFF, M.; ENGELJOHN, D. L.; BUCHANAN, R. L. Using risk analysis for microbial food safety regulatory decision making. In: SCHAFFNER, D. W. (Ed.). **Microbial risk analysis of foods**. Washington, DC: American Society of Microbiology, 2008. p. 137-176.

DILKIN, P. et al. Production of fumonisins by strains of *Fusarium moniliforme* according to temperature, moisture and growth period. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 33, n. 2, p. 111–118, 2002.

DOOHAN, F. M.; BRENNAN, J.; COOKE, B. M. Influence of climatic factors on *Fusarium* species pathogenic to cereals. **European Journal of Plant Pathology**, v. 109, n. 7, 2003.

DUARTE, J. de O.; MATTOSO, M. J.; GARCIA, J. C. **AGEITEC**: Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Importância Socioeconômica. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01\\_8\\_168200511157.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_8_168200511157.html)>. Acesso em: 22 jun. 2018.

DUBUGRAS, M. T. B.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, E. Perspectiva sobre a análise de risco na segurança dos alimentos. **Opas/Oms**, p. 160, 2008.

EMBRAPA. **Zoneamento agrícola de riscos climáticos para a cultura do milho no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/25594/1/Zoneamento-agricola.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Introdução In: **Produção de milho**. 1. ed. Rio Grande do Sul: Agropecuária, cap.1, p. 21, 2000.

FANDOHAN, P.; HELL, K.; MARASAS, W. F. O.; WINFGIELD, M. J. Infection of maize by *Fusarium* species and contamination with fumonisin in Africa. **African Journal of Biotechnology**, v. 2, n. 12, p. 570-579, 2003.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations; WHO. World Health Organization. **The application of risk communication to food standards and safety matters**, Food and Nutrition; 1999; Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-x1271e.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

\_\_\_\_\_. **Food Safety Risk Analysis - Part I - An Overview and Framework Manual - Provisional Edition**. Rome: FAO, 2005. Disponível em: <[http://www.fsc.go.jp/sonota/foodsafety\\_riskanalysis.pdf](http://www.fsc.go.jp/sonota/foodsafety_riskanalysis.pdf)>. Acesso em 5 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Food safety risk analysis: a guide for national food safety authorities**. Rome, IT, 2006. (FAO. Food and Nutrition Paper, 87). Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/012/a0822e/a0822e.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Risk Characterization of Microbiological Hazards in Food: Guidelines**. Microbiological Risk Assessment Series No . 17. Rome, p. 116, 2009. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/012/i1134e/i1134e.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Guide for application of risk analysis principles and procedures during food safety emergencies**. Rome: FAO, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/014/ba0092e/ba0092e00.pdf>>. Acesso em 5 mar. 2018.

FORBES, C. et al. **Statistical Distributions**. 4th. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

FREIRE, F. DAS C. O. et al. **Micotoxinas**: Importância na Alimentação e na Saúde Humana e Animal. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2007. 48 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 110).

GIANNITTI, F., DIAB, S.S., PACIN, A.M., ET AL. Equine leukoencephalomalacia (ELEM) due to fumonisins B1 and B2 in Argentina. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 31, n. 5, p. 407–412, 2011.

GUILHERME, L. R. G. Fundamentos da Análise de risco. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 34, p. 44–55, 2005.

GUIMARAES, D.P.; LANDAU, E.C. **Zoneamento Agrícola**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção 1. Cultivo do Milho). Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducaolf6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7905&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=8660](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=8660)>. Acesso em: 19 ago. 2018.

GURGEL, F. L. **A Cultura do Milho**. 2007. Desenvolvimento de material didático ou instrucional. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/31650688/A-Cultura-Do-Milho>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

HOFFMAN, F. O.; HAMMONDS, J. S. Propagation of Uncertainty in Risk Assessments: The Need to Distinguish Between Uncertainty Due to Lack of Knowledge and Uncertainty Due to Variability. **Risk Analysis**, v. 14, n. 5, p. 707–712, 1994.

IAMANAKA, B. T.; OLIVEIRA, I. S.; TANIWAKI, M. H. Micotoxinas Em Alimentos. In: Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica. **Anais...**, 2013, v. 7, n. 0, p. 138–161.

IARC. **Some traditional herbal medicines, mycotoxins, naphthalene and styrene**, in IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. International Agency for Research on Cancer, Lyon, p. 590, 2002.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2018. **Precipitação Total Anual**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>>. Acesso em: 21 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Temperatura Média Anual**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomalTempMediaAnual>>. Acesso em: 21 set. 2018.

IPCC. Intergovernmental panel on climate change report. 52 pp.. **Climate Change 2007: Synthesis Report**.

JOUBE, J.L. Microbiological risk assessment (MRA): an introduction. In M. Brown and M. Stringer (eds.). **Microbiological Risk Assessment in Food Processing**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, Abington, England. 2002. Cap. 3.

KIMANYA, M. E. et al. Exposure of infants to fumonisins in maize-based complementary foods in rural Tanzania. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 53, p. 667–674, 2009.

LAMMERDING, A. M. An overview of microbial food safety risk assessment. **Journal of Food Protection**, v. 60, n. 11, p. 1420–1425, 1997.

LAMMERDING, A.M.; FAZIL, A.M.; PAOLI, G.M. Microbial Food Safety Risk Assessment. In: DOWNES, F.P.; ITO, K. (Org.) **Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods**. 4th ed. Washington DC: American Public Health Association, 2001. p.267-282.

LAMMERDING, A.M.; MCKELLAR, R. Predictive Microbiology in Quantitative risk assessment. **Modeling Microbial Responses in Food**, p. 263–284, 2004.

LANZA, F. E. et al. Prevalence of fumonisin-producing *Fusarium* species in Brazilian corn grains. **Crop Protection**, v. 65, p. 232–237, 2014.

LEE, H. et al. Quantitative microbial risk assessment for *Staphylococcus aureus* in natural and processed cheese in Korea. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 9, p. 5931–5945, 2015.

LIU, F. et al. Determination of Fumonisin B1 and B2 in Corn Products. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 13, n. 3, p. 273–278, 2005.

MACHINSKI M.JR; VALENTE SOARES, L. M. Fumonins B1 and B2 in Brazilian corn-based food products. **Food Additives and Contaminants**, v. 17, n. 10, 2000. DOI: 10.1080/026520300420466.

MACHINSKI, M.JR. et. al. Aflatoxins, ochratoxin A and zearalenone in Brazilian corn cultivars. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v.81, p.1001-1007, 2001.

MAGALHAES, P.; SOUZA, T. C. de. **Ecofisiologia**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção 1. Cultivo do Milho). Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducaolf6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_column\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7905&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=8662](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_column_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=8662)>. Acesso em: 19 ago. 2018.

MALLMANN, C.A.; DILKIN, P.; MALLMANN, A. O. Panorama da micotoxinas. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE NUTRIÇÃO ANIMAL, 6., 2014, São Pedro, SP. **Anais...** CBNA, 2014

MANTOVANI, E. C. et al. **Colheita e pós-colheita**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015a. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção 1. Cultivo do Milho). Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducaolf6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_column\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7905&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=1316](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_column_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=1316)>. Acesso em: 22 ago. 2018.

\_\_\_\_\_. **Plantio**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015b. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção 1. Cultivo do Milho). Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducaolf6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_column\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7905&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=1309](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_column_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=1309)>. Acesso em: 22 ago. 2018.

MARÍN, S. et al. Environmental factors, in vitro interactions, and niche overlap between *Fusarium moniliforme*, *F. proliferatum*, and *F. graminearum*, *Aspergillus* and *Penicillium* species from maize grain. **Mycological Research**, v. 102, n. 7, p. 831–837, 1998.

\_\_\_\_\_. Fumonisin B1 production and growth of *Fusarium moniliforme* and *Fusarium proliferatum* on maize, wheat, and barley grain. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 5, p. 921–924, 1999.

MARTÍNEZ, M. et al. Environmental factors that affect the fumonisin content in maize grain. **Tropical Plant Pathology**, v. 35, n. 5, p. 277–284, 2010.

MAZIERO, M. T.; BERSOT, L. D. S. Micotoxinas em alimentos produzidos no brasil. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 1, p. 89–99, 2010.

MEDINA, A. et al. Climate change, food security and mycotoxins: Do we know enough? **Fungal Biology Reviews**, v. 31, n. 3, p. 143–154, 2017.

MILLER, J. D. Factors that affect the occurrence of fumonisin. **Environmental Health Perspectives**, v. 109, n. SUPPL. 2, p. 321–324, 2001.

MOLIN, R.; VALENTINI, M.L. (Ed.) **Simpósio sobre micotoxinas em grãos**. São Paulo: Fundação Cargill; [Castro]: Fundação ABC, 1999. 199 p.

MUSSER, S. M.; PLATTNER, R. D. Fumonisin Composition in Cultures of *Fusarium moniliforme*, *Fusarium proliferatum*, and *Fusarium nygami*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 45, n. 4, p. 1169–1173, 1997.

NAUTA, M. J. Separation of uncertainty and variability in quantitative microbial risk assessment models. **International Journal of Food Microbiology**, v. 57, n. 1–2, p. 9–18, 2000.

NAVARRO, S. (Ed.), NOYES, R. (Ed.). (2001). **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Boca Raton: CRC Press.

OIE. **Análisis de Riesgo**: guía práctica. Paris: World Animal Health Organization, 2006. 60p.

OLIVEIRA, E. de et. al. Diagnose e controle de doenças na cultura do milho. In: GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. (Ed.). **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2004. p. 226-267

OLIVEIRA, M. S. et al. Natural mycotoxin contamination of maize (*Zea mays* L.) in the South region of Brazil. **Food Control**, 2016.

ONO, E. Y. S. et al. A comparative study of indirect competitive ELISA and HPLC for fumonisin detection in corn of the state of Parana, Brazil. **Food and Agricultural Immunology**, v. 12, n. 1, 2000.

\_\_\_\_\_. Effect of climatic conditions on natural mycoflora and fumonisins in freshly harvested corn of the State of Parana, Brazil. **Mycopathologia**, v. 147, n. 3, p. 139–148, 1999.

\_\_\_\_\_. Effect of cropping systems and crop successions on fumonisin levels in corn from Northern Paraná State, Brazil. **European Journal of Plant Pathology**, v. 131, n. 4, p. 653–660, 2011.

ORSI, R. B. et al. Mycoflora and occurrence of fumonisins in freshly harvested and stored hybrid maize. **Journal of Stored Products Research**, v. 36, n. 1, p. 75–87, 2000.

OTTONI, J. R. **Análise da incidência de *Fusarium* spp. toxigênico e de níveis de fumonisinas em grãos ardidos de milho híbrido** - Piracicaba, 2008. 54 p.: il. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.

OTTOSON, J. R. et al. Quantitative Microbial Risk Assessment for *Escherichia coli* O157 on Lettuce, Based on Survival Data from Controlled Studies in a Climate Chamber. **Journal of Food Protection**, v. 74, n. 12, p. 2000–2007, 2011.

PALISADE CORPORATION. @Risk. Disponível em: <<https://www.palisade-br.com/>>. Acesso em: 09 set. 2018.

PALISADE. **Manual do Usuário do @RISK**. 2016.

PATERSON, R. R. M.; LIMA, N. How will climate change affect mycotoxins in food? **Food Research International**, v. 43, n. 7, p. 1902–1914, 2010.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, **Hydrology and Earth System Sciences**, 11, 1633-1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>, 2007

PEREIRA FILHO, I. A. **Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção, 1). Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducao1f6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7905&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=8658/](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao1f6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=8658/)>. Acesso em: 26 abr. 2018.

PEREIRA, M.L.G.; CARVALHO, E.P.; PRADO, G. Crescimento e produção de aflatoxinas por *Aspergillus flavus* e *Aspergillus parasiticus*. **Boletim Ceppa**, Curitiba, v.20, n.1, p.141-156, 2002.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, F. et al. Extracting Additional Risk Managers Information from a Risk Assessment of *Listeria monocytogenes* in Deli Meats. **Journal of Food Protection**, v. 70, n. 5, p. 1137–1152, 2007.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, F.; VALERO, A. **Predictive Microbiology in Foods**. New York: Springer, 2013.

PFOST, H.B., RENGIFO, G.E., SAUER, D.B. High temperature, high humidity grain storage, **Paper No. 76-3520**, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 1976.

PIMENTEL, M.A.G. et al. Armazenamento de milho e micotoxinas: você sabe o que é isso? **Grão em grão**, Sete Lagoas, ano 6, ed. 38, ago. 2012. Disponível em: <<http://grao.cnpms.embrapa.br/artigo.php?ed=OA==&id=Nw>>. Acesso em: 11 mar. 2015.

PITT, John I. et al (Ed.). **Improving Public Health through Mycotoxin Control**. França: Iarc Scientific Publication, 2012. Disponível em: <<http://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Improving-Public-Health-Through-Mycotoxin-Control-2012>>. Acesso em: 23 set. 2018.

POZZI, C. R. et al. Aspectos relacionados à ocorrência e mecanismo de ação de fumonisinas. **Ciência Rural**, v. 32, n. 5, p. 901-907, 2002.

QUEIROZ, V. A. V. et al. **Boas práticas e sistema APPCC na fase de pós-colheita de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 28 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 122).

RHEEDER, J.P.; MARASAS, F.O; VISMER, H.F. Production of fumonisin analogs by *Fusarium* species. **Applied Environmental Microbiology**, v.68. p. 2101-2105, 2002.

ROBENS, J.; CARDWELL, K. The costs of mycotoxin management to the USA: management of aflatoxins in the United States. **Journal of Toxicology-Toxin Reviews**, v. 22, p. 143-156, 2003.

ROBERTS, T.; JENSEN, H.; UNNEVEHR, L. Tracking foodborne pathogens from farm to table: Data needs to evaluate control options. **Miscellaneous Pub.**, v. 1532, 1995.

ROQUE-SPECHT, V. F.; CASTRO, J. E. E.; NETO, M. F. Avaliação de risco quantitativa como uma ferramenta para a caracterização da segurança microbiológica de alimento. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 4, p. 37–48, 2007.

RYU, D., HANNA, M.A., BULLERMAN, L.B. Stability of zearalenone during extrusion of corn grits. **Journal of Food Protection**. 62, 1482–1484, 1999.

SANS, L. M. A.; GUIMARÃES, D. P. **Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos para a Cultura do Milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 5 p. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica, 82).

SANT'ANA, A. DE S.; FRANCO, B. D. G. DE M. Revisão: Avaliação quantitativa de risco microbiológico em alimentos: conceitos, sistemática e aplicações. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 12, n. 04, p. 266–276, 2010.

SANT'ANA, A. S. **Avaliação quantitativa do risco da patulina em suco de maçã**. 373 f. Dissertação (Mestrado em em Ciência dos Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2007.

SANT'ANA, A. S.; FRANCO, B. D. G. M.; SCHAFFNER, D. W. Modeling the growth rate and lag time of different strains of *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat lettuce. **Food Microbiology**, v. 30, n. 1, p. 267–273, 2012.

SANTOS, D.V. et al. A análise de risco como ferramenta estratégica para o serviço veterinário oficial brasileiro: dificuldades e desafios. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, Rio de Janeiro, v.34, n.6, p.542-554, 2014.

SANTOS, W., MARTINS, J. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 73-94, 2016. Disponível em:<<https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1157>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

SCAFF, R. M. C.; SCUSSEL, V. M. Fumonisin B1 and B2 in corn-based products commercialized in the State of Santa Catarina - Southern Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 6, 2004.

SCHJØTH, J. E.; VISCONTI, A.; SUNDHEIM, L. Fumonisin in maize in relation to climate, planting time and hybrids in two agroecological zones in Zambia. **Mycopathologia**, v. 167, n. 4, p. 209–219, 2009.

SCUSSEL, V. M. et al. Fumonisin in corn (*Zea mays* L.) from Southern Brazil. **Food Additives and Contaminants. Part B**, v. 7, n. 2, p. 151–155, 2014. DOI: 10.1080/19393210.2013.862745.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. 2018. Disponível em: <<http://www.sebrae-sc.com.br/leis/default.asp?vcdtexto=447&%5E%5E>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

SHELBY, R. A.; WHITE, D. G.; BAUSKE, E. M. Differential Fumonisin Production in Maize Hybrids. **Plant Disease**, v. 78, n. 6, p. 582-584, 1994. DOI: 10.1094/PD-78-0582. Disponível em: <[http://www.apsnet.org/publications/PlantDisease/BackIssues/Documents/1994Abstracts/PD\\_78\\_582.htm](http://www.apsnet.org/publications/PlantDisease/BackIssues/Documents/1994Abstracts/PD_78_582.htm)>. Acesso em: 22 nov. 2018.

SILVA, D. D. da.; COTA, L. V.; COSTA, R. V. da. **Doenças**. 9. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção 1. Cultivo do Milho). Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducao1f6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7905&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=8666](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao1f6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=8666)>. Acesso em: 23 ago. 2018.

SILVA, J. J. et al. Genetic structure of *Fusarium verticillioides* populations and occurrence of fumonisins in maize grown in Southern Brazil. **Crop Protection**, v. 99, p. 160–167, 2017.

SORIANO, J. M.; DRAGACCI, S. Intake, decontamination and legislation of fumonisin in foods. **Food Research International**, Canadá, 37 (4), p. 367-374, 2004.

SUN, G. et al. Fumonisin B1 contamination of home-grown corn in high-risk areas for esophageal and liver cancer in China. **Food Additives and Contaminants**, v. 24, p. 181– 185, 2007.

THIEL, P. G. et al. The Implications of Naturally-Occurring Levels of Fumonisin in Corn for Human and Animal Health. **Mycopathologia**, v. 117, n. 4, p. 1169–1173, 1997.

U. S. FOOD & DRUG ADMINISTRATION. **Guidance for Industry: Fumonisin Levels in Human Foods and Animal Feeds**. 2000. Disponível em: <<https://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/ucm109231.htm>>. Acesso em: 23 jul. 2018.

USDA. U.S. Department of Agriculture. 2018. Disponível em: <<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

VAN DER FELS-KLERX, H. J.; BURGERS, S. L. G. E.; BOOIJ, C. J. H. Descriptive modelling to predict deoxynivalenol in winter wheat in the Netherlands. **Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment**, v. 27, n. 5, p. 636–643, 2010.

VAN DER FELLS-KLERX, H. J.; LIU, C.; BATTILANI, P. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination. **World Mycotoxin Journal**, v. 9, n. 5, p. 717–726, 2016.

VAN DER WESTHUIZEN, L. et al. Fumonisin contamination and *Fusarium* incidence in corn from Santa Catarina, Brazil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 18, p. 5574–5578, 2003.

VINCELLI, P.; PARKER, G. Fumonisin, vomitoxin, and other mycotoxins in corn produced by *Fusarium* fungi. **University of Kentucky Cooperative Extension Service**. ID 121. 8 p., 2002.

VIQUEZ, O. M.; CASTELL-PEREZ, M. E.; SHELBY, R. A. Occurrence of Fumonisin B1 in Maize Grown in Costa Rica. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 44, n. 9, p. 2789–2791, 1996.

VOSE, D. **Risk Analysis: A quantitative guide**. 2nd. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

\_\_\_\_\_. **Risk Analysis - A quantitative guide**. 3rd. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

VOSS, K. A.; SMITH, G. W.; HASCHEK, W. M. Fumonisin : Toxicokinetics , mechanism of action and toxicity. **Animal Feed Science and Technology**, v. 137, p. 299–325, 2007.

VOYSEY, P.; JEWELL, K.; STRINGER, M. Risk characterization. In M. Brown and M. Stringer (eds.). **Microbiological Risk Assessment in Food Processing**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, Abington, England. 2002. Cap. 7.

WARFIELD, C. Y.; GILCHRIST, D. G. Influence of Kernel age on Fumonisin B1 production in maize by *Fusarium moniliforme*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 65, n. 7, p. 2853–2856, 1999.

WHITING, R. C.; BUCHANAN, R. L. Development of a quantitative risk assessment model for *Salmonella enteritidis* in pasteurized liquid eggs. **International Journal of Food Microbiology**, v. 36, p. 111–125, 1997.

WHO. **Safety Evaluation of Certain Mycotoxins in Food**: Prepared by the Fiftysixth Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Geneva: World Health Organization (WHO Food Additives Series, No. 47), 2001.

WHO. World Health Organization. (1999). **Basic Food Safety for Health Workers**. Disponível em: <<https://www.who.int/foodsafety/publications/health-workers/en/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

WU, F. et al. Climate change impacts on mycotoxin risks in US maize. **World Mycotoxin Journal**, v. 4, n. 1, p. 79–93, 2011.

WU, F. Measuring the economic impacts of *Fusarium* toxins in animal feeds. **Animal Feed Science and Technology**, v. 137, p. 363–374, 2007.

## **ANEXOS**

**ANEXO A – ESTUDOS QUE AUXILIARAM NA IDENTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE FUMONISINAS E O CLIMA**

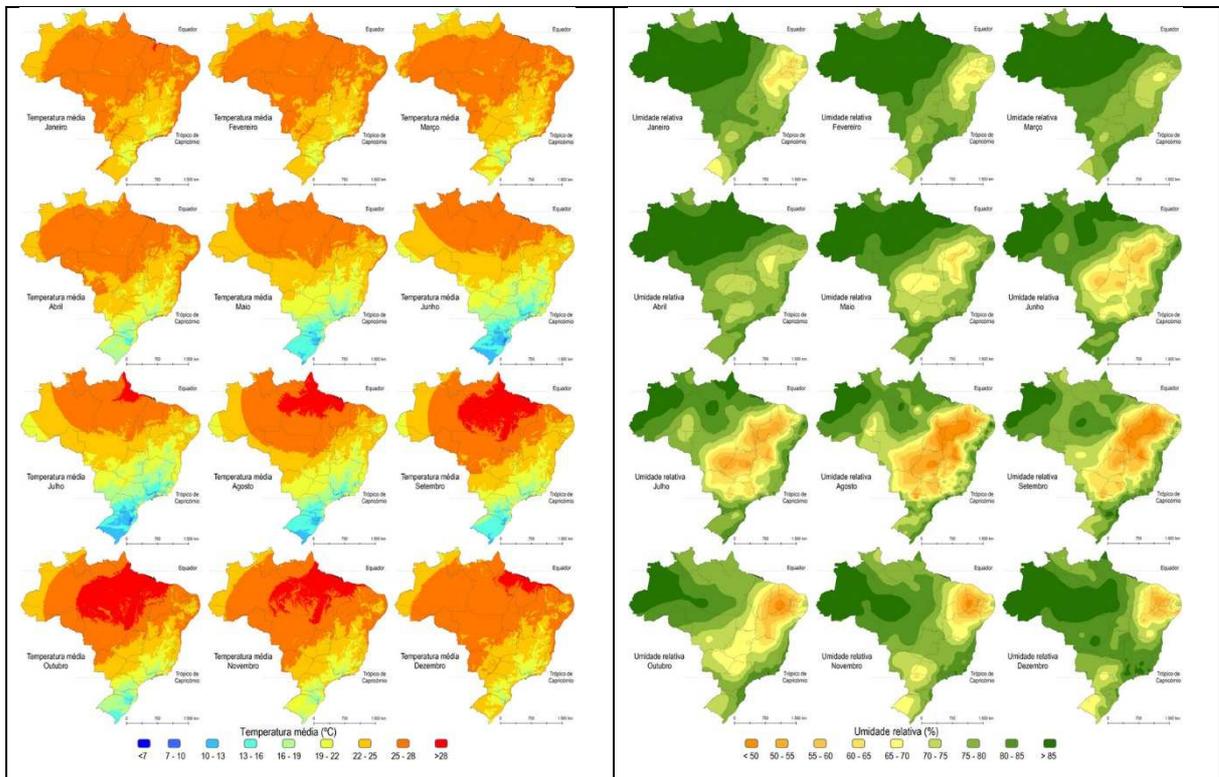
| Citação                        | Referência bibliográfica   |
|--------------------------------|--|
| ALMEIDA et al., 2002           | ALMEIDA, A. P. et al. Mycoflora and fumonisin contamination in Brazilian sorghum from sowing to harvest. <b>Journal of Agricultural and Food Chemistry</b> , v. 50, n. 13, p. 3877–3882, 2002.   |
| ANDRADE et al., 2013           | ANDRADE, C. L. T. et al. <b>Uma metodologia alternativa para o zoneamento de risco climático da cultura do milho</b> . Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 42 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 87). |
| ATUKWASE; KAAYA; MUYANJA, 2009 | ATUKWASE, A.; KAAYA, A. N.; MUYANJA, C. Factors associated with fumonisin contamination of maize in Uganda. <b>Journal of the Science of Food and Agriculture</b> , v. 89, n. 14, 2009.  |
| BATTILANI, 2016                | BATTILANI, P. Recent advances in modeling the risk of mycotoxin contamination in crops. <b>Current Opinion in Food Science</b> , v. 11, 2016.  |
| BERND et al., 2008             | BERND, L. P. et al. Modelagem matemática para fumonisinas em milho e perfil cromatográfico de metabolitos produzidos por <i>Fusarium verticillioides</i> . <b>Semina: Ciências Agrárias</b> , v. 29, n. 2, p. 361–378, 2008.               |
| CAMARGOS et al., 2002          | CAMARGOS, S. M. et al. Accumulation of fumonisins B1 and B2 in freshly harvested Brazilian commercial maize at three locations during two nonconsecutive seasons. <b>Mycopathologia</b> , v. 155, n. 4, 2002.                              |

| Citação                             | Referência bibliográfica   |
|-------------------------------------|--|
| DE LA CAMPA et al., 2005            | DE LA CAMPA, R. et al. Modeling effects of environment, insect damage, and Bt genotypes on fumonisin accumulation in maize in Argentina and the Philippines. <b>Mycopathologia</b> , v. 159, n. 4, p. 539–552, 2005.   |
| DE OLIVEIRA ROCHA et al., 2011      | DE OLIVEIRA ROCHA, L. et al. Molecular characterization and fumonisin production by <i>Fusarium verticillioides</i> isolated from corn grains of different geographic origins in Brazil. <b>International Journal of Food Microbiology</b> , v. 145, n. 1, p. 9–21, 2011.                                      |
| DILKIN et al., 2002                 | DILKIN, P. et al. Production of fumonisins by strains of <i>Fusarium moniliforme</i> according to temperature, moisture and growth period. <b>Brazilian Journal of Microbiology</b> , v. 33, n. 2, p. 111–118, 2002.   |
| DOOHAN; BRENNAN; COOKE, 2003        | DOOHAN, F. M.; BRENNAN, J.; COOKE, B. M. Influence of climatic factors on <i>Fusarium</i> species pathogenic to cereals. <b>European Journal of Plant Pathology</b> , v. 109, n. 7, 2003.  |
| GARCIA et al., 2009                 | GARCIA, D. et al. Predicting mycotoxins in foods: A review. <b>Food Microbiology</b> , v. 26, n. 8, p. 757–769, 2009.  |
| HUMPHREYS; CARRINGTON; BOLGER, 2001 | HUMPHREYS, S. H.; CARRINGTON, C.; BOLGER, M. A quantitative risk assessment for fumonisins B 1 and B 2 in US corn. <b>Food Additives and Contaminants</b> , v. 18, n. 3, p. 211–220, 2001.   |
| MAIORANO et al., 2009               | MAIORANO, A. et al. A dynamic risk assessment model (FUMAGrain) of fumonisin synthesis by <i>Fusarium verticillioides</i> in maize grain in Italy. <b>Crop Protection</b> , v. 28, n. 3, p. 243–256, 2009.   |
| MARÍN et al., 1998a                 | MARÍN, S. et al. Environmental factors, in vitro interactions, and niche overlap between <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>F. proliferatum</i> , and <i>F. graminearum</i> , <i>Aspergillus</i> and <i>Penicillium</i> species from maize grain. <b>Mycological Research</b> , v. 102, n. 7, p. 831–837, 1998a. |

| Citação                        | Referência bibliográfica   |
|--------------------------------|--|
| MARÍN et al., 1998b            | MARÍN, S. et al. Effect of water activity and temperature on competing abilities of common maize fungi. <b>Mycological Research</b> , v. 102, n. 8, p. 959–964, 1998b.   |
| MARTÍNEZ et al., 2010          | MARTÍNEZ, M. et al. Environmental factors that affect the fumonisin content in maize grain. <b>Tropical Plant Pathology</b> , v. 35, n. 5, p. 277–284, 2010.   |
| MEDINA et al., 2017            | MEDINA, A. et al. Climate change, food security and mycotoxins: Do we know enough? <b>Fungal Biology Reviews</b> , v. 31, n. 3, p. 143–154, 2017.  |
| MEDINA; RODRÍGUEZ; MAGAN, 2015 | MEDINA, Á.; RODRÍGUEZ, A.; MAGAN, N. Climate change and mycotoxigenic fungi: Impacts on mycotoxin production. <b>Current Opinion in Food Science</b> , v. 5, n. Cc, p. 99–104, 2015.   |
| ONO et al., 1999               | ONO, E. Y. S. et al. Effect of climatic conditions on natural mycoflora and fumonisins in freshly harvested corn of the State of Parana, Brazil. <b>Mycopathologia</b> , v. 147, n. 3, p. 139–148, 1999.   |
| ONO et al., 2001               | ONO, E. Y. S. et al. Evaluation of fumonisin-aflatoxin co-occurrence in Brazilian corn hybrids by ELISA. <b>Food Additives and Contaminants</b> , v. 18, n. 8, p. 719–729, 2001.   |
| PATERSON; LIMA, 2010           | PATERSON, R. R. M.; LIMA, N. How will climate change affect mycotoxins in food? <b>Food Research International</b> , v. 43, n. 7, p. 1902–1914, 2010.  |
| PITT; TANIWAKI; COLE, 2013     | PITT, J. I.; TANIWAKI, M. H.; COLE, M. B. Mycotoxin production in major crops as influenced by growing, harvesting, storage and processing, with emphasis on the achievement of Food Safety Objectives. <b>Food Control</b> , v. 32, n. 1, p. 205–215, 2013. |

| Citação                             | Referência bibliográfica   |
|-------------------------------------|--|
| SAMAPUNDO et al., 2005a             | SAMAPUNDO, S. et al. Predictive modelling of the individual and combined effect of water activity and temperature on the radial growth of <i>Fusarium verticillioides</i> and <i>F. proliferatum</i> on corn. <b>International Journal of Food Microbiology</b> , v. 105, n. 1, p. 35–52, 2005a.   |
| SAMAPUNDO et al., 2005b             | SAMAPUNDO, S. et al. Effect of water activity and temperature on growth and the relationship between Fumonisin production and the radial growth of <i>Fusarium verticillioides</i> and <i>Fusarium proliferatum</i> on corn. <b>Journal of Food Protection</b> , v. 68, n. 5, p. 1054–1059, 2005b. |
| SCHAAFSMA; HOOKER, 2007             | SCHAAFSMA, A. W.; HOOKER, D. C. Climatic models to predict occurrence of Fusarium toxins in wheat and maize. <b>International Journal of Food Microbiology</b> , v. 119, n. 1–2, p. 116–125, 2007.   |
| SCHJØTH; VISCONTI; SUNDHEIM, 2009   | SCHJØTH, J. E.; VISCONTI, A.; SUNDHEIM, L. Fumonisin in maize in relation to climate, planting time and hybrids in two agroecological zones in Zambia. <b>Mycopathologia</b> , v. 167, n. 4, p. 209–219, 2009.   |
| SILVA et al., 2017                  | SILVA, J. J. et al. Genetic structure of <i>Fusarium verticillioides</i> populations and occurrence of fumonisins in maize grown in Southern Brazil. <b>Crop Protection</b> , v. 99, p. 160–167, 2017.   |
| VIQUEZ; CASTELL-PEREZ; SHELBY, 1996 | VIQUEZ, O. M.; CASTELL-PEREZ, M. E.; SHELBY, R. A. Occurrence of Fumonisin B1 in Maize Grown in Costa Rica. <b>Journal of Agricultural and Food Chemistry</b> , v. 44, n. 9, p. 2789–2791, 1996.   |
| WU et al., 2011                     | WU, F. et al. Climate change impacts on mycotoxin risks in US maize. <b>World Mycotoxin Journal</b> , v. 4, n. 1, p. 79–93, 2011.  |

## ANEXO B – TEMPERATURA E UMIDADE MENSAIS DE 2017 NO BRASIL



Fonte: Alvares et. al (2017)

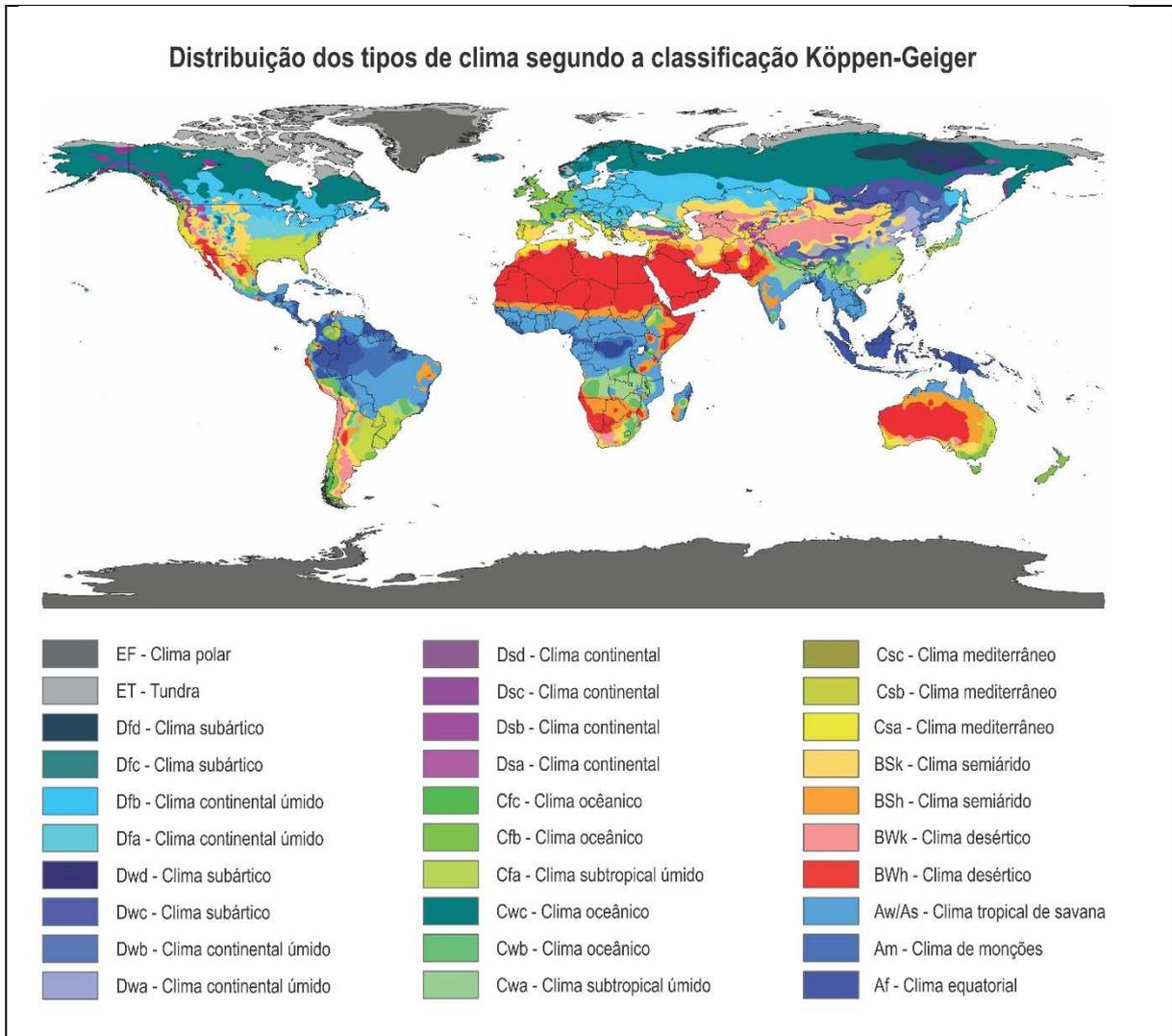
## ANEXO C – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS<sup>23</sup>

|                 | <b>IT</b> | <b>NEB</b> | <b>NDP</b> | <b>PT</b> | <b>TMAX</b> | <b>TMED</b> | <b>TMIN</b> | <b>UR</b> |
|-----------------|-----------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| <b>1ª Safra</b> |           |            |            |           |             |             |             |           |
| Sul             |           |            |            |           |             |             |             |           |
| Média           | 179,6     | 6,0        | 12,1       | 154,0     | 24,9        | 19,1        | 14,9        | 78,8      |
| Mediana         | 177,9     | 6,0        | 12,0       | 137,1     | 25,3        | 19,4        | 15,2        | 79,6      |
| Desvio padrão   | 47,2      | 1,3        | 4,7        | 94,6      | 4,2         | 4,1         | 4,0         | 6,6       |
| Amplitude       | 297,2     | 8,1        | 27,0       | 778,8     | 22,6        | 20,5        | 21,1        | 52,1      |
| Mínimo          | 20,9      | 1,6        | 1,0        | 0,0       | 12,4        | 7,1         | 2,9         | 43,6      |
| Máximo          | 318,1     | 9,7        | 28,0       | 778,8     | 35,0        | 27,6        | 23,9        | 95,7      |
| MG              |           |            |            |           |             |             |             |           |
| Média           | 207,2     | 5,3        | 9,4        | 106,9     | 29,7        | 22,7        | 17,5        | 68,8      |
| Mediana         | 209,6     | 5,4        | 8,0        | 69,0      | 29,9        | 23,0        | 18,1        | 71,0      |
| Desvio padrão   | 50,8      | 1,8        | 6,9        | 115,4     | 2,8         | 2,8         | 3,1         | 10,9      |
| Amplitude       | 275,5     | 9,1        | 28,0       | 822,4     | 17,5        | 17,5        | 19,6        | 57,9      |
| Mínimo          | 58,2      | 0,0        | 0,0        | 0,0       | 20,6        | 12,5        | 4,7         | 34,9      |
| Máximo          | 333,7     | 9,1        | 28,0       | 822,4     | 38,2        | 29,9        | 24,4        | 92,8      |
| <b>2ª Safra</b> |           |            |            |           |             |             |             |           |
| MT/MS           |           |            |            |           |             |             |             |           |
| Média           | 206,1     | 5,2        | 9,2        | 120,5     | 32,3        | 24,6        | 19,2        | 75,7      |
| Mediana         | 208,9     | 5,2        | 7,0        | 74,7      | 32,5        | 25,1        | 20,0        | 78,6      |
| Desvio padrão   | 57,0      | 2,0        | 7,6        | 128,6     | 2,2         | 2,0         | 3,0         | 11,3      |
| Amplitude       | 329,3     | 8,9        | 29,0       | 612,8     | 15,8        | 13,2        | 14,0        | 58,4      |
| Mínimo          | 0,0       | 0,4        | 0,0        | 0,0       | 22,2        | 15,6        | 10,5        | 36,9      |
| Máximo          | 329,3     | 9,4        | 29,0       | 612,8     | 38,1        | 28,8        | 24,5        | 95,3      |
| PR              |           |            |            |           |             |             |             |           |
| Média           | 172,9     | 6,4        | 12,5       | 155,5     | 26,1        | 19,8        | 15,4        | 79,9      |
| Mediana         | 172,7     | 6,5        | 13,0       | 138,6     | 26,3        | 20,1        | 15,8        | 81,3      |
| Desvio padrão   | 50,1      | 1,4        | 5,2        | 97,3      | 3,5         | 3,6         | 3,8         | 7,3       |
| Amplitude       | 285,0     | 7,5        | 25,0       | 562,8     | 15,9        | 16,6        | 18,1        | 51,9      |
| Mínimo          | 20,9      | 1,9        | 1,0        | 0,0       | 17,3        | 10,6        | 5,8         | 43,6      |
| Máximo          | 305,9     | 9,5        | 26,0       | 562,8     | 33,1        | 27,2        | 23,9        | 95,5      |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

<sup>23</sup> Legenda: IT= Insolação total; NEB= Nebulosidade; NDP= N<sup>o</sup> de dias de precipitação; PT= Precipitação total; TMAX= Temperatura máxima; TMED= Temperatura média; TMIN= Temperatura mínima; UR= Umidade relativa.

## ANEXO D – TIPOS DE CLIMA NO MUNDO



Fonte: Peel, Finlayson e McMahon (2007)