

ELENA BEATRIZ PIEDRA BONILLA

**DIVERSIFICAÇÃO AGROPECUÁRIA E MUDANÇA CLIMÁTICA NO
BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Dênis Antônio da Cunha

Coorientador: Marcelo José Braga

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P613d
2020 Piedra Bonilla, Elena Beatriz, 1982-
Diversificação agropecuária e mudança climática no Brasil /
Elena Beatriz Piedra Bonilla. – Viçosa, MG, 2020.
138 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Dênis Antônio da Cunha.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 111-130.

1. Agrobiodiversidade - Brasil. 2. Mudanças climáticas.
3. Extremos climáticos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Economia Rural. Programa de Pós-Graduação
em Economia Aplicada. II. Título.

CDD 22. ed. 333.950981

ELENA BEATRIZ PIEDRA BONILLA

**DIVERSIFICAÇÃO AGROPECUÁRIA E MUDANÇA CLIMÁTICA NO
BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 13 de outubro de 2020.

Assentimento:



Elena Beatriz Piedra Bonilla
Autora



Denis Antônio da Cunha
Orientador

A mis grandes amores, Julianita y Gustavito,
por el tiempo que estuve ausente por estudiar.
A Miguelo, por pausar su profesión
para acompañarme a seguir mis sueños.

AGRADECIMENTOS

Obter o Doutorado em Economia Aplicada foi um dos desafios mais fortes que eu tenho experimentado já que comecei os estudos com filhos pequenos, longe das nossas famílias e em outra área fora das ciências agrárias. Assim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que me brindaram com todo o apoio ao longo desta jornada.

Agradeço a meus pais e irmãos, pelo amor incondicional, pelas palavras carinhosas que me fortaleceram ao longo de meus estudos. Gratidão, especial, à minha mãe, pelo tempo em que veio me acompanhar para me apoiar em Viçosa.

A meus professores do Departamento de Economia Rural (DER), pelos seus ensinamentos, sobretudo a meu orientador Prof. Dênis Cunha e coorientador Prof. Marcelo Braga, que me brindaram com uma orientação de excelentíssima qualidade.

A meus colegas das turmas de mestrado e doutorado em Economia Aplicada, que compartilharam comigo seus ensinamentos, apoio e amizade, especialmente, a Raquel Pereira Pontes, por estudar junto comigo quando mais precisava, e a Gabriel de Sampaio Morais e Cícero Augusto Braga, por sempre me brindarem com seu apoio.

Às minhas amigas Flávia Rodrigues, Carolina Jaramillo, Stephany Lioska e Delmara Teixeiras, mães-estudantes, que compartilharam comigo os cuidados de nossos filhos.

Aos nossos vizinhos do Bairro Santo Antônio, que nos acolheram como família própria. O maior carinho para Janete e Ana Maria de Souza.

À UFV, por toda a infraestrutura pública e pessoal de qualidade: RU, supermercado, escolinha (LDI-LDH), divisão de saúde que brinda pelo apoio a seus estudantes.

A todos os amigos e família que torceram por meus estudos.

Finalmente, quero agradecer de imensa forma a meus grandes amores Julianita, Gustavito e Miguel, por me acompanharem e seguirem meus sonhos.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001”.

BIOGRAFIA

ELENA BEATRIZ PIEDRA BONILLA, filha de Elena Beatriz Bonilla Córdova e Segundo Germán Piedra Ramírez, nasceu em Quito, Equador, em 08 de agosto de 1982.

Em setembro de 2001, iniciou o curso em Engenharia em Agronegócios pela Universidad San Francisco de Quito, no Equador, graduando-se com *Cum laude* em janeiro de 2008.

Em março de 2010, ingressou no Mestrado em Agroecossistemas na Universidade Federal de Santa Catarina, concluindo os requisitos necessários para obtenção do título de Magister Scientiae em outubro de 2015.

Em março de 2016, iniciou o curso de Doutorado em Economia Aplicada na Universidade Federal de Viçosa, defendendo sua tese em outubro de 2020.

RESUMO

PIEDRA-BONILLA, Elena Beatriz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2020. **Diversificação agropecuária e mudança climática no Brasil**. Orientador: Dênis Antônio da Cunha. Coorientador: Marcelo José Braga.

A variabilidade climática pode impactar consideravelmente na agricultura e nos países que dependem da produção agrícola. No futuro, espera-se que a variabilidade climática aumente em certas regiões do mundo, assim como a frequência e a intensidade de eventos extremos. A diversificação agropecuária tem sido reconhecida como importante estratégia na gestão de riscos climáticos. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo principal analisar o processo de diversificação agropecuária, compreendendo seus determinantes e seu papel como medida adaptativa às mudanças climáticas no Brasil. O estudo apresenta dois capítulos. No primeiro capítulo, a autora apresenta o arcabouço teórico e empírico da diversificação agropecuária no Brasil, utilizando abordagens socioeconômica e agrônômica. Além disso, foram discutidas as possíveis formas de diversificação agropecuária, ressaltando sua importância ambiental e econômica. Para isso, analisou-se a evolução da produção agropecuária municipal com base em dois índices, Shannon e Simpson, no período 1987-2017. Os resultados revelaram tendência à especialização de culturas, principalmente na região Centro-Oeste. No entanto, a produção agropecuária municipal foi classificada na categoria “diversificada” nesse período. Os grandes produtores tiveram relação negativa com a diversificação agropecuária, o contrário dos pequenos estabelecimentos da região Sul e Centro-Oeste. No segundo capítulo, utilizando modelos em painel de efeitos fixos, foram identificados os impactos de clima extremo sobre a diversificação agropecuária; na sequência, compreendeu-se o efeito das mudanças climáticas na diversificação da produção agropecuária de acordo com cenários futuros propostos pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Os resultados indicaram que as “médias sazonais de temperatura e precipitação”, os “dias secos consecutivos”, os “dias secos” e os “dias quentes” afetaram positivamente a diversificação, e as variáveis relativas a “geadas” e “inundações” não apresentaram efeitos estatisticamente significativos. As simulações mostraram que os municípios tenderiam a diversificar conforme o cenário climático se torne mais severo. O incremento do percentual de dias quentes no período 2045-2065 incrementaria a diversificação de culturas em 0,957% e 0,961%, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Esses resultados podem

ajudar a promover políticas públicas que fomentem práticas de diversificação, com redução de riscos climáticos na produção agrícola brasileira.

Palavras-chave: Diversificação agropecuária. Variabilidade climática. Mudanças climáticas. Índices de clima extremo

ABSTRACT

PIEDRA-BONILLA, Elena Beatriz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2020. **Agricultural diversification and climate change in Brazil.** Adviser: Dênis Antônio da Cunha. Co-adviser: Marcelo José Braga.

Climatic variability can have a considerable impact on agriculture. In the future, climate variability is expected to increase, as well as the frequency and intensity of extreme events. Crop diversification helps to reduce vulnerability to climate risks. In this context, the present research analyzed the process of agricultural diversification, understanding its determinants and its role as an adaptive measure in Brazil. Thus, the study consists of two chapters. The first chapter presented the theoretical and empirical framework of agricultural diversification in Brazil, using socioeconomic and agronomic approaches. In addition, the possible forms of agricultural diversification were presented, highlighting its environmental and economic importance. We presented the evolution of municipal agricultural production from two indices: Shannon and Simpson, in the period 1987-17. The results showed a tendency towards crop specialization, especially in the Midwest region. However, municipal agricultural production was still in the “diversified” category during this period. Farms over 1000 hectares had a negative relationship with agricultural diversification, contrary to establishments between 0 to 50 hectares in the South and Midwest. In the second essay, using fixed-effects panel models, we identified the impact of extreme weather on crop diversification; then, we analyzed the effect of climate change on the diversification according to future scenarios proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). It was found that seasonal averages of temperature and precipitation, *Consecutive Dry Days* (CDD), *Dry Days*, and *Hot days* affect positively on diversification, while for *Frost days* and *Very Heavy Rain Days*, there was no effect. The simulations showed that Brazilian municipalities would tend to diversify as the climate scenario becomes more severe. The increase in the percentage of hot days in the period 2045-2065 would increase crop diversification by 0.957% and 0.961%, in the scenarios RCP4.5 and RCP8.5, respectively. These results can help to promote public policies that promote adaptation practices in response to adverse effects of climate extreme in agriculture.

Keywords: Crop diversification. Climate variability. Climate Change. Extreme climate indices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Evolução do índice de Shannon para os municípios brasileiros por região no período de 1987 a 2017.	35
Figura 2.	Evolução do índice de Simpson.....	36
Figura 3.	Mapa correlação entre percentual de estabelecimentos por grupos de área e diversificação agropecuária (Simpson) nas regiões brasileiras de 2017	38
Figura 4.	Frequência de cultivos com maior diversificação agropecuária.....	40
Figura 5.	Relação entre a variabilidade de precipitação/temperatura e o PIB agropecuário do Brasil (1996 – 2016)	48
Figura 6.	Evolução das geadas média (dias) nos estados da região Sul no período 1985-2016	61
Figura 7.	Geadas médias (dias) da região Sul ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016	61
Figura 8.	Evolução do <i>CDD</i> - média (dias) e Número de dias secos - média nas regiões brasileiras no período 1985-2016.....	63
Figura 9.	<i>CDD</i> - média (dias) nas regiões brasileiras ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016.....	64
Figura 10.	Número de dias secos - média nas regiões brasileiras ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016	64
Figura 11.	Evolução do Número de dias de chuva muito fortes - média nas regiões brasileiras no período 1985-2016	65
Figura 12.	Número de dias de chuvas muito fortes - média ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016.....	65
Figura 13.	Frequência de inundações no Brasil (1985-2015)	66
Figura 14.	Evolução da Quantidade de dias quentes - média (%) nas regiões brasileiras no período 1985-2016	67
Figura 15.	Quantidade de dias quentes - média (%) ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016	68
Figura 16.	Evolução diversificação agropecuária (Índice Simpson) nos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017	77
Figura 17.	Temperatura média e Precipitação acumulada anual das AMC das regiões brasileiras	80
Figura 18.	Evolução esperada da temperatura média anual (°C) e precipitação acumulada (mm) no Brasil (2016-2065).....	91
Figura 19.	Evolução esperada do <i>CDD</i> (dias) no Brasil e Nordeste (2016-2065)...	92
Figura 20.	Evolução esperada dos dias secos no Brasil e Nordeste (2016-2065)....	93
Figura 21.	Evolução esperada dos dias quentes no Brasil (2016-2065).....	94
Figura 22.	Variação porcentual na diversificação agropecuária no Brasil sob cenários de clima futuro de <i>TX90p</i>	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. A diversificação dentro e fora do estabelecimento agrícola.....	24
Tabela 2. Correlação entre tamanho médio do estabelecimento agropecuário e diversificação no Brasil e suas regiões no 2006 e 2017	37
Tabela 3. Principais pesquisas na literatura internacional que analisam a Diversificação Agrícola.....	43
Tabela 4. Literatura relativa à Diversificação Agrícola e Variáveis Climáticas	53
Tabela 5. Definição dos índices de clima extremo.....	59
Tabela 6. Definição das variáveis explicativas, unidades de medida e sinal esperado conforme a literatura.....	71
Tabela 7. Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas, valores agregados para o Brasil nos anos de censo agropecuário (1996, 2006 e 2017).....	76
Tabela 8. Quantidade e Valor de produtos por setor agropecuário dos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006, 2017.....	78
Tabela 9. Efeitos das médias sazonais na diversificação agropecuária do Brasil	81
Tabela 10. Efeitos das geadas na diversificação agropecuária da região Sul.....	83
Tabela 11. Efeitos do <i>CDD</i> na diversificação agrícola no Brasil e no Nordeste.....	84
Tabela 12. Efeitos dos dias secos na diversificação agrícola no Brasil.....	86
Tabela 13. Efeitos dos dias muito chuvosos na diversificação agrícola no Brasil.....	88
Tabela 14. Efeitos dos dias quentes na diversificação agrícola no Brasil	89
Tabela 15. Efeito do cenário das mudanças climáticas na variação da diversificação agropecuária ($(\% \Delta Sit)$) no Brasil.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AMC - Área de Mínimas Comparáveis
- ATER - Assistência Técnica e Extensão Rural
- CAP - *Common Agricultural Policy*
- CDD – *Consecutive Dry Days*
- CoV - Coeficiente de Variação
- CRE - *Correlated Random Effects*
- CSA - *Climate-Smart Agriculture*
- DAP - Declaração de Aptidão ao Pronaf
- DP – Desvio padrão
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- ET-SCI - *Expert Team on Sector-Specific Climate Indices*
- FAO – *Food and Agriculture Organization*
- FD – *Frost days*
- GCM – *General Circulation Model*
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- HadGEM2-ES – *Hadley Centre Global Environmental Model versão 2*
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ILP – Integração Lavoura Pecuária
- iLPF – Integração Lavoura Pecuária Floresta
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IRI – *International Research Institute for Climate and Society*
- MAPA – Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- MATOPIBA – Maranhão Tocantins Piauí Bahia
- MDA - Ministério de Desenvolvimento Agrário
- MIROC-ESM – *Model for Interdisciplinary Research on Climate*
- MRI-CGCM3 – *Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3*
- NCEP–NCAR - *National Center for Environmental Prediction/Nacional Center for Atmospheric Research*
- P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
- PAA - Programa de Aquisição de Alimentos
- PAM - Produção Agrícola Municipal PAM - Produção Agrícola Municipal
- PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura

PIB – Produto Interno Bruto

Planapo - Plano Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica

Plano ABC – Plano Agricultura de Baixa Emissão de Carbono

Pnae - Programa Nacional de Alimentação Escolar

PPM - Pesquisa da Pecuária Municipal

PR – Precipitação

Pronaf – Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar

R20mm – Número de dias de chuva muito forte

RCP - *Representative Concentration Pathway*

Rn1mm – Número de dias sem chuva

SAM - Sistemas Agropecuários Mistos

SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática

SPD - Sistema de Plantio Direto

SPI - *Standard Precipitation Index*

SUR - *Seemingly Unrelated Regression*

THRG - *Terrestrial Hydrology Research Group*

TN - Temperatura mínima

TX - Temperatura máxima

TX90p – Quantidade de dias quentes

UE – União Europeia

VP - Valor da Produção

WMO - *World Meteorological Organization*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1.	Hipótese	20
1.2.	Objetivos da pesquisa	20
1.2.1.	Objetivo geral	20
1.2.2.	Objetivos específicos.....	20
2.	DIVERSIFICAÇÃO AGROPECUÁRIA NO BRASIL.....	21
2.2.	Definição de diversificação agropecuária.....	23
2.3.	Formas de diversificação agropecuária	26
2.3.1.	Consórcio de culturas	26
2.3.2.	Sucessão de culturas	27
2.3.3.	Rotação de culturas.....	28
2.3.4.	Integração Lavoura-Pecuária	29
2.3.5.	Sistemas Agropecuários Mistos (SAM)	30
2.3.6.	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)	31
2.3.7.	Agroflorestas	31
2.4.	Mensurando a diversificação agropecuária no Brasil.....	32
2.4.1.	Estatísticas no Brasil.....	34
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	42
3.1.	Revisão de literatura	42
3.2.	Referencial teórico.....	54
4.	METODOLOGIA.....	56
4.1.	Estratégia empírica	56
4.1.1.	Geadas	59
4.1.2.	Seca.....	62
4.1.3.	Inundação.....	64
4.1.4.	Dias quentes.....	66
4.2.	Modelo analítico	68
4.3.	Fontes de dados	74
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
5.1.	Análise descritiva das variáveis.....	76
5.2.	Impactos dos eventos de variabilidade climática e clima extremo sobre a diversificação agropecuária	80
5.3.	Projeções futuras do impacto das mudanças climáticas sobre a diversificação agropecuária.....	90
5.4.	Discussão dos resultados	99
6.	CONCLUSÃO GERAL	108
7.	REFERÊNCIAS	111

8.	ANEXOS	131
----	--------------	-----

1. INTRODUÇÃO GERAL

A agropecuária é um dos setores econômicos mais sensíveis às mudanças climáticas, já que sua produtividade depende diretamente das condições de temperatura e precipitação da área geográfica onde é desenvolvida (TOL, 2018). De modo geral, os estudos mostram que os impactos negativos das mudanças climáticas no rendimento das culturas são mais prováveis do que os impactos positivos¹ (*International Panel on Climate Change – IPCC, 2014, p. 51*). Desse modo, o desempenho econômico das nações que dependem muito desse setor pode ficar comprometido.

No Brasil, os impactos negativos das mudanças climáticas na agricultura podem causar elevadas perdas econômicas, pois o agronegócio responde por parcela expressiva do Produto Interno Bruto (PIB) (ao redor de 21%) do país (CEPEA, 2018). Estimativas para médio e longo prazo indicam que o Brasil pode ter perdas de produtividade agrícola que variam entre 19% e 40% (ASSUNÇÃO; CHEIN, 2016), com severas consequências em nível local, sobretudo nas regiões mais pobres do país (FERREIRA FILHO; MORAES, 2014). Ademais, as áreas nas quais se pode realizar a dupla safra, um dos maiores fatores de sucesso da agricultura brasileira, podem ser drasticamente reduzidas até 2050 (ABRAHÃO; COSTA, 2018)

No entanto, os impactos negativos esperados na agricultura podem ser reduzidos se ações de adaptação às mudanças climáticas forem empreendidas. Existem muitas opções potenciais de adaptação disponíveis para mudanças marginais nos sistemas agrícolas atuais (MAGRIN et al., 2014; HOWDEN et al., 2007; SMIT; SKINNER, 2002), visto que a decisão dos agricultores pode ser afetada por questões edafoclimáticas, culturais, institucionais e econômicas (HOWDEN et al., 2007). A adaptação tem vários âmbitos no setor agrícola, por exemplo, os desenvolvimentos tecnológicos, os programas governamentais e seguros agrícolas, as alterações de práticas de produção e os manejos financeiros agrícolas (SMIT; SKINNER, 2002). Ademais, o planejamento adequado de ações adaptativas envolve a análise das opções disponíveis, suas potencialidades e limitações, bem como as incertezas associadas às mudanças climáticas (CUNHA et al., 2015).

Por outro lado, a agropecuária é uma das responsáveis pelas mudanças climáticas, já que as emissões diretas do setor, bem como o desmatamento para a conversão de terras agrícolas, representam aproximadamente 25% de todas as emissões

¹ Existem poucos estudos que mostram impactos positivos das mudanças climáticas na agricultura (IPCC, 2014, p. 51).

antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) no mundo (IPPC, 2014). No Brasil, as emissões relacionadas às mudanças no uso da terra e agropecuária somadas correspondem por, aproximadamente, 70% do total emitido em 2017 (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG, 2019). Por conseguinte, o adequado planejamento de ações de adaptação requer o desenvolvimento de práticas agrícolas que reduzam a vulnerabilidade dos agricultores e, ao mesmo tempo, contribuam com a sustentabilidade do sistema, reduzindo emissões de GEE. Dessa forma, podem ser geradas sinergias entre as práticas adaptativas com medidas de mitigação de emissões (SMITH et al., 2013).

Nesse contexto, a diversificação de culturas tem sido reconhecida como importante prática de adaptação (ASFAW; PALLANTE; PALMA, 2018; ASRAVOR, 2017; WELDEGEBRIEL; PROWSE, 2017; THAMO et al., 2017; MITTER; HEUMESSER; SCHMID, 2015; MAGRIN et al., 2014; BELOW et al., 2010). Conforme Asfaw, Pallante e Palma (2018), a diversificação tem impactos de bem-estar positivos e significativos quando as famílias mais vulneráveis dependem dela como uma estratégia de adaptação à variabilidade climática.

Em termos específicos, a diversificação de culturas promove ganhos econômicos por auxiliar na redução da variabilidade da renda do agricultor, no aumento da produtividade de recursos escassos (JOSHI, 2004; JOSHI et al. 2004), na redução da pobreza (MICHLER; JOSEPHSON, 2017; TAFFESSE; DOROSH; GEMESSA, 2013; FAO, 2012), na adaptação a mudanças climáticas e na melhora da segurança alimentar. A diversificação contribui para a viabilidade a longo prazo da agricultura, melhorando a rentabilidade e a estabilidade do setor, já que os impactos positivos estão ligados à renda e à produção geral (JOSHI, 2004; RAHMAN, 2009). Ao mesmo tempo, a diversificação de cultivos pode aumentar a eficiência técnica nos sistemas agrícolas, inclusive superar em valores de eficiência os estabelecimentos especializados² (NGUYEN, 2017; RAHMAN, 2009; COELLI; FLEMING, 2004). Conforme Rahman (2009), quando o estabelecimento é diversificado em cultivos, o agricultor aproveita a oportunidade para selecionar atividades que se complementam, dada a natureza da sazonalidade na demanda de trabalho em particular. Essa constatação implica a presença potencial de economias de escopo e retornos crescentes de escala, que têm importantes implicações no desempenho econômico (NGUYEN, 2017; RAHMAN, 2009; PAUL; NEHRING, 2005; COELLI; FLEMING, 2004).

² Esses resultados foram obtidos usando a Análise de Fronteira Estocástica com função de distância de insumo.

Em termos ambientais, a diversificação promove serviços de diversidade biológica que elevam a produtividade agrícola (VAN DUSEN, 2000). A rotação ou alternância da produção entre culturas e pecuária tem o potencial de reduzir a erosão do solo, melhorar a umidade e a retenção de nutrientes (DELCOURT & VAN KOOTEN, 1995). Adicionalmente, a associação entre leguminosas e cereais, por exemplo, melhora a fertilidade do solo, pois as leguminosas têm a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico no solo. Em relação à supressão de pragas, os sistemas agrícolas diversificados, com maior riqueza de espécies de cultivos distribuídos no espaço e no tempo, são mais similares aos sistemas naturais e, assim, mantêm maior diversidade de espécies de animais, de forma que muitos deles podem ser inimigos naturais das pragas dos cultivos (ALTIERI, 1999; LIN, 2011). Além disso, o aumento de diversidade genética na produção de cultivos diminui a susceptibilidade a doenças, porque tem taxa menor de transmissão/contágio (LIN, 2011). Assim, sistemas diversificados aumentam a resiliência do solo e do ecossistema (SCHOUTEN et al., 2013; LIN, 2011). Por isso, a diversificação é considerada prática da Agricultura Inteligente para o Clima (*Climate-Smart Agriculture* - CSA). As tecnologias do tipo CSA abordam o risco relacionado ao clima, melhoram a segurança alimentar, como também contemplam no mínimo dois benefícios entre produtividade, resiliência e mitigação de emissões de GEE (LIPPER et al., 2017; ROSENSTOCK et al., 2016). Por exemplo, verificou-se que sistemas apropriados de rotação de culturas diversificadas reduzem a pegada de carbono na planície do norte da China (YANG et al., 2014) e práticas agroflorestais sustentáveis na África ajudam a alcançar ações de mitigação e adaptação bem-sucedida (MBOW et al., 2014).

Em função da discussão anterior, é possível afirmar que a diversificação agropecuária, ao possibilitar a melhora da resiliência do produtor rural, poderá ser cada vez mais utilizada, considerando os cenários de mudanças climáticas no Brasil. O Brasil se destaca por ser o terceiro maior exportador de alimentos (depois dos Estados Unidos e da Holanda), mas também foi o terceiro maior emissor de GEE na agricultura (depois da China e da Índia) em 2016 (FAO, 2018). Porém seu potencial de medida adaptativa pode ser reforçado no país em razão da grande superfície agrícola em diferentes zonas agroecológicas, o que permite ter ampla agrobiodiversidade. Ao mesmo tempo, a agricultura brasileira se tem desenvolvido muito em inovações tecnológicas, incluindo técnicas sustentáveis, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária (VIEIRA FILHO, 2014). Porém há pouca literatura sobre a diversificação agropecuária no país. Embora existam trabalhos recentes, como de Sambuichi et al. (2016) e de Herrera et al.

(2018), que analisam os determinantes socioeconômicos da diversificação de produção, o foco recai apenas nos estabelecimentos da agricultura familiar no Brasil.

Na literatura, há poucos estudos que analisam a relação entre clima e diversificação agropecuária na região de América do Sul. Seo (2010) mostrou que os agricultores sul-americanos (inclusive os brasileiros) escolhem um sistema misto em vez de sistemas especializados quando o clima é mais quente e a precipitação varia significativamente de um ano para o outro. Contudo, há pesquisas relacionadas a outras regiões do mundo, em que se observa que a escolha de número de culturas é determinada por diferentes variáveis climáticas (temperatura, precipitação, eventos extremos etc.) (SEO, 2011; DILLON et al., 2015, MCCORD et al., 2015; RAHMAN 2016; ASFAW et al., 2018; ASFAW et al., 2019; TESFAYE e TIRIVAYI, 2020). A pesquisa dessa relação levaria a uma compreensão de como o uso da terra agrícola muda devido ao clima. Assim, poderia auxiliar na elaboração de políticas para promover mudanças no uso da terra com a finalidade de aumentar a eficiência no uso de recursos escassos (água e terras férteis) e reduzir a vulnerabilidade climática. Além disso, permitiria examinar as respostas adaptativas e as medidas de mitigação de emissões adotadas pelos municípios brasileiros. Essas políticas podem ser introduzidas por meio de serviços ou de crédito rural para promover sistemas agrícolas diversificados apropriados.

Assim, considerando a discussão apresentada, este projeto pretende refletir a seguinte questão: a diversificação agropecuária em escala municipal brasileira respondeu à variabilidade climática no passado recente e poderá ser afetada por cenários futuros de mudanças climáticas?

Neste estudo, a diversificação é contemplada como as diversas atividades que os produtores desenvolvem dentro do estabelecimento agrícola, ligadas à produção de espécies diretamente utilizadas na agropecuária com interesse econômico durante um período de tempo. Ademais, a pesquisa busca compreender melhor o processo de diversificação na agricultura brasileira, enfatizando seu papel como medida adaptativa às mudanças climáticas. Assim, pretende-se entender a influência da variabilidade climática sobre a diversificação de culturas e também simular futuros impactos das mudanças climáticas sobre ela.

De modo geral, acredita-se que este estudo tenha o potencial de contribuir para o melhor entendimento sobre o desenvolvimento agrícola no Brasil, bem como sobre o desenho e o ajuste de políticas ligadas às mudanças climáticas. Na primeira parte da pesquisa, será apresentado o cenário brasileiro em relação à diversificação. Na segunda

parte, os resultados auxiliarão no entendimento da escolha da diversificação agropecuária como medida adaptativa e como os cenários futuros de mudanças climáticas poderão contribuir nesse processo. Dessa forma, espera contribuir para o desenho de possíveis projetos de Pesquisa e Desenvolvimento de sistemas agrícolas diversificados como tecnologia com potencial de aumentar o desempenho socioeconômico das regiões. Por fim, este estudo complementa a literatura sobre a diversificação de culturas como medida adaptativa às mudanças climáticas, fornecendo evidências empíricas em âmbito regional.

1.1. Hipótese

- a) A diversificação agrícola se expandirá nos municípios brasileiros quando considerados cenários futuros de mudanças climáticas.

1.2. Objetivos da pesquisa

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral é analisar o processo de diversificação agropecuária, compreendendo seus determinantes e seu papel como medida adaptativa nos municípios brasileiros. Especificamente, pretende-se:

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Identificar o grau de diversificação de produção agrícola municipal brasileira.
- ii. Verificar o impacto da variabilidade climática sobre a diversificação agropecuária nos municípios brasileiros no passado recente.
- iii. Compreender o efeito de cenários futuros de mudanças climáticas na diversificação da produção agropecuária municipal.

2. DIVERSIFICAÇÃO AGROPECUÁRIA NO BRASIL

A diversificação tem importante papel para reduzir riscos e permitir economia de escopo nas atividades agropecuárias. Contudo, de acordo com Joshi et al. (2004), o conceito de diversificação expressa significados diferentes a depender dos sujeitos, níveis, abordagens e contextos analisados, podendo ser de vários tipos. Estes tipos de diversificação, por sua vez, são afetados pela ampla diversidade agroecológica e socioeconômica que uma região pode ter como também por suas práticas agropecuárias. Ainda assim, são escassos na literatura brasileira estudos sobre a diversificação agropecuária³, sobretudo aqueles com análises quantitativas (SAMBUICHI et al., 2016).

Existe, na literatura, uma discussão que passa pela diversificação segundo dois componentes principais: exposição ao risco e renda esperada (PAUT; SABATIER; TCHAMITCHIAN; 2020; CHAVAS e DI FALCO, 2011). Deste último componente, surge a discussão de economia de escopo que se manifesta quando a diversificação implica uma redução dos custos associada a um processo de um ou mais produtos diferentes como resultado (BAUMOL et al., 1982; De ROEST et al., 2018). Em levantamento de estudos de caso, De Roest et al. (2018) mostraram que a diversificação e economias de escopo, de fato, contribuem significativamente para caminhos de desenvolvimento agrário mais resilientes.

Neste sentido, o objetivo deste capítulo é discutir o conceito da diversificação agropecuária dentro do estabelecimento com culturas agrícolas e pecuárias, pela ótica socioeconômica e agrônômica. Ademais, no intuito de ilustrar o cenário brasileiro, constrói e analisa dois índices de diversificação dos municípios brasileiros. Esta discussão contribui com a literatura no intuito de sistematizar conceitos em relação à diversificação agropecuária e suas vantagens (ou não) para o desenvolvimento rural e para que os agricultores de diferentes tamanhos sejam mais produtivos. Complementarmente, as evidências dos produtores brasileiros incorporam a discussão e permitem inferências de políticas públicas e repensar novas formas de adaptação, sobretudo para aqueles produtores mais vulneráveis. Para tal, o capítulo é dividido em 5 seções. A primeira seção apresenta uma discussão sobre a diversificação em relação à Economia de escopo e à Gestão de riscos. A seção 2.2 se dedica a conceituar a diversificação agropecuária, enquanto na seção 2.3, são descritas as diferentes formas

³ Os trabalhos encontrados sobre o tema são focados na diversificação na agricultura familiar (SAMBUICHI et al., 2016; HERRERA et al., 2018).

como ela pode ser exercida. A Seção 2.4 busca explorar empiricamente a relação da diversificação nos municípios brasileiros. Por fim, são apresentadas as considerações finais do capítulo.

2.1. Diversificação: Economia de escopo e riscos

A discussão da economia de escopo nasce da Economia Industrial em que as empresas tendem a produzir mais de um produto. Desse modo, a estrutura produtiva das empresas – ou, no caso aqui apresentado, dos estabelecimentos agropecuários – deveria levar em consideração não só o próprio volume de produção, mas de toda a planta produtiva. A partir daí, nascem as economias de escopo que, de acordo com Kufper e Hasenclever (2013), podem ser definidas como:

$$C(q_a, q_b) < C(q_a, 0) + C(0, q_b) \quad (1),$$

em que C é o custo q_a e q_b são produtos. A equação 1 indica que é mais vantajoso produzir dois produtos concomitantemente do que produzi-los separadamente. Nesse caso, ocorre redução nos seus custos médios ao produzir mais tipos de produtos. Os mesmos autores ademais apontam que a existência de economia de escopo se deve principalmente a três fatores principais: a) existência de fatores comuns, b) existência de reserva de capacidade e c) complementariedades tecnológicas e comerciais.

A existência de fatores comuns refere-se especialmente ao uso de insumos comuns, que podem ser usados na produção de diferentes bens. Neste caso, adquirido um fator, o custo marginal para utilização na produção de outro produto é praticamente zero. No caso da produção agropecuária, pode-se pensar em sistemas de irrigação, posto que existe uma estrutura preparada para a técnica, em períodos de safra e entressafra, por exemplo, o custo para irrigar diferentes culturas seria praticamente nulo. Reduz-se, portanto, o custo médio de todos os produtos adicionais, visto que o investimento já foi feito.

A segunda fonte de economia de escopo baseia-se na possibilidade de compartilhamento de insumos, ou reserva de capacidade, permitindo produzir concomitantemente diferentes culturas. Baseia-se no aproveitamento total da planta produtiva, de modo que uma produção complementar serviria para ocupar a capacidade ociosa quando da produção de um único produto.

Por fim, as complementariedades tecnológicas e comerciais, especialmente no caso da produção agropecuária, parecem ir ao encontro das duas primeiras fontes de economia de escopo. Ela diz respeito a produções suficientemente semelhantes em

termos tecnológicos e/ou comerciais, de modo a permitir a utilização de insumos ou táticas de mercado semelhantes para a produção e comercialização dos diferentes produtos.

Percebe-se, portanto, que a teoria econômica sobre as Economias de Escopo dialoga com o conceito da diversificação agropecuária, visto ser capaz de explicar a possibilidade de complementariedade para aumento das receitas (e/ou redução dos custos), tornando os produtores menos suscetíveis em termos de riscos e incertezas agropecuárias.

Além da economia de escopo, a gestão de riscos pode ser um dos motivos da diversificação agropecuária (CHAVAS e DI FALCO, 2011). Segundo o Banco Mundial (2015), o risco agropecuário está ligado a consequências negativas causadas por fatores imprevisíveis de produção (climáticos e incêndios, sanidade animal e vegetal, gestão da produção e de recursos naturais), de mercado (preços de insumos e produtos, crédito, comércio exterior) e de ambiente de negócios (logística e infraestrutura, marco regulatório, políticas, instituições). A diversificação da produção é considerada uma estratégia de mitigação para prevenir, reduzir ou eliminar a ocorrência de impactos negativos à produção agropecuária. Por exemplo, evidências indicam que a diversificação de culturas auxilia na redução da pobreza (MICHLER; JOSEPHSON, 2017), na adaptação de mudanças climáticas (PIEDRA-BONILLA; DA CUNHA; BRAGA, 2020; SCHEMBERGUE et al., 2017) e no melhoramento da segurança alimentar dos agricultores (WAHA et al., 2018; ADJIMOTI; KWADZO, 2018; DILLON; MCGEE; OSENI, 2015). A diversificação pode se dar de distintas maneiras e a partir de diferentes táticas. Neste sentido, a próxima seção se dedica a explorar os conceitos existentes na literatura sobre a diversificação, bem como apresentar suas diferentes formas.

2.2. Definição de diversificação agropecuária

A diversificação tem duas principais abordagens no que tange a estabelecimentos agropecuários. Na primeira, abordagem socioeconômica, a diversificação é dividida dependendo da fonte de renda, dentro do estabelecimento (*on-farm*), fora do estabelecimento (*off-farm*) ou pluriativa (ARSLAN et al., 2018; SAMBUICHI et al., 2014; JOSHI, 2004; ELLIS, 2000). Além disso, existe também a abordagem agronômica ou da agrobiodiversidade, que contempla a diversificação inter e intraculturas dentro do estabelecimento (BROOKFIELD, STOCKING, 1999; SANTILLI, 2009). Ou seja, a análise da diversificação permite que os produtores

desenvolvam duas ou mais atividades agropecuárias na mesma propriedade e/ou desempenhem diferentes atividades agropecuárias ou não que complementem sua renda.

Os motivos da escolha de qualquer desses tipos de diversificação estão associados aos ganhos de eficiência e redução de riscos. Se os produtores são avessos ao risco e percebem que a variabilidade de renda é maior em uma atividade do que em outra, eles alocarão menos tempo para a atividade de maior risco (ARSLAN et al., 2018; MCNAMARA, WEISS, 2005). Na Tabela 1, são sintetizadas essas duas abordagens, destacando possíveis atividades desenvolvidas pelos agricultores dentro e fora do estabelecimento, relacionadas ou não com a agropecuária. Observa-se que os eles têm à sua disposição amplo portfólio de estratégias para lidar com os riscos econômicos e climáticos.

Tabela 1. A diversificação dentro e fora do estabelecimento agrícola

	Atividades <i>on-farm</i>	Atividades <i>off-farm</i>
Atividades agropecuárias	<ul style="list-style-type: none"> • Agrícola (lavouras temporárias e permanentes, horticultura, floricultura etc.) • Pecuária (ovinocultura, suinocultura, apicultura, bovinocultura etc.) • Silvicultura • Extrativismo vegetal • Aquicultura 	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalho temporário de colheita, plantio etc. • Arrendamento de terras • Aluguel de equipamentos e benfeitorias
Atividades não agropecuárias	<ul style="list-style-type: none"> • Serviços rurais (turismo, alimentação etc.) • Atividades de transformação de alimentos e fibras 	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalho assalariado ou autônomo não agrícola (comércio, serviços) • Aposentadoria, pensões, bolsas sociais.

Fonte: Elaboração dos autores a partir de Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2019).

Da diversificação *off-farm*, emerge o conceito de pluriatividade, que permite a compreensão da realidade dos agricultores em uma perspectiva que ultrapassa os limites das propriedades. Segundo Schneider (2001), a pluriatividade é uma estratégia utilizada nos estabelecimentos agropecuários que operam fundamentalmente com base no trabalho familiar, em que algum membro da família se articula com o mercado de trabalho agrícola ou não agrícola. Embora a maior parte (52%) dos estabelecimentos de agricultura não familiar sejam pluriativos do que na própria agricultura familiar (34%) no Censo do 2006 (ESCHER et al., 2014); no censo do 2017, constata-se esse mesmo resultado, mas é aumentado o percentual em ambas as tipologias - agricultura não familiar (78%) e agricultura familiar (68%). As atividades *off-farm* serão escolhidas pelos membros da família quando a renda *on-farm* for menor que o salário de reserva da família (MCNAMARA, WEISS, 2005). Portanto, os agricultores familiares podem

estabelecer iniciativas de diversificação externamente à sua propriedade e aumentar as fontes e as formas de acesso à renda (SCHNEIDER, 2007).

Ambas as rendas - *on-farm* e *off-farm* - podem ser obtidas em atividades agropecuárias ou não. No caso das rendas *off-farm*, as atividades agropecuárias são contempladas desde empregos fixos e temporários agropecuários até o aluguel de suas terras ou equipamentos. Já no caso das rendas não agropecuárias, *off-farm*, são incluídos trabalhos autônomos ou assalariados no comércio e serviços, bem como rendas de aposentadorias, pensões ou bolsas sociais. Por sua vez, as atividades *on-farm* agropecuárias relacionam-se ao conceito de agrobiodiversidade, definido como a variedade e a variabilidade de animais, plantas e microrganismos, que são, direta ou indiretamente, utilizados para a alimentação e a agricultura, incluindo cultivos, pecuária, silvicultura e pesca (FAO, 1999; SANTILLI, 2009). Já as atividades não agropecuárias são aquelas que de forma sucessiva ou simultânea complementam as atividades agropecuárias, como, por exemplo, serviços de turismo, de alimentação, atividades de transformação de alimentos e fibras.

Este estudo se concentra na diversificação *on-farm* de culturas de interesse econômico, especificamente agrícolas e pecuárias, por serem as atividades predominantes na área rural. A diversificação agrícola ou de cultivos (*crop diversification*) faz referência a uma mistura de lavouras temporárias e/ou permanentes. As lavouras temporárias compreendem os plantios de culturas de curta duração, de menos de um ano, que necessitam, geralmente, de novo plantio após cada colheita. As lavouras permanentes abarcam os plantios de culturas de longa duração, que, após a colheita, não necessitam de novo plantio, produzindo por vários anos sucessivos (IBGE, 2002). Por isso, na diversificação agrícola, entende-se a possibilidade de cultivos sucessivos ou simultâneos (simples, associados e/ou intercalados) no mesmo ano e local. Do mesmo modo, a diversificação pecuária está ligada a atividades que envolvam a criação de diferentes tipos de gado e a diversificação florestal envolve atividades ligadas à silvicultura (florestas plantadas) e ao extrativismo vegetal (exploração dos recursos florestais nativos).

Por conseguinte, a diversificação agropecuária é uma junção entre as atividades agrícolas (lavoura) e/ou pecuárias que mesclam diferentes tipos de cultivos e gado (JOSHI et al., 2004). Assim, o conceito de “diversificação agropecuária” é referente às distintas atividades *on-farm*, ligadas à produção mista de espécies agrícolas e/ou pecuárias, com interesse econômico durante um período de tempo de um ano. Já o conceito de “diversificação agropecuária-floresta” inclui também espécies florestais.

Assim, pode-se observar que esse conceito abarca uma noção espacial-temporal, considerando o estabelecimento agropecuário subordinado a um único produtor e o período de um ano. Em razão dessas especificidades, a diversificação agropecuária não pode ser confundida com o conceito de pluriatividade.

2.3. Formas de diversificação agropecuária

O desempenho econômico dos estabelecimentos na diversificação agropecuária está ligado às economias de escopo⁴, devido à economia obtida com redução dos custos de produção conjunta (RAHMAN, 2009; MCNAMARA, WEISS, 2005; PAUL e NEHRING, 2005). Em vista disso, os produtores desenvolvem atividades agropecuárias sucessivas ou simultâneas no mesmo ano e no mesmo local, procurando obter benefícios agrícolas ou econômicos dessa associação de culturas. Sendo assim, a diversificação agropecuária abrange ampla variedade de tecnologias necessárias, que podem redesenhar sistemas agrícolas mais produtivos, estáveis e sustentáveis (ANDRADE et al., 2017). Rosenstock et al., (2016) destacam que entre as principais formas de diversificação agropecuária estão: a) o consórcio de culturas; b) a sucessão de culturas; c) a rotação de culturas; d) a integração lavoura-pecuária; e) os sistemas mistos agropecuários, f) integração lavoura-pecuária-floresta; e g) agroflorestas. Esta seção, portanto, se dedicará a apresentar cada uma destas formas de diversificação bem como destacar seus benefícios agropecuários, ambientais e econômicos.

2.3.1. Consórcio de culturas

O consórcio de culturas (*intercropping*), ou mistura de culturas, consiste no cultivo simultâneo de duas ou mais espécies vegetais em uma mesma área, no mesmo período de tempo. O arranjo de culturas no mesmo espaço pode ser em fileiras alternadas, faixas ou mosaico, uma servindo de bordadura ou cobertura para a outra, sem arranjo definido (SEDIYAMA; DOS SANTOS; DE LIMA, 2015). As plantas podem ser semeadas ou plantadas ao mesmo tempo ou com breves espaços com o objetivo de maximizar o uso de terra.

A prática do consórcio de culturas é antiga na agricultura e resulta em vários benefícios econômicos, agropecuários e ambientais⁵. Ela implica o aproveitamento de

⁴ Redução do custo médio pela produção conjunta de mais de um produto ou serviço.

⁵ Uma das primeiras experiências de consórcio de culturas foi a *milpa* (milho, feijão e abóbora), desenvolvida na época pré-hispânica no México, que trazia interações positivas para ambas as culturas: o feijão, por ser uma leguminosa, nitrifica o solo (principal elemento na adubação), enquanto o milho ajuda

nutrientes do solo, água, luz e prevenção de pragas, pois existe interação fisiológica entre as espécies consorciadas, que complementam suas necessidades, diminuindo a concorrência entre as culturas. O mais comum é o consórcio de um cereal com uma leguminosa, em que a fixação de nitrogênio no solo pela leguminosa complementa a adubação do outro cultivo, melhora o manejo biológico de pragas, reduz a erosão do solo e aumenta a eficiência no uso de água (CHAPAGAIN et al., 2018; LEMKEN; SPILLER; VON MEYER-HÖFER, 2017).

Existem, ainda, consórcios de outros tipos, como entre tubérculos e leguminosas (GITARI et al., 2018) ou consórcios entre fruteiras (VAN ASTEN et al., 2011), em que os rendimentos observados são maiores em comparação aos sistemas de monocultura. De fato, Martin-Guay et al. (2018), em revisão de 126 pesquisas em 41 países, que contemplaram 939 observações de consórcio de dois cultivos, encontraram que, em comparação com a monocultura, os consórcios produziram, em média, 38% mais energia bruta, 33% mais renda bruta e utilizaram 23% menos terra. No Brasil, Perdoná e Soratto (2015) mostraram que o consórcio de macadâmia com café arábica pode superar (51% sem irrigação; 252% com irrigação) à produtividade da monocultura.

No entanto, a eficiência do consórcio de cultivos depende da densidade e do tipo de cada espécie vegetal que compõe o sistema para se complementar mutuamente (DE VASCONCELOS BATISTA et al., 2016). Os autores observaram que a eficiência técnica da cenoura e rúcula no Nordeste brasileiro depende da manipulação das densidades populacionais. Outro fator importante na escolha dos consórcios é a estação do ano. Por exemplo, Chapagain et al. (2018) mostraram que, no Nepal, enquanto a combinação de milho e feijão foi a mais adequada para a primavera-verão, no inverno, a melhor escolha seria a combinação de trigo e ervilha.

2.3.2. Sucessão de culturas

O sistema de cultivo em sucessão consiste na alternância de culturas dentro do período de um ano. Ela se diferencia do consórcio ao passo que diferentes espécies podem ser semeadas ou plantadas em períodos diferentes, depois da safra de uma delas, na mesma área.

Uma adequada sucessão de culturas pode apresentar diversos benefícios por ser menos intensiva no uso de herbicidas e fungicidas em comparação com sucessões da mesma cultura (ANDERT et al., 2016). Além disso, permite altas concentrações de

como mecanismo de suporte para o crescimento do feijão e sombra para a abóbora e a abóbora beneficia o consórcio pelo controle de plantas e insetos indesejados (GOMES, JCC et al., 2010).

nitrogênio e biomassa microbiana do solo, melhorando sua qualidade e sua umidade (DAS et al., 2018). Esses benefícios diminuem custos ao produtor e causam menor impacto ambiental. Por outro lado, as sucessões das mesmas culturas na mesma área podem aumentar a ocorrência de pragas e doenças e, conseqüentemente, diminuir a produtividade. Sendo assim, a prática é recomendada para a conservação de solo e o controle de pragas, doenças e plantas daninhas.

Uma combinação adequada de sucessão e consórcio de culturas pode trazer melhores rendimentos do que monoculturas (CHAPAGAIN et al., 2018; ANDRADE et al., 2017). Nos Pampas argentinos, vários experimentos indicam que a repetição de safras de sucessão de cereais reduz suas produtividades, enquanto sucessões de consórcios bem equilibradas⁶, que incluem leguminosas, resultaram nas mais altas produtividades das culturas de cereais (ANDRADE et al., 2017).

No Brasil, tem-se a sucessão contínua de cultivo de soja no verão, seguido dos cultivos milho ou algodão no inverno, repetido todos os anos (FORTINI, 2018). A dupla safra tem-se convertido um dos maiores fatores de sucesso da agricultura brasileira por estar ligada ao aumento da rentabilidade dos estabelecimentos agropecuários. Desse modo, a maior parte do milho (58%) é produzido em dupla safra (ABRAHÃO; COSTA, 2018).

2.3.3. Rotação de culturas

A rotação de cultura (*crop rotation*) consiste em alternar o cultivo de espécies vegetais em uma mesma área, na mesma estação de cultivo (REIS; CASA; BIANCHIN, 2011). Esta prática é hoje de significativa importância na agricultura brasileira. Segundo o IBGE (2018), ao redor de 19% dos estabelecimentos agropecuários brasileiros fazem a prática de rotação de culturas. Os estados que apresentam maiores percentuais de estabelecimentos com rotação de culturas são Rio Grande do Sul (19,10%), Paraná (14,58%) e Bahia (11,68%).

A rotação é alternada preferencialmente com culturas que têm sistemas radiculares diferentes (gramíneas e leguminosas), o que permite efeito residual positivo para o solo (GONCALVES et al., 2007). Essa alternância acontece anualmente ou em períodos mais longos, o que a diferencia da sucessão de culturas. Por exemplo, durante dois ou três anos não se deve cultivar (período de descanso) a mesma área com batata doce, mas fazer rotação com outras espécies como leguminosas ou cereais.

⁶ O sistema de cultivo consistiu em um consórcio de trigo e soja na primeira estação de crescimento, seguido de uma monocultura de milho na segunda estação.

Os benefícios agrícolas da rotação de culturas vão desde quebrar os ciclos de patógenos (REIS, CASA, BIANCHIN, 2011), reduzir a erosão do solo e as perdas de nitrogênio, até usar eficientemente os nutrientes e os recursos hídricos (KARLEN et al., 1994). No que tange à questão ambiental, as rotações podem aumentar as populações de fauna nos estabelecimentos agropecuários (KROLOW et al., 2017; KARLEN et al., 1994). Enquanto no âmbito econômico, a rotação de culturas, associada aos sistemas alternativos de plantio direto, pode ter impacto positivo nos retornos (KARLEN et al., 1994).

Deve-se salientar que a prática também está sujeita às condições edafoclimáticas de cada região e, quando realizada adequadamente, leva a ganhos de produtividade. Desse modo, é necessário pesquisar a melhor combinação de culturas e intervalos para a rotação, dependendo de cada localidade. Existe, porém, um desafio nas pesquisas de rotação, uma vez que envolvem experimentos de longa duração (REIS, CASA, BIANCHIN, 2011).

2.3.4. Integração Lavoura-Pecuária

A integração lavoura-pecuária (ILP) envolve sistemas planejados com interações temporais e espaciais em diferentes escalas e a exploração de animais e culturas na mesma área, simultaneamente ou em épocas diferentes, em rotação ou sucessão. A prática foi iniciada no Sul do país com culturas de arroz introduzidas em áreas de pastagens para recuperar a produtividade dos pastos (DE MORAES et al., 2014).

No Brasil, atualmente, o sistema ILP tem sido usado em várias regiões, adotado, inclusive, com outros grãos, como soja, milho ou sorgo (DE MORAES et al., 2014; VILELA et al., 2012). Existem, ainda, outras modalidades de ILP, como lavouras de grãos que utilizam gramíneas forrageiras para melhorar a cobertura de solo em sistema plantio direto, na entressafra para uso da forragem na alimentação de bovinos e na rotação de pasto com lavoura para intensificar o uso da terra e beneficiar da interação entre as duas atividades (VILELA et al., 2012).

Vilela et al. (2012) e Bonaudo et al. (2014) apontam benefícios agropecuários e ambientais trazidos pela ILP, bem como melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, redução da ocorrência de doenças, insetos-praga e plantas daninhas, maior produtividade das plantas e dos animais e diminuição de dependência de insumos externos e perda limitada de produção.

Os benefícios econômicos, por sua vez, ainda têm que ser aprimorados. Apesar de a ILP ser um sistema lucrativo, por reduzir os riscos pela diversificação de atividades (POFFENBARGER et al., 2017), ela apresenta menores taxas de retorno em comparação a sistemas de monocultura, pois existe elevada demanda por capital na ILP, particularmente para a aquisição de animais em recria para a engorda (POFFENBARGER et al., 2017; JUNIOR, ALVES, CONTINI, 2012). Apesar da carência de evidências sobre os benefícios econômicos sobre o tema, há um estudo de caso no Brasil que indica que a ILP aumentou a resiliência do sistema agropecuário aos choques do mercado (BONAUDO et al., 2014).

2.3.5. Sistemas Agropecuários Mistos (SAM)

Os sistemas agropecuários mistos (SAM) consistem basicamente na coexistência de culturas agrícolas e atividades pecuárias no mesmo estabelecimento agropecuário. A diferença para a ILP é que os sistemas agropecuários mistos não têm necessariamente a exploração de culturas e animais na mesma área, mas, sim, no mesmo estabelecimento. Nos sistemas mistos, o gado, além de ser produtor de carne e leite, também ajuda a fornecer nutrientes para as culturas e microrganismos do solo com seus resíduos. Essa complementariedade entre agricultura e pecuária ocorre quando sua exploração gera produtos diferentes, mas vinculados a produtos de uma atividade, que são, por sua vez, insumos na segunda atividade (VILLANO; FLEMING; FLEMING, 2010).

Os SAM precisam de combinações apropriadas de culturas e gado, dependendo da região, para resolver *trade-offs* entre sustentabilidade ambiental, desenvolvimentos agropecuários e desempenho econômico. Segundo Liang, Hui e You (2018), em um sistema misto orgânico de 100 hectares, o mais lucrativo seria produzir culturas destinadas para o mercado (*cash crops*) de alto valor, como produção de leite, pois o que gera maior acumulação de matéria orgânica no solo seria produzir várias culturas com maior quantidade de restolho, ampliando o tamanho do rebanho. Em outro estudo feito na Austrália, foram identificadas economias de escopo entre atividades de ovinos e bovinos, atividades de ovinos e de culturas agrícolas e atividade bovina de corte e agrícolas (VILLANO, FLEMING, FLEMING, 2010).

Vê-se, portanto, que diferentes formas de Diversificação Agropecuária, dependendo das combinações apropriadas de espécies agrícolas e pecuárias mais as condições edafoclimáticas, podem trazer resultados positivos na produção agropecuária, na sustentabilidade ambiental e econômica.

2.3.6. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)

O sistema de integração entre Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) aparece quando elementos florestais passam a ser considerados entre as inúmeras possibilidades de combinação, resultando em diferentes sistemas, como o sistema silvipastoril (integração Pecuária-Floresta), o silviagrícola (integração Lavoura-Floresta), o agropastoril (integração Lavoura-Pecuária) e o agrossilvipastoril (integração Lavoura-Pecuária-Floresta) (BALBINO et al., 2012).

De acordo com Balbino et al. (2011), a iLPF é definida como “uma estratégia de produção sustentável que integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação (...) contemplando a adequação ambiental, valorização do homem e a viabilidade econômica da atividade agropecuária”. Nesse sentido, para os mesmos autores, o sistema iLPF pode contribuir para recuperar áreas degradadas, manter e reconstruir áreas de cobertura florestal, além de contribuir para o bem-estar pela geração de renda.

No Brasil, alguns estudos confirmam os pressupostos conceituais previamente apresentados. Por exemplo, Kichel et al. (2014) mostraram que a produtividade e a rentabilidade em sistemas como este são maiores para pecuária de corte em relação às lavouras de grão e em relação a sistemas de produção tradicionais. Ademais, havendo aumento de bem-estar animal bem como mitigação de gases de efeito estufa (ALMEIDA, 2010).

2.3.7. Agroflorestas

Os sistemas agroflorestais associam espécies lenhosas perenes com lavoura temporária, espécies de frutas, arbustos e forrageiras na mesma área (DO CARMO MARTINELLI et al., 2019; MICCOLIS et al., 2019). Esses sistemas permitem manter estruturas semelhantes à vegetação nativa, desse modo, ajudam na recuperação de área degradadas (MICCOLIS et al., 2019). Ademais, as agroflorestas podem também ser sistemas viáveis economicamente, dependendo da interação entre componentes específicos edafoclimáticos da área (DO CARMO MARTINELLI et al., 2019), podendo, inclusive, aumentar o valor da terra (SCHEMBERGUE et al., 2017). Contudo, a prática está diretamente ligada à agricultura familiar, dadas as particularidades do cuidado da terra e das culturas (ALVES et al., 2015).

2.4. Mensurando a diversificação agropecuária no Brasil

A diversificação produtiva pode ser mensurada por diferentes medidas, como índices ecológicos ou por indicadores que vêm da Economia Industrial. Esses indicadores de diversificação produtiva são construídos com base no número e importância das n atividades que o estabelecimento agropecuário desenvolve. Em ambos os casos, os indicadores ecológicos e econômicos consideram a proporção das espécies ou atividades, calculada por área total ou por unidade específica (KUPFER; HASENCLEVER, 2012; MAGURRAN, 2004). No entanto, os indicadores não levam em conta as diferentes formas de diversificação agropecuária praticadas e pesquisadas na agricultura brasileira (SEDIYAMA, DOS SANTOS, DE LIMA, 2015).

No Brasil, poucos estudos tratam desse tema com indicadores de diversificação em razão do complexo manejo de dados desagregados que detalhem a área ou o valor de produção de cada espécie ou atividade agrícola e pecuária por estabelecimento⁷, cabendo especialmente o uso de dados primários. Por exemplo, Oliveira Filho et al. (2014) identificaram os fatores que influenciam a probabilidade de o agricultor diversificar sua produção no Polo Petrolina-Juazeiro, nos estados de Pernambuco e Bahia, como sendo: experiência, participação da receita advinda de contratos, participação da receita advinda de atravessadores, culturas específicas (banana, coco, goiaba, manga e uva), participação em associação e acesso à *assistência técnica*. Da mesma forma, foi desenvolvido um estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio das Contas, no estado de Bahia, em que o acesso a linhas de créditos e *assistência técnica* e o fato de morar na propriedade influenciam positivamente na diversificação de cultivos (PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2018).

Sambuichi et al. (2016) e de Herrera et al. (2018) analisam os determinantes socioeconômicos da diversificação de produção nos estabelecimentos da agricultura familiar brasileira, utilizando microdados da base da Declaração de Aptidão ao Pronaf (DAP), disponibilizados pelo Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA). A base abrange ao redor de 4,8 milhões de estabelecimento de agricultura familiar, mas sua obtenção envolve burocracia restritiva⁸. Os resultados mostraram que a *assistência técnica* dada a agricultores familiares membros de uma cooperativa agropecuária ou de uma associação afeta positivamente a diversificação.

⁷ No Brasil, a principal fonte de dados agropecuários desagregados é o Censo Agropecuário. Apesar de informações completas (a horticultura contempla 66 produtos; a lavoura permanente contempla 66 produtos; e a lavoura temporária compreende 65 produtos), o acesso aos dados é de complexo manejo e incorre em barreiras burocráticas.

⁸ A base de dados é acessada de forma restrita na sala de sigilo do MDA.

Guanzirolí, Buainain e Di Sabbato (2012) quantificaram o grau de diversificação agropecuária nos estabelecimentos familiares e compararam os resultados obtidos no Censo Agropecuário de 1996 com os de 2006. Para isso, foi adotada como medida de diversificação a proporção da renda do produto principal sobre a renda total do agricultor. Seus resultados mostraram que, entre os dois períodos, a agricultura familiar diminuiu a diversidade de sua produção e que o padrão de produção em um único produto aumentou.

No presente trabalho, dada a complexidade de acesso aos microdados do Censo Agropecuário, foram utilizados dados com desagregação municipal, nomeadamente de Produção Agrícola Municipal (PAM), Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) e Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) (IBGE, 2018). A PAM fornece informações estatísticas sobre quantidade produzida, área plantada e colhida, rendimento médio e valor da produção agrícola. A PPM fornece informações estatísticas sobre o efetivo dos rebanhos, ovinos tosquiados, vacas ordenhadas, produtos de origem animal e produção da aquicultura. Os dados do valor de produção de lavouras temporárias e perenes da PAM e do valor de produção por produto de origem animal da PPM podem servir para quantificar a diversificação agropecuária apenas no nível municipal. A PEVS fornece informações estatísticas sobre quantidade e valor dos principais produtos obtidos através do processo de exploração dos recursos florestais nativos, denominado extrativismo vegetal, bem como a quantidade e o valor dos principais produtos da silvicultura, ou seja, produtos provenientes da exploração de maciços florestais plantados. A inclusão do valor de produção da extração vegetal e silvicultura da PEVS pode servir para quantificar também a diversificação agropecuária-floresta.

Para a análise, foram utilizados dois índices de diversificação: i) Índice de Shannon, específico para culturas agrícolas; e ii) Índice de Simpson que considera também a pecuária.

O Índice de Shannon (S_s) é adaptado dos índices ecológicos de diversidade de espécies para representar regularidade na diversificação de culturas agrícolas (BENIN et al., 2004; RAHMAN, 2008). De forma geral, a regularidade descreve a variabilidade na abundância de espécies. Especificamente, trata-se de uma combinação de riqueza e uniformidade. A riqueza de espécies faz referência ao número total de espécies por área ou unidade específica, enquanto a uniformidade indica quão uniforme os indivíduos são distribuídos entre as diferentes espécies em uma comunidade (MAGURRAN, 2004). Aqui, o índice levará em conta a proporção de rendas agrícolas (equação 2):

$$S_s = - \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \ln \alpha_j \quad S_s \geq 0 \quad (2)$$

em que α_j é a proporção de Valor da Produção (VP) de cada produto agrícola ou cultura no VP total agrícola. Valores maiores indicam maior diversificação. O VP foi utilizado porque se subentende a possibilidade de cultivos sucessivos ou simultâneos (simples, associados e/ou intercalados) no mesmo ano e no mesmo local, podendo, por isto, a área informada da cultura exceder a área geográfica. Além disso, usando o VP, procura-se evitar erros de medição da área plantada. Nesse índice, foi usado o valor da produção agrícola de 31 produtos da lavoura temporária e 33 produtos da lavoura permanente, de um total de 64 produtos da PAM.

O índice de Simpson (S_I) é também adaptado dos índices ecológicos de diversidade de espécies, representando a concentração de espécies (MAGURRAN, 2004). Esse índice considera quanto cada atividade agropecuária contribui para a renda agropecuária total do município (SAMBUICHI et al., 2016). Na pecuária, foram utilizados os produtos de origem animal ao invés das espécies pecuárias. Assim, são levados em conta os produtos agrícolas e pecuários (equação 3):

$$S_I = 1 - \sum_{k=1}^N \alpha_k^2 \quad 0 \leq S_I \leq 1 \quad (3)$$

em que α_k é a proporção de VP de cada produto agrícola e pecuário no VP total agropecuário. No índice Simpson, foram incluídos seis produtos pecuários da PPM, além dos produtos da PAM, compreendendo um total de 70 produtos. Da mesma forma, foi calculado o índice Simpson com produtos florestais em que foram incluídos 42 produtos de extrativismo vegetal e sete produtos da silvicultura, somando um total 119 produtos,

Conforme Sambuichi et al. (2016), esse índice permite classificação de diversificação em quatro categorias: *muito especializado* ($S_I = 0$), que apenas produzem um produto; *especializado* ($0,0 < S_I \leq 0,35$), que tem 80% ou mais do Valor da Produção proveniente apenas de um produto; *diversificado* ($0,35 < S_I \leq 0,65$), em que a renda do principal produto é menor que 80% do Valor da Produção; e *muito diversificado* ($S_I > 0,65$), em que pelo menos três produtos têm proporções similares na renda.

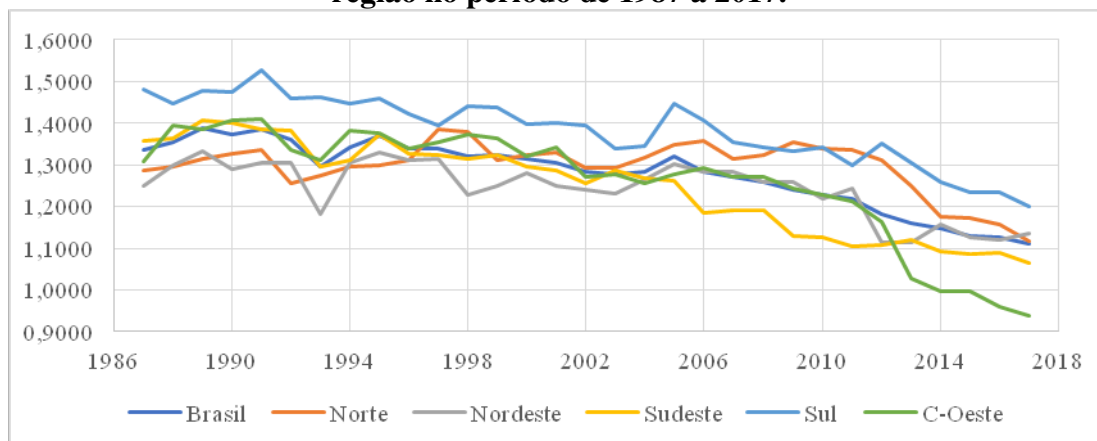
2.4.1. Estatísticas no Brasil

Para analisar a evolução da diversificação agropecuária a nível municipal, foram calculados os índices de Shannon e Simpson no período de 1987 a 2017. A escolha deste período se deu no intuito de incluir a maior quantidade de dados disponíveis para

o país, garantindo observar tendências e mudanças do sistema produtivo agrário brasileiro. Nas Figuras 1 e 2, Índice Shannon e Índice Simpson, respectivamente, observa-se tendência na especialização da produção municipal no Brasil e nas suas regiões ao longo do tempo. Estes resultados são semelhantes àqueles encontrados por Guanziroli, Buainain e Di Sabbato (2012) e Sambuichi et al. (2016).

Na Figura 1, observa-se que a riqueza e a distribuição da produção agrícola nos municípios brasileiros ao longo do período de 1987 a 2017 é baixa, pois os valores do Índice de Shannon estão situados abaixo do intervalo considerado normal de dados empíricos (situado, normalmente, entre 1.5 e 3.5) (MAGURRAN, 2004). Entretanto, os resultados indicam que, mesmo com valores baixos, a produção agrícola continua se especializando, visto que o índice de Shannon do Brasil passou de 1.34 em 1987 para 1.11 em 2017, sendo a Região Sul a que apresenta maior nível de diversificação agrícola. Já a região Centro-Oeste apresenta a menor diversificação (1,03) a partir do 2013, em razão, principalmente, da concentração de poucas culturas como soja, cana-de-açúcar, algodão herbáceo e milho (DE CASTRO, 2014). Esse resultado está em consonância com os resultados de pesquisas sobre diversificação em agricultura familiar no Brasil (HERRERA et al., 2018).

Figura 1. Evolução do índice de Shannon para os municípios brasileiros por região no período de 1987 a 2017.



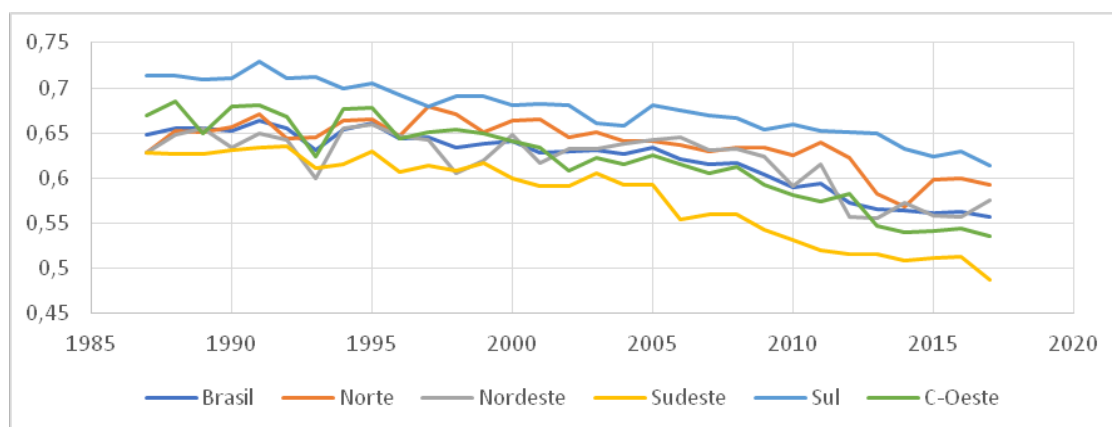
Fonte: Resultados da Pesquisa

Na Figura 2 a), observa-se que a concentração de produção agropecuária no Brasil, medida pelo índice de Simpson, diminuiu de 0,65 em 1987 para 0,56 em 2017, ressaltando que a produção agropecuária municipal ainda se encontra na classe “diversificada”, possivelmente pela inclusão de produtos de origem animal; na Figura 2 b), a evolução da diversificação com a inclusão de produtos florestais (0,67 em 1987 –

0,58 em 2017) é similar à diversificação com produtos agropecuários. Além disso, observa-se que a região Sudeste apresenta a maior especialização de atividades agropecuárias, enquanto na região Sul, ocorre o oposto. Incluindo os produtos pecuários, pode-se também observar que a região Centro-Oeste não apresenta a menor diversificação, contrário ao índice de Shannon, que só inclui produtos de origem vegetal. Cabe ressaltar que o índice de Shannon representa a riqueza e a uniformidade apenas das culturas agrícolas, enquanto o índice de Simpson representa a concentração dos produtos agropecuários. Como os índices foram calculados em nível municipal, é difícil afirmar se a diversificação é feita por grandes ou pequenos produtores. No entanto, uma primeira aproximação é possível, calculando a correlação entre o tamanho médio⁹ de estabelecimento de cada município e os índices Shannon e Simpson para os anos 2006 e 2017. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Figura 2. Evolução do índice de Simpson

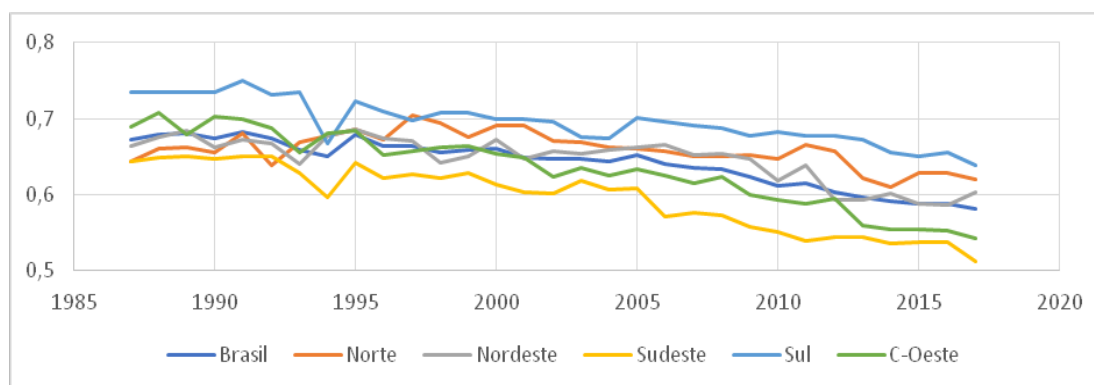
a) Evolução do índice de Simpson (Agropecuário) para os municípios brasileiros por região no período de 1987 a 2017



Fonte: Resultados da Pesquisa

⁹ O tamanho médio foi calculado dividindo a área dos estabelecimentos agropecuários de cada município pelo número de estabelecimentos.

b) Evolução do índice de Simpson (Agropecuário-Floresta) para os municípios brasileiros por região no período de 1987 a 2017



Fonte: Resultados da Pesquisa

Os resultados mostram que para o Brasil, em 2006, a correlação entre os índices de diversificação e o tamanho dos estabelecimentos foi -0,114 e -0,104 para o índice de Shannon e Simpson, respectivamente. Isso indica que estabelecimentos maiores tendem a especializar sua produção. Em 2017, a relação inversa entre tamanho e diversificação foi intensificada (correlação de -0,134 e -0,106 para o índice de Shannon e Simpson, respectivamente).

Tabela 2. Correlação entre tamanho médio do estabelecimento agropecuário e diversificação no Brasil e suas regiões no 2006 e 2017

Região	Shannon 2006	Shannon 2017	Simpson 2006	Simpson 2017
Brasil	-0,114***	-0,134***	-0,104***	-0,106***
Norte	-0,112**	-0,120**	-0,059	-0,156***
Nordeste	-0,122***	-0,106***	-0,174***	-0,132***
Sudeste	-0,090***	-0,122***	-0,129***	-0,107***
Sul	-0,246***	-0,313***	-0,228***	-0,292***
Centro-Oeste	-0,270***	-0,107**	-0,156***	-0,143***

Nota: Nível de significância ***1%, **5%, *10%.

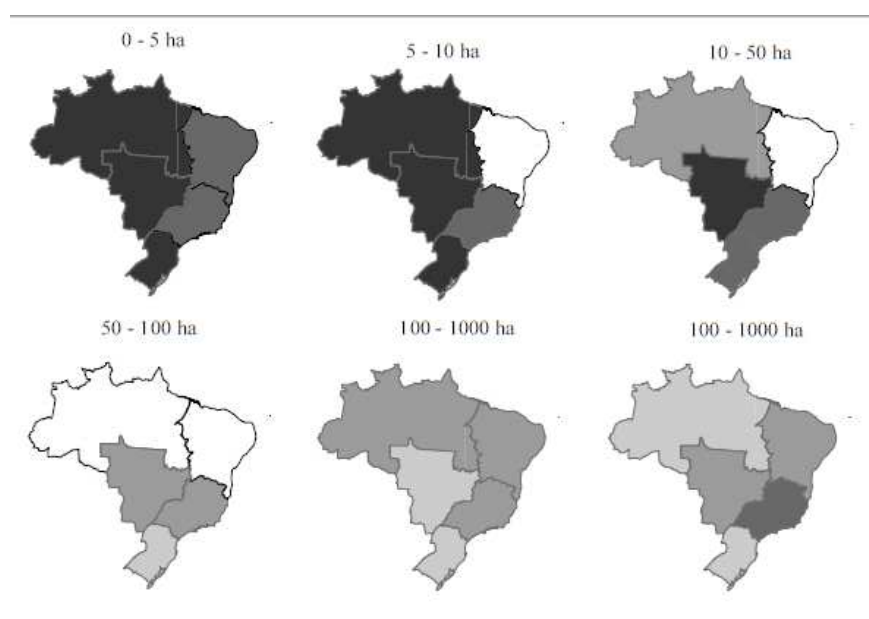
Fonte: Resultados da pesquisa

Para ambos os índices, a região Sul apresentou a maior relação entre tamanho de estabelecimento e especialização, o que pode ser justificado pela intensa presença da agricultura familiar, que não produz em grandes áreas e tem participação majoritária na produção dessa região (GUANZIROLI; BUAINAIN; DI SABBATO, 2012). Essa relação aumenta consideravelmente do ano de 2006 para 2017 em ambos os índices. Por outro lado, a região Centro-Oeste também tem relação alta entre tamanho e

especialização, que diminui ligeiramente entre 2006 e 2017. Para o índice de Shannon, a região Sudeste apresentou o menor valor da correlação em 2006, enquanto, em 2017, foi a região Nordeste. Já para o índice Simpson, a região Norte apresentou a menor relação em 2006, em 2017, foi a região Sudeste. Em geral, os resultados da correlação com o índice de Simpson foram similares aos resultados obtidos no índice de Shannon.

De maneira geral, os resultados anteriores indicam baixa correlação entre o tamanho de estabelecimento e a diversificação. No intuito de confirmar estas evidências, calculou-se a correlação entre a porcentagem de estabelecimentos por grupos de área e o índice de Simpson para as regiões brasileiras no ano de 2017. Para tal, a Figura 3 apresenta uma padronização a partir de valores máximos e mínimos em que o menor valor assume zero e o maior a unidade¹⁰. Posteriormente, os valores normalizados foram divididos em quatro categorias a partir dos quartis, descritos na Figura 3. Os valores não significativos estão em branco nos mapas.

Figura 3. Mapa correlação entre percentual de estabelecimentos por grupos de área e diversificação agropecuária (Simpson) nas regiões brasileiras de 2017



Fonte: Resultados da pesquisa

¹⁰ Esta normalização é feita utilizando a fórmula $Y = \frac{X - \text{Min}(X_i)}{\text{Máx}(X_i) - \text{Min}(X_i)}$, em que Y é o valor normalizado utilizado na Figura 3. Min(X_i) e Máx(X_i) são, respectivamente, os valores calculados de correlação. X é o valor do escore a ser normalizado. Informações sobre os valores de correlação podem ser obtidas no Anexo 1.

Conforme a Figura 3, para as regiões Sul, Centro-Oeste e Norte, é notório que estabelecimentos de 0 a 10 hectares são favoráveis à diversificação agropecuária. Esse resultado para a região Sul pode ser justificado pela intensa presença da agricultura familiar, que não produz em grandes áreas e tem uma participação majoritária na produção dessa região (GUANZIROLI; BUAINAIN; DI SABBATO, 2012). Ademais, a diversificação é coerente com a agricultura familiar de pequenos estabelecimentos, já que tem uma maior dotação de mão de obra em relação a terra (BIRTHAL; HAZRANA; NEGI, 2020). Desse modo, pequenos agricultores conseguem obter vários benefícios dos sistemas diversificados, bem como eficiência no uso da terra (BIRTHAL; HAZRANA; NEGI, 2020; MARTIN-GUAY et al., 2018), redução de riscos, especialmente climáticos (PIEDRA-BONILLA; DA CUNHA; BRAGA, 2020; SCHEMBERGUE et al., 2017), além de garantia de segurança e diversidade alimentar (WAHA et al., 2018; ADJIMOTI; KWADZO, 2018; DILLON; MCGEE; OSENI, 2015).

À medida que vai aumentando o tamanho de estabelecimento, a relação como índice de Simpson torna-se muito baixa. Os resultados mostram que estabelecimentos agropecuários acima de 100 hectares estão estatisticamente correlacionados com a especialização agropecuária nas regiões brasileiras. Os grandes estabelecimentos operam em sistemas agrícolas altamente mecanizados, tornando-se difícil acoplá-los ao manejo complexo agrônômico dos sistemas diversificados (PAUT; SABATIER; TCHAMITCHIAN; 2020). Contudo, existe mecanização que pode estar associada à diversificação de culturas específicas (TAKESHIMA; HATZENBUEHLER; EDEH, 2020).

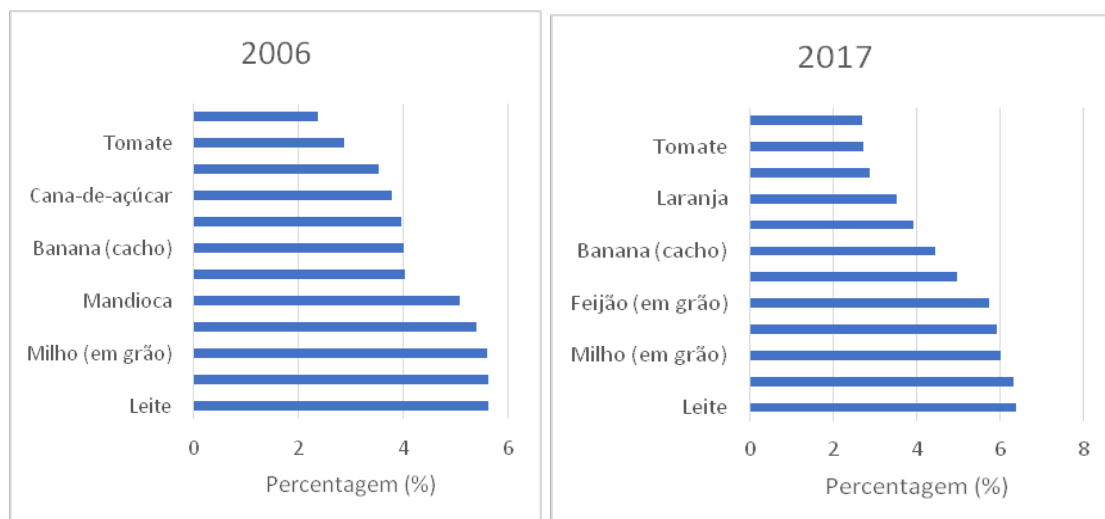
Para os demais grupos de área, a relação entre tamanho e diversificação é ambígua. Esses resultados, em consonância com a literatura, apontam que o tamanho de estabelecimento influencia pouco na decisão de diversificar a produção agropecuária municipal do Brasil, exceto nas regiões Sul e Centro-Oeste, que, como pontuado, têm produção agropecuária típica. Sambuichi et al. (2016) quantificaram a diversificação agrícola nos estabelecimentos da agricultura familiar do Brasil e concluíram que a classe muito especializada foi a que apresentou menor área (15,8 ha), enquanto as demais classes apresentaram valores muito próximos entre si. Esse resultado mostra que a área do estabelecimento tem relação positiva com a diversificação agrícola (HERRERA et al., 2018; SAMBUICHI et al., 2016). Contudo, na região Centro-Oeste, essa relação parece se inverter, pois as classes de menor diversidade apresentam maiores áreas médias (SAMBUICHI et al., 2016). Nesse sentido, outras variáveis,

incluindo acesso a mercados, podem afetar a diversificação de culturas. O acesso a mercados facilita a oferta de produtos agropecuários, tanto quanto a demanda de insumos como sementes certificadas (PIEDRA-BONILLA; DA CUNHA; BRAGA, 2020). Porém, para os agricultores, torna-se complicada a venda de muitos produtos em poucas quantidades (BIRTHAL; HAZRANA; NEGI, 2020).

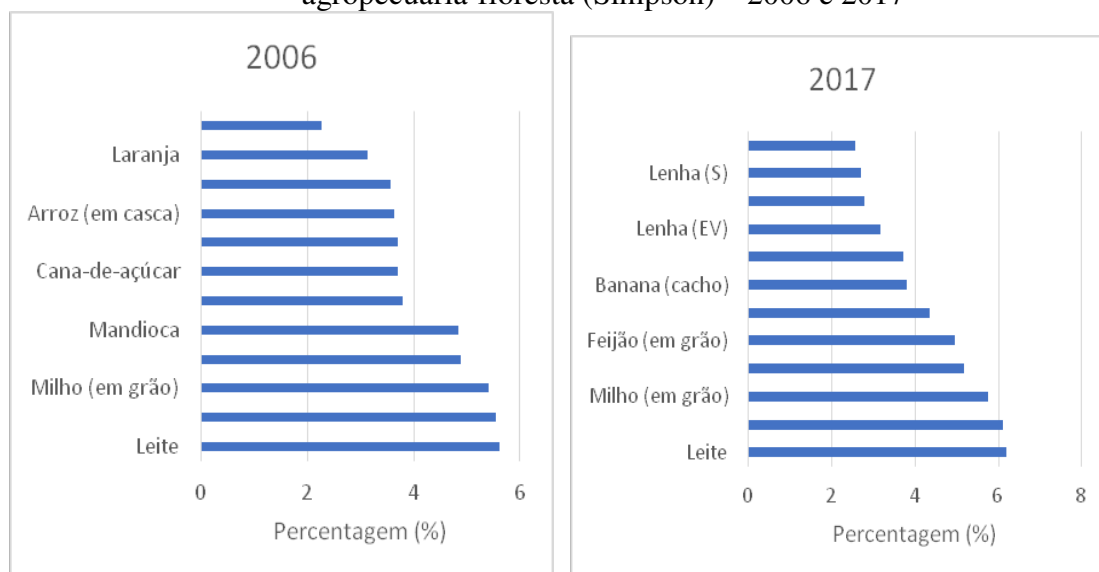
Ademais, foram também analisados os produtos agrícolas e pecuários mais utilizados na diversificação agropecuária. Para obter esses resultados, foi calculada a frequência dos produtos agrícolas e pecuários no maior quartil do índice de Simpson (0,72 a 1), considerados “muito diversificados”, conforme a classificação de Sambuichi et al. (2016). Esses resultados são apresentados na Figura 4. Assim, observa-se que os produtos agrícolas e pecuários mais utilizados na diversificação agropecuária são principalmente leite, ovos de galinha, milho, feijão e mandioca de um total de 70 produtos. Além disso, o mel de abelha tem se tornado um respeitável produto de origem animal, dado o aumento em sua frequência em 2017. A produção de frutas como banana, laranja e melancia faz parte da diversificação agropecuária. No entanto, o arroz (em casca) diminuiu em importância de produção em 2017. Por outro lado, ao incluir os produtos florestais, observam-se os mesmos produtos mais a lenha da extração vegetal entre os mais frequentes em ambos os anos, segundo a Figura 4 b). Ademais, a lenha proveniente de florestas plantadas (silvicultura) aparece como produto importante na diversificação no ano 2017. Tanto na Figura 4 a), quanto b), observa-se que os produtos pecuários, leite e ovos de galinha foram os líderes na frequência, inclusive em ambos os anos.

Figura 4. Frequência de cultivos com maior diversificação agropecuária

a) Frequência de cultivos nos municípios com maior índice de concentração agropecuária (Simpson) – 2006 e 2017



b) Frequência de cultivos nos municípios com maior índice de concentração agropecuária-floresta (Simpson) – 2006 e 2017



Nota: EV – Extração vegetal; S – Silvicultura.

Fonte: Resultados da Pesquisa

Nos próximos capítulos, analisaremos o impacto da variabilidade climática na diversificação, pois, caso os resultados sejam favoráveis, eles poderão ser usados na elaboração de políticas que promovam a eficiência no uso de recursos escassos (água e terras férteis).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentada, na primeira seção, uma revisão de literatura das pesquisas internacionais que tratam da diversificação e da sua relação com os determinantes econômicos e climáticos. Na sequência, é apresentado o modelo teórico.

3.1. Revisão de literatura

A diversificação agropecuária tem sido estudada em muitas regiões do mundo, especialmente em relação a seus determinantes socioeconômicos (MESFIN, FUFA, HAJI, 2011; RAHMAN, 2008; SINGH, et al., 2006; BENIN et al., 2004; JOSHI et al., 2004). Recentemente, os estudos têm começado a contemplar a análise do efeito de variáveis climáticas sobre a diversificação (ASRAVOR, 2017; RAHMAN, 2016; MCCORD et al., 2015). Assim, nessa seção, serão apresentadas pesquisas que tenham contemplado essas temáticas. Foram priorizados estudos mais recentes, publicados a partir dos anos 2000 que representassem a maior diversidade regional possível. A Tabela 3 sintetiza as principais pesquisas e seus resultados.

Em relação aos índices de Diversificação Agrícola, a pesquisa de Bradshaw, Dolan e Smit (2004) revelou, por meio do cálculo de índice de Herfindhal para o período de 1994-2002, a existência de mudança em direção aos padrões de cultivo mais especializados nos estabelecimentos canadenses, sendo tal tendência aparentemente mais pronunciada em pequenas e médias propriedades. Já o trabalho de Joshi et al. (2004) concluiu que os países do sul da Ásia estão gradualmente se diversificando, com alguma variação entre os países em favor de *commodities* de alto valor, especialmente frutas e legumes. O índice de Simpson mudou de 0,59 em 1981-82 a 0,64 em 1999-2000. No índice de Simpson, da mesma forma que o índice de Shannon, valores maiores indicam maior diversificação. E essa diversificação agrícola da maioria dos países do sul asiático deriva de uma expansão de área¹¹ (JOSHI et al., 2004). Além disso, Singh et al. (2006) explicam que na Índia a diversificação agrícola varia dependendo de cada região do país, sendo que o aumento da diversificação significa mudança para culturas sem grãos, tais como legumes, frutas, pecuária e pesca. Em um estudo de multifuncionalidade na União Europeia (UE), Mittenzwei et al. (2007) mostram que os valores de diversificação agrícola (índice de Shannon variando entre 1,4 e 1,83) foram

¹¹ A expansão da área vem pela utilização de pousios e reabilitação de terras degradadas ou pelo aumento da intensidade de cultivo.

baixos no nível regional, especialmente na região de Montanhas. Isso se deve ao fato de a região de Montanhas ser desfavorável para a agricultura em razão das condições naturais (MITTENZWEI et al., 2007).

Tabela 3. Principais pesquisas na literatura internacional que analisam a Diversificação Agrícola

	Autor(es)	Alvo	Metodologia	Principais resultados em relação à Diversificação Agrícola
Padrões diversificação agrícola	Bradshaw, Dolan e Smit (2004)	Canadá	Índice de Herfindahl	Estabelecimentos individuais se tornaram mais especializadas em seus padrões de cultivo desde 1994.
	Joshi et al. (2004)	Países sul asiático	Índice de Simpson	Países do sul da Ásia estão gradualmente se diversificando em favor de commodities de alto valor, especialmente frutas e legumes.
	Singh et al. (2006)	Índia	Índice de Simpson	O aumento da diversificação agrícola significa mudança para culturas não alimentares.
	Mitzenzwei et al. (2007)	União Europeia	Índice de Shannon	Os valores de diversificação agrícolas foram baixos no nível regional, especialmente na região de Montanhas.
Determinantes socioeconômicos diversificação agrícola	Benin et al. (2004)	Etiópia	Índices de Shannon e Margalef, Heckman	O tamanho do estabelecimento, a riqueza e os estoques de mão de obra têm significativos efeitos positivos na diversificação agrícola
	Van Dusen e Taylor (2005)	México	Número de culturas e variedades, Poisson	A integração ao mercado reduz a diversidade de culturas. A heterogeneidade ambiental dos estabelecimentos e efeitos geracionais promovem a diversidade.
	Asante et al. (2018)	Gana	Índice Herfindahl, Cragg de duas partes	Para a diversificação agropecuária, a decisão discreta e de continuar foi positivamente influenciada pelo uso de equipamentos de lavoura. Mas a renda <i>off-farm</i> e o tamanho do estabelecimento afetam a decisão discreta. O acesso ao crédito, a extensão e a informação de mercados afetam a decisão de continuar.
Políticas públicas	Council Of The European Union, 2013	Política Agrícola Comum (CAP) da UE		Propôs uma medida que visa a melhorar a diversidade de paisagens agrícolas pela diversificação de culturas
	Mahy et al. (2015)	Padrões de diversificação, Flanders, Bélgica	Índice de Shannon	35% dos agricultores da região precisam mudar sua alocação de culturas para cumprir a proposta da Comissão Europeia.

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos determinantes da diversificação, Benin et al. (2004) analisaram o efeito de variáveis socioeconômicas na diversificação de cultivos e variedades na Etiópia através de um modelo econométrico de *Heckman*. Foi encontrado que o tamanho do estabelecimento, a riqueza e os estoques de mão de obra têm significativos efeitos positivos, tanto na diversidade interespecífica (entre diferentes espécies) de culturas de cereais, quanto na intraespecífica (entre diferentes variedades da mesma espécie), variando entre as culturas. Do mesmo modo, Van Dusen e Taylor (2005) desenvolveram um modelo do comportamento do agricultor em relação à conservação de recursos genéticos (neste estudo foi considerada a *milpa*¹²) no contexto de ambientes ecológicos e de mercado heterogêneos. Estimando um modelo econométrico de *Poisson*, esses autores concluíram que o aumento no nível de integração de mercado diminui o nível total de diversidade nos estabelecimentos. Foram construídas *proxies* para os efeitos de falta de mercados e custos de transação, incluindo a distância de um centro de mercado, a intensidade do trabalho contratado (média de toda a vila da parcela do trabalho contratado no trabalho total usado na *milpa*) e o índice de redes de migração (porcentagem de famílias na vila com migrantes no ano anterior à pesquisa). Porém, o ambiente ecológico heterogêneo influenciou positivamente a diversidade em razão da altitude, da qualidade do solo e da adoção de tecnologias agrícolas.

Ainda em se tratando das questões socioeconômicas, a pesquisa de Asante et al. (2018) analisa tanto a decisão discreta de diversificar quanto a decisão de continuar em relação à intensidade de diversificação de sistemas agrícolas, pecuários e agropecuários (integração lavoura-pecuária) entre pequenos agricultores em Gana. Foi usado um modelo de regressão de *Cragg* de duas partes, em que se encontrou que os efeitos das variáveis usadas variam através das três categorias de diversificação. Para a diversificação agrícola, ambos os tipos de decisões foram influenciados positivamente pelos equipamentos de lavoura e pela quantidade de fertilizantes utilizada, contrário ao efeito negativo do acesso a boas redes rodoviárias. Igualmente, a decisão discreta de diversificação pecuária foi afetada positivamente pelo acesso à informação de mercado e pela distância aos mercados, mas essas mesmas variáveis tiveram efeitos contrários na decisão de continuar nessa categoria. O acesso ao crédito teve efeitos positivos em ambas as decisões, contrário ao acesso a boas rodovias. Além disso, para a diversificação agropecuária, ambas as decisões foram positivamente influenciadas pelo uso de equipamentos de lavoura. A renda *off-farm* e o tamanho do estabelecimento afetaram a decisão discreta. O gênero, o acesso ao crédito, a extensão e a informação de

¹² A definição de *milpa* foi apresentada na seção 2.4.1.

mercados e a percepção de obter renda estável também tiveram influência sobre a decisão de continuar nessa categoria.

Em relação às políticas públicas, a Política Agrícola Comum (*Common Agricultural Policy - CAP*) da União Europeia propôs em 2013 uma medida que visa a melhorar a diversidade de paisagens agrícolas pela diversificação de culturas (MAHY et al., 2015). A CAP propunha que 30% dos pagamentos diretos dos agricultores dependessem de três medidas agroambientais: (1) os agricultores são obrigados a ter um mínimo de duas culturas se tiverem entre 10 e 30 hectares de terra arável; (2) se tiverem mais de 30 hectares, precisam ter três culturas; e (3) a primeira cultura não pode cobrir mais de 75% da área e, além disso, no caso de haver mais de 30 hectares de terra arável, as duas primeiras culturas não podem cobrir mais de 95% dessa terra (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2013). Conforme Mahy et al. (2015), 35% dos agricultores da região norte da Bélgica (Flanders), por exemplo, precisam mudar sua alocação de culturas para cumprir esta regra.

Nesta pesquisa, o foco é a análise dos efeitos da variabilidade climática na diversificação agropecuária. A diversificação, entre outros efeitos, reduz os riscos climáticos observados ou projetados, mesmo que também seja justificada na ausência deles (HEAL, et al., 2014). Logo, a diversificação será considerada estratégia adaptativa que, além de tentar reduzir impactos negativos, aproveita efeitos positivos para maximizar o bem-estar do agricultor. Como já apresentado na Introdução Geral desta tese, a diversificação de culturas promove benefícios econômicos como redução da variabilidade da renda do agricultor (JOSHI, 2004; JOSHI et al., 2004) e redução da pobreza rural (RENARD; TILMAN, 2019; MICHLER; JOSEPHSON, 2017; TAFESSE; DOROSH; GEMESSA, 2013; FAO, 2012). Além disso, os sistemas diversificados geram benefícios ambientais como a resiliência e a produção limpa na agricultura (MBOW et al., 2014; YANG et al., 2014), de tal forma que são considerados como tecnologias de *Climate-Smart Agriculture* (CSA) (LIPPER, et al., 2017; ROSENSTOCK et al., 2016).

Entretanto, primeiramente, devem ser deixadas claras as diferenças entre os termos “variabilidade climática” e “mudanças climáticas”, os quais são fundamentais neste capítulo. O clima é um sistema complexo, pois é afetado internamente pela interação dinâmica de processos nos seus componentes atmosfera, hidrosfera, criosfera, superfície terrestre e biosfera. Além disso, o sistema climático pode ser influenciado pelas interações com fatores externos como atividade vulcânica, variações solares e

mudanças antropogênicas na composição da atmosfera e no uso da terra (IPCC, 2014). Nessa interação dinâmica, as magnitudes climáticas adotam comportamento variável, mas estável, ou seja, flutuam aleatoriamente ao redor de uma tendência central (média ou mediana), com parâmetros de dispersão (desvio padrão) (CUADRAT; PITA, 2011).

No entanto, é complicado identificar o momento em que acontece a mudança climática, já que as magnitudes climáticas são flutuantes e variáveis (CUADRAT; PITA, 2011). Para avaliar as consideráveis diferenças de magnitudes climáticas, são usados os valores médios, como também a variabilidade desses valores. O uso somente da média pode levar a uma interpretação errada do clima como um fenômeno constante, sendo o sistema climático caracterizado por variações. Por exemplo, as médias de precipitação de uma região podem mascarar a realidade, especialmente em regiões secas, onde tendem a apresentar um grande número de valores baixos e, apenas, ocasionalmente, são observados valores muito altos (CUADRAT; PITA, 2011).

Segundo o IPCC (2014) e a Organização Mundial de Meteorologia (*World Meteorological Organization - WMO*) (2017), o conceito de variabilidade climática é o seguinte: “*Climate variability refers to variations in the mean state and other statistics (such as standard deviations, the occurrence of extremes, etc.) of the climate on all spatial and temporal scales beyond that of individual weather¹³ events*”. Além disso, a variabilidade climática é normalmente medida com desvios de estatísticas climáticas ao longo de determinado período de tempo (mês, estação ou ano), quando comparado com estatísticas de longo prazo para o mesmo período de calendário. Esses desvios são geralmente denominados de anomalias¹⁴ (WMO, 2017).

Nesse contexto, pode-se observar que existe variabilidade climática natural. A variabilidade pode ser baixa em algumas regiões do mundo por certos períodos de tempo, enquanto as condições climáticas podem ter alta variabilidade em outras regiões ou períodos de tempo. Logo, qualquer evento único, como um ciclone severo tropical, não pode ser assumido como mudança climática (WMO, 2017). A variabilidade climática inclui valores extremos e diferenças mensais, sazonais e anuais dos valores climáticos esperados (média).

A variação do clima é devida, especialmente, às oscilações naturais nos sistemas da terra, que redistribuem e mudam a quantidade de energia ao redor do planeta, levando a mudanças na pressão, temperatura, precipitação, vento e outras variáveis

¹³ O tempo representa mudanças de curto e de pequena escala na atmosfera.

¹⁴ Uma variação nos parâmetros de uma série climática é considerada anômala se sua duração for curta e depois dela forem restauradas as condições habituais, independentemente da intensidade (CUADRAT; PITA, 2011).

climáticas (IRI, 2018). Assim, a variabilidade pode resultar de processos internos no sistema climático (variabilidade interna) ou de forças externas naturais ou antropogênicas (variabilidade externa) (IPCC, 2014). As forças externas referem-se a agentes fora do sistema climático, tais como erupções vulcânicas¹⁵, variações solares¹⁶, mudanças antropogênicas¹⁷ na composição da atmosfera e no uso da terra.

No entanto, os termos de variabilidade climática e mudanças climáticas podem, normalmente, ser confundidos. Na variabilidade, as mudanças acontecem em períodos de curto prazo, enquanto as mudanças climáticas consideram mudanças que ocorrem a longo prazo, ao longo de décadas ou mais. A diferença principal entre esses dois termos está na persistência¹⁸ da condição anômala, ou seja, quando os eventos que costumavam ser raros ocorrem com maior frequência ou vice-versa (WMO, 2017). Contudo, é esperado que a variabilidade climática aumente em certas regiões do mundo, assim como a frequência e a intensidade de eventos extremos (IPCC, 2014).

Por outro lado, a variabilidade climática tem impactos consideráveis na agricultura e nos países que dependem da produção agrícola. Segundo Thornton et al. (2014), tem sido observada relação entre a variabilidade climática e mudanças no Produto Interno Bruto (PIB) em vários países tropicais, que dependem, economicamente, da agricultura. Para ilustrar, a Figura 5 mostra a relação entre variabilidade anual da precipitação e temperatura com a variação percentual no PIB agropecuário do Brasil no período de 1996-2016. Destaca-se que o PIB agropecuário teve picos de queda acompanhados com valores altos anômalos (ora positivos, ora negativos) de precipitação e temperatura. Conforme Ray et al. (2015), a variabilidade observada globalmente da produtividade de culturas importantes, como o milho, arroz, trigo e soja, depende, ao redor de 32% a 39%, da variação do clima. Assim, devem ser salientados os trabalhos que analisam como a variação do clima afeta a produção agrícola.

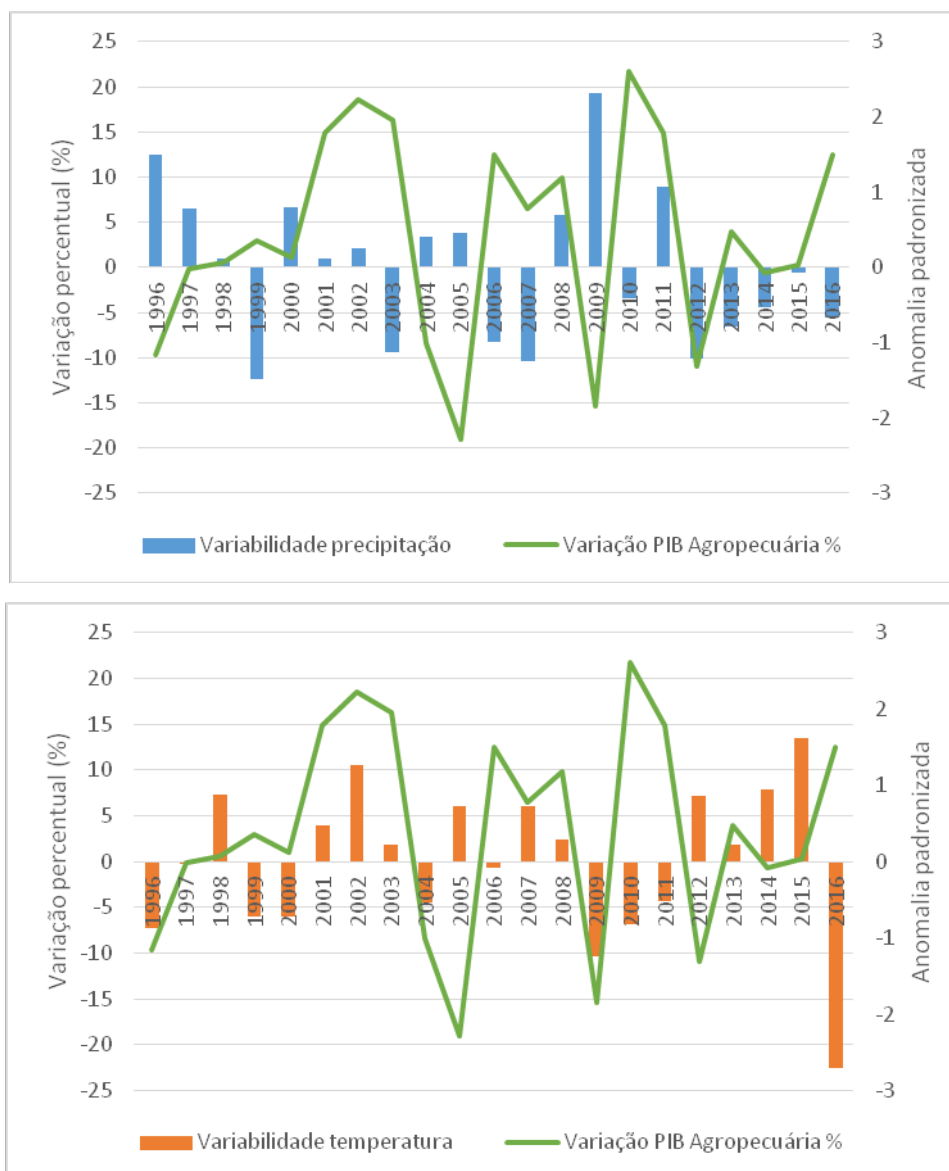
¹⁵ Algumas erupções têm produzido velos de cinza e aerossóis de ácido sulfúrico, que absorvem quantidades significativas das radiações solares, que são capazes de resfriar o clima mundial por uma fração de um grau (OLIVER, 2008).

¹⁶ A radiação solar pode variar em vários aspectos, incluindo a constante solar total, o componente ultravioleta e a intensidade do vento solar, que podem alterar o comportamento da circulação atmosférica (OLIVER, 2008).

¹⁷ Mudanças na composição gasosa da atmosfera podem alterar o equilíbrio de calor se os gases forem absorvedores seletivos de radiação, como vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂) e ozônio (O₃). O dióxido de carbono acumulou-se na atmosfera nos últimos dois séculos, em parte pelo grande desmatamento da agricultura e da lenha e pelo aumento acentuado do uso de combustíveis fósseis (OLIVER, 2008).

¹⁸ A persistência é o oposto de variabilidade.

Figura 5. Relação entre a variabilidade¹⁹ de precipitação/temperatura e o PIB agropecuário do Brasil (1996 – 2016)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006) e nos dados do PIB do agronegócio brasileiro (CEPEA; CNA, 2020)

No que diz respeito à influência do clima na diversificação, a Tabela 4 descreve as principais pesquisas consultadas. Procurou-se sintetizar as metodologias usadas, como também seus principais resultados. Seo (2010) foi o pioneiro em analisar a relação de mudança climática e sistemas mistos (lavoura e pecuária). Para atingir tal objetivo, primeiro foi usado um modelo *logit* misto para explicar a escolha do agricultor

¹⁹ A variabilidade interanual da precipitação/temperatura é expressa como anomalia padronizada de precipitação e temperatura, calculada pela diferença entre a média anual e a média do período dividida pelo desvio padrão do período.

entre um sistema de lavoura, um sistema de pecuária e um sistema misto lavoura-pecuária. Foram usadas, aproximadamente, 2000 observações de estabelecimentos rurais de sete países da América do Sul, sendo que as variáveis explicativas abarcavam dados socioeconômicos, do solo e de clima. As variáveis climáticas foram temperatura e precipitação de verão e inverno e suas formas quadráticas, bem como os desvios padrão de temperatura e precipitação. Os resultados dessa primeira parte mostram que o aumento de temperatura incrementa a probabilidade de escolher sistemas mistos em detrimento de sistemas especializados. O incremento de chuva aumenta a probabilidade de escolher sistemas de lavoura, mas diminui a probabilidade de escolher sistemas de pecuária. A adoção de sistemas mistos se torna mais atrativa com um aumento ligeiro de chuvas (<130 mm por mês), diminuindo posteriormente. O autor também analisou o valor da terra para os três sistemas, seguido de simulações de impactos de vários cenários climáticos na escolha de sistemas agrícolas. Os resultados nessa última parte da pesquisa indicam que, sob cenários quentes e secos, os valores das terras dos três sistemas diminuem, sendo a redução menor em sistemas mistos (-10%) que em sistemas especializados (-20%).

Da forma similar à pesquisa anterior (em termos de problema e metodologia), Seo (2011) analisou a relação de sistemas mistos e mudança climática em nove países da África, considerando cerca de 9.000 estabelecimentos agropecuários. Inicialmente, o autor testou a hipótese de que a escolha de sistemas integrados lavoura-pecuária depende de variáveis climáticas. Os principais resultados indicaram que o aumento de temperatura eleva a probabilidade de escolher sistemas integrados. Um pequeno aumento na precipitação diminui a probabilidade de escolher sistemas pecuários. Esses resultados são muito semelhantes àqueles de uma pesquisa desenvolvida na América Latina (SEO, 2010). Posteriormente, foi analisado como as receitas líquidas de cada sistema variam através de intervalos de clima. Os resultados mostraram que o aumento de temperatura reduz a receita na lavoura e nos sistemas mistos. Além disso, o aumento de precipitação produz incremento apenas nos sistemas de lavoura. Por último, em termos de escolha de sistemas e receitas sob cenários de mudança climática, o autor identificou aumento de sistemas integrados em detrimento dos especializados, como também que os sistemas integrados se tornam os mais rentáveis.

A pesquisa de Dillon et al. (2015) identificou efeito da variação da produção agrícola (diversidade) na diversidade e composição da dieta das famílias dos agricultores via variabilidade climática na Nigéria. Para isso, foram coletadas informações de 5.000 agricultores, sendo que 60% deles produziam ampla variedade de

culturas (um total de mais de 100 produtos). A variação da produção agrícola foi representada pela contagem do número de grupos de culturas colhidas e pela receita agrícola. Para a variabilidade climática, foram usados *degree days*²⁰ e desvios de precipitação de médias históricas. A estratégia empírica incluiu um modelo domiciliar de não separabilidade, em que as decisões de produção e consumo são determinadas conjuntamente. No primeiro estágio, foi estimada a relação entre produção (agrícola) e variabilidade climática, controlada por outras variáveis de produção. No segundo estágio, as variáveis climáticas exógenas foram instrumentalizadas como efeito das variáveis da produção agrícola (receita agrícola e diversidade de culturas) na diversidade alimentar. Os resultados em relação à diversificação agrícola mostram que os choques de *degree days* afetam leve e positivamente o número de grupos de culturas colhidos, contrário aos choques de chuva. No segundo estágio, os resultados indicam que um aumento de 10% na diversidade de culturas eleva em 2,4% a diversificação da dieta.

Mccord et al. (2015) examinaram as práticas de diversificação em regiões de clima semiárido no Quênia. A amostra foi composta de 325 observações de estabelecimentos rurais coletadas no verão de 2012. Por meio de um modelo de Mínimos Quadrados Ordinários, os autores analisaram como a diversificação (número de diferentes tipos de culturas e a frequência de culturas) é influenciada pelas condições sociais e biofísicas. Dado o clima semiárido, foi considerada dentro das variáveis biofísicas a precipitação média anual (mm). Os resultados mostram que apenas a precipitação foi significativa positivamente com o número de tipos de culturas. No caso da frequência de culturas, a precipitação foi também altamente significativa junto com a renda, o tamanho de plantio e o acesso à extensão agrícola.

Rahman (2016) utilizou a variabilidade de temperatura, a precipitação total anual e a propensão a inundações para analisar os efeitos do clima na diversificação agrícola em Bangladesh. Foi usado o Método de Momentos Dinâmicos Generalizados para dados em painel (1948-2008). Os resultados mostraram que, entre as variáveis climáticas, apenas a precipitação afetou positivamente a diversidade de culturas em escala regional durante um período de 61 anos (1948 - 2008). Adicionalmente, os preços de legumes e de fertilizantes de fósforo e investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) afetam positivamente, enquanto a diversificação agrícola

²⁰ É uma medida de aquecimento ou resfriamento, que ajuda a planejar o plantio de culturas, o manejo de pragas e o controle de pragas.

diminui significativamente com o aumento nos preços de fertilizantes de nitrogênio e potássio e despesas de extensão (RAHMAN, 2016).

Em relação ao impacto de eventos de clima extremo, Asfaw (2019) analisou a diversificação de culturas e a renda na região da África Subsaariana. Assim, foram coletadas informações domiciliares rurais do Malawi (2010-2013), Niger (2011-2014) e Zambia (2012-2015). O autor estimou um modelo de regressões aparentemente não relacionadas (*Seemingly Unrelated Regression – SUR*) com efeitos aleatórios no contexto de painel não balanceado para estimar os determinantes da diversificação. O modelo consistia em duas equações para cada país, cujas variáveis dependentes foram os índices de diversificação de culturas e renda, já que existe potencial correlação entre as características não observáveis para cada estratégia de diversificação. Para os choques de seca de longo prazo (30 anos), foi usada a porcentagem de anos em que o índice de precipitação padronizado (*Standard Precipitation Index – SPI*) esteve abaixo do limiar de -1.5 do total de anos que precediam o período de referência. Os resultados mostraram que os choques de seca afetam positivamente a diversificação de culturas para Malawi e Nigéria, mas tiveram apenas impacto significativo e positivo para a diversificação de renda no Zâmbia. Assim, os efeitos foram heterogêneos entre países e estratégias de diversificação. De forma similar, Asfaw (2018) analisou o impacto dos choques de precipitação na diversificação de culturas e do trabalho (mensurados com três índices) na Nigéria (2011 e 2014). Neste caso, também foi usado um modelo SUR nas estimações, porque se supõe que os dois tipos de diversificações são simultaneamente determinados. As estimações mostram que os efeitos dos choques de seca promovem a diversificação de culturas tanto em riqueza (número de culturas) e uniformidade (índice de Shannon). Os choques de seca não afetaram significativamente a diversificação de trabalho.

Ademais, Arslan et al. (2018) analisaram os determinantes de três tipos de diversificação (culturas, pecuárias e renda), utilizando a variação da precipitação de longo e médio prazo em Zâmbia. Foram coletadas mais de 8.000 observações de agricultores em 2012 e 2015. A estratégia empírica foi usar o modelo SUR porque existe o potencial de correlação entre os termos de erro nas diferentes diversificações. As variáveis climáticas consistiram no Coeficiente de Variação (CoV) da precipitação da estação de colheita (1983-2014) e no desvio percentual da precipitação total do período corrente e prévio. Os resultados mostram que a variabilidade de longo prazo (CoV) afeta positivamente os três tipos de diversificação analisados. Além disso, a escassez de chuva no período prévio aumentou a diversificação de culturas, mas

diminuiu a diversificação de renda. Por último, a escassez de chuvas correntes apenas afetou positivamente a diversificação de renda.

Por fim, destaca-se a pesquisa de Tesfaye e Tirivayi (2020), que apresentam evidência empírica dos efeitos do risco climático na diversificação de culturas e como o incremento da diversificação afeta o bem-estar e o consumo de agricultores em Uganda. Para estimar os determinantes da diversificação de culturas, foi utilizado o modelo de Efeitos Aleatórios Correlacionados (*Correlated Random Effects* – CRE) em dados painel (2009-2012) por permitir correlação entre os efeitos não observados com as variáveis explicativas. As variáveis climáticas abrangeram o desvio padrão de chuva (choque de chuva) com dados históricos (1981-2010), a média de temperatura da estação de crescimento das plantas e a altitude (km) e a interação entre temperatura e altitude. Os resultados apontam que os choques de precipitação e a altitude afetam positivamente a diversificação de culturas. A temperatura não afetou significativamente. Porém a interação entre temperatura e altitude teve efeito negativo, indicando que a heterogeneidade geográfica influencia a diversificação.

De forma geral, esta revisão de literatura indica que são numerosas as pesquisas que lidam com a diversificação agrícola, com diferentes focos. A diversificação de culturas tem aumentado em algumas regiões, como no Sudeste Asiático ou na Índia, e se reduzido em outras, como no Canadá ou na União Europeia. No entanto, a diversificação tem tomado relevância como estratégia sustentável nas políticas públicas agrícolas internacionais. A literatura mostra que o tamanho do estabelecimento e a distância aos mercados são fatores que podem influenciar na decisão de alocar as culturas, embora com efeitos ambíguos nos resultados. Ademais, as pesquisas indicam que o uso de tecnologias ou equipamentos e a disponibilidade de mão de obra influenciam positivamente na diversificação. Em relação às variáveis climáticas, a maioria das pesquisas indica efeitos estatisticamente significativos na concentração de culturas. As pesquisas convergem nos impactos positivos das variáveis de temperatura sobre a diversificação, inclusive nas suas diferentes unidades de medida. Porém os choques de precipitação apresentam resultados ambíguos e até mesmo sem efeitos estatisticamente significativos, como o caso de choque de inundações. Esses resultados dependem das condições geográficas das regiões. Assim, o presente trabalho pretende analisar as convergências e divergências do cenário agrícola brasileiro com a literatura internacional.

Tabela 4. Literatura relativa à Diversificação Agrícola e Variáveis Climáticas

Autor(es)	Alvo	Variável climática	Medida climática	Estrutura de dados	Unidade de observação	Principais resultados
Seo (2010)	América do Sul ²¹	Temperatura, precipitação	Médias de verão e inverno, desvio padrão	Seção cruzada (jul 2003-jun 2004)	Estabelecimentos rurais	Os agricultores em um clima mais quente preferem um sistema misto lavoura-pecuária a sistemas especializados.
Seo (2011)	África ²²	Temperatura, precipitação	Médias de verão e inverno	Seção cruzada (jul 2002 – jun 2003)	Estabelecimentos rurais	O número de estabelecimentos integrados (lavoura-pecuária) cresce, ao contrário dos especializados, sob cenários climáticos.
Dillon et al. (2015)	Nigeria	Temperatura, precipitação	<i>Degree days</i> (médias 1981-2009), desvios de precipitação (estação de plantio (abril-junho) (2000-2009)	Painel (2010-2011)	Estabelecimentos rurais e urbanos	O número de grupos de culturas colhidas tem relação positiva com os choques de <i>degree days</i> e relação negativa com choques de chuva.
Mccord et al. (2015)	Quênia	Precipitação	Precipitação anual	Seção cruzada (2012)	Estabelecimentos rurais	A precipitação foi a única variável que influencia significativa e positivamente o número de tipos de culturas.
Rahman (2016)	Bangladesh	Temperatura, precipitação, Enchente	Diferença entre a média anual de máxima e mínima temperatura, precipitação anual, proporção da área total inundada em cada região	Painel (1948-1972)	Regiões	Apenas a precipitação afetou positivamente e significativamente a diversificação agrícola.
Arslan et al. (2018)	Zâmbia	Precipitação	Coefficiente de variação (1983-2014), percentagem de desvios do total de chuvas no período prévio e corrente	Painel (2012, 2015)	Estabelecimentos rurais	O coeficiente de variação afetou positivamente os três tipos de diversificação (culturas, pecuária, renda)
Asfaw et al. (2019)	África ²³ Subsaariana	Precipitação	SPI (1983-2014)	Painel	Estabelecimentos rurais	A exposição a eventos extremos de chuva está positivamente associada à diversificação de culturas em todos os países analisados
Tesfaye e Tirivayi (2020)	Uganda	Precipitação, elevação, temperature	Desvio padrão de chuva (choque de chuva) (1981-2010) e média temperatura da estação de crescimento, elevação (km)	Painel (2009-2012)	Estabelecimentos rurais	O choque de chuva e a elevação aumentam o grau de diversificação de culturas.

²¹ Argentina, Brasil, Chile, Uruguai, Colômbia, Equador e Venezuela.

²² Níger, Burkina Faso, Senegal, Gana, Camarões Quênia, Etiópia, África do Sul, Zâmbia e Egito.

²³ Os países que formaram parte da pesquisa são Malawi (2010-2013), Nigéria (2011-2014), Zâmbia (2012-2015)

3.2. Referencial teórico

Para examinar os determinantes da diversificação de culturas, é apresentado um modelo geral de estabelecimento agrícola desenvolvido por Van Dusen (2000) e Benin et al. (2004). O agricultor maximiza sua utilidade sob um conjunto de bens de consumo (C_P – Consumo da propriedade) gerados na propriedade agrícola e um conjunto de bens de consumo comprados (C_{NP} – Consumo fora da propriedade) com a renda agrícola ou não agrícola. A utilidade é afetada por um vetor de características socioeconômicas do agricultor (ϕ_{SE} -Socio-Econômicas) (VAN DUSEN; 2000; BENIN et al, 2004):

$$\max_{C_P, C_{NP}} U(C_P, C_{NP}, \phi_{SE}) \quad (4)$$

O consumo da família está sujeito a uma restrição de renda, que abrange a renda da produção de produtos não consumidos ($Q - C_P$) de um vetor Q dos produtos agrícolas e a renda não agrícola \bar{Y} (VAN DUSEN; 2000; BENIN et al., 2004). A produção agrícola está sujeita a uma função de tecnologia fixa que combina insumos (X) entre j culturas, e o lucro está sujeito aos preços de insumos e produtos (VAN DUSEN; 2000).

$$p_P(Q - C_P) - p_X X + \bar{Y} = p_{NP} C_{NP} \quad (5)$$

A produção está em função de um vetor de características agroecológicas e tecnológicas (como tamanho, tipo de solo, bioma, irrigação) do estabelecimento agrícola (ϕ_{AT} -Agroecológicas- Tecnológicas) (VAN DUSEN; 2000; BENIN et al., 2004):

$$Q = f(\alpha, X | \phi_{SE}, \phi_{AT}) \quad (6)$$

Cada conjunto de proporção da área ou fonte de renda (α_j) entre j culturas soma $\sum_j^J \alpha_j = 1$, $j = 1, 2, \dots, J$, que projeta no vetor Q através de relações físicas de insumo-produto. A escolha da proporção da área ou fonte de renda implica um nível de produtos do estabelecimento e vice-versa (BENIN et al., 2004).

Segundo Benin et al. (2004), a função objetivo da equação (4) pode ser reescrita como

$$\max_h U(C_P, C_{NP}, \phi_{SE}) \quad (7),$$

em que $h = ((\alpha_1, \dots, \alpha_j) \geq 0; C_f, C_{nf}, X)$. Não há soluções interiores para cada cultura, e algumas proporções de área podem ser censuradas como zero.

A escolha de produção e do consumo pelo produtor se faz simultaneamente quando os mercados de insumos e produtos são imperfeitos (BENIN et al., 2004), ou

seja, existem produtores que conseguem influenciar o preço de mercado. Logo, os preços são endógenos ao estabelecimento agrícola, como também são afetados pelos custos de transações de mercado (BENIN et al., 2004), dados pelo afastamento geográfico dos principais mercados ou pela infraestrutura rodoviária (VAN DUSEN; 2000). Desse modo, esses custos de transação e o acesso ao mercado são caracterizados por um vetor de características exógenas de mercado (ϕ_M -Mercado), que, de forma geral, descrevem as restrições de mercado ao produtor (VAN DUSEN, 2000). Adicionalmente, há restrições climatológicas que estão em função das características atmosféricas da região de produção (ϕ_C -Climáticas) e influenciam as escolhas do agricultor.

Conforme Benin et al. (2004), quando as escolhas de consumo e produção não são separadas, a escolha ótima do agricultor ($h^* = (\alpha^*, C_f^*, C_{nf}^*, X^*)$) pode ser definida como uma função de forma reduzida de renda não agrícola, das características socioeconômicas, agroecológicas e práticas agrícolas do mercado e climáticas:

$$h^* = h^*(\bar{Y}, \phi_{SE}, \phi_{AT}, \phi_M, \phi_C) \quad (8)$$

A equação (8) afeta o consumo e a produção e, conseqüentemente, influencia o nível de diversificação de culturas nos estabelecimentos agrícolas.

Por outro lado, a diversificação de culturas (S) de cada estabelecimento agrícola i toma a forma de uma demanda derivada simples (BENIN et al., 2004; RAHMAN, 2008; VAN DUSEN, 2000):

$$S = S(\alpha_j^*(\bar{Y}, \phi_{SE}, \phi_{AT}, \phi_M, \phi_C)) \quad (9)$$

A equação (9) é o resultado da otimização da utilidade do agricultor. Além disso, essa equação também é considerada como diversificação latente de culturas, que, neste estudo, será representada por um índice de diversidade (VAN DUSEN, 2000).

Na presente pesquisa, o modelo para o estabelecimento agrícola individual é ampliado a nível municipal brasileiro. Seguindo a sugestão metodológica de Rahman(2016), supõe-se que os fatores afetando a escolha de culturas no nível de estabelecimento agrícola individual em dado período de tempo possam ser aplicados para identificar os determinantes da área de terra alocada a várias culturas ao nível regional. Essa suposição representa a ação combinada das respostas individuais do agricultor em cada município (RAHMAN, 2016):

$$S_{it} = S_{it}(\alpha_{ijt}^*(\bar{Y}_{it}, \phi_{SE_{it}}, \phi_{AT_{it}}, \phi_{M_{it}}, \phi_{C_{it}})) \quad (10),$$

em que S representa o índice de diversificação no nível municipal, i representa o município ($i (i = 1, 2, \dots, n)$) e t representa o tempo ($t = 1, 2, 3$).

4. METODOLOGÍA

Neste capítulo, é explicada a metodologia, que inclui a estratégia empírica, o modelo econométrico, o procedimento das simulações futuras e a fonte de dados. Neste estudo, foi utilizado um modelo de dados em painel. Os dados em nível de Área de Mínimas Comparáveis (AMC) ²⁴ (corte transversal) foram combinados com os anos dos censos agropecuários 95/96, 2006 e 2017 (séries de tempo). Dessa forma, obtém-se maior precisão nas estimações, permitindo a possibilidade de estimação consistente de modelos a existência de efeitos não observados potencialmente correlacionados com os regressores e a possibilidade de aprender mais sobre a dinâmica do comportamento individual (CAMERON, TRIVEDI, 2005). Assim, o uso de dados em painel possibilitou o estudo da dinâmica da diversificação de culturas ao longo do período de tempo considerado no estudo, como também os efeitos do clima sobre essa dinâmica.

4.1. Estratégia empírica

A diversificação agropecuária em nível regional é uma resposta agregada das decisões de escolha de culturas dos agricultores individuais. Essa alocação imediata de culturas dentro do estabelecimento agropecuário responde a diversos fatores, entre os quais as variáveis climáticas (MU et al., 2018; ASRAVOR, 2017; RAHMAN, 2016; MCCORD et al., 2015). Assim, esperou-se que a relação causal fosse que o incremento do nível de diversificação agropecuária de uma região pudesse ser influenciado pela variação da precipitação e temperatura. O entendimento desse efeito ajudaria a prever a diversificação como acréscimo da capacidade de adaptação em face de eventos climáticos adversos em nível regional, como também poderia antecipar as mudanças do uso de terra agrícola brasileira por causa das mudanças climáticas ou da variabilidade climática. Além disso, o conhecimento dessa relação de causa e efeito contribuiria para o planejamento agrícola no Brasil bem como para o desenho e o ajuste de políticas ligadas às mudanças climáticas e à variabilidade climática.

Para determinar a relação causal entre variação climática e a diversificação agropecuária, seria necessária a realização de um experimento natural que tornasse a escolha de culturas pelo agricultor uma decisão aleatória. O experimento natural permitiria construir uma situação contrafactual para examinar o que teria acontecido a um grupo de regiões se elas não tivessem recebido influência da variação do clima. Normalmente, o clima é considerado exógeno e aleatório na maioria das aplicações

²⁴ Na seção de Fonte de dados, é explicado com mais detalhe sobre esta unidade de observação.

econômicas (AUFFHAMMER, 2013). Assim, a variabilidade climática pode gerar variações exógenas e aleatórias sobre a decisão de alocar as culturas. Mesmo que parte da variabilidade climática seja afetada por forças antropogênicas globais, ela pode ser considerada uma variação exógena resultante de mudanças não antecipadas nas condições do clima dos municípios brasileiros. Desse modo, a relação entre variabilidade climática e diversificação de culturas nos municípios brasileiros foi tratada de modo aleatório, como em um experimento natural.

Da mesma forma, a variabilidade climática pode ser considerada um experimento ideal, já que as anomalias climáticas não podem ser previstas com exatidão. Isso pode provocar também variações exógenas e aleatórias na decisão dos agricultores na alocação de culturas, afetando o grau de diversificação agropecuária no nível municipal. Então, pode-se comparar a diversificação dos municípios e saber o efeito das variações de temperatura e precipitações sem ter problemas de viés de seleção.

A variação da precipitação e temperatura foi modelada neste estudo como um vetor de variabilidade climática de médio prazo (médias móveis de cinco anos). Essa variação do clima incluiu tanto a precipitação quanto a temperatura porque são historicamente correlacionadas, embora os choques climáticos sejam exógenos. O sinal da correlação entre a temperatura e a precipitação depende da pressão atmosférica. Assim, com o fim de obter estimativas imparciais dos efeitos das mudanças na precipitação e nas temperaturas, ambas as variáveis devem ser incluídas na equação de regressão, especialmente se for previsto que a correlação mude no futuro. A correlação entre precipitação e temperatura através do espaço varia significativamente em sinal e magnitude, implicando que, se for controlada apenas uma das duas variáveis meteorológicas numa regressão, o direcionamento do sinal da variável omitida dependerá da localização em estudo (AUFFHAMMER, 2013).

Nesse contexto, a equação de interesse foi o impacto do clima na diversificação agropecuária:

$$S = f(C, X) \tag{11},$$

em que vetores de variáveis climáticas (C) e variáveis de controle (X)²⁵ afetaram a diversificação agropecuária municipal brasileira. As variáveis climáticas incluíram médias móveis de cinco anos de verão (dezembro a fevereiro) e de inverno (junho a agosto) usando valores mensais. Essa escolha foi feita, já que na maioria dos estados do Brasil as estações de verão e inverno são bem definidas (CUNHA et al., 2015). A variabilidade climática incluiu os desvios padrão mensais de temperatura e precipitação. Além disso, foram também consideradas as médias móveis de cinco anos de índices de clima extremo para cada período dos Censos Agropecuários 95/96, 2006 e 2017. A média móvel de cinco anos foi escolhida para considerar o impacto do clima de médio prazo nas culturas perenes e temporárias porque um período mais longo poderia diluir o efeito nessas culturas. Segundo Cho e McCarl (2017), as médias defasadas de cinco anos modelam bem as reações dos agricultores às alterações climáticas.

Tanto a temperatura e precipitação de médio prazo quanto os índices climáticos foram considerados porque se espera que a variabilidade do clima aumente em certas regiões do mundo, assim como a frequência e a intensidade de eventos extremos (IPCC, 2014). No Brasil, a frequência e a intensidade da seca têm aumentado nas regiões Norte e Nordeste (SHUKLA et al., 2019). Segundo Marengo (2009), para América do Sul tropical é esperada redução na quantidade total de chuva e no número de dias úmidos, como também aumento do número de dias secos consecutivos até 2030. Ademais, prevê-se aumento de chuvas fortes em regiões como o oeste da Amazônia e o Sul e o Sudeste do Brasil. Além disso, existe evidência de aumento de frequência de ondas de calor²⁶ ao redor do Brasil (BITENCOURT et al., 2019; GEIRINHAS et al., 2018), como também ondas de frio²⁷ mais severas e intensas na maior parte da região sul (BITENCOURT et al., 2019).

Por outro lado, há evidência de que o estresse abiótico²⁸ devido às condições climáticas adversas reduz a produtividade das lavouras nos principais produtos agrícolas no mundo (MITTLER, 2006; BOYER, 1982). Os estresses abióticos ligados ao clima são o frio/calor e a seca/inundação (KUMAR, 2013; TAIZ e ZEIGER, 2009). Neste estudo, os eventos extremos considerados foram as geadas, secas, dias quentes e uma *proxy* para inundações. Desse modo, foram utilizados cinco índices de clima extremo,

²⁵ As variáveis de controle (X) incluem características correlacionadas com o vetor de variáveis climáticas (C) e também afetam a diversificação agropecuária, possivelmente condicionadas pelos efeitos climáticos (DELL, JONES, OLKEN, 2014). A seguinte subseção explica com mais detalhe as variáveis de controle

²⁶ Uma onda de calor é considerada com 3 ou mais dias com temperaturas máximas acima do percentil 90 (BITENCOURT et al., 2019).

²⁷ Uma onda de frio é definida com 3 ou mais dias com temperaturas mínimas abaixo do percentil 10 90 (BITENCOURT et al., 2019).

²⁸ Estresse causado por fatores não ligados a organismos vivos.

recomendados pela Equipe de Especialistas em Índices Climáticos Setoriais (*Expert Team on Sector-Specific Climate Indices – ET-SCI*²⁹) da WMO para o setor de agricultura. A definição dos índices de clima extremo deste estudo é apresentada na Tabela 5. Os índices foram calculados usando valores diários de precipitação, temperatura máxima e mínima com dados do *Terrestrial Hydrology Research Group* (THRG) (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006), obtendo resultados de valores anuais considerando o período base (1985-2016³⁰), utilizando um software padronizado (ClimPACT2) (ALEXANDER e HEROLD, 2015).

Tabela 5. Definição dos índices de clima extremo

Código do índice	Nome	Definição	Unidade	Tipo de evento
FD	Dias de geada	Contagem anual de dias em que TN < 0°C	Dias	Geadas
CDD	Dias secos consecutivos	Número máximo de dias secos consecutivos (quando PR < 1,0 mm)	Dias	Maior período de seca anual
Rn1mm ³¹	Número de dias secos	Contagem anual de dias em que PR < 1,0 mm	Dias	Dias secos
R20mm	Número de dias de chuva muito forte	Contagem anual de dias em que PR ≥ 20 mm	Dias	<i>Proxy</i> de Inundação
TX90p	Quantidade de dias quentes	Porcentagem de dias em que TX > percentil 90	%	Dias quentes

Nota: TN=temperatura mínima, TX=temperatura máxima, PR=precipitação
 Fonte: Adaptado de Alexander e Herold (2015).

4.1.1. Geadas

Vários tipos de culturas podem sofrer danos por congelamento, que ocorrem a temperaturas abaixo do ponto de congelamento da água, matando as células vegetais

²⁹ O ET-SCI promove o uso de índices climáticos específicos por setor, consistentes em escala global, para encontrar tendências e variações do clima de interesse para os setores socioeconômicos e ajudar a caracterizar a sensibilidade climática dos diversos setores.

³⁰ O período base considerou um período mínimo de 30 anos, que incluía os períodos censitários agropecuários. Os dados diários disponíveis de temperatura e precipitação foram até 2016. A seção de fonte dados tem mais detalhe.

³¹ Originalmente este índice indica o número de dias de chuva personalizado em que a precipitação é pelo menos um número de mm especificado pelo usuário para contabilizar os dias chuvosos. Nesse estudo, foi adaptado para quantificar os dias secos. Contudo, existe ressalva de mostrar chuva onde não tem, já que há problemas de resolução em pixel.

pela formação de cristais de gelo. Entre as culturas sensíveis ao resfriamento, estão o milho, o feijão, o arroz, o tomate, o pepino, a batata doce e o algodão (TAIZ e ZEIGER, 2009). Existem também variedades de espécies frutíferas que não são tolerantes ao estresse de frio e apresentam danos nas flores e queda de frutos, causando perdas econômicas (BORGES et al., 2012; TAIZ e ZEIGER, 2009; ASSMANN et al., 2008). No entanto, existem culturas vegetais (especialmente lenhosas³²) (TAIZ e ZEIGER, 2009), como também raças da pecuária que podem se aclimatar a temperaturas muito baixas.

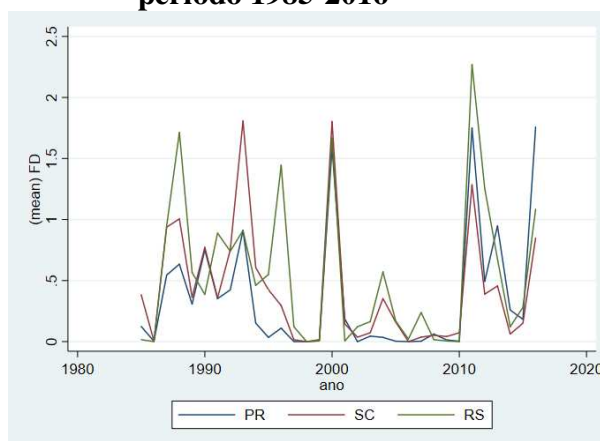
Existem duas formas de classificar as geadas, conforme sua origem e os danos causados. Conforme sua origem, temos as geadas advectivas e as geadas por radiação. A primeira acontece com massas de ar frio (ventos fortes) e baixa umidade do ar. A segunda acontece quando há altas pressões e poucas nuvens, provocando perdas de calor para a atmosfera (MELO-ABREU; RIBEIRO, 2010). Conforme os danos causados, há as geadas brancas e as geadas negras. No primeiro caso, refere-se à formação de cristais de gelo sobre a superfície das plantas. Há culturas tolerantes, assim as geadas brancas não provocam danos. No caso das geadas negras, elas causam necroses nos órgãos vegetais já que há congelamento da água no seu interior. No Brasil, esse tipo de geadas é causado pelas geadas advectivas e provoca a morte nas plantas (ALGARVE, 1996; CARAMORI et al., 2007).

Nesta pesquisa, a variável *Dias de geada* foi considerada apenas para a região Sul, já que está localizada abaixo da zona tropical e é onde comumente ocorrem geadas no inverno (BITENCOURT et al., 2019; WREGGE et al., 2018). A Figura 6 apresenta a evolução de geadas para região Sul no período de 1985 a 2016.

A Figura 6 mostra que, em geral, o estado do Rio Grande do Sul apresenta médias (dias) mais altas em relação aos outros dois estados da região Sul. Além disso, houve três anos (1988, 2000 e 2011) em que as geadas estiveram acima da média de 1,5 dias. Contudo, não é possível afirmar que exista alguma tendência de geadas ao longo do período analisado.

³² Plantas lenhosas são capazes de produzir madeira como tecido de suporte dos seus caules.

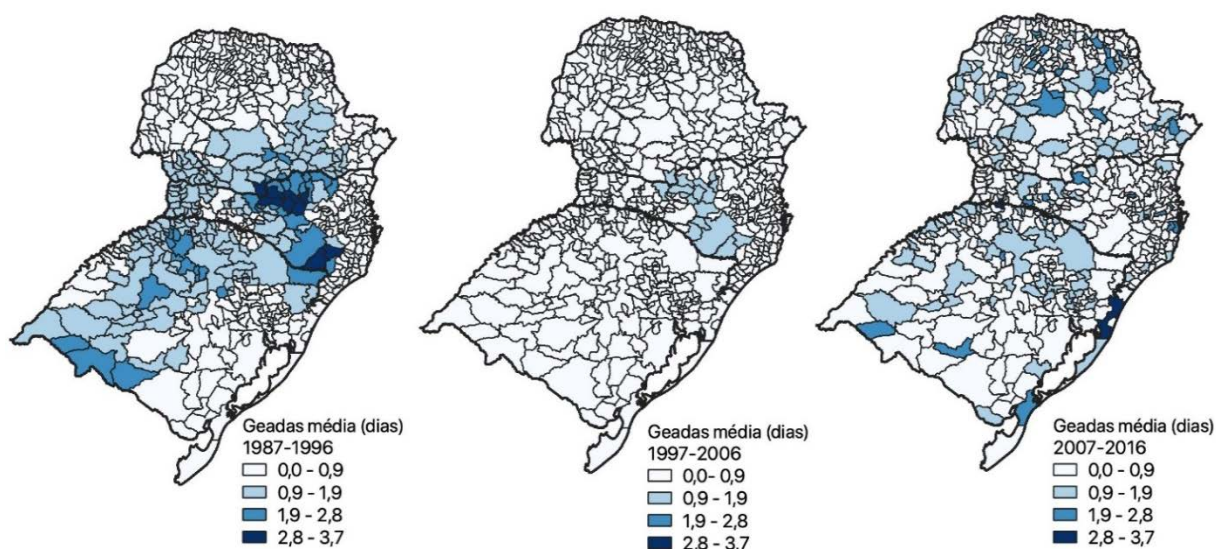
Figura 6. Evolução das geadas média (dias) nos estados da região Sul no período 1985-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

A Figura 7 apresenta o comportamento errático das geadas nas AMCs da região Sul ao longo de três períodos (1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016). O primeiro período (1987-1996) teve maior número de geadas que afetaram, sobretudo, as AMCs catarinenses. No segundo período (1997-2006), o número de geadas foi menor, afetando apenas a serra Catarinense. Santa Catarina destaca-se entre os estados com alto relevo, assim as geadas são frequentes no planalto serrano desse estado. Já no último período (2007-2016), as AMCs com geadas acima de três dias foram poucas, mas as geadas afetaram aos três estados da região Sul.

Figura 7. Geadas médias (dias) da região Sul ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016



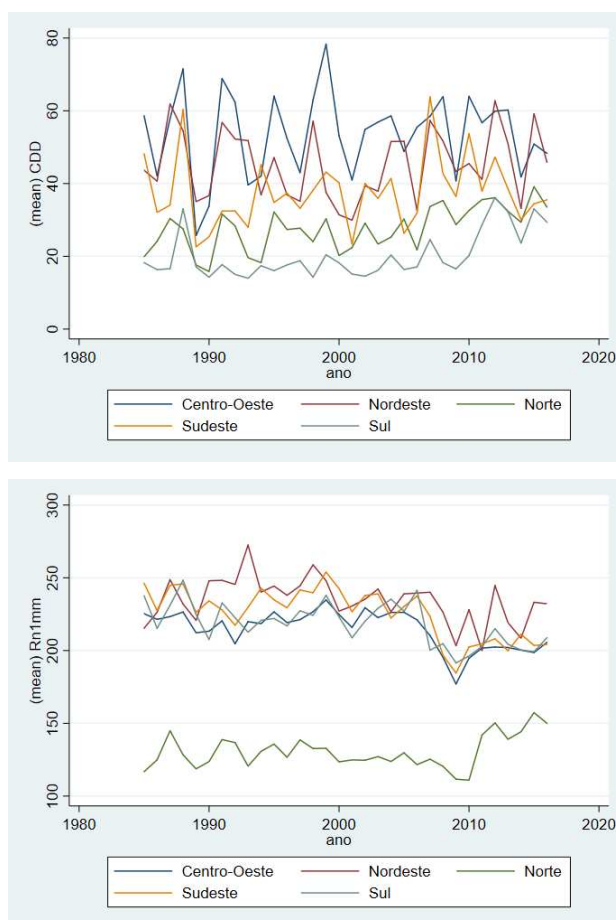
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

4.1.2. Seca

As secas são eventos climáticos que também provocam estresses nas plantas e animais, que podem levar a perdas agrícolas e econômicas (TAIZ e ZEIGER, 2009). Condições severas de seca podem causar a morte prematura das plantas, enquanto condições de seca descontínua afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (KUMAR, 2013). Por exemplo, a seca provocada pelo fenômeno severo *El Niño* (2015-2016) causou alta mortalidade de cacauzeiros (15%) e diminuiu o rendimento de cacau em 89% na Bahia (GATEAU-REY et al., 2018). A seca severa de 2012-2013 no Ceará levou à redução da área plantada em 43%, resultando em perdas médias de 75% nas lavouras, e também provocou perdas na pecuária, passando o índice de mortalidade do rebanho bovino de 0,33% em 2010 para 3,05% em 2013 (CEARÁ, 2013).

Nesse contexto, para analisar o efeito da seca prolongada e a seca intermitente na diversificação agropecuária, foram considerados dois índices: o *Número de dias secos consecutivos (CDD)* e o *Número de dias secos* (Tabela 5). Na Figura 8, é apresentada a evolução de cada índice relacionado à seca nas regiões brasileiras no período de 1985 a 2016. Observa-se que as secas prolongadas têm acontecido, principalmente, nas regiões Centro-Oeste e Nordeste. A região Sul apresenta menos dias consecutivos de seca ao longo do período. Contudo, parece que há tendência crescente da variável *CDD* para o Sul e o Norte. Em relação à média do *Número de dias secos anuais*, a região Norte teve o menor valor, embora a partir de 2011 esse valor tenha aumentado acima de 139 dias. As demais regiões têm tido a mesma tendência de número de dias secos no período 1985 a 2016, mas o Nordeste destaca-se com a maior quantidade, com picos máximos em 1993 (273 dias), 1998 (258 dias) e 2012 (245 dias).

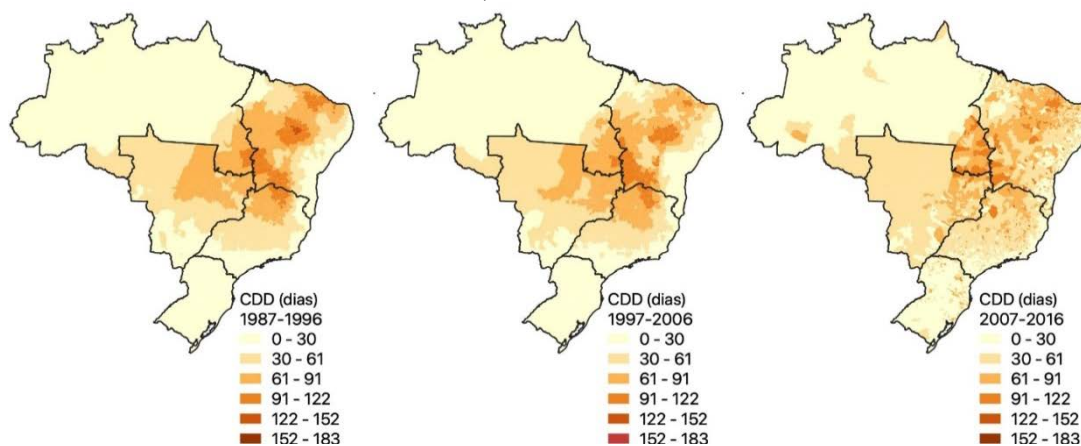
Figura 8. Evolução do *CDD* - média (dias) e Número de dias secos - média nas regiões brasileiras no período 1985-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

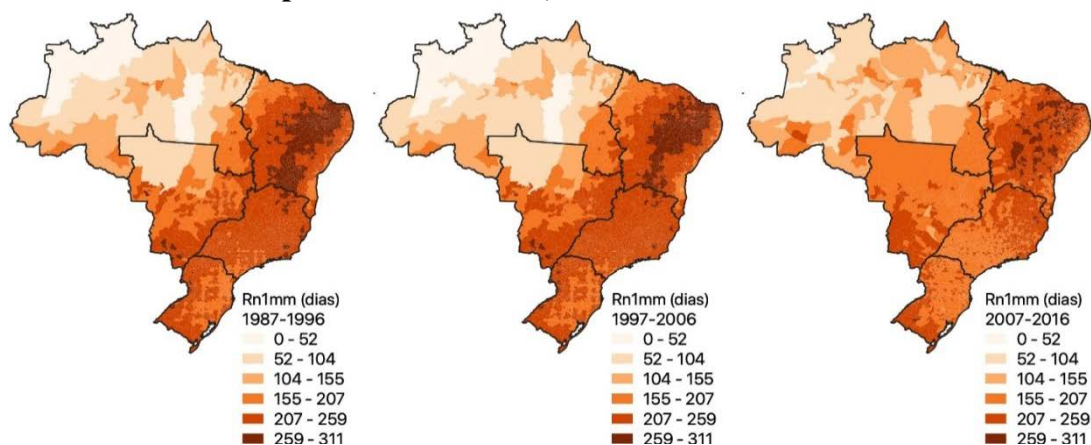
Na Figura 9, observa-se a expansão de períodos de seca entre 30 a 61 dias nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, enquanto o Nordeste apresenta aumento da dispersão de valores altos (>122 dias) de *CDD*. Na Figura 10, destaca-se que têm aumentado os dias sem precipitação no Norte e Centro-Oeste. As AMCs nordestinas têm diminuído os valores altos de dias secos (acima de 259 dias), mantendo-se constantes acima de 155 dias sem precipitação ao longo dos períodos. Além disso, o Sudeste e o Sul têm aumentado os dias com precipitação no período de 2007 a 2016. Portanto, observando tanto a Figura 8, quanto a Figura 10, destaca-se que os dias sem precipitação têm diminuído levemente no Nordeste, no entanto, a expansão de secas tem aumentado para o Centro-Oeste.

Figura 9. CDD - média (dias) nas regiões brasileiras ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

Figura 10. Número de dias secos - média nas regiões brasileiras ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016



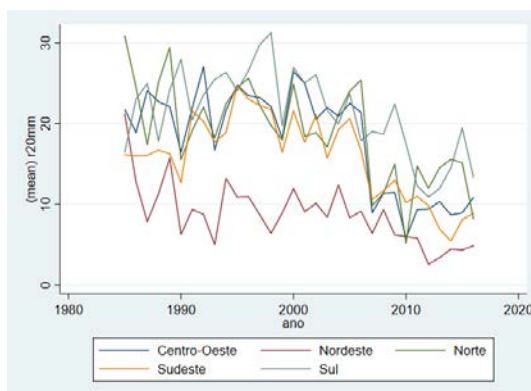
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

4.1.3. Inundação

Quando há chuva excessiva, o solo com drenagem deficiente pode tornar-se inundado, danificando as raízes das plantas pela deficiência de oxigênio. As culturas sensíveis à inundação são prejudicadas, reduzindo consideravelmente sua produtividade. Por exemplo, a produtividade da ervilha se reduz acima de 50% quando suas raízes sofrem inundação por seis horas após o florescimento (SÁ, CRUCIANI, MINAMI, 2004). Existem também plantas tolerantes à inundação que podem suportar temporariamente a falta de oxigênio, porém por poucos dias. Existem ainda lavouras adaptadas às terras húmidas, podendo resistir à deficiência de oxigênio, como o arroz e algumas outras gramíneas (TAIZ e ZEIGER, 2009). Fante (2008) identificou vários cultivares de soja tolerantes ao alagamento.

Conforme a Figura 11, houve tendência decrescente de dias de chuva muito fortes em todas as regiões brasileiras ao longo de 1985 a 2016. Entretanto, o Sul destaca-se em média com a maior quantidade de dias com precipitação acima de 20 mm a partir de 2008. Já o Nordeste encontra-se quase sempre com a menor quantidade de dias com chuva forte.

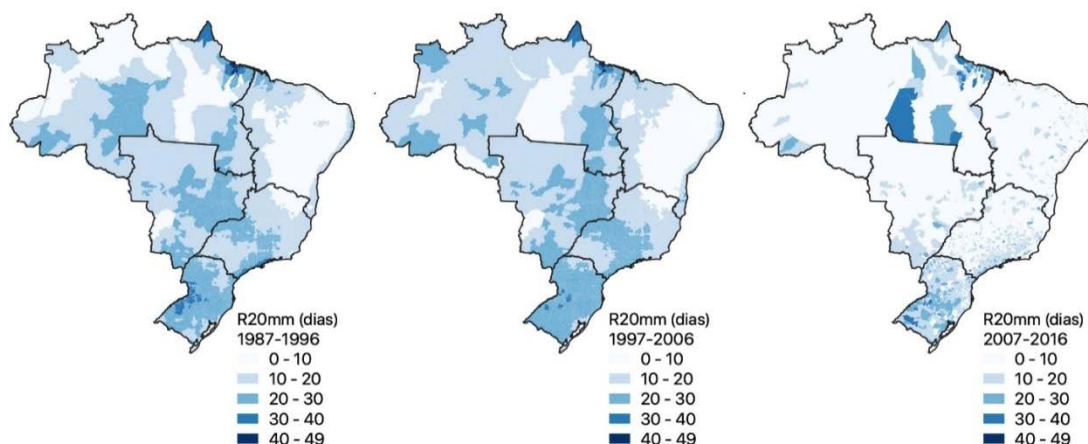
Figura 11. Evolução do Número de dias de chuva muito fortes - média nas regiões brasileiras no período 1985-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

Em relação à Figura 12, destaca-se a diminuição de dias com chuva muito forte no período de 2007 a 2016. Os cenários passados de 1987 a 2006 são muito parecidos, exceto pela região Norte, que apresentou leve aumento de chuvas fortes (entre 10 a 20 dias/ano) entre 1997-2006.

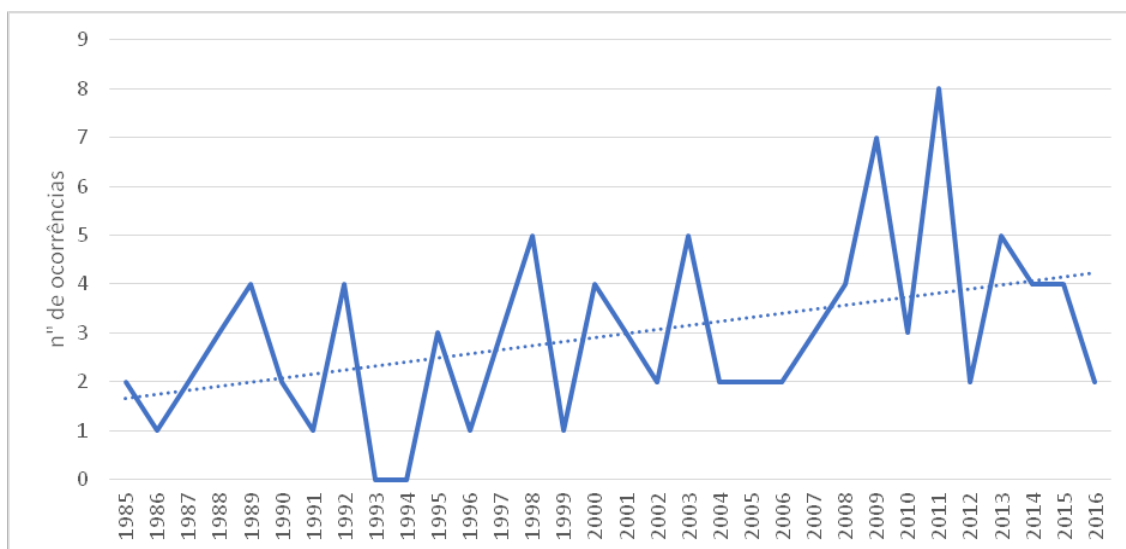
Figura 12. Número de dias de chuvas muito fortes - média ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

No entanto, o número de ocorrências de inundações tem tido uma tendência crescente no período 1985-2016 no Brasil (Figura 13). Este fato pode estar relacionado com precipitações prolongadas por vários dias ou intensas chuvas em um curto período de tempo, mas também com alterações antrópicas como o desmatamento e a falta de políticas de uso e ocupação do solo, sobretudo em áreas de risco (GOERL & KOBIYAMA, 2005).

Figura 13. Frequência de inundações no Brasil (1985-2015)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de eventos de desastres (EM-DAT, 2021)

4.1.4. Dias quentes

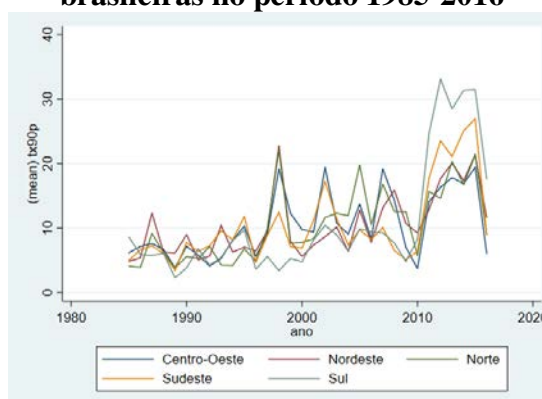
Conforme Taiz e Zeiger (2009), a exposição prolongada a temperaturas extremas, especialmente na floração, prejudica a maioria das plantas, podendo ocasionar perdas na produção agrícola. Os cenários futuros (2080) analisados por Deryng et al. (2014) mostram que o estresse de calor na floração será responsável pelas perdas (até 45%) de rendimento médio global de milho e pela redução dos ganhos de rendimento médio global de trigo (até 52%) e soja (até 25%). No caso do Brasil, experimentos realizados por Didonet e Vitória (2006) mostram que o estresse térmico no feijão pode reduzir o rendimento devido ao menor número e massa de matéria seca nos grãos. Adicionalmente, o estudo de Gusso et al. (2014) mostra que as ondas de calor podem potencialmente aumentar os efeitos da seca e reduzir a produtividade da soja na região Sul.

O estresse térmico também prejudica a produção pecuária (DE SOUZA & BATISTA, 2012). Por exemplo, exposições severas de estresse térmico podem provocar

reduções na produtividade (20%) de leite de vaca no Sul do Brasil (GARCIA et al., 2015), inclusive animais considerados rústicos ao calor, como os caprinos, podem ser afetados pelo estresse térmico (SOUZA, SALLES, ARAÚJO, 2012). Dessa forma, são recomendadas criação de raças de animais com maior adaptabilidade climática e/ou práticas que ajudem a dissipar o calor, como o sistema ILPF, em que as árvores provisionam sombra natural aos animais (ALMEIDA et al., 2010; DE SOUZA & BATISTA, 2012; SOUZA, SALLES, ARAÚJO, 2012).

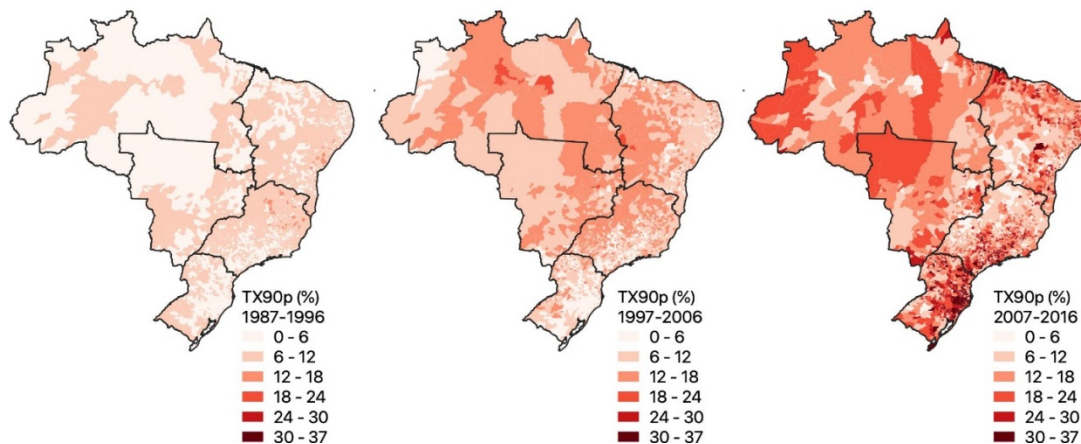
Na Figura 14, observa-se que o número de dias quentes tem aumentado ao longo do período de 1985 a 2016 em todas as regiões brasileiras. O Sul destaca-se como a região com maior quantidade de dias quentes desde 2010, seguido pelo Sudeste. Em 2012, o Sul teve o maior pico, com média de 33,1 dias/ano. Da igual forma, a Figura 15 mostra que a quantidade de dias quentes tem aumentado ao longo dos três períodos (1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016). O último período (2007 – 2016) apresentou o maior aumento de dias quentes. Várias AMC's do Norte e Centro-Oeste passaram a ter média anual de 18 a 24 dias quentes. O intervalo máximo da variável $TX90p$ (30 a 37 dias) localiza-se, sobretudo, nas AMC's próximas ao litoral Sul e Sudeste. Cabe destacar que o Nordeste, mesmo sendo considerado região com histórico de secas, tem poucas AMCs com valores máximos da variável $TX90p$.

Figura 14. Evolução da Quantidade de dias quentes - média (%) nas regiões brasileiras no período 1985-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

Figura 15. Quantidade de dias quentes - média (%) ao longo dos períodos 1987-1996, 1997-2006 e 2007-2016



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

4.2. Modelo analítico

A diversificação agropecuária é uma medida adaptativa tanto no curto prazo (para reduzir riscos da variabilidade climática) quanto no longo prazo (para reduzir riscos das mudanças climáticas). De forma geral, a adaptação de longo prazo é tratada com dados em painel (SCHLENKER, 2010). Além disso, uma análise de painel oferece uma solução para evitar variáveis omitidas invariantes no tempo, pois reconhece que existem diferenças fundamentais entre os municípios ao incluir os efeitos fixos (DELL, JONES, OLKEN, 2014; SCHLENKER, 2010). Por outro lado, embora a vantagem de pesquisas com clima seja dependente unicamente da variação climática aleatória, essa análise deveria ser imune ao viés de variável omitida. Contudo, mesmo em um experimento natural, podem existir outros fatores capazes de causar influência na diversificação agropecuária além do clima. Ou seja, quando esses outros controles são incluídos ou excluídos, os coeficientes das variáveis climáticas permanecem robustos (SCHLENKER, 2010). A análise empírica foi baseada no modelo desenvolvido na seção (3.3) do Referencial Teórico, em que a diversificação agropecuária dos municípios brasileiros é afetada pelo clima e por outras características socioeconômicas, agroecológicas e de mercado. Assim, a versão completa da equação de interesse (11), anteriormente apresentada, é:

$$S_{it} = \beta C_{it} + \gamma SE_{it} + \delta A_{it} + \zeta M_{it} + \mu_i + \theta_{rt} + \varepsilon_{it}, \quad (12)$$

em que S_{it} representa o índice de diversificação agropecuária Simpson do município i e no ano t ; C_{it} representa várias especificações de variabilidade climática do município i ; SE_{it} é o vetor das características socioeconômicas do município i no ano t ; A_{it} é o vetor das características agrícolas do município i e no ano t ; M_{it} é o vetor das características de mercado do município i no ano t ; e μ_i representa os efeitos fixos dos municípios, captando características fixas espaciais, observadas ou não, removendo o choque de muitas fontes possíveis de viés de variáveis omitidas (DELL, JONES, OLKEN, 2014). θ_{rt} representa os efeitos fixos do ano t e do estado r , neutralizando quaisquer tendências estaduais comuns e garantindo que as relações de interesse sejam identificadas por choques locais idiossincráticos. ε_{it} é o termo de erro independente e identicamente distribuído (*iid*) no município i no ano t , com média 0 e variância σ (GREENE, 2012).

Foram usadas seis especificações para analisar o efeito da variabilidade climática e eventos de clima extremo (C_{it}):

- i. **Médias sazonais:** as médias móveis de cinco anos de *temperatura* e de *precipitação de verão e inverno*, como também os desvios padrão mensais de cinco anos de *temperatura* e *precipitação* são apresentadas na Figura 16.
- ii. **Geadas:** a média móvel de cinco anos do índice *FD*, como também a média móvel de cinco anos da *precipitação de inverno*, já que existe correlação $(0,52^{***})^{33}$ entre *temperatura* e *precipitação* (AUFFHAMMER, 2013), são apresentadas nas Figuras 6 e 7. Foi usada a *precipitação de inverno* porque a maioria das geadas acontecem nessa estação. Essas variáveis foram usadas apenas para a região Sul.
- iii. **Maior período de seca anual:** a média móvel de cinco anos do índice *CDD* como também a média móvel de cinco anos da *temperatura média anual* são apresentadas nas Figuras 8 e 9. A correlação entre essas duas variáveis foi de $0,35^{***}$.
- iv. **Dias secos:** a média móvel de cinco anos do índice *RnImm* como também a média móvel de cinco anos da *temperatura média anual* são apresentadas nas Figuras 8 e 10. A correlação entre essas duas variáveis foi de $0,01^*$.

³³ Significância: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$

- v. **Proxy de Inundação:** a média móvel de cinco anos do índice *R20mm* como também a média móvel de cinco anos da *temperatura média anual* são apresentadas nas Figuras 11 e 12. A correlação entre essas duas variáveis foi de -0,37***.
- vi. **Dias quentes:** a média móvel de cinco anos do índice *TX90p* como também a média móvel de cinco anos da *precipitação acumulada anual* são apresentadas nas Figuras 13 e 14. A correlação entre essas duas variáveis foi de -0,12***.

O índice de Simpson é adaptado dos índices ecológicos de diversidade de espécies, representando a concentração de espécies (MAGURRAN, 2004). Esse índice considera quanto cada atividade agropecuária contribui para a renda agropecuária total do município (SAMBUICHI et al., 2016). Assim, são levados em conta os produtos agrícolas e pecuários:

$$S_I = 1 - \sum_{j=1}^N \alpha_k^2 \quad 0 \leq S_I \leq 1 \quad (13),$$

em que α_k é a proporção de VP de cada produto agropecuário no VP total agropecuário do município. O valor 1 indica diversificação perfeita e o valor 0 indica perfeita especialização (um único produto).

As variáveis independentes representam medições dos vetores apresentados na parte direita da equação (12), conforme as definições contidas na Tabela 6. A variável de *assistência técnica* é considerada importante recurso de disseminação de informações nas práticas agrícolas (RAHMAN, 2008), podendo influenciar a adoção de novas tecnologias e também a diversificação de culturas. Segundo Benin et al. (2004), os estabelecimentos agrícolas maiores podem produzir maior quantidade de cultivos. A variável *irrigação* pode diminuir a diversidade através de condições uniformes de umidade (BENIN et al., 2004), bem como ser um investimento direcionado para cultivos intensivos. Na variável de mercado, foi usado o *número de estabelecimentos que produzem milho*, considerada uma *proxy* para controlar o efeito da demanda das principais culturas. O valor da produção de soja não foi considerado porque apenas em 1877, 1360 e 1832 municípios brasileiros nos censos de 1995/1996, 2006 e 2017, respectivamente, reportaram esses dados, causando perda considerável de observações. No entanto, como a maior parte da produção brasileira de milho é feita nos sistemas de dupla colheita (soja) (ABRAÃO; COSTA, 2018), os dados utilizados nesta pesquisa levam em consideração a soja indiretamente. Para as variáveis climáticas, é esperado que o aumento de temperatura e precipitação bem como o aumento de sua variabilidade

afetem positivamente a diversificação de culturas, como medida adaptativa na redução de riscos negativos associados às mudanças climáticas (CUNHA et al., 2015).

Tabela 6. Definição das variáveis explicativas, unidades de medida e sinal esperado conforme a literatura

Variável	Descrição	Unidade	Sinal esperado	Referências literatura
Características socioeconômicas (S)				
Condição legal	Número de produtores proprietários do estabelecimento	unidade	+	RAHMAN (2008)
Assistência técnica	Número de produtores que receberam assistência técnica	unidade	+	RAHMAN, 2008; IBRAHIM et al., 2009; MCCORD et al., 2015
Características agrícolas (A)				
Tamanho estabelecimento	Média do tamanho por estabelecimento agrícola	Ha	+	BENIN et al., 2004; RAHMAN, 2008; MCCORD et al., 2015
Irrigação	Número de estabelecimentos com irrigação	unidade	-	MESFIN, FUFA, HAJI, 2011; RAHMAN, 2008; JOSHI et al., 2004
Características do mercado (M)				
Estabelecimentos com milho	Número de estabelecimentos com cultura de milho	unidade	+	JOSHI et al., 2004; RAHMAN, 2008
Características climáticas (C)				
Temperatura de verão	Média móvel de 5 anos de temperatura de verão	°C	+	SEO, 2010; CUNHA et al., 2015; PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2020
Temperatura de inverno	Média móvel de 5 anos de temperatura de inverno	°C	-	SEO, 2010; RAHMAN, 2016; CUNHA et al., 2015; PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2020
Precipitação de verão	Média móvel de 5 anos de precipitação de verão	mm	-	SEO, 2010; RAHMAN, 2016; CUNHA et al., 2015; PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2020
Precipitação de inverno	Média móvel de 5 anos de precipitação de inverno	mm	-	SEO, 2010; RAHMAN, 2016; PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2020
Variabilidade temperatura	Desvio padrão de temperatura de 5 anos anteriores		+	SEO, 2010; RAHMAN, 2016; PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2020
Variabilidade precipitação	Desvio padrão de precipitação de 5 anos anteriores		+	SEO, 2010; RAHMAN, 2016; PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2020
FD_5ma	Média móvel de 5 anos dos Dias de geadas anual	Dias	+	
CDD_5ma	Média móvel de 5 anos dos Dias Secos Consecutivos anual	Dias	+	
Rn1mm_5ma	Média móvel de 5 anos do Número de dias secos anual	Dias	+	
R20mm_5ma	Média móvel de 5 anos dos Números de dias de chuva muito fortes anual	Dias	+	
TX90p_5ma	Média móvel de 5 anos do Número de dias de quentes	Dias	+	
Temperatura anual	Média móvel de 5 anos da temperatura anual	°C	+	
Precipitação anual	Média móvel de 5 anos da Precipitação acumulada anual	Mm	+	RAHMAN, 2016

4.2.1. Simulações do impacto da mudança climática sobre a diversificação agropecuária

Com o objetivo de analisar de que forma a diversificação da produção agrícola municipal responderá em períodos futuros aos cenários de mudanças climáticas esperados pelo IPCC, foram simuladas as consequências desses cenários no

comportamento de diversificação agropecuária, usando os parâmetros estimados pela equação de interesse desta pesquisa (11) (DELAZERI; CUNHA; COUTO-SANTOS, 2018; SEO; MENDELSON, 2008).

Assim, conforme a equação (14), foi estimado o índice de diversificação agropecuária dos municípios brasileiros (\hat{S}_{iBASE}), considerando as médias de temperatura, precipitação e os índices de clima extremo projetadas para o ano base ($C_{i,BASE}$), junto com os parâmetros estimados pela equação (13):

$$\hat{S}_{iBASE} = \beta C_{i,BASE} + \gamma SE_{it} + \delta A_{it} + \zeta M_{it} + \mu_i + \theta_{rt} + \varepsilon_{it} \quad (14)$$

O ano base foi o último ano do período compreendido neste estudo, 2016. Desse modo, eliminou-se o viés existente entre os valores esperados e os valores observados das variáveis climáticas consideradas. Além disso, a estimação foi feita em relação ao período compreendido entre 1986 e 2005, que é o período base especificado pelo Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC. O cenário base pressupõe que os agricultores continuarão a produzir suas culturas atuais se o clima permanecer inalterado. Ou seja, não foram elencadas outras possíveis razões pelas quais a escolha de culturas possa mudar no futuro. Foram observados apenas os efeitos da mudança climática separadamente dos efeitos das demais variáveis, embora se espere que as outras variáveis variem ao longo do tempo (SEO; MENDELSON, 2008).

Depois, estimou-se o índice de diversificação agropecuária ($\hat{S}_{iFUTURO}$), considerando as médias de temperatura e precipitação e os índices de clima extremo projetadas para cenários futuros³⁴ ($C_{i,FUTURO}$), estabelecidos pelo IPCC (2013) para as médias de dois períodos: de início (2016-2035) e meados (2046-2065) do século XXI, conforme a seguinte equação:

$$\hat{S}_{iFUTURO} = \beta C_{i,FUTURO} + \gamma SE_{it} + \delta A_{it} + \zeta M_{it} + \mu_i + \theta_{rt} + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

Ao utilizar os parâmetros estimados na equação (15) para a estimação do índice de diversificação agropecuária futura, assumiu-se que a relação entre as variáveis climáticas e o índice de diversificação permanecerá constante até o último período futuro utilizado nas simulações (DELAZERI; CUNHA; COUTO-SANTOS, 2018). Para evitar usar uma projeção de um ano com *outlier*, trabalhou-se com dados médios para períodos de tempo (SOUZA et al., 2013).

³⁴ Isto fornece uma nova previsão climática para todos os AMCs para cada cenário.

Finalmente, calculou-se a variação percentual na diversificação em resposta às variações na temperatura e na precipitação esperadas pela seguinte equação:

$$\% \Delta S_{it} = \frac{\hat{S}_{iFUTURO} - \hat{S}_{iBASE}}{S_{iBASE}} \times 100 \quad (16)$$

Assim, examinou-se um conjunto de cenários de mudanças climáticas previstos pelo IPCC, embasados no tamanho da população, na atividade econômica, no estilo de vida, no uso de energia, nos padrões de uso da terra, na tecnologia e na política climática. As projeções usadas neste estudo tiveram como base os *Representative Concentration Pathways* (RCPs), que foram usados para fazer projeções segundo os fatores anteriormente mencionados. Os RCPs descrevem quatro categorias de emissões de GEE e concentrações atmosféricas, emissões de poluentes do ar e uso do solo. Essas categorias incluem um cenário de mitigação rigoroso (RCP2.6), dois cenários intermediários (RCP4.5 e RCP6.0) e um cenário com emissões muito altas de GEE (RCP8.5). Cenários sem esforços adicionais para restringir as emissões ("cenários de linha de base") levam a caminhos que variam entre RCP6.0 e RCP8.5. O RCP2.6 é representativo de um cenário que visa a manter o aquecimento global abaixo de 2 °C acima das temperaturas pré-industriais (IPCC, 2014). Para esta pesquisa, os cenários futuros para as simulações foram o RCP4.5 e o RCP8.5, visto representarem uma projeção de mudança climática intermediária e outra extrema.

Para fazer as simulações para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, os dados climáticos foram obtidos de quatro Modelos de Circulação Geral³⁵ (GCM – *General Circulation Model*) : HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; e MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3. De acordo com Pires et al. (2016), o modelo HadGEM2-ES tem capacidade de simular corretamente a sazonalidade da precipitação em várias regiões do Brasil, conforme avaliações de precipitação histórica simulada.

³⁵ Um Modelo de Circulação Geral é um modelo matemático que simula o sistema climático da Terra (DELL, JONES, OLKEN, 2014).

4.3. Fontes de dados

Este estudo utilizou como unidades de observações as Áreas Mínimas Comparáveis (AMC) por possibilitarem comparações intertemporais de uma mesma área geográfica, já que o número de municípios brasileiros aumentou ao longo dos anos considerados (REIS et al., 2008). Em 1995, existiam 4.974 municípios, que, em 2017, aumentaram para 5570. A AMC é uma agregação de municípios em áreas geográficas mais abrangentes que garante comparações consistentes no tempo (REIS et al., 2008). Para isso, foram compatibilizados os municípios dos Censos Demográficos desde 1980 até 2010³⁶, seguindo a metodologia proposta por Ehrl (2017), com o propósito de obter dados climáticos de 1985 a 2016 para calcular os índices extremos de clima. Desse modo, foram obtidos 3.829 AMCs, tendo sido excluídos apenas seis municípios, porque o Censo Demográfico de 2010 contabiliza 5564 municípios do país.

Os dados usados para a construção do índice de Simpson foram extraídos dos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017³⁷, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE através do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Foram considerados o Valor das cabeças vendidas de Bovinos, Suínos, Aves³⁸ e o Valor da Produção Bruta dos produtos de Horticultura, Lavoura Permanente, Lavoura Temporária, Silvicultura, Extração Vegetal no nível municipal. Esses produtos foram selecionados em razão da limitação de dados do Censo Agropecuário 1995/1996, apesar de os demais Censos Agropecuários terem informações de mais produtos agropecuários. Posteriormente, esses dados municipais foram agregados em AMCs. Porém, várias AMCs não exibiram dados dos produtos agropecuários em todos os períodos do tempo, resultando em um painel desbalanceado. Do Censo Agropecuário 1995/1996, foram extraídos os dados dos produtos agropecuários que resultaram em 3.809 AMCs, enquanto, constituíram 3.798 AMCs e 3.813 AMCs, em 2006 e 2017, respectivamente.

Os dados diários georreferenciados de temperatura máxima e mínima como também de precipitação foram extraídos pelo *Terrestrial Hydrology Research Group* (THRG) (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006). O banco de dados foi construído pela combinação de dados globais com base em observações em superfície com a reanálise do NCEP–NCAR (*National Center for Environmental Prediction/Nacional Center for*

³⁶ O último Censo Demográfico foi feito em 2010.

³⁷ O Censo Agropecuário 2017 tem como referência o período de 1º de outubro de 2016 a 30 de setembro de 2017.

³⁸ As aves incluem de cabeças de galinhas, galos, frangas, frangos e pintos.

Atmospheric Research). Os dados originais utilizados têm resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (resolução espacial 28km) de precipitação diários (mm) e temperatura diários (C) para o período de 1985 a 2016. No entanto, para a análise a nível de AMC, os dados foram interpolados para resolução de 30 metros. Desse modo, ficaram 3826 AMCs, já que três observações foram excluídas porque não tinham dados climáticos em seus respectivos pixels³⁹. Cabe ressaltar que os dados de temperatura e precipitação disponibilizados pelo *THRG* são até o ano de 2016. Desse modo, o impacto do clima não considerou o ano de 2017. No entanto, as médias móveis de cinco anos atrás podem modelar as escolhas das culturas dos agricultores em relação à variabilidade climática (CHO; MCCARL, 2017).

Os dados das variáveis representativas das características socioeconômicas, agrícolas e de mercado dos municípios brasileiros foram também extraídos dos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017. Essas informações também foram agregadas em AMCs.

Os dados climáticos futuros foram extraídos dos Modelos de Circulação Geral: HadGEM2-ES; MIROC-ESM; e MRI-CGCM3. Da mesma forma que os dados climáticos observados, os dados futuros utilizados têm resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de precipitação diária (mm) e temperatura diária (C) para o período de 2016 a 2065. No entanto, para a análise a nível de AMC, os dados foram interpolados para resolução de 30 metros. Logo, quatro AMCs foram excluídos das simulações por falta de dados nos *pixels* correspondentes.

³⁹ Um pixel é o menor ponto que forma uma imagem digital.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados a análise descritiva das variáveis de interesse como também os índices de diversificação agropecuária e as variáveis socioeconômicas, agrícolas e de mercado dos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017. Posteriormente, são apresentados os resultados estimados dos impactos da variabilidade climática e dos eventos de clima extremo sobre a diversificação agropecuária. Por último, serão analisados os impactos das mudanças climáticas sobre a diversificação.

5.1. Análise descritiva das variáveis

A Tabela 7 resume os dados das variáveis da equação (11), e a Figura 16⁴⁰ mapeia a evolução do índice de Simpson dos AMCs para os anos 1996, 2006 e 2017.

Tabela 7. Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas, valores agregados para o Brasil nos anos de censo agropecuário (1996, 2006 e 2017)

Variáveis	1996		2006		2017	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Índice Simpson	0,69	0,20	0,61	0,22	0,63	0,21
Características socioeconômicas						
Assistência técnica	238,62	494,99	299,25	556,35	262,99	488,34
Condição legal	941,76	1390,97	1031,22	1563,97	1072,78	1739,89
Características agrícolas						
Tamanho do estabelecimento	95,62	178,97	77,18	135,03	77,62	127,05
Irrigação	74,26	180,83	86,76	216,69	132,04	335,30
Características de mercado						
Estabelecimentos com milho	663,61	1187,94	530,45	983,90	432,35	863,44
Características climáticas						
Precipitação no inverno_5ma	57,13	57,37	54,71	53,85	60,63	55,08
Precipitação no verão_5ma	172,92	79,75	179,69	75,30	169,19	77,62
Temperatura no inverno_5ma	21,62	3,69	22,18	3,44	21,97	3,74
Temperatura no verão_5ma	25,41	1,72	25,66	1,71	25,79	1,62
Variabilidade de precipitação	8,89	2,47	8,55	2,38	5,67	1,77
Variabilidade de temperatura	2,14	0,90	2,15	0,84	2,43	0,97
FD_5ma	0,10	0,36	0,02	0,09	0,26	0,77
Rn1mm_5ma	229,62	35,29	227,05	34,74	208,48	33,58
R20mm_5ma	17,86	8,02	16,45	7,03	8,20	7,94
TX90p_5ma	7,07	2,96	9,96	4,19	19,95	14,84
CDD_5ma	36,80	23,86	33,74	21,31	41,01	27,75
Temperatura anual	23,77	2,60	24,16	2,54	24,06	2,66
Precipitação anual	1407,93	469,22	1359,94	424,30	1337,29	511,09

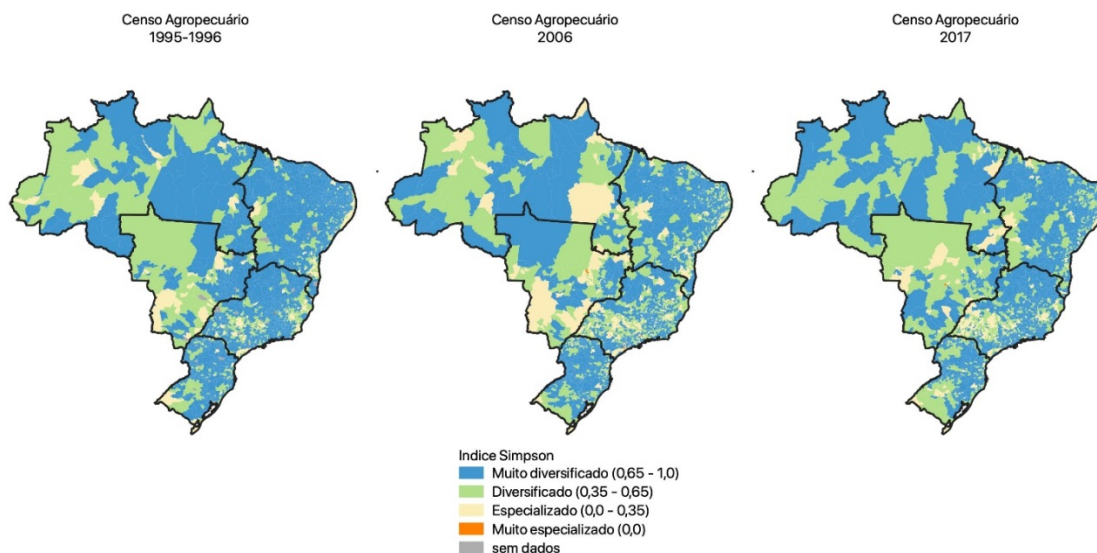
Fonte: Elaborado pela autora, tendo base os Censos Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017 e os dados de Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

Nota: O sufixo _5ma indica que é a média móvel de 5 anos atrás.

⁴⁰ As categorias usadas foram conforme Sambuichi et al. (2016). A definição das categorias está na seção 2.5.

Primeiramente, observa-se na Tabela 7 que o índice de Simpson diminuiu ao longo dos anos de interesse, apresentando apenas leve aumento no ano de 2017, confirmando os resultados da Figura 2b (seção 2.5.1), que teve outra fonte de dados. A taxa de decréscimo da diversificação brasileira foi -8,7% entre 1996-2017. Porém os valores do índice ainda se encontraram na categoria Diversificada mesmo com tendência de decréscimo. Além disso, as regiões apresentaram evoluções particulares na diversificação agropecuária (Figura 15). As regiões Sul e Nordeste mantiveram os valores maiores de diversificação nos três Censos Agropecuários, enquanto para a região Centro-Oeste, ocorreu o contrário (Anexo 2). Esses resultados estão relacionados com o *tamanho dos estabelecimentos*. Como foi discutido no primeiro capítulo, o Sul e o Nordeste têm forte presença da agricultura familiar com produção de pequeno tamanho, contrário à região Centro-Oeste, que tem grandes estabelecimentos especializados em poucas culturas (DE CASTRO, 2014; GUANZIROLI; BUAINAIN; DI SABBATO, 2012).

Figura 16. Evolução diversificação agropecuária (Índice Simpson) nos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017



Fonte: Elaboração própria

A evolução da diversificação agropecuária pode também ser analisada na Tabela 8, que apresenta a quantidade e o valor dos produtos por setor agropecuário. Nessa tabela, destaca-se que a quantidade dos produtos teve comportamento similar ao índice de Simpson, já que de 318 produtos no censo 1995/1996, houve diminuição de 226 produtos em 2006 e ligeiro aumento de 257 produtos em 2017. Neste sentido, a

Lavoura Permanente foi a mais representativa em quantidades de produtos nos dois últimos censos agropecuários, mas a Lavoura Temporária foi mais representativa em valores, pois nos Censos Agropecuários 1995/1996 e 2006, ela correspondeu a mais do 50% do Valor Total e, no de 2017, alcançou 70% do Valor Total. Assim, parece que mesmo que existam muitos produtos, a produção agropecuária vem ficando mais concentrada nos produtos de Lavoura Temporária. Além disso, observa-se que a participação do Valor dos Bovinos vem se reduzindo drasticamente no último censo. No entanto, existe ainda expansão do efetivo bovino ao longo dos três últimos Censos Agropecuários. A expansão de novas áreas agrícola, como a região do MATOPIBA⁴¹, tem aumentado a produção de grãos (OLIVEIRA e GASQUES, 2019). Logo, o crescimento do valor da lavoura temporária opaca a expansão do efetivo bovino.

Tabela 8. Quantidade e Valor de produtos por setor agropecuário dos Censos Agropecuários 1995/1996, 2006, 2017

Setores Agropecuários	Censos Agropecuários								
	1995/1996			2006			2017		
	Quant.	Valor*	%	Quant.	Valor	%	Quant.	Valor	%
Horticultura	54	974.676	2	59	4.156.665	3	69	8.645.763	3
Lavoura Permanente	79	6.019.263	15	65	25.354.709	18	70	38.764.977	11
Lavoura Temporária	77	20.495.498	51	52	77.149.395	54	54	236.984.983	70
Silvicultura	23	1.082.170	3	7	5.632.636	4	9	17.631.242	5
Extração Vegetal	82	754.212	2	40	1.212.586	1	52	2.378.614	1
Bovinos	1	6.888.607	17	1	20.287.706	14	1	9.564.600	3
Suínos	1	1.482.939	4	1	4.335.268	3	1	11.501.896	3
Aves	1	2.634.046	7	1	5.729.977	4	1	12.469.355	4
Total	318	40.331.411	100	226	143.858.942	100	257	337.941.430	100

*Para os produtos bovinos, suínos e aves, foi utilizado o Valor das cabeças vendidas (Mil Reais), enquanto, para a Horticultura, Lavoura Permanente e Temporária, Silvicultura e Extração Vegetal, foi utilizado o Valor da Produção Bruta (Mil Reais).

Fonte: Censo Agropecuários 1995/1996, 2006 e 2017.

No que se refere às variáveis de características socioeconômicas, agrícolas e de mercado, destaca-se que a média brasileira de número de produtores com título de propriedade da terra aumentou. O número de produtores que receberam *assistência técnica* aumentou em 2006, mas se reduziu levemente em 2017. Além disso, a média do *tamanho dos estabelecimentos*, em hectares, diminuiu ao longo dos períodos. A média

⁴¹ Última fronteira agrícola brasileira que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia.

de número de estabelecimentos com *irrigação* aumentou aproximadamente 78% de 1996 a 2017. Segundo Alves e Vieira Filho (2019), o crescimento da irrigação no país foi motivado pelas iniciativas privadas e pelo planejamento público como a nova Política Nacional de Irrigação a partir de 2013. Ao mesmo tempo, a média de *número de estabelecimentos com produção de milho* em 2017 se reduziu em mais de 55% em relação a 1996. Nas últimas três décadas, a produção de milho foi se concentrando em regiões com maiores produtividades, especialmente no Centro-Oeste e Sul e na área do MATOPIBA (OLIVEIRA & GASQUES, 2019).

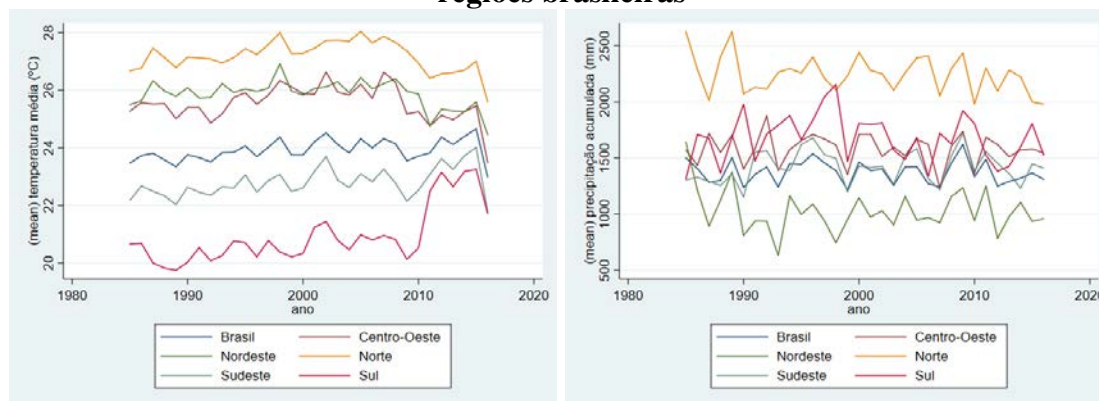
Em relação às variáveis climáticas, cabe destacar que as médias móveis de *temperatura e precipitação de verão e inverno* como também a *variabilidade de temperatura* não variaram muito ao longo dos três Censos Agropecuários. A *variabilidade de precipitação* se reduziu, especialmente, em 2017. As médias móveis de *dias secos* (abaixo de 1mm de precipitação) também diminuíram levemente no Brasil. De igual forma, o número de *dias com chuva forte* decresceu consideravelmente no último período. Mas o número de *dias quentes* cresceu muito, sobretudo, em 2017, aumentando ao redor de 182% em comparação com a média móvel de 1996. Similarmente, a média móvel de *dias secos* consecutivos aumentou. Por outro lado, as médias móveis de *geadas* da região Sul⁴² (Anexo 2) também foram aumentando nos anos de interesse.

A Figura 17 mostra a série de *temperatura média e precipitação acumulada anual* das regiões brasileiras e do Brasil desde 1985 a 2016. Pode-se perceber que a *temperatura média* do Brasil teve variação estável entre 23°C e 24°C. As regiões que se localizam em latitudes próximas à linha equatorial tiveram temperaturas maiores, o Norte oscilou entre 26° e 28°C, o Nordeste e o Centro-Oeste entre 25° e 27°C, tendo ocorrido apenas uma queda de temperatura em 2016. As regiões da porção sul do país apresentaram temperaturas menores, o Sudeste teve variações entre 22° a 23°C ao longo do período, mas com pico de 24°e no 2015, enquanto o Sul oscilou entre 19°C e 21°C, com elevação de temperatura desde 2011 até de 23,25°C em 2015. Esses picos de temperatura responderam ao fenômeno do *El Niño*, que teve forte intensidade em 2015 (BUREAU OF METEOROLOGY, 2020), aumentando a *temperatura média* nas regiões Sudeste e Sul (CAI et al., 2020). Além disso, as precipitações acumuladas nas regiões e no Brasil oscilaram estavelmente ao longo do período. A região Sul teve pico alto de chuvas, que foi influenciado pela forte intensidade do El Niño em 1998 (CAI et al., 2020). O Nordeste teve as maiores quedas de precipitação em 1993 e 1998, tendo a

⁴² As *geadas* vão ser analisadas apenas para a região Sul, como explicado na página 45.

diminuição das chuvas também sido influenciada pela intensidade do El Niño naqueles anos (JIMENEZ et al., 2019). Enfim, percebe-se que as maiores mudanças de clima no Brasil têm acontecido na temperatura, seguindo a tendência de aquecimento global.

Figura 17. Temperatura média e Precipitação acumulada anual das AMC das regiões brasileiras



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de *Global Meteorological Forcing Dataset for land surface modeling* (SHEFFIELD; GOTETI; WOOD, 2006)

5.2. Impactos dos eventos de variabilidade climática e clima extremo passado sobre a diversificação agropecuária

Primeiramente foram analisados os efeitos de variabilidade climática sobre a diversificação agropecuária no Brasil. A Tabela 9 apresenta os resultados estimados da equação (11), considerando *as médias sazonais* e os *desvios padrão de temperatura e precipitação*. As colunas (1) e (2) estão ajustados com efeitos fixos para AMC e para ano, enquanto as colunas (3) e (4) incluem efeitos fixos para AMCs e estado/ano. As colunas (1) e (3) incluem controles relacionados às características socioeconômicas, agrícolas e de mercado. Nos modelos, as variáveis foram em conjunto estatisticamente significativas a 1%, indicando que a diversificação agropecuária é influenciada pelas características, conforme previsto no referencial teórico (seção 3.1).

O modelo (3) apresenta o valor de coeficiente de determinação (R^2 *within*⁴³) mais alto, explicando aproximadamente 15% da variação da diversificação no Brasil. Algumas tendências comuns dos estados (efeitos fixos estado/ano) foram significativas, indicando possivelmente que os choques agregados ou programas/políticas estaduais impactaram na diversificação. Em relação às variáveis de interesse, apenas a variabilidade de precipitação e de temperatura foram estatisticamente significativas a

⁴³ Qualidade de ajuste para as observações que foram ajustadas dentro da variação ao longo do tempo para cada AMC.

10% e 5%, respectivamente. Isso mostra a importância de estudar a variabilidade climática e/ou os eventos extremos sobre a diversificação agropecuária. Observa-se que o aumento do *desvio padrão da temperatura* afeta positivamente na diversificação, contrário ao efeito negativo do *desvio de precipitação*. Contudo a *variabilidade de precipitação* não é estatisticamente significativa no modelo (4), que não tem variáveis de controle. Além disso, os valores da *variabilidade de temperatura* nos quatro modelos têm pouca diferença, mostrando robustez no efeito dessa variável.

Tabela 9. Efeitos das médias sazonais na diversificação agropecuária do Brasil

VARIÁVEIS	(1)	(2)	(3)	(4)
Assistência técnica	7.64e-06 (7.76e-06)		1.92e-05** (8.29e-06)	
Condição legal	1.77e-06 (3.85e-06)		-2.11e-06 (4.27e-06)	
Irrigação	3.76e-05*** (1.03e-05)		1.49e-05 (1.00e-05)	
Tamanho do estabelecimento	-0.000232*** (3.49e-05)		-0.000245*** (3.59e-05)	
Estabelecimentos de milho	6.26e-06* (3.30e-06)		1.15e-05*** (3.78e-06)	
Precipitação no inverno	-0.000313*** (5.41e-05)	-0.000332*** (5.45e-05)	-3.46e-05 (6.38e-05)	-5.08e-05 (6.46e-05)
Temperatura no inverno	0.00358 (0.00300)	0.00360 (0.00305)	0.00318 (0.00318)	0.00354 (0.00322)
Temperatura no verão	0.00194 (0.00373)	0.00188 (0.00381)	0.00454 (0.00394)	0.00422 (0.00399)
Precipitação no verão	-0.000135** (5.70e-05)	-0.000149*** (5.75e-05)	3.91e-05 (6.12e-05)	3.52e-05 (6.15e-05)
Variabilidade de precipitação	0.00415** (0.00163)	0.00529*** (0.00163)	-0.00328* (0.00194)	-0.00290 (0.00196)
Variabilidade de temperatura	0.0165** (0.00805)	0.0176** (0.00817)	0.0168** (0.00846)	0.0175** (0.00855)
Constante	0.542*** (0.0518)	0.523*** (0.0525)	0.425*** (0.0529)	0.414*** (0.0530)
Efeitos fixos município	SIM	SIM	SIM	SIM
Efeitos fixos ano	SIM	SIM	SIM	SIM
Efeitos fixos estado/ano	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Teste Hausman	120,98***	165,28***	-	2129,34***
Teste Wald	8.2e+32***	3.7e+32***	1.4e+60***	6.2e+59***
Teste Wooldridge	0,932	0,798	0,932	0,798
Número de Observações	11.420	11.420	11.420	11.420
R-squared	0,088	0,078	0,145	0,137
F estatístico	61,13***	86,71***	226,71****	178,51****
Número de AMC	3.818	3.818	3.818	3.818

Nota: Erros padrão robustos estão entre parênteses; Significância: *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1; O teste Hausman sem valor (-) significa que o modelo ajustado nesses dados não atende às premissas assintóticas do teste.

Fonte: Resultados da pesquisa

Em relação às variáveis de controle, nota-se que a *assistência técnica* e a *produção de milho* tiveram uma relação positiva e significativa com a diversificação, mas seus coeficientes tiveram valores menores. O acesso aos programas de extensão rural promove o envolvimento com a diversificação, contudo poderia não ser suficiente, pois, segundo resultados encontrados em Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2020), a assistência é contrária à intensificação da diversificação de culturas. A *produção do milho* tem influência positiva porque a maior parte de sua produção (58%) ocorre pela sucessão de culturas, que é uma forma de diversificação (ABRAHÃO & COSTA, 2018). Por outro lado, o *tamanho do estabelecimento* tem influência negativa e significativa sobre a diversificação. Isso corrobora os resultados obtidos no primeiro capítulo deste estudo. A *condição legal* e a *irrigação* não obtiveram coeficientes significativos em nenhum modelo.

Em seguida, foram analisados os efeitos de *geadas* sobre a diversificação agropecuária na região Sul. A Tabela 10 apresenta os resultados estimados da equação (11), considerando os dias de geadas (*Índice FD*). As colunas (5) e (6) estão ajustadas com efeitos fixos para AMC e para ano, enquanto as colunas (7) e (8) incluem efeitos fixos para AMCs e estado/ano. As colunas (5) e (7) incluem controles relacionados às características socioeconômicas, agrícolas e de mercado. O valor do F estatístico foi significativo a 1% em todos os modelos.

Observa-se que as *geadas* tiveram relação negativa com a diversificação agropecuária da região Sul, mas a variável não foi estatisticamente significativa. Apesar disso, os coeficientes do *índice FD* foram similares em todos os modelos (5 a 8), indicando que a relação de interesse foi abordada de forma aleatória. Das variáveis de controle, apenas os coeficientes da *precipitação média de inverno* foram estatisticamente significativos e positivos a 10% nos modelos (7) e (8).

Tabela 10. Efeitos das geadas na diversificação agropecuária da região Sul

VARIÁVEIS	(5)	(6)	(7)	(8)
Assistência técnica	1.39e-05 (9.70e-06)		1.45e-05 (1.00e-05)	
Condição legal	1.67e-05 (1.40e-05)		2.85e-06 (1.40e-05)	
Irrigação	3.92e-05 (4.05e-05)		4.14e-05 (3.96e-05)	
Tamanho do estabelecimento	-0.000355 (0.000289)		-0.000284 (0.000300)	
Estabelecimentos com milho	3.82e-06 (8.56e-06)		6.34e-06 (8.71e-06)	
FD_5ma	-0.00564 (0.00499)	-0.00655 (0.00507)	-0.00541 (0.00496)	-0.00579 (0.00504)
Precipitação no inverno	4.17e-05 (9.91e-05)	5.97e-05 (9.87e-05)	0.000178* (0.000103)	0.000188* (0.000103)
Constante	0.699*** (0.0249)	0.717*** (0.00916)	0.681*** (0.0249)	0.685*** (0.00838)
Efeitos fixos município	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos ano	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos estado/ano	NO	NO	SI	SI
Teste Hausman	49,82***	-	3008.26***	-
Teste Wald	1.9e+31***	2.2e+07***	9.5e+30***	6.5e+30***
Teste Wooldridge	1,997	0,809	1,997	0,809
Observações	2,009	2,009	2,009	2,009
R-squared	0.064	0.056	0.088	0.083
F estatístico	11,34***	19,44***	12,75***	17,59***
Número de AMC	671	671	671	671

Nota: Erros padrão robustos estão entre parênteses; Significância: *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1; O teste Hausman sem valor (-) significa que o modelo ajustado nesses dados não atende às premissas assintóticas do teste.

Fonte: Resultados da pesquisa

Posteriormente, foram analisados os efeitos das secas sobre a diversificação agropecuária no Brasil e na região Nordeste (Tabela 11). O Nordeste também foi incluído na análise já que o semiárido brasileiro ocupa a maior parte dessa região. A região nordestina e o semiárido, em particular, estão associados a secas prolongadas. No período mais recente, entre 2012 e 2015, a seca se intensificou. Além disso, em termos projeção futura, é esperada tendência de períodos mais longos com dias secos consecutivos (*CDD*) nessa região (MARENGO, TORRES, ALVES, 2017).

A Tabela 11 apresenta os resultados estimados da equação (11), considerando os dias secos consecutivos. As colunas (9) e (10) estão ajustados com efeitos fixos para AMC e para ano, enquanto as colunas (11) a (14) incluem efeitos fixos para AMCs e estado/ano. As colunas (13) e (14) analisam apenas as observações dos AMCs da região do Nordeste. As variáveis de clima e os controles foram, em conjunto, estatisticamente significativas a 1%, tanto nos modelos que analisam os efeitos na diversificação

brasileira, quanto na região nordestina. Em relação ao Brasil, o *índice dos dias secos consecutivos* afetou positivamente a diversificação agropecuária ao nível de 10% de significância, mas apenas no modelo (9), que inclui efeitos fixos de ano e AMC. Nos modelos (11) e (12), que incluem efeitos fixos de estado/ano, o coeficiente da variável de interesse (*CDD*) é positivo, mas não estatisticamente significativo. Desse modo, a diversificação agropecuária não é vista como uma estratégia relevante para reduzir os efeitos negativos das secas prolongadas no país.

Tabela 11. Efeitos do *CDD* na diversificação agrícola no Brasil e no Nordeste

VARIÁVEIS	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
	BR	BR	BR	BR	NE	NE
Assistência técnica	9.22e-06 (7.75e-06)		1.94e-05** (8.32e-06)		1.92e-05 (2.14e-05)	
Condição legal	4.01e-06 (3.80e-06)		-2.40e-06 (4.29e-06)		-1.62e-05** (6.56e-06)	
Irrigação	3.90e-05*** (1.04e-05)		1.44e-05 (1.00e-05)		4.83e-06 (1.52e-05)	
Tamanho do estabelecimento	-0.000236*** (3.53e-05)		-0.000244*** (3.59e-05)		-0.000346*** (6.91e-05)	
Estabelecimentos com milho	6.21e-06* (3.32e-06)		1.19e-05*** (3.81e-06)		1.76e-05*** (5.75e-06)	
CDD_5ma	0.000161* (9.46e-05)	0.000142 (9.59e-05)	0.000148 (9.61e-05)	0.000158 (9.70e-05)	0.000322*** (0.000124)	0.000344*** (0.000124)
Temperatura anual móvel	0.00182* (0.00103)	0.00138 (0.00104)	0.00350*** (0.00107)	0.00359*** (0.00108)	-0.00129 (0.00181)	-0.00124 (0.00183)
Constante	0.648*** (0.0250)	0.650*** (0.0242)	0.549*** (0.0265)	0.537*** (0.0261)	0.707*** (0.0462)	0.687*** (0.0461)
Efeitos fixos município	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos ano	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos estado/ano	NO	NO	SI	SI	SI	SI
Teste Hausman	137,48***	96,27***	5475,37***	26445,99***	416,75***	530,26***
Teste Wald	5.7e+32***	3.1e+32***	1.0e+61***	6.2e+59***	1.3e+31***	3.5e+31***
Teste Wooldridge	1,429	0,982	1,429	0,982	3,457*	2,126
Observações	11,420	11,420	11,420	11,420	3,964	3,964
R-squared	0.083	0.072	0.144	0.135	0.105	0.091
F estatístico	11,34***	19,44***	12,75***	17,59***	13,75***	15,06***
Número de AMC	3,818	3,818	3,818	3,818	1,322	1,322

Nota: Erros padrão robustos estão entre parênteses; Significância: *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Fonte: Resultados da pesquisa

No entanto, a redução prolongada de chuvas influencia de forma positiva e estatisticamente significativa 1% da diversificação agropecuária no Nordeste. Os modelos (13) e (14) explicam aproximadamente 11% (com controles) e 9% (sem

controles), respectivamente, a variação da diversificação nessa região. Adicionalmente, observa-se que há pouca diferença nos coeficientes das variáveis climáticas, indicando que a relação entre o *CDD* e a diversificação agropecuária nordestina foi tratada de forma aleatória. Assim, as AMCs nordestinas têm adotado a diversificação agropecuária como uma estratégia de adaptação para os *Dias Secos Consecutivos*. No que se refere às variáveis de controle, a *condição legal* do produtor, o *tamanho da propriedade* e a *proxy* de demanda de culturas principais foram estatisticamente significativas.

Ademais, o fato de ser proprietário do estabelecimento aumenta o nível de concentração de produtos agropecuários nos AMCs nordestinos, o que está direcionado a investimentos em culturas mais intensivas. Contudo, esse resultado foi contrário ao encontrado em um estudo de caso na Bahia, que analisou os determinantes econômicos sobre a diversidade de culturas ao nível de produtor, tendo sido utilizado o índice de Margalef para medir a riqueza⁴⁴ de culturas por área do estabelecimento (PIEDRA-BONILLA, CUNHA, BRAGA, 2019). Além disso, os estabelecimentos de pequeno tamanho estão relacionados com a diversificação de atividades agropecuárias no Nordeste. Essa relação acompanha os resultados da correlação entre percentual de estabelecimentos por grupos de área e diversificação agropecuária (Simpson) na Figura 3 do primeiro capítulo deste estudo. Cabe mencionar que a média do *tamanho de estabelecimento* da região tem sido a menor entre as regiões brasileiras nos censos de 2006 e 2017 (Anexo 2), como também que a região se tem enquadrado na categoria de Muito Diversificado ao longo dos três censos (Figura 14). Além disso, observa-se que a *produção de milho* influencia positivamente a diversificação nessa região. Por último, observa-se que os valores absolutos do *tamanho de estabelecimento* e do índice *CDD* são similares e mais altos do que os outros coeficientes, mostrando a relevância destas variáveis no Nordeste.

A seguir, foram analisados os efeitos da quantidade de *Dias Secos* anuais sobre a diversificação agropecuária nas AMCs brasileiras. A Tabela 12 apresenta os resultados estimados da equação (11), considerando os dias com precipitação menor do que 1 mm (*Índice Rn1mm*). As colunas (15) e (16) estão ajustadas com efeitos fixos para AMC e para ano, enquanto nas colunas (17) e (18), são considerados os efeitos fixos para AMCs e estado/ano. As colunas (15) e (17) incluem controles relacionados às características socioeconômicas, agrícolas e de mercado. O valor de F foi estatisticamente significativo ao nível de 1% em todos os modelos. Os modelos (17) e (18) explicam aproximadamente 14% (com e sem controles) da variação da

⁴⁴ Riqueza de espécies faz referência ao número total de espécies por área ou unidade específica.

diversificação agropecuária brasileira, ou seja, as variáveis climáticas são as mais relevantes. Ademais, nota-se que há pouca diferença nos coeficientes das variáveis climáticas (*índice Rn1mm* e *temperatura anual*) entre esses dois modelos, mostrando que a relação entre os *dias secos* e a diversificação é tratada como um experimento natural.

Tabela 12. Efeitos dos dias secos na diversificação agrícola no Brasil

VARIÁVEIS	(15)	(16)	(17)	(18)
Assistência técnica	9.33e-06 (7.75e-06)		1.91e-05** (8.36e-06)	
Condição legal	1.82e-06 (3.86e-06)		-3.20e-06 (4.30e-06)	
Irrigação	4.04e-05*** (1.06e-05)		1.52e-05 (1.01e-05)	
Tamanho do estabelecimento	-0.000234*** (3.51e-05)		-0.000243*** (3.56e-05)	
Estabelecimentos com milho	6.74e-06** (3.33e-06)		1.19e-05*** (3.80e-06)	
Rn1mm_5ma	0.000293*** (7.48e-05)	0.000314*** (7.62e-05)	0.000229*** (7.82e-05)	0.000244*** (7.97e-05)
Temperatura anual móvel	0.00185* (0.00101)	0.00139 (0.00102)	0.00346*** (0.00107)	0.00355*** (0.00108)
Constante	0.587*** (0.0292)	0.583*** (0.0289)	0.508*** (0.0299)	0.493*** (0.0298)
Efeitos fixos município	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos ano	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos estado/ano	NO	SI	SI	NO
Teste Hausman	75,61***	31,85***	1263,87***	29352,40***
Teste Wald	1,0e+33***	1,9e+32***	2,0e+61***	6,6e+59***
Teste Wooldridge	2,204	1,803	2,204	1,803
Observações	11,420	11,420	11,420	11,420
R-squared	0.084	0.074	0.144	0.136
F estatístico	83,71***	33,34***	236,09***	163,86***
Número de AMC	3,818	3,818	3,818	3,818

Nota: Erros padrão robustos estão entre parênteses; Significância: *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1
Fonte: Resultados da pesquisa

Nessa análise, a variável de interesse (*Rn1mm*) foi estatisticamente significativa a 1% em todos os modelos. Por consequência, a diversificação agropecuária tem sido adotada como medida para reduzir a vulnerabilidade causada pela redução das chuvas. No modelo (17), observa-se que as variáveis de controle *assistência técnica*, *tamanho*

do estabelecimento, número de estabelecimentos com produção de milho e temperatura anual foram estatisticamente significativas. Logo, o aumento do número de estabelecimentos que receberam serviços de extensão rural elevou o nível de diversificação agropecuária nas AMCs. Nesse caso, novamente o *tamanho da propriedade* tem efeito negativo na diversidade de atividades agropecuárias. A *produção de milho* tem relação positiva sobre a diversificação, como também o aumento da temperatura anual.

Também foram analisados os efeitos dos *dias de chuvas muito fortes* sobre a diversificação agropecuária. A Tabela 13 apresenta os resultados estimados da equação (11), considerando os dias com precipitação igual ou maior que 20 mm (*Índice R20mm*). As colunas (19) e (20) estão ajustados com efeitos fixos para AMC e para ano, enquanto as colunas (21) e (22) incluem efeitos fixos para AMCs e estado/ano. As colunas (19) e (21) incluem controles relacionados às características socioeconômicas, agrícolas e de mercado. Em todos os modelos, as variáveis foram, em conjunto, estatisticamente significativas a 1%. Porém os *dias muito chuvosos* afetaram a diversificação agropecuária apenas no modelo (20), com significância de 10%.

Tabela 13. Efeitos dos dias muito chuvosos na diversificação agrícola no Brasil

VARIÁVEIS	(19)	(20)	(21)	(22)
Assistência técnica	8.94e-06 (7.74e-06)		1.96e-05** (8.32e-06)	
Condição legal	3.51e-06 (3.81e-06)		-2.46e-06 (4.31e-06)	
Irrigação	3.72e-05*** (1.03e-05)		1.34e-05 (9.99e-06)	
Tamanho do estabelecimento	-0.000237*** (3.53e-05)		-0.000245*** (3.59e-05)	
Estabelecimentos com milho	6.65e-06** (3.33e-06)		1.21e-05*** (3.82e-06)	
R20mm_5ma	0.000487 (0.000333)	0.000581* (0.000338)	-1.20e-05 (0.000358)	-3.41e-05 (0.000361)
Temperatura anual móvel	0.00240** (0.00105)	0.00200* (0.00106)	0.00371*** (0.00109)	0.00380*** (0.00110)
Constante	0.632*** (0.0278)	0.630*** (0.0272)	0.550*** (0.0278)	0.538*** (0.0273)
Efeitos fixos município	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos ano	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos estado/ano	NO	NO	SI	SI
Teste Hausman	100,62***	112,79***	8835,13***	28029,52***
Teste Wald	8.5e+32***	3.6e+32***	1.0e+61***	1.0e+61***
Teste Wooldridge	1,048	0,765	1,048	0,765
Observações	11,420	11,420	11,420	11,420
R-squared	0.083	0.072	0.143	0.135
F estatístico	82,86***	161,70***	237,29***	26,51***
Número de AMC	3,818	3,818	3,818	3,818

Nota: Erros padrão robustos estão entre parênteses; Significância: *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Fonte: Resultados da pesquisa

Finalmente, foram analisados os efeitos dos *dias quentes* sobre a diversificação agropecuária. A Tabela 14 apresenta os resultados estimados da equação (11), considerando a percentagem de dias em que a temperatura máxima esteve acima do percentil 90 ($TX90p$). As colunas (23) e (24) estão ajustadas com efeitos fixos para AMC e para ano, enquanto as colunas (25) e (26) incluem efeitos fixos para AMCs e estado/ano. As colunas (23) e (25) têm controles relacionados às características socioeconômicas, agrícolas e de mercado. Em todos os modelos, as variáveis foram, em conjunto, estatisticamente significativas a 1%. Os coeficientes de determinação dos modelos (25) e (26) explicam ao redor do 14% da variação da diversificação agropecuária do Brasil, por conseguinte, a quantidade de *dias quentes* torna-se o maior responsável dessa variação. Além disso, ressalta-se que os coeficientes das variáveis

climáticas têm pouca diferença, o que denota que o evento de clima extremo foi resultado de uma variação exógena.

Tabela 14. Efeitos dos dias quentes na diversificação agrícola no Brasil

VARIÁVEIS	(23)	(24)	(25)	(26)
Assistência técnica	9.39e-06 (7.78e-06)		2.00e-05** (8.36e-06)	
Condição legal	3.60e-06 (3.81e-06)		-2.51e-06 (4.30e-06)	
Irrigação	3.94e-05*** (1.05e-05)		1.38e-05 (1.00e-05)	
Tamanho do estabelecimento	-0.000236*** (3.53e-05)		-0.000243*** (3.58e-05)	
Estabelecimentos com milho	6.14e-06* (3.32e-06)		1.18e-05*** (3.80e-06)	
TX90p_5ma	0.000454*** (0.000175)	0.000430** (0.000177)	0.000704*** (0.000179)	0.000729*** (0.000180)
Precipitação acumulada móvel	-8.64e-06 (6.53e-06)	-7.09e-06 (6.61e-06)	-3.93e-06 (6.63e-06)	-4.15e-06 (6.69e-06)
Constante	0.707*** (0.0113)	0.695*** (0.00999)	0.630*** (0.0124)	0.621*** (0.0110)
Efeitos fixos município	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos ano	SI	SI	SI	SI
Efeitos fixos estado/ano	NO	NO	SI	SI
Teste Hausman	53,42***	39,63***	83,86***	24936,94***
Teste Wald	6.5e+32***	2.6e+32***	2.0e+61***	1.0e+61***
Teste Wooldridge	1,270	1,012	1,270	1,012
Observações	11,420	11,420	11,420	11,420
R-squared	0.084	0.073	0.144	0.136
F estatístico	83,67***	163,54***	236,66***	84,24***
Número de AMC	3,818	3,818	3,818	3,818

Nota: Erros padrão robustos estão entre parênteses; Significância: *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1
Fonte: Resultados da pesquisa

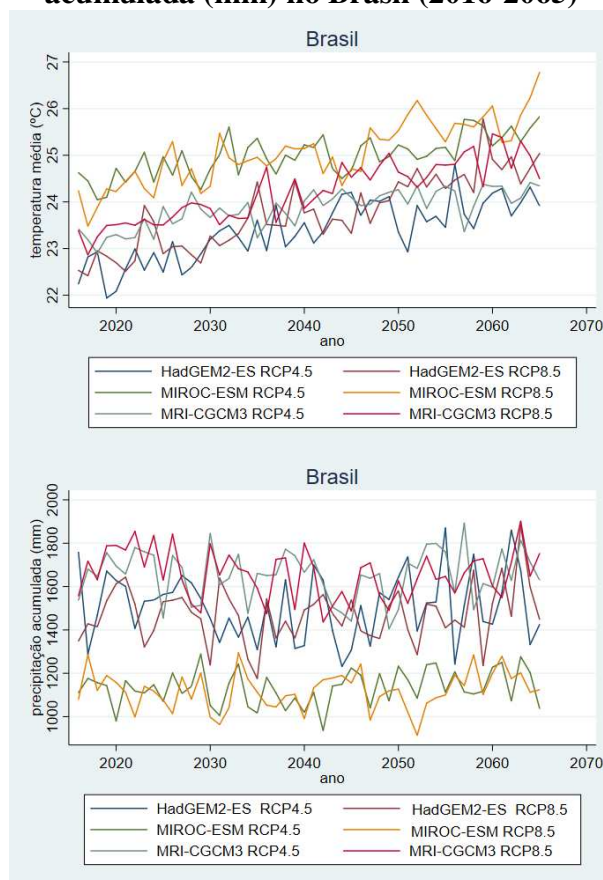
Em média, a diversificação agropecuária no Brasil aumenta com a percentagem de dias quentes anuais. No modelo (25), o aumento da percentagem de *Dias quentes*, em média, produz um incremento de 0,000704 no nível de diversificação. Os coeficientes da variável de interesse (*TX90p*) foram mais altos do que o restante das variáveis. Em relação às variáveis de controle, a *assistência técnica* e o *número de estabelecimentos que produzem milho* tiveram uma relação positiva e estatisticamente significativa. Pelo contrário, o *tamanho do estabelecimento* influenciou negativamente na diversificação agropecuária brasileira.

5.3. Projeções futuras do impacto das mudanças climáticas sobre a diversificação agropecuária

Nesta seção, são apresentadas simulações de impactos dos cenários futuros de mudanças climáticas sobre a diversificação agropecuária brasileira. Para o análise, foram considerados apenas as especificações climáticas que obtiveram coeficientes estatisticamente significativos nos modelos estimados na seção anterior, tais são as *médias sazonais de temperatura e precipitação*, os *Dias secos consecutivos*, os *Dias secos* e os *Dias quentes*. Tanto para as *Geadas* na região Sul, quanto para os *Dias muito chuvosos* no Brasil, não foram observados efeitos sobre a diversificação, não tendo sido feitas projeções futuras. Em seguida, são mostradas as projeções futuras das especificações climáticas consideradas.

A Figura 18 exibe a evolução esperada (2016-2065) de *temperatura média anual* e da *precipitação acumulada* no Brasil. Destaca-se tendência crescente de temperatura nas três projeções dos modelos climáticos globais (HadGEM2-ES; MIROC-ESM e MRI-CGCM3) e nos dois cenários de emissões de GEE (intermediário - RCP4.5 e extremo - RCP8.5). As projeções MRI-CGCM3 mostram o pior cenário de temperatura como também os menores valores de *precipitação acumulada* em relação aos demais modelos climáticos. Além disso, observa-se que não existe tendência na evolução esperada de *precipitação acumulada anual*. Segundo o IPCC (2013), mudanças na precipitação não serão uniformes ao longo do século XXI, porém espera-se aumento no contraste na precipitação entre as regiões úmidas e secas e entre as estações chuvosas e secas. No Anexo 3, podem ser notadas as diferentes evoluções de temperatura e precipitação que as regiões brasileiras poderiam ter. Destaca-se que o aumento de temperatura poderia ser maior nas regiões próximas à latitude equatorial. Além disso, a precipitação acumulada anual do Nordeste oscilaria ao redor dos 1000 mm, enquanto nas demais regiões, a precipitação estaria acima desse valor. A precipitação média, provavelmente, aumentará nas regiões úmidas de latitude média no cenário RCP8.5 (IPCC, 2014)

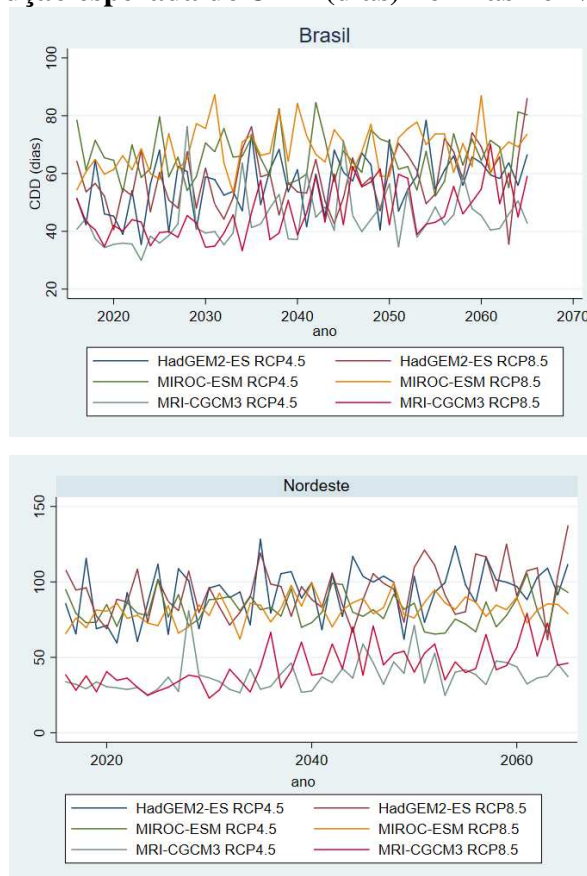
Figura 18. Evolução esperada da temperatura média anual (°C) e precipitação acumulada (mm) no Brasil (2016-2065)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

A Figura 19 apresenta a evolução esperada dos *Dias secos consecutivos* no Brasil, que oscilaria ao redor dos 40 e 80 dias/ano. Na região Nordeste, os *CDD* oscilariam acima dos 60 dias/ano, podendo atingir picos próximos a 140 dias/ano nos modelos climáticos HadGEM2-ES e MIROC-ESM. Cabe mencionar que, em muitas regiões secas de latitude média e subtropical, a precipitação média provavelmente diminuirá sob cenários de emissões RCP8.5 (IPCC, 2014). As projeções de MRI-CGCM3 são mais otimistas, pois os *CDD* poderiam variar, aproximadamente, entre 30 a 80 dias/ano. O Anexo 4 retrata as evoluções esperadas do *CDD* de todas as regiões brasileiras. A região Sul teria os menores valores (30 a 60 dias/ano) de *CDD*.

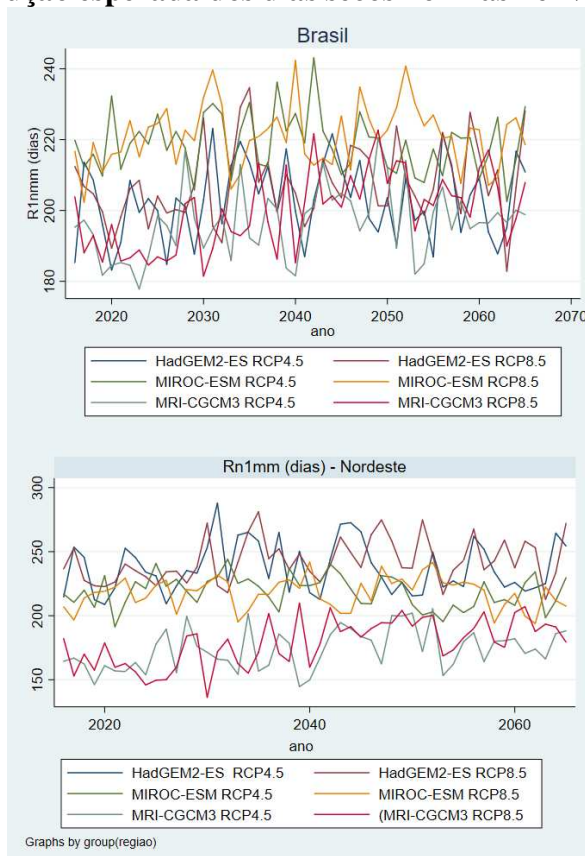
Figura 19. Evolução esperada do CDD (dias) no Brasil e Nordeste (2016-2065)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

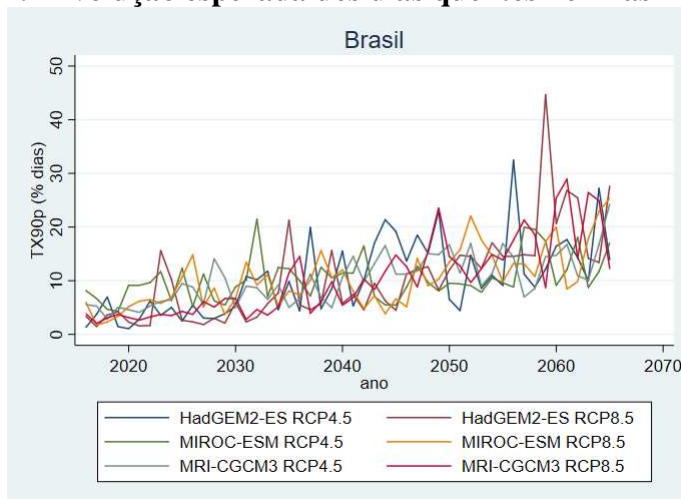
Em relação à evolução esperada dos *dias secos* no Brasil (Figura 20), observa-se que existiria ampla oscilação entre 180 a 240 dias/ano, mostrando pouca uniformidade nos dias sem chuva ao longo do período projetado (2016-2065). Contudo, no Nordeste, percebe-se que o *Rn1mm* estaria acima, aproximadamente, dos 200 dias/ano, atingindo picos ao redor dos 290 dias/ano nas projeções HadGEM2-ES e MIROC-ESM. Desse modo, na maior parte do ano haveria precipitação abaixo de 1 mm/diário. Além disso, no Anexo 5, observa-se que a região Nordeste apresentaria os maiores valores de *Rn1mm*, ao contrário à região Norte, que teria maior quantidade de dias com chuvas.

Figura 20. Evolução esperada dos dias secos no Brasil e Nordeste (2016-2065)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

Em relação ao índice $TX90p$, é esperada maior porcentagem de *dias quentes* no curto e médio prazo do século XXI em todas os Modelos de Circulação Geral em ambos os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 21). Essas projeções acompanham a tendência crescente de temperatura média anual no Brasil (Figura 18). O Anexo 6 mostra que todas as regiões brasileiras apresentariam incremento de porcentagem de dias em que a temperatura máxima estaria acima do percentil 90, porém as regiões Norte e Nordeste poderiam ter os maiores picos. Segundo o IPCC (2014), é muito provável que sejam mais frequentes temperaturas extremas quentes conforme aumente o aquecimento global como também é plausível que ondas de calor ocorram com maior frequência e com duração mais longa.

Figura 21. Evolução esperada dos dias quentes no Brasil (2016-2065)

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

Para fazer as simulações dos impactos das mudanças climáticas na diversificação agropecuária no Brasil, foram utilizadas as estimativas estatisticamente significativas dos parâmetros da seção anterior. Desse modo, foram considerados as médias sazonais, os índices *CDD*, *Rn1mm* e *TX90p* para o Brasil e o índice *CDD* para o Nordeste. A maioria das simulações com as especificações climáticas foram obtidas dos coeficientes estimados dos modelos econométricos que incluíam os efeitos fixos para AMCs e estado/ano, pois mostraram melhor ajustamento, conforme a equação (12). Apenas no caso do índice *CDD* para o Brasil, foi usado o modelo econométrico que incluía os efeitos fixos para AMCs e ano, desde que o coeficiente da variável de interesse fosse estatisticamente significativo. De modo específico, as previsões da diversificação brasileira com as médias sazonais, o maior período de seca anual, os *Dias secos*, e os *Dias quentes* foram obtidas dos parâmetros estimados nos modelos econométricos (3), (9), (17) e (25), respectivamente, da seção anterior⁴⁵. Além disso, a previsão da diversificação do Nordeste com o maior período de seca anual foi estimada com base no modelo (13). Finalmente, os índices de diversificação agropecuária base (\hat{S}_{IBASE}) e futura ($\hat{S}_{IFUTURO}$) foram estimados usando as equações (14) e (15), respectivamente.

A Tabela 15 sintetiza o impacto das mudanças climáticas sobre a diversificação agropecuária no Brasil nos períodos 2016-2035 e 2046-2065 nas três projeções dos Modelos de Circulação Geral (HadGEM2-ES; MIROC-ESM e MRI-CGCM3) e em

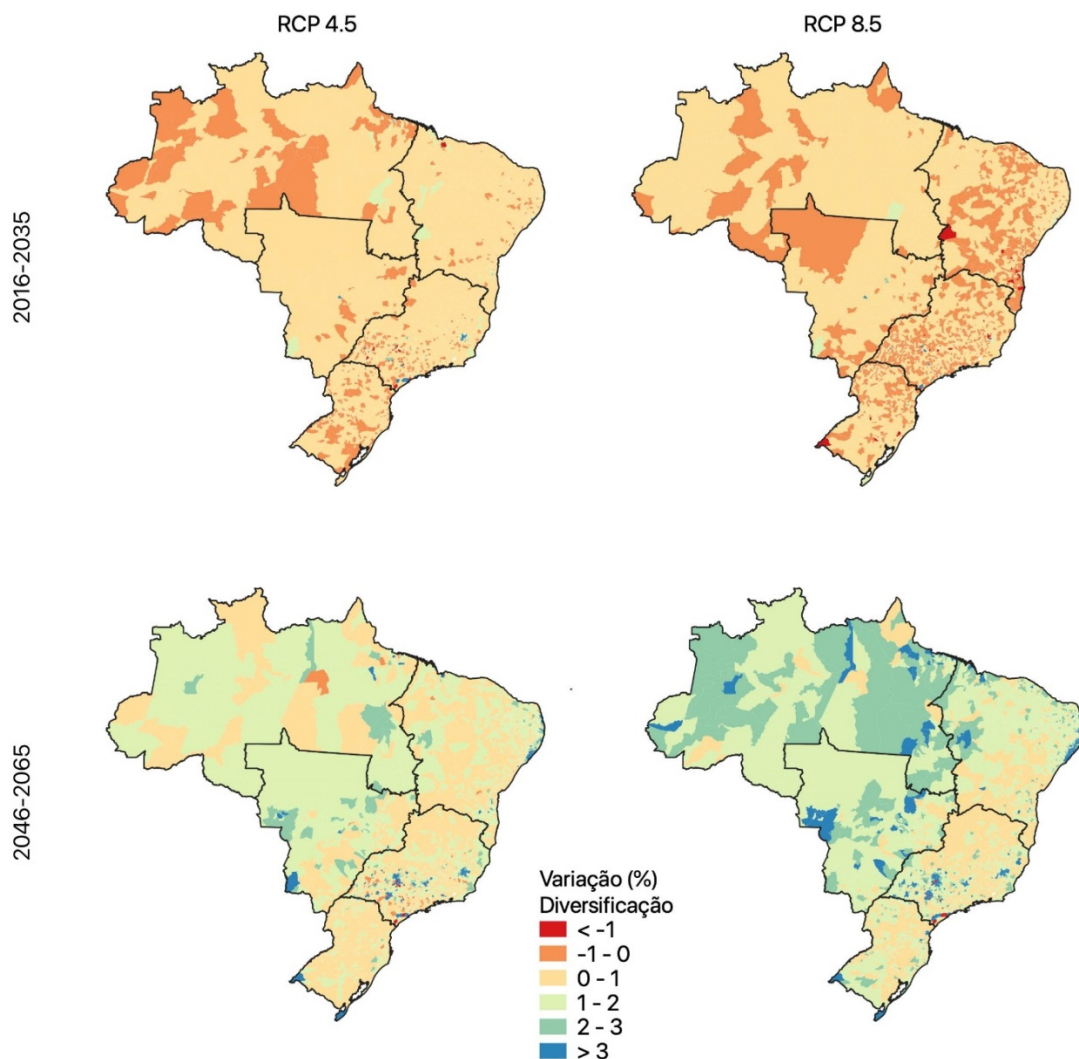
⁴⁵ Os parâmetros estimados do modelo (3) encontram-se na Tabela 9; dos modelos (9) e (13), na Tabela 11; do modelo (7), na Tabela (12); e do modelo (25), na Tabela 14.

dois cenários de emissão de GEE (RCP4.5 e RCP8.5). Os resultados foram calculados usando a equação (16) da variação da diversificação agropecuária ($\% \Delta S_{it}$), considerando as médias sazonais e os índices de clima extremo (CDD , $RnImm$ e $TX90p$), projetados para o ano base, e os cenários futuros. Adicionalmente, foi aplicado o teste t^{46} para comparar igualdade de médias na variação de diversificação entre as diferentes especificações climáticas, em ambos os cenários de emissões. A especificação de *dias quentes* foi escolhida como base de comparação com as outras variáveis climáticas, já que os coeficientes estimados do índice $TX90p$ foram estatisticamente significativos a 1% na Tabela 14 como também por haver alta probabilidade de as temperaturas máximas extremas serem mais frequentes (IPCC, 2014). Destaca-se que, na maioria dos casos, não há diferença estatisticamente significativa entre as médias. Assim, é evidenciada robustez nos modelos econométricos utilizados nas simulações.

Os resultados indicam que no período 2016-2035 a diversificação agropecuária no Brasil aumentaria pouco e até poderia diminuir, especialmente, no cenário extremo (RCP8.5). Nos resultados das simulações apresentados na Tabela 15, observa-se que o aumento da porcentagem de *dias quentes* no primeiro período poderia levar a um leve declínio no nível de diversificação de -0,003% e -0,176% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Para ilustrar, a Figura 22 mostra as mudanças de diversificação que poderiam acontecer no início e meados do século XXI sob cenários de clima futuro de $TX90p$. O índice $TX90p$ foi escolhido como principal especificação de análise, pois o aumento de temperatura é a tendência global com maior probabilidade de ocorrência. Os mapeamentos da variação percentual da diversificação agropecuária sob cenários de clima futuro das médias sazonais, CDD , $RnImm$ podem ser observadas nos Anexos 7 a 9.

⁴⁶ No software *Stata*, foi utilizado o comando *ttest* para executar testes *t* de duas amostras em dados emparelhados.

Figura 22. Variação porcentual na diversificação agropecuária no Brasil sob cenários de clima futuro de *TX90p*



Nota: Os valores foram calculados para a média das três projeções do modelo climático global (HadGEM2-ES; MIROC-ESM e MRI-CGCM3) e em dois cenários de emissão (RCP4.5 e RCP8.5), médias calculadas do índice *TX90p*.

Fonte: Resultados da pesquisa

Por outro lado, no período 2045-2065, a diversificação teria variação positiva, ainda que de baixa magnitude, na maioria dos casos (Tabela 15). Nas simulações do incremento de *TX90p*, a variação percentual média da diversificação de culturas seria 0,957% e 0,961%, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Conforme a Figura 22, o maior aumento da diversificação nesse período aconteceria no cenário de aquecimento global de altas emissões de GEE (RCP8.5). Além disso, destaca-se que a maior variação percentual no nível de diversificação agropecuária aconteceria nas regiões Centro-Oeste e Norte. Esse resultado foi similar ao encontrado no Anexo 7.

Em geral, observa-se que o cenário sem esforços adicionais para restringir as emissões de GEE (RCP8.5) prevê os menores valores na variação percentual da

diversificação no primeiro período, enquanto, no segundo período, a variação exibiria os maiores valores. As AMCs tenderiam a se diversificar mais conforme o cenário climático se torne mais severo. Adicionalmente, o modelo HadGEM2-ES antecipa os maiores valores percentuais na variação da diversificação em ambos os períodos e cenários de emissões.

Em relação às simulações do Nordeste, destaca-se a previsão de queda na diversificação no período 2016-2035, com mudanças médias de -0,220% no cenário RCP4.5 e -0,265% no cenário RCP8.5 (Tabela 15). Esses valores percentuais foram menores que resultados obtidos para as simulações do Brasil. No período 2045-2065, a previsão é diminuição na diversificação (-0,106%) no cenário RCP4.5 e leve incremento (0,135%) no cenário RCP8.5. Cabe mencionar que a região Nordeste se enquadrava na categoria “muito diversificada” no Censo Agropecuário de 2017 (Figura 15), assim essas ligeiras variações não levariam a classificá-la como sendo de produção especializada.

Tabela 15. Efeito do cenário das mudanças climáticas na variação da diversificação agropecuária ($(\% \Delta S_{it})$) no Brasil

Modelos climáticos	Variação da diversificação agropecuária ($(\% \Delta S_{it})$)									
	Médias sazonais		CDD - Brasil		CDD – Nordeste ^a		Rn1mm		TX90p	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
2016-2035										
HadGEM2-ES	0,481 (7,435)	-0,55** (12,92)	0,212 (0,542)	-0,037 (0,488)	-0,027 (1,446)	-1,009 (1,205)	9,462 (520,197)	0,062 (1,649)	0,427 (11,57)	0,599 (23,9048)
MIROC-ESM	-0,487 (8,296)	-0,306 (7,062)	-0,293 (0,538)	0,387 (0,583)	-0,62 (1,183)	0,547 (1,194)	0,027 (1,754)	-0,213 (40,744)	-0,087 (20,474)	-1,069 (87,886)
MRI-CGCM3	0,07 (4,316)	-0,3*** (3,893)	0,04 (0,467)	-0,2*** (0,713)	-0,014 (0,641)	-0,333 (0,937)	-0,199 (7,144)	-0,42*** (3,886)	-0,35 (23,564)	-0,06*** (1,444)
Média modelos	0,021 (3,816)	-0,395 (4,314)	-0,014 (0,289)	0,038 (0,291)	-0,220 (0,595)	-0,265 (0,562)	3,097 (173,329)	-0,189 (12,981)	-0,003 (11,713)	-0,176 (30,266)
2046-2065										
HadGEM2-ES	2,539** (18,467)	1,423 (5,259)	0,724 (0,831)	0,545 (0,614)	0,344 (1,647)	-0,722 (1,032)	20,111 (1141,966)	1,172 (4,217)	1,317 (25,165)	1,368 (53,669)
MIROC-ESM	0,002 (6,851)	1,46 (6,573)	-0,117* (0,584)	0,82 (0,799)	-0,903 (1,377)	0,696 (1,306)	0,304 (3,069)	-0,583 (137,809)	0,623 (26,557)	-0,026 (121,3)
MRI-CGCM3	1,009 (5,236)	1,23** (7,787)	0,324*** (0,562)	0,437*** (0,728)	0,242 (0,689)	0,43 (1,118)	0,515*** (3,888)	0,873*** (8,908)	0,932 (2,178)	1,541 (7,922)
Média modelos	1,183 (6,985)	1,371 (3,483)	0,31*** (0,404)	0,600 (0,487)	-0,106 (0,66)	0,135 (0,595)	6,977 (380,693)	0,487 (48,934)	0,957 (12,429)	0,961 (47,792)

Nota: Desvios padrão estão entre parênteses; Significância na diferença entre médias dos modelos: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$; a: Não foi testado comparação de médias com os outros modelos porque apenas foi estimado um modelo para a Região Nordeste.

Fonte: Resultados da pesquisa

5.4. Discussão dos resultados

Neste capítulo, foram analisados, entre outras questões, os impactos dos eventos de variabilidade climática e clima extremo passado sobre a diversificação agropecuária brasileira. No caso das médias sazonais de temperatura e precipitação, o resultado é similar ao encontrado na pesquisa de seção cruzada (dados do Censo Agropecuário de 2006) de Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2020), em que o desvio de temperatura teve relação positiva com a intensificação da diversificação de culturas no Brasil. Assim, a diversificação agropecuária municipal aparece como uma estratégia de gestão aos riscos, associada à variabilidade climática, especialmente, relacionada à temperatura. De acordo com Cohn et al. (2016), em análise da produção agrícola no estado do Mato Grosso, uma anomalia de temperatura de +1°C está relacionada com perdas na produção agrícola pela redução na frequência e na área dos cultivos, enquanto as condições de precipitação poderiam causar efeitos muito fracos.

Em relação ao impacto das geadas na região Sul, os parâmetros não estatisticamente significativos podem ser justificados, dado que a estratégia de diversificar não é contemplada como prática comum para gerir esse tipo de risco, pois implicaria, sobretudo, utilizar espécies ou variedades tolerantes às baixas temperaturas ou arborizar com espécies mais altas para ajudar a reduzir as perdas associadas ao calor. Isso limitaria a seleção de diversidade de espécies apenas para esse evento climático extremo. Ademais, existem outros métodos para prevenir os danos causados pelas geadas, que independem da seleção de espécies específicas, tais como alterações das datas de semeadura, planejamento de cultivos segundo a topografia, uso de estufas ou cobertura de mudas e plantas, irrigação e, no caso da pecuária, aquecedores e construção de estábulos com cobertura para a proteção do frio para os animais. Assim, a diversificação agropecuária não se constitui como estratégia principal para mitigar os riscos das geadas.

No que diz respeito às secas prolongadas (*CDD*), a diversificação agropecuária não é contemplada como resposta aos efeitos adversos desse evento extremo no país. Possivelmente, a irrigação é considerada a prática principal na escolha para reduzir os riscos das secas, havendo evidências de que tem respondido à redução de precipitação no Brasil (CUNHA et al., 2015). Contudo, vale ressaltar que o planejamento de adaptação adequado deveria incluir a sinergia entre práticas adaptativas⁴⁷

⁴⁷ A discussão sobre a sinergia entre a diversificação agropecuária com outras estratégias de adaptação é desenvolvida no final dessa seção.

(TEKLEWOLD et al., 2017; LIPPER, et al., 2017). Por exemplo, adotar a diversificação conjuntamente com a irrigação pode ajudar a superar os choques relacionados à seca prolongada. Conforme Renard e Tilman (2019), a diversidade de espécies agrícolas, associada à irrigação, aumenta a estabilidade temporal da produção nacional de culturas, contrário à instabilidade de precipitação e temperatura. Por outro lado, a diversificação tem sido efetiva em reduzir a demanda de água para irrigação e para mitigar a emissão de GEE na produção de arroz na Filipinas (JANZ et al., 2019), bem como para mitigar os efeitos adversos na produtividade agrícola em razão do déficit de chuvas na Índia (BIRTHAL; HAZRANA, 2019) e nos Estados Unidos (BOWLES et al., 2020). Esta pesquisa também identificou que o Nordeste tem adotado a diversificação agropecuária como uma estratégia de adaptação para os períodos longos sem precipitação, para os quais há expectativas futuras de aumento e intensidade nessa região. Esse resultado é similar à literatura, que mostra que a diversificação de culturas tem relação positiva com choques de chuva (TESFAYE; TIRIVAYI, 2020; ASFAW et al., 2019; ARSLAN et al., 2018).

Os resultados também indicaram que a diversificação não está sendo contemplada como estratégia para reduzir a vulnerabilidade agrícola causada por inundações no Brasil. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que medidas para diminuir os efeitos negativos das inundações estão mais ligadas com outros métodos, tais como os sistemas de previsão de inundações, as infraestruturas de canais e/ou as drenagens agrícolas, a localização dos sistemas produtivos que evitem estar em áreas de inundações recorrentes e os seguros agrícolas (HILL; VERJEE; BARRETT, 2010). Além disso, pode ser que a diversificação não seja afetada pelo fato de haver tendência decrescente de dias com chuvas muito fortes em todas as regiões brasileiras (Figura 10). Contudo, o sistema agroflorestal (SAF), uma forma de diversificação agropecuária, tem sido reconhecido como prática que mitiga os efeitos das inundações, já que as florestas não são facilmente prejudicadas pelos alagamentos, evitam a erosão do solo e reduzem o fluxo de água (QUANDT; NEUFELDT; MCCABE, 2017). Logo, mais pesquisa e desenvolvimento são necessários para compreender como SAFs podem ser resilientes aos eventos de chuvas intensas no Brasil.

Os resultados sugerem que as AMCs têm adotado a diversidade de atividades agropecuárias como estratégia de adaptação aos choques de calor, incrementados consideravelmente em todas as regiões brasileiras (Figuras 12 e 13). Esses resultados são similares aos encontrados no estudo de Birthal e Hazrana (2019), em que os choques de estresse térmico do ano anterior aumentaram a diversificação de culturas de

agricultores indianos. De forma similar, os resultados de Dillon et al. (2015) revelaram que o número de grupos de culturas colhidas tem relação positiva com os choques de *degree days*. Adicionalmente, algumas pesquisas mostram que a diversificação de culturas mitiga a perda de rendimento em razão de condições quentes, conseqüentemente, reduzindo as quebras de safra em milho e soja (GAUDIN et al., 2015). Em relação aos sistemas mistos, o aumento de temperatura tem influenciado positivamente na escolha de integração lavoura-pecuária na América do Sul (SEO, 2010) e na África (SEO, 2011).

De forma geral, no estudo dos impactos das variações climáticas sobre a diversificação agropecuária, ressalta-se que algumas variáveis, tais como *assistência técnica*, *tamanho do estabelecimento* e a *proxy* de demanda por culturas importantes, foram estatisticamente significativas nos modelos que incluíram efeitos fixos para AMCs e estado/ano em quase todas as especificações climáticas, exceto pelas geadas. Portanto, são fatores consideráveis na alocação de culturas no Brasil. O acesso à *assistência técnica* e a *produção de milho* tiveram efeitos positivos sobre a diversificação em todos os modelos. Assim, o papel dos serviços de extensão rural torna-se importante, sobretudo em propriedades pequenas, para divulgar práticas resilientes aos eventos de clima extremo que se espera aumentem em intensidade e frequência no futuro. Além disso, mostra-se que a diversificação não é contrária à produção de *commodities*, pois o desenvolvimento de práticas intensivas de produção, como os sistemas de dupla safra, tem melhorado os ganhos produtivos no Brasil (ABRAHÃO; COSTA, 2018).

Ademais observou-se que o *tamanho do estabelecimento* tem influência negativa sobre a diversificação em todos os modelos econométricos estimados, exceto quando o modelo inclui as geadas. Em valores absolutos, os coeficientes obtidos nessa variável foram superiores aos coeficientes das variáveis climáticas nos modelos das secas (*CDD* e *RnImm*), ao passo que ocuparam o segundo lugar nos modelos de variabilidade climática sazonal, chuva forte (*R20mm*) e dias quentes (*TX90p*). Por consequência, o pequeno produtor está mais propenso a diversificar como forma de reduzir sua variabilidade de renda, que é muito maior que a do grande, que é menos vulnerável aos choques na sua produção agropecuária. Por outro lado, as pequenas propriedades estão mais ligadas à agricultura familiar, que proporciona maior dotação de mão de obra por área (BIRTHAL; HAZRANA; NEGI, 2020). Essa característica é conexa à diversificação, pois o aumento da diversidade de culturas gerou mais empregos agrícolas em 44 países ao redor do mundo (GARIBALDI; PÉREZ-MÉNDEZ, 2019).

Porém a literatura internacional mostra que a área de cultivo tem relação positiva com o número de culturas no Quênia (MCCORD et al., 2015), na Zâmbia (ARSLAN et al., 2018; ASFAY et al., 2019), no Malawi, Nigéria (ASFAY et al., 2019) e em Uganda (TESFAYE & TIRIVAYI, 2020). Nesses casos, os grandes estabelecimentos podem produzir maior quantidade de culturas (BENIN et al., 2004), assim como podem ter melhores condições econômicas para investir em novas tecnologias e insumos como sementes melhoradas (ARSLAN et al., 2018). No caso do Brasil, o agronegócio tem começado a utilizar tecnologias sustentáveis relacionadas à diversificação, tais ILP ou sucessão de culturas (especificamente milho-soja) em plantio direto (VIEIRA FILHO, 2014). Logo, a P&D poderiam inovar tecnologias diversificadas, sobretudo na mecanização, ajustadas à grande escala agrícola brasileira.

Cabe realçar que a ação coordenada de práticas resilientes pode levar a sistemas que contemplem várias questões importantes como conservação do solo, aumento de matéria orgânica no solo, supressão de pragas, doenças e plantas daninhas, regulação da temperatura e umidade no solo etc., potencializando seus efeitos adaptativos aos choques climáticos quando elas são combinadas. Desse modo, a diversificação agropecuária, em suas diferentes formas, junto outras práticas do tipo *climate smart agriculture* têm obtido resultados satisfatórios na produção brasileira. Um exemplo relevante disso é o Sistema de Plantio Direto (SPD), que se baseia na interação de três tecnologias: a ausência de revolvimento, cobertura do solo e a rotação de culturas (forma de diversificação agropecuária) (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998). Nesse sentido, o SPD tem ganho reconhecimento pelos seus benefícios econômicos, agronômicos e sustentáveis, conseqüentemente, foi incrementado em, aproximadamente, 11% nas terras agrícolas no nível mundial em 2013 (KASSAM et al., 2015). O SPD pode obter maiores rendimentos ou receitas do que a monocultura, quando combina outras formas de diversificação como consórcios de culturas e/ou ILP (ANDRADE et al., 2017; QUEIROZ et al., 2016; CRUSCIOL et al., 2014; GARCIA et al., 2012). Adicionalmente, o estudo de Gaudin et al. (2015) mostra que sistemas de plantio direto com rotações diversificadas de até cinco culturas tiveram maiores rendimentos (7% a 22%) do que a sucessão de culturas de soja e milho durante anos secos e quentes na Canadá. Segundo Bowle et al. (2019), rotações mais diversificadas mostraram ter maiores efeitos positivos na produtividade de milho do que em rotações simples, tendo permitido que as perdas na produtividade diminuíssem em condições adversas na América do Norte. Nesse sentido, pesquisas futuras poderiam

analisar os fatores que influenciam na escolha de estratégias adaptativas usadas em combinação no Brasil.

Em relação às simulações de mudanças climáticas futuras, a diminuição futura de diversificação agropecuária no período 2016-2035 (Tabela 15 e Figura 22) refletiria uma continuação da evolução passada, que foi decrescente ao longo de 1985 a 2017 (Figuras 1 e 2). Porém, no segundo período (2046-2065), haveria uma mudança de direção em que a diversificação aumentaria no Brasil, ainda que levemente (Tabela 15 e Figura 22). Então, nesse período, a diversificação agropecuária começaria a ganhar destaque como estratégia de adaptação às mudanças climáticas. Esses resultados são similares aos encontrados na África por Seo (2011), cujas simulações de cenários climáticos futuros indicaram aumento no número de estabelecimentos mistos (lavoura-pecuária) e redução da quantidade de estabelecimentos especializados em lavoura ou pecuária no meio do século XXI. Já os resultados de Seo (2010), para a América Latina, indicam que o aumento de estabelecimentos mistos (ILP) se daria em cenários quentes, tanto secos, quanto levemente úmidos, até 2060.

Adicionalmente, o aumento da variação percentual na diversificação no Centro-Oeste no período 2045-2060, em ambos os cenários de emissões de GEE (RCP 4.5 e RCP8.5) (Figura 21), mostra que esta região, que tem sido caracterizada pela especialização em culturas como milho, soja e cana-de-açúcar, mudaria suas tecnologias para práticas agrícolas mais resilientes. Por exemplo, o sistema de plantio direto nas culturas de grãos, que tem sido adotado nessa região (ROMEIRO, 2014), exige a rotação de culturas diversificadas para seu correto funcionamento ao longo prazo (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998).

Porém o ligeiro crescimento na diversificação agropecuária, que poderia acontecer nos municípios brasileiros a partir nos meados do século XXI, não conseguiria ser suficiente na redução de vulnerabilidade frente aos cenários climáticos. Os benefícios da resiliência adquiridos da diversificação melhoram no longo prazo (BOWLES et al., 2020; BIRTHAL; HAZRANA, 2019), havendo, então, necessidade de políticas públicas prementes que ajudem a aumentar a diversidade de culturas no Brasil para melhorar seu potencial de redução de riscos climáticos ao longo do tempo. Nesse contexto, é importante discutir, por um lado, os fatores que desde o setor público têm favorecido a concentração de culturas, mas por outro lado, há diferentes estratégias públicas atuais que podem incentivar a diversificação agropecuária como adaptação agrícola brasileira às mudanças climáticas.

No Brasil, as monoculturas em grandes propriedades com destino à exportação tiveram importância econômica desde a época colonial, exceto no Nordeste, já que, sobretudo, suas condições climáticas têm sido pouco favoráveis (FAUSTO & FAUSTO, 1994). No entanto, só a partir de 1980, o país deixa de depender das importações de alimentos após várias políticas públicas. O crédito, a pesquisa e a extensão rural de várias instituições se consolidaram e impulsionaram a produção agropecuária ao redor dos anos 70 do século passado (VIEIRA FILHO & FISHLOW, 2017). Contudo, a pesquisa pública feita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária⁴⁸ (Embrapa) e pelas Universidades Federais teve papel preponderante no desenvolvimento agrícola, adaptando algumas culturas, como a soja, às baixas latitudes e às condições edafoclimáticas dos trópicos. Todavia, o desenvolvimento da tecnologia agropecuária esteve voltado, principalmente, à produção de grãos com uso intensivo de mecanização, fertilizantes e defensivos (ALVES et al., 2013; MARTHA; CONTINI; ALVES, 2012). Essa lógica teve influência das práticas e tecnologias da Revolução Verde, protagonizada por Norman Borlaug, expandida nos países industrializados, pelo melhoramento de novas variedades de grãos, uso intensivo de agrotóxicos (herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes químicos), mecanização (tratores, colheitadeiras etc.) e irrigação (DE ANDRADES & GANIMI, 2007). Dessa forma, a pesquisa esteve concentrada na especialização de culturas, influenciando de igual forma na assistência técnica e no crédito rural. Então, as políticas públicas têm promovido essa lógica de monoculturas e redução da diversidade de culturas.

Porém a pesquisa tem começado a focar no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, depois da pressão da sociedade civil e de cientistas mostrando o impacto ambiental negativo das monoculturas e do uso intensivo de insumos químicos e maquinaria. Entre os principais problemas, pontuam a erosão do solo, os resíduos dos agrotóxicos, ora nos alimentos, ora na água, a perturbação da biodiversidade nos solos e no resto de espécies nativas como também o reduzido aumento dos rendimentos por hectare (ROMEIRO, 2014). Assim, o Embrapa e as Universidades Federais têm ampliado unidades voltadas a pesquisar os impactos ambientais e tecnologias sustentáveis (ROMEIRO, 2014). Desse modo, têm saído tecnologias com base ecológica tais como o SPD, a iLPF, as práticas conservacionistas do solo (VIEIRA FILHO, 2014), que estão ligadas à diversificação agropecuária.

⁴⁸ Foi criada em 1973, com o objetivo de desenvolvimento de tecnologias e informação técnico-científica voltada para a agricultura e pecuária brasileira, como também de transferência de tecnologia e de intercâmbio de conhecimento.

No ano 2009, o Brasil estabeleceu a Política Nacional de Mudanças Climáticas, em que o setor agropecuário é contemplado pelo Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), estabelecido no ano seguinte até 2020. O Plano ABC visa à organização de ações a serem empreendidas para a adoção de tecnologias de produção sustentáveis, a fim de atender aos compromissos de redução das emissões de GEE no setor agrícola assumidos pelo país. Dentro destas ações, o conceito de diversificação não é contemplado como tal, mas tem várias formas de diversificação utilizadas nos programas, tais como Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Sistemas Agroflorestais (SAFs) e Rotação, Consórcio e/ou Sucessão de culturas como parte dos Sistemas de Plantio Direto (SPD). Conforme o MAPA (2018), foram convertidos 5,83 milhões de hectares em área de iLPF através do financiamento do Plano ABC entre 2010 e 2016, contribuindo com a mitigação de 22,11 milhões Mg CO₂ eq. Porém o MAPA não reportou dados decorrentes dos SAFs, mas indica-se que, com o Plano ABC, tenham sido plantadas 9,97 milhões de hectares utilizando SPD, que usa a diversificação de espécies como parte de seu complexo de tecnologias sustentáveis. Assim, observa-se que o Plano ABC tem impulsionado a diversificação agropecuária através de seus programas, inclusive excedendo os compromissos estabelecidos no início dos programas, visto o iLPF e o SPD terem alcançado 146% e 125%, respectivamente, das metas. Por conseguinte, é importante que o Plano ABC continue em uma nova fase para reforçar e expandir tecnologias resilientes e de mitigação, como a diversificação. Segundo Souza Piao et al. (2021) e Vinholis et al. (2021), para fortalecer a adoção das tecnologias do Plano ABC, há necessidade de melhorar o serviço de extensão rural na difusão de tecnologias sustentáveis aos produtores. Esses resultados acompanham os efeitos positivos da assistência técnica sobre a diversificação agropecuária observados na maioria das especificações climáticas.

Por outro lado, lembrando que os pequenos estabelecimentos têm maior disposição a diversificar sua produção agropecuária no Brasil, torna-se importante discutir também as políticas públicas focalizadas na agricultura familiar⁴⁹. Primeiramente, pontuam as compras públicas alimentares como instrumentos para fomentar a compra de produtos da agricultura familiar, sendo citados para este fim o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA), Compras Institucionais e o Programa

⁴⁹ Conforme a legislação brasileira, a agricultura familiar é definida quando o tamanho do estabelecimento agropecuário é de até quatro módulos fiscais, a mão de obra é predominantemente da própria família e a renda familiar provém de atividades do próprio estabelecimento.

Nacional de Alimentação Escolar (Pnae). Esses programas têm como finalidade apoiar a produção agropecuária sustentável e a aquisição de alimentos diversificados, considerados de valor alimentício (GRISA; SCHNEIDER; VASCONCELLOS, 2020). Assim, destaca-se na pesquisa de Reynaldo et al. (2021) que existe um nível alto de diversificação (segundo o índice de Simpson) nos produtos convencionais adquiridos pelo PAA, mas os produtos orgânicos tiveram menor nível de diversificação no período de 2012 a 2016. No entanto, no ano de 2016, observou-se o maior nível de diversificação dos produtos orgânicos adquiridos pelo PAA na maioria dos estados brasileiros. Esse último fato pode responder às ações impulsionadas pelo Plano Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (Planapo) ao publicar as listas de produtos da sociodiversidade em 2016 e 2018 para a comercialização nas compras públicas alimentares (MOURA et al., 2020). O Planapo é o instrumento da Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (PNAPO). Sua primeira etapa foi executada no período de 2013-2015 e sua segunda execução, no período de 2016 a 2019. O Planapo tem como finalidade articular ações entre agentes públicos e privados para incentivar a agroecologia no Brasil, cumprindo a diversificação de culturas, parte primordial nas práticas agroecológicas. Logo, tanto as compras institucionais quanto o Planapo têm contribuído para o aumento da comercialização de produtos diversificados da agricultura familiar.

Outra política pública que apoia os agricultores familiares é o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf). O Pronaf tem como objetivo promover o desenvolvimento da agricultura familiar, principalmente através do crédito rural subsidiado, mas também com Assistência Técnica e Extensão rural (ATER). Embora o acesso ao crédito⁵⁰ não tenha sido analisado no estudo, torna-se importante discutir esse instrumento de política pública na agricultura familiar no contexto da diversificação agropecuária. Assim, as “linhas de crédito verde⁵¹” do Pronaf se encaixam como promotoras da diversificação, pois financiam a implantação de SAFs, de sistemas agroecológicos de produção, a adoção de práticas conservacionistas como rotação de culturas, entre outros. No entanto, segundo a pesquisa de De Aquino, Gazolla e Schneider (2021), esses tipos de créditos ainda financiam baixos valores totais visto terem apresentado baixo número de contratos firmados, ainda que o Planapo tenha tentado fortalecer a agroecologia e a produção orgânica através do Pronaf.

⁵⁰ Não foi possível incluir a variável acesso de crédito nas análises econométricas pois esses dados não foram compatíveis com os censos agropecuários usados.

⁵¹ As “linhas de crédito verde” do Pronaf implementadas desde o 2003 incluem o Pronaf Agroecologia, o Pronaf Floresta, o Pronaf Semiárido e o Pronaf Eco (DE AQUINO; GAZOLLA; SCHNEIDER, 2021).

Segundo os autores, os elementos que limitaram, principalmente, o avanço dos créditos verdes são a falta de divulgação desse tipo de créditos, a carência de operadores e técnicos em projetos de base ecológica, como também o excesso de burocracia e as instituições voltadas mais ao financiamento de *commodities*, relacionadas à monocultura. Portanto, os créditos voltados para os agricultores familiares ainda estão direcionados à especialização de culturas, mesmo havendo créditos verdes que poderiam ser aproveitados para melhorar a diversificação agropecuária.

Então, observa-se o papel primordial do investimento em pesquisa relacionada a tecnologias sustentáveis, como a diversificação agropecuária, para poder acompanhar a extensão e o crédito rural. Além disso, faz-se necessário o desenvolvimento de equipamentos e maquinaria acoplados à realidade dos sistemas agrícolas diversificados nos diferentes biomas brasileiros. Desse modo, é também primordial a formação de operadores, técnicos e agricultores com base ecológica, que saibam aproveitar os serviços da diversidade biológica, mediante interações positivas agroecológicas que resultam em economias de escopo e/ou redução dos riscos climáticos.

6. CONCLUSÃO GERAL

O conceito de Diversificação Agropecuária ficou contemplado como as diversas atividades que os produtores desenvolvem dentro do estabelecimento agropecuário (*on-farm*), ligadas à produção mista de espécies agrícolas e/ou pecuárias com interesse econômico, no período de um ano. Assim, pode-se observar que esse conceito abarca uma noção espacial-temporal. Além disso, as principais formas de diversificação apresentaram melhoras no rendimento produtivo no estabelecimento agropecuário. Essas formas de diversificação ajudam a prevenir os riscos advindos das condições agropecuárias, especialmente doenças e pragas, climáticas e do mercado.

Constatou-se que há poucos estudos tratando o tema da diversificação agropecuária em decorrência do complexo manejo de dados desagregados no Brasil. Contudo, a evolução dos índices de diversificação no nível municipal indicou tendência de especialização de atividades agropecuárias no período de 1987 a 2017. No entanto, o índice de Simpson nesse período indica que a produção agropecuária municipal ainda se encontra na categoria “diversificada”. Além disso, observou-se relação inversa entre o tamanho de estabelecimento e a diversificação agropecuária, embora essa correlação seja baixa. Os produtos mais utilizados nos municípios mais diversificados são, principalmente, leite, ovos de galinha, milho, feijão e mandioca. Os produtos da floresta são pouco relevantes na diversificação, exceto a lenha.

A quantificação da diversificação agropecuária no nível municipal tem suas limitações. Existe a possibilidade de uma mudança na diversificação agropecuária nos níveis regionais não implicar necessariamente mudança semelhante no grau de diversificação na escala de cada estabelecimento agropecuário. Porém, assume-se que a contribuição das atividades individuais impacta na diversificação com dados no nível regional. Além disso, o estudo tem limitações ao não poder incluir todos os ramos da agricultura, como a horticultura e a floricultura, nem outros produtos de origem animal, em razão da falta de dados.

Em relação ao impacto da variabilidade climática passada sobre a diversificação agropecuária no Brasil, são observados os seguintes efeitos. De um lado, os resultados mostraram que a diversificação foi adotada como estratégia de adaptação pelas AMCs brasileiras quando os choques climáticos foram a *variabilidade climática sazonal*, o *maior período de seca anual*, os *dias sem precipitação* e os *dias quentes*. Destaca-se que as evoluções da *percentagem de dias quentes* e da temperatura média anual tiveram tendências crescentes ao longo do período de 1985 a 2016. Por outro lado, a diversificação não foi considerada como prática para mitigar a vulnerabilidade causada

pelas fortes precipitações e pelas geadas na região Sul. No entanto, os *dias de chuva muito forte* tiveram tendência decrescente em todas as regiões brasileiras ao longo do mesmo período, enquanto as *geadas* tiveram comportamento errático. Assim, pode-se concluir que a resposta da diversificação como estratégia adaptativa dependeria do tipo de choque climático.

Além disso, os resultados permitiram identificar os efeitos da *assistência técnica, tamanho do estabelecimento* e o *número de estabelecimentos que produzem milho* sobre a diversificação agropecuária nas AMCs brasileiras. Esses resultados destacam a importância dos serviços de Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) na implementação de sistemas diversificados nos municípios brasileiros. Para alavancar esses serviços, é necessário P&D, como também melhorar a capacitação dos técnicos em práticas de diversificação, que demandam conhecimentos agropecuários ajustados às condições edafoclimáticas dos estabelecimentos. Além disso, os valores estimados do *tamanho do estabelecimento*, que, inclusive, tiveram maior influência do que os choques climáticos em vários modelos, mostraram a importância dessa variável na decisão de alocar as culturas. Nesse sentido, os serviços de ATER podem direcionar suas ações aos agricultores de pequena propriedade, que têm maior disposição para diversificar suas atividades agropecuárias do que os grandes estabelecimentos. Finalmente, a demanda de milho influenciou positivamente a diversificação agropecuária, mostrando que a produção de *commodities* agrícolas não necessariamente está ligada à especialização de culturas. Contudo, os dados disponíveis e/ou compatíveis entre os Censos Agropecuários (1995/96, 2006-2017) limitaram as análises a variáveis que possivelmente afetam a diversificação agropecuária brasileira, tais como idade, escolaridade, acesso ao crédito, renda não agrícola e associação a cooperativas ou associações de classe. Adicionalmente, a metodologia utilizada impediu considerar fatores invariantes no tempo tais como tipo de solo e/ou bioma.

Os resultados do último capítulo também apresentaram as previsões da variação na diversificação agropecuária brasileira no início (2016-2035) e meados (2046-2065) do século XXI. No primeiro período, todas as especificações climáticas exibiram diminuição da variação percentual da diversificação agropecuária brasileira, sobretudo nos cenários RCP8.5. Contudo, o decréscimo da diversificação brasileira no período 2016-2035 seria menor do que a média histórica observada (-8,7%) no período de 1996 a 2017. Por outro lado, a variação na diversificação aumentaria no cenário de alta das emissões de GEE (RCP8.5) no segundo período (2046-2065). Essas previsões de mudanças de uso do solo agrícola no Brasil indicam convergência a sistemas agrícolas

mais resilientes às mudanças climáticas. Porém uma mudança na diversificação agropecuária no nível regional não implicaria, necessariamente, alteração semelhante no nível de propriedade.

Como conclusão, os resultados empíricos destacam a importância da diversificação agropecuária como estratégia de gestão de riscos para vários eventos extremos climáticos no Brasil. Os efeitos estimados podem servir no planejamento de políticas rurais tais como pesquisa e desenvolvimento, assistência técnica e crédito rural para o desenvolvimento sustentável da produção agropecuária. Além disso, as simulações futuras mostrariam produções agropecuárias com tendência a diversificar nos meados do século XXI. Todos esses resultados podem ser utilizados na elaboração de políticas públicas ligadas às Mudanças Climáticas, levando em consideração a importância da P&D de sistemas diversificados, dependendo das condições edafoclimáticas de cada região, dos níveis e ds formas apropriadas de diversificação. Futuras pesquisas poderiam entender os fatores que determinam a combinação de várias práticas adaptativas para promover sistemas resilientes como também estudar outras estratégias que sejam relevantes nas especificações climáticas (geadas e chuvas muito fortes) em que a diversificação não teve influência.

7. REFERÊNCIAS

ABDO, M. T. V. N.; VALERI, Sérgio Valiengo; MARTINS, Antônio Lúcio Mello. Sistemas agroflorestais e agricultura familiar: uma parceria interessante. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 2, p. 50-59, 2008.

ABRAHÃO, Gabriel M.; COSTA, Marcos H. Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256, p. 32-45, 2018.

ADJIMOTI, Gilbert Onionkiton; KWADZO, George Tsey-Mensah. Crop diversification and household food security status: evidence from rural Benin. **Agriculture & Food Security**, v. 7, n. 1, p. 82, 2018. doi: 0.1186/s40066-018-0233-x

ALEXANDER, Lisa; HEROLD, Nicolas. **ClimPACT2 indices and software**. WMO Commission for Climatology Expert Team on Sector-Specific Climate Indices. Disponível: <<https://climpact-sci.org>> Acesso em: 14 out. 2019.

ALGARVE, Viviane R. Geadas no Brasil. **Climanálise Especial**, p. 123-128, 1996.

ALMEIDA, RG de et al. Sistemas agrossilvipastoris: benefícios técnicos, econômicos, ambientais e sociais. **ENCONTRO SOBRE ZOOTECNIA DE MATO GROSSO DO SUL**, v. 7, p. 1-10, 2010.

ALTIERI, Miguel A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 74, n. 1, p. 19-31, 1999.

ALVES, Elaine Ponciano et al. Economic analysis of a coffee-banana system of a family-based agriculture at the atlantic forest zone, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 3, p. 232-239, 2015.

ALVES, Eliseu & VIEIRA FILHO, José Eustáquio. O que se espera da irrigação no Nordeste? In: VIEIRA FILHO, José Eustáquio, et al. (Org.). **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: IPEA, 2019.

ALVES, Eliseu et al. Fatos marcantes da agricultura brasileira. In: ALVES, ER de A.; SOUZA, G. da S.; GOMES, Eliane Gonçalves (edit). **Contribuição da Embrapa para o desenvolvimento da agricultura no Brasil**. Área de Informação da Sede-Livro científico (ALICE), 2013.

ANDERT, Sabine et al. The influence of crop sequence on fungicide and herbicide use intensities in North German arable farming. **European Journal of Agronomy**, v. 77, p. 81-89, 2016.

ANDRADE, Carlos Augusto Oliveira de et al. Straw production and agronomic performance of soybean intercropped with forage species in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 10, p. 861-868, 2017.

ANDRADE, J. F. et al. Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. **European Journal of Agronomy**, v. 82, p. 1-10, 2017.

ARSLAN, Aslihan et al. Diversification as Part of a CSA Strategy: The Cases of Zambia and Malawi. In: **Climate Smart Agriculture**. Springer, Cham, 2018. p. 527-562.

ASANTE, Bright O. et al. Determinants of farm diversification in integrated crop–livestock farming systems in Ghana. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 33, n. 2, p. 131-149, 2018.

ASFAW, Solomon, et al. Heterogeneous impact of livelihood diversification on household welfare: Cross-country evidence from Sub-Saharan Africa. **World Development**, vol. 117, p. 278-295, 2019.

ASFAW, Solomon; PALLANTE, Giacomo; PALMA, Alessandro. Diversification strategies and adaptation deficit: Evidence from rural communities in Niger. **World Development**, v. 101, p. 219-234, 2018.

ASRAVOR, Richard Kofi. Livelihood Diversification Strategies to Climate Change among Smallholder Farmers in Northern Ghana. **Journal of International Development**, 2017.

ASSMANN, André Paulo et al. Tolerância de frutos de pessegueiro a geadas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 4, p. 1030-1035, 2008.

ASSUNÇÃO, Juliano; CHEIN, Flávia. Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives. **Environment and Development Economics**, v. 21, n. 5, p. 581-602, 2016.

AUFFHAMMER, Maximilian, et al. Using weather data and climate model output in economic analyses of climate change. **Review of Environmental Economics and Policy**, vol. 7, no 2, p. 181-198, 2013.

BALBINO, Luiz Carlos et al. Agricultura sustentável por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **Informações agrônômicas**, v. 138, n. 7, p. 1-14, 2012.

BALBINO, Luiz Carlos et al. Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta. Brasília: Embrapa, 2011^a. 130p.

BANCO MUNDIAL. **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil: caminhos para uma visão integrada.** 1a edição. Brasília, p. 76, 2015.

BAUMOL, W. J., PANZAR, J. C. and WILLIG, R. D. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure (New York: Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1982).

BELLON, Mauricio R. et al. To diversify or not to diversify, that is the question. Pursuing agricultural development for smallholder farmers in marginal areas of Ghana. **World Development**, v. 125, p. 104682, 2020.

BELOW, Till et al. Micro-level practices to adapt to climate change for African small-scale farmers. **A review of Selected Literature. Environ. Prod. Technol. Division**, v. 953, 2010.

BENIN, Samuel et al. The economic determinants of cereal crop diversity on farms in the Ethiopian highlands. **Agricultural Economics**, v. 31, n. 2-3, p. 197-208, 2004.

BIRTHAL, Pratap S.; HAZRANA, Jaweriah. Crop diversification and resilience of agriculture to climatic shocks: evidence from India. **Agricultural systems**, v. 173, p. 345-354, 2019.

BIRTHAL, Pratap S.; HAZRANA, Jaweriah; NEGI, Digvijay S. Diversification in Indian agriculture towards high value crops: Multilevel determinants and policy implications. **Land Use Policy**, v. 91, p. 104427, 2020.

BITENCOURT, Daniel P. et al. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. **International Journal of Climatology**, 2019.

BONAUDO, Thierry et al. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 43-51, 2014.

BORGES, Amanda da Fonseca et al. Tolerância de gemas floríferas, flores e frutos de pessegueiro a temperaturas de ocorrência de geadas. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 355-359, 2012.

BOWLES, Timothy M. et al. Long-Term evidence shows that crop-rotation Diversification increases agricultural resilience to Adverse Growing conditions in North America. **One Earth**, 2020.

BOYER, John S. Plant productivity and environment. **Science**, v. 218, n. 4571, p. 443-448, 1982.

BRADSHAW, Ben; DOLAN, Holly; SMIT, Barry. Farm-level adaptation to climatic variability and change: crop diversification in the Canadian prairies. **Climatic Change**, v. 67, n. 1, p. 119-141, 2004.

BROOKFIELD, Harold; STOCKING, Michael. Agrodiversity: definition, description and design. **Global environmental change**, v. 9, n. 2, p. 77-80, 1999.

BUREAU OF METEOROLOGY. Timeline of monthly Southern Oscillation Index (SOI) values since 1876. Australian Government, 2020. Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/climate/influences/timeline/>>. Acesso em: 30 abr 2020.

CAI, Wenju et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020.

CAMERON, A. Colin; TRIVEDI, Pravin K. **Microeconometrics: methods and applications**. Cambridge university press, 2005.

CARAMORI, Paulo Henrique et al. Métodos de proteção contra geadas em cafezais em formação. **Informe de Pesquisa IAPAR**, 2007.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. Comissão Especial para Acompanhar a Problemática da Seca e as Perspectivas de Chuvas no Estado do Ceará. Que venham as providências! Relatório final de atividades; relator, Welington Landim. - Fortaleza: INESP, 2013.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA) E CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (CNA). **PIB do agronegócio brasileiro de 1996 a 2018**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em 3 de agosto de 2020.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Produto Interno Bruto (PIB) do Agronegócio**. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br>> Acesso em 3 de outubro de 2019.

CHAPAGAIN, Tejendra et al. Intercropping of maize, millet, mustard, wheat and ginger increased land productivity and potential economic returns for smallholder terrace farmers in Nepal. **Field Crops Research**, v. 227, p. 91-101, 2018.

CHAVAS, J.-P., & DI FALCO, S. (2011). On the Role of Risk Versus Economies of Scope in Farm Diversification With an Application to Ethiopian Farms. *Journal of Agricultural Economics*, 63(1), 25–55. doi:10.1111/j.1477-9552.2011.00319.x

CHO, Sung Ju; MCCARL, Bruce A. Climate change influences on crop mix shifts in the United States. **Scientific reports**, vol. 7, no 1, p. 1-6, 2017.

COELLI, Tim; FLEMING, Euan. Diversification economies and specialisation efficiencies in a mixed food and coffee smallholder farming system in Papua New Guinea. **Agricultural Economics**, v. 31, n. 2-3, p. 229-239, 2004.

COHN, Avery S. et al. Cropping frequency and area response to climate variability can exceed yield response. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 6, p. 601-604, 2016.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. REGULATION (EU) No 1307/2013 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 december 2013 establishing rules for direct payments to farmers under support schemes within the framework of the common agricultural policy and repealing Council Regulation (EC) No 637/2008 and Council Regulation (EC) No 73/2009. 2013. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:347:0608:0670:EN:PDF>>.

Acesso em 3 de agosto de 2018.

CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa et al. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. **European Journal of Agronomy**, v. 58, p. 53-62, 2014.

CUADRAT, José Maria; PITA, Maria Fernanda. **Climatología**: José M^a Cuadrat, M^a Fernanda Pita. 6 ed. Madrid, Espanha: Cátedra, 2011.

CUNHA, Dênis Antônio da et al. Effects of climate change on irrigation adoption in Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 1, p. 01-09, 2014.

CUNHA, Denis Antonio; COELHO, Alexandre Bragança; FÉRES, José Gustavo. Irrigation as an adaptive strategy to climate change: an economic perspective on Brazilian agriculture. **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 1, p. 57-79, 2015.

DAS, Anup et al. Tillage and cropping sequence effect on physico-chemical and biological properties of soil in Eastern Himalayas, India. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 182-193, 2018.

DE ANDRADES, Thiago Oliveira; GANIMI, Rosângela Nasser. Revolução verde e a apropriação capitalista. **CES Revista**, v. 21, p. 43-56, 2007.

DE AQUINO, Joacir Rufino; GAZOLLA, Marcio; SCHNEIDER, Sergio. TENTATIVAS DE INCLUSÃO DA AGRICULTURA DE BASE ECOLÓGICA NO PRONAF: DO OTIMISMO DAS LINHAS DE CRÉDITO VERDE AO SONHO FRUSTRADO DO I PLANAPO. **Revista Grifos**, v. 30, n. 51, p. 163-189, 2021.

DE CASTRO, César Nunes. **A agropecuária na região Centro-Oeste: limitações ao desenvolvimento e desafios futuros.** Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2014.

DE MORAES, Anibal et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

DE ROEST, K., FERRARI, P., & KNICKEL, K. (2018). Specialisation and economies of scale or diversification and economies of scope? Assessing different agricultural development pathways. *Journal of Rural Studies*, 59, 222–231. doi:10.1016/j.jrurstud.2017.04.013

DE SOUZA, Bonifácio Benício; BATISTA, Nayanne Lopes. Os efeitos do estresse térmico sobre a fisiologia animal. **Agropecuária científica no semiárido**, v. 8, n. 3, p. 06-10, 2012.

DE VASCONCELOS BATISTA, Thaíza Mabelle et al. Bio-agro-economic returns from carrot and salad rocket as intercrops using hairy woodrose as green manure in a semi-arid region of Brazil. **Ecological indicators**, v. 67, p. 458-465, 2016.

DEBIASI, Henrique et al. Diversificação de espécies vegetais como fundamento para a sustentabilidade da cultura da soja. **Embrapa Soja-Documentos (INFOTECA-E)**, 2015.

DELAZERI, Linda Márcia Mendes; DA CUNHA, Dênis Antônio; COUTO-SANTOS, Fabiana Rita. CLIMATE CHANGE AND URBANIZATION: EVIDENCE FROM THE SEMI-ARID REGION OF BRAZIL. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 12, n. 2, p. 129-154, 2018.

DELCOURT, Gregg; VAN KOOTEN, G. C. How resilient is grain production to climatic change? Sustainable agriculture in a dryland cropping region of western Canada. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 37-57, 1995.

DELL, Melissa; JONES, Benjamin F.; OLKEN, Benjamin A. What do we learn from the weather? The new climate-economy literature. **Journal of Economic Literature**, v. 52, n. 3, p. 740-98, 2014.

DERYNG, Delphine et al. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 3, p. 034011, 2014.

DIAS, Helga Arato; VENÂNCIO, Sebastião Martins; DE FERRARI SOUZA, Silvia Helena. Produção e decomposição de serrapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área degradada em Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 715-721, 2003.

DIDONET, Agostinho Dirceu; VITÓRIA, Tiago Barbosa. Resposta do feijoeiro comum ao estresse térmico aplicado em diferentes estágios fenológicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 3, p. 199-204, 2006.

DILLON, Andrew; MCGEE, Kevin; OSENI, Gbemisola. Agricultural production, dietary diversity and climate variability. **The Journal of Development Studies**, v. 51, n. 8, p. 976-995, 2015.

DO CARMO MARTINELLI, Gabrielli et al. Decreasing uncertainties and reversing paradigms on the economic performance of agroforestry systems in Brazil. **Land Use Policy**, v. 80, p. 274-286, 2019.

DOS SANTOS, Isis Lima et al. Soil N₂O emissions from long-term agroecosystems: Interactive effects of rainfall seasonality and crop rotation in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 111-120, 2016. doi: /10.1016/j.agee.2016.08.027

EHRL, Philipp. Minimum comparable areas for the period 1872-2010: an aggregation of Brazilian municipalities. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 47, n. 1, p. 215-229, 2017.

ELLIS, Frank. The determinants of rural livelihood diversification in developing countries. **Journal of Agricultural Economics**, v. 51, n. 2, p. 289-302, 2000.

EM-DAT. CRED / Université Catholique de Louvain, Brussel, Bélgica, 202. Disponível em: <www.emdat.be>. Acesso em 13 de fevereiro de 2021.

ESCHER, Fabiano et al. Caracterização da pluriatividade e dos plurirrendimentos da agricultura brasileira a partir do Censo Agropecuário 2006. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52, n. 4, p. 643-668, 2014.

FANTE, Camila Argenta. **Teores de isoflavonas no grão e respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estágios**. 2008. 48 p, Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras- MG.

FAO - Food and Agriculture Organization. Agricultural Biodiversity, Multifunctional Character of Agriculture and Land Conference, Background Paper 1. Maastricht, Netherlands. September 1999.

FAO – Food and Agriculture Organization. **Crop diversification for sustainable diets and nutrition: The role of FAO's Plant Production and Protection Division**, Roma, 2012.

FAO. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. **Serie FAO sobre el Medioambiente y la Gestión de los Recursos Naturales**, v. 1, n. 10, 2010. Disponível em: <<https://http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s00.htm>>. Acesso em 25 de abril de 2020.

FAO. World Food and Agriculture e Statistical Pocketbook 2018. Rome. 254 pp, 2018.

FARRELL, Michael James. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**, v. 120, n. 3, p. 253-290, 1957.

FAUSTO, Boris; FAUSTO, Sergio. **História do Brasil**. São Paulo: Edusp, 1994.

FÁVERO, Claudenir; LOVO, Ivana Cristina; DE SÁ MENDONÇA, Eduardo. Recuperação de área degradada com sistema agroflorestral no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 861-868, 2008.

FERREIRA FILHO, Joaquim Bento De Souza; DE MORAES, Gustavo Inacio. Climate change, agriculture and economic effects on different regions of Brazil. **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 1, p. 37-56, 2015.

FORTINI, Rosimere Miranda; BRAGA, Marcelo José; FREITAS, Carlos Otávio. Impacto das práticas agrícolas conservacionistas na produtividade da terra e no lucro dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 58, n. 2, 2020.

GARCIA, Alejandra Barrera et al. Relationships between heat stress and metabolic and milk parameters in dairy cows in southern Brazil. **Tropical animal health and production**, v. 47, n. 5, p. 889-894, 2015.

GARIBALDI, Lucas A.; PÉREZ-MÉNDEZ, Néstor. Positive outcomes between crop diversity and agricultural employment worldwide. **Ecological Economics**, v. 164, p. 106358, 2019.

GATEAU-REY, Lauranne et al. Climate change could threaten cocoa production: Effects of 2015-16 El Niño-related drought on cocoa agroforests in Bahia, Brazil. **PloS one**, v. 13, n. 7, 2018.

GAUDIN, Amélie CM et al. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. **PloS one**, v. 10, n. 2, p. e0113261, 2015.

GEIRINHAS, João L. et al. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2018.

GITARI, Harun I. et al. Optimizing yield and economic returns of rain-fed potato (*Solanum tuberosum* L.) through water conservation under potato-legume intercropping systems. **Agricultural Water Management**, v. 208, p. 59-66, 2018.

GOERL, Roberto Fabris; KOBAYAMA, Masato. Considerações sobre as inundações no Brasil. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005.

GOMES, JCC et al. Milpa: Estratégia Pré-Colombiana para a produção de alimentos. 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/37364/1/panfleto_milpa.pdf> Acesso em 4 de outubro de 2018.

GONÇALVES, S. L.; GAUDENCIO, C. A.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R.; GARCIA, A. **Rotação de Culturas**. Circular técnica 45. 10 f. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2007.

GREENE, William H., **Econometric Analysis**. Prentice-Hall, Boston. 2012.

GREENE, William. Reconsidering heterogeneity in panel data estimators of the stochastic frontier model. **Journal of econometrics**, v. 126, n. 2, p. 269-303, 2005.

GRISA, Catia; SCHNEIDER, Sergio; VASCONCELLOS, Fernanda Castilhos França de. As compras públicas como instrumentos para a construção de sistemas alimentares sustentáveis. In: **A contribuição brasileira à segurança alimentar e nutricional sustentável**. p. 69-90, 2020.

GUANZIROLI, Carlos Enrique; BUAINAIN, Antonio Marcio; DI SABBATO, Alberto. Dez anos de evolução da agricultura familiar no Brasil:(1996 e 2006). **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 2, p. 351-370, 2012.

GUSSO, Anibal et al. Monitoring heat waves and their impacts on summer crop development in southern Brazil. **Agricultural sciences. Irvine. Vol. 5, n. 4 (Mar. 2014), p. 353-364**, 2014.

HEAL, M., G., et al. Economics of adaptation. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectorial Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 945-977, 2014.

HERRERA, Gabriel Paes et al. Econometric analysis of income, productivity and diversification among smallholders in Brazil. **Land Use Policy**, 2018.

HILL, C.; VERJEE, F.; BARRETT, C. Flash flood early warning system reference guide. **University Corporation for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA**, 2010.

HO, Thong Quoc et al. Which farming systems are efficient for Vietnamese coffee farmers?. **Economic Analysis and Policy**, v. 56, p. 114-125, 2017.

HOWDEN, S. Mark et al. Adapting agriculture to climate change. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 104, n. 50, p. 19691-19696, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisas agropecuárias In: **Relatórios metodológicos**, v.6. Departamento de Agropecuária, 2. Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IBGE. Censo Agropecuário 2006 - Segunda apuração. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2006/segunda-apuracao>>. Acesso em: 5 out 2018.

IBGE. Censo Agropecuário 2017- Resultados Preliminares 2018. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em 5 de outubro de 2018.

IBRAHIM, H. et al. Income and crop diversification among farming households in a rural area of north central Nigeria. **Journal of Tropical Agriculture, Food, Environment and Extension**, v. 8, n. 2, p. 84-89, 2009.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. PACHAURI, R. K.; MEYER, L.A. (Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

IPCC – INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: STOCKER, T. F. et al. (eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis** Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IRI – INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE AND SOCIETY. Climate Variability. Disponível em: <<https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/climate-variability>>. Acesso em 25 de setembro de 2018.

JANZ, Baldur et al. Greenhouse gas footprint of diversifying rice cropping systems: Impacts of water regime and organic amendments. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 270, p. 41-54, 2019.

JIMENEZ, Juan C. et al. The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, 2019.

JOSHI, Pramod K. Diversification of agriculture in more competitive environment. **Agricultural Diversification and International Competitiveness. Tokyo: Asian Productivity Organization**, 2004.

JOSHI, Pramod K. et al. Agriculture diversification in South Asia: patterns, determinants and policy implications. **Economic and political weekly**, p. 2457-2467, 2004.

JOSHI, Pramod. Diversification of Agriculture in more competitive environment. In: Ali, M. (Ed.). **Asian Productivity Organization**, Tokyo, Japan. 2004. Disponível: <<http://www.apo-tokyo.org/publications/files/agr-03-adic.pdf>> Acesso em 14 de março de 2017

JÚNIOR, Geraldo Bueno Martha; ALVES, Eliseu; CONTINI, Elisio. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 10, p. 1117-1126, 2012.

KARLEN, D. L. et al. Crop rotations for the 21st century. **Advances in agronomy**, v. 53, n. 1.45, 1994.

KASSAM, Amir et al. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. **Field Actions Science Reports. The Journal of Field Actions**, v. 8, 2015.

KHANAL, Uttam et al. Farmers' adaptation to climate change, its determinants and impacts on rice yield in Nepal. **Ecological Economics**, v. 144, p. 139-147, 2018.

KICHEL, Armindo Neivo, et al. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPP)-experiência no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, vol. 71, no 1, p. 94-105, 2014.

KROLOW, Daniela da Rocha Vitória et al. Alteration in soil fauna due to soil management and crop rotation in a long-term experiment. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 50-63, 2017.

KUMAR, M. Crop plants and abiotic stresses. **J. Biomol. Res. Ther**, v. 3, n. 1, 2013.

KUMBHAKAR, Subal C. et al. Do we estimate an input or an output distance function? An application of the mixture approach to European railways. **Journal of Productivity Analysis**, v. 27, n. 2, p. 87-100, 2007.

KUMBHAKAR, Subal C.; LOVELL, CA Knox. **Stochastic frontier analysis**. Cambridge university press, 2003.

KUPFER, David; HASENCLEVER, Lia. **Economia industrial: fundamentos teóricos e práticas no Brasil**. Elsevier, 2013.

LEAKEY, R.R.B. Definition of agroforestry revisited. In: Multifunctional Agriculture – Achieving Sustainable Development in Africa, RRB Leakey, 5-6, Academic Press, San Diego, California, USA. 2017

LEMKEN, Dominic; SPILLER, Achim; VON MEYER-HÖFER, Marie. The Case of Legume-Cereal Crop Mixtures in Modern Agriculture and the Transtheoretical Model of Gradual Adoption. **Ecological Economics**, v. 137, p. 20-28, 2017.

LIANG, Yingzong; HUI, Chi Wai; YOU, Fengqi. Multi-Objective Economic-Resource-Production Optimization of Sustainable Organic Mixed Farming Systems with Nutrient Recycling. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

LIN, Brenda B. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. **BioScience**, v. 61, n. 3, p. 183-193, 2011.

LIPPER, Leslie et al. (Ed.). **Climate smart agriculture: building resilience to climate change**. Springer, 2017.

LOVELL, CA Knox et al. Resources and functionings: a new view of inequality in Australia. In: **Models and measurement of welfare and inequality**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994. p. 787-807.

MAGRIN, G.O.; MARENGO, J.A.; BOULANGER, J.-P.; BUCKERIDGE, M.S.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F.R.; VICUÑA, S. Central and South America. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566. 2014.

MAGURRAN, Anne E. **Measuring biological diversity**. Blackwell Science, 2004.

MAHY, Louis et al. Simulating farm level response to crop diversification policy. **Land Use Policy**, v. 45, p. 36-42, 2015.

MAPA – Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Adoção e mitigação de Gases de Efeitos Estufa pelas tecnologias do Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas (Plano ABC)**, 2018. Disponível em:

<<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/plano-abc-em-numeros/arquivos/ResumodaadooemitigaodegasesdeefeitosestufapelastecnologiasdoPlanoABCPerodo2010a2018nov.pdf>> Acesso em 4 de janeiro de 2020.

MARENCO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.

MARENCO, José Antônio et al. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009.

MARTHA, Geraldo B.; CONTINI, Elisio; ALVES, Eliseu. Embrapa: its origins and changes. In: **The Regional Impact of National Policies**. Edward Elgar Publishing, 2012.

MARTIN-GUAY, Marc-Olivier et al. The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping. **Science of the Total Environment**, v. 615, p. 767-772, 2018.

MBOW, Cheikh et al. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 8-14, 2014.

MCCORD, Paul F. et al. Crop diversification as a smallholder livelihood strategy within semi-arid agricultural systems near Mount Kenya. **Land Use Policy**, v. 42, p. 738-750, 2015.

MCNAMARA, Kevin T.; WEISS, Christoph. Farm household income and on- and off-farm diversification. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 37, n. 1, p. 37-48, 2005.

MELO-ABREU, J.; RIBEIRO, António Castro. Os danos de geadas: conceitos, mecanismos e modelos de simulação. **Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao professor Doutor Dionísio Gonçalves**, p. 141-166, 2010.

MESFIN, Wondimagegn; FUFU, Bekabil; HAJI, Jema. Pattern, trend and determinants of crop diversification: empirical evidence from smallholders in eastern Ethiopia. **Journal of Economics and Sustainable Development**, v. 2, n. 8, p. 78-89, 2011.

MICCOLIS, Andrew et al. Restoration through agroforestry: options for reconciling livelihoods with conservation in the Cerrado and Caatinga biomes in Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. S1, p. 208-225, 2019. doi: [10.1017/S0014479717000138](https://doi.org/10.1017/S0014479717000138)

MICHLER, Jeffrey D.; JOSEPHSON, Anna L. To specialize or diversify: agricultural diversity and poverty dynamics in Ethiopia. **World Development**, v. 89, p. 214-226, 2017.

MITTENZWEI, Klaus et al. Opportunities and limitations in assessing the multifunctionality of agriculture within the CAPRI model. **Ecological Indicators**, v. 7, n. 4, p. 827-838, 2007.

MITTER, Hermine; HEUMESSER, Christine; SCHMID, Erwin. Spatial modeling of robust crop production portfolios to assess agricultural vulnerability and adaptation to climate change. **Land Use Policy**, v. 46, p. 75-90, 2015.

MITTLER, Ron. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in plant science**, v. 11, n. 1, p. 15-19, 2006.

MOURA, Victor et al. A contribuição do Plano Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (Planapo) na definição das listas de espécies da sociobiodiversidade. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 2, 2020.

MU, Jianhong E., et al. Adaptation with climate uncertainty: An examination of agricultural land use in the United States. **Land use policy**, vol. 77, p. 392-401, 2018.

NGUYEN, Huy Quynh. Analyzing the economies of crop diversification in rural Vietnam using an input distance function. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 148-156, 2017.

OLIVEIRA FILHO, Silvio Fernando Santana et al. Adoção de estratégias para redução de riscos: identificação dos determinantes da diversificação produtiva no Polo Petrolina-Juazeiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52, n. 1, p. 117-138, 2014.

OLIVEIRA, Daniela & GASQUES, José. Produção e Economia regional. In: VIEIRA FILHO, José Eustáquio, et al. (Org.). **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: IPEA, 2019.

OLIVER, John E. (Ed.). **Encyclopedia of world climatology**. Springer Science & Business Media, 2008.

PAUL, Catherine J. Morrison; NEHRING, Richard. Product diversification, production systems, and economic performance in US agricultural production. **Journal of Econometrics**, v. 126, n. 2, p. 525-548, 2005.

PAUT, Raphaël; SABATIER, Rodolphe; TCHAMITCHIAN, Marc. Modelling crop diversification and association effects in agricultural systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 288, p. 106711, 2020. doi: [10.1016/j.agee.2019.106711](https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106711)

PERDONÁ, Marcos J.; SORATTO, Rogério P. Higher yield and economic benefits are achieved in the macadamia crop by irrigation and intercropping with coffee. **Scientia Horticulturae**, v. 185, p. 59-67, 2015.

PIEDRA-BONILLA, Elena Beatriz; CUNHA, Dênis Antônio; BRAGA, Marcelo José. Diversificação agrícola na bacia hidrográfica do Rio das Contas, Bahia. **Geosul**, v. 34, n. 72, p. 280-306, 2019.

PIEDRA-BONILLA, Elena Beatriz; DA CUNHA, Dênis Antônio; BRAGA, Marcelo José. Climate variability and crop diversification in Brazil: An ordered probit analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120252, 2020.

PIRES, Gabrielle F. et al. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286-298, 2016.

POFFENBARGER, Hanna et al. An economic analysis of integrated crop-livestock systems in Iowa, USA. **Agricultural Systems**, v. 157, p. 51-69, 2017.

QUANDT, Amy; NEUFELDT, Henry; MCCABE, J. Terrence. The role of agroforestry in building livelihood resilience to floods and drought in semiarid Kenya. **Ecology and Society**, v. 22, n. 3, 2017.

QUEIROZ, Renata Fernandes de et al. Maize intercropped with *Urochloa ruziziensis* under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 3, p. 238-244, 2016.

RAHMAN, Sanzidur. Impacts of climate change, agroecology and socio-economic factors on agricultural land use diversity in Bangladesh (1948–2008). **Land Use Policy**, v. 50, p. 169-178, 2016.

RAHMAN, Sanzidur. The economic determinants of crop diversity on farms in rural Bangladesh. **J. Int. Agric. Trade Dev.** v. 5, p. 51–70, 2008.

RAHMAN, Sanzidur. Whether crop diversification is a desired strategy for agricultural growth in Bangladesh? **Food Policy**, v. 34, n. 4, p. 340-349, 2009.

RAY, Deepak K. et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature communications**, v. 6, p. 5989, 2015.

REIS, Erlei Melo; CASA, Ricardo Trezzi; BIANCHIN, Vânia. Controle de doenças de plantas pela rotação de culturas. **Summa phytopathol**, v. 37, n. 3, p. 85-91, 2011.

REIS, Eustáquio et al. Áreas mínimas comparáveis para os períodos intercensitários de 1872 a 2000. **Rio de Janeiro: Ipea/Dimac**, 2008.

RENARD, Delphine; TILMAN, David. National food production stabilized by crop diversity. **Nature**, v. 571, n. 7764, p. 257-260, 2019.

REYNALDO, Gabriela Oshiro, et al. Analysis of national policy for family farming organic products trade in Brazil. In: **Extensão Rural: práticas e pesquisas para o fortalecimento da agricultura familiar** - Volume 1, 2021.

RODRIGUES, Elisangela Ronconi et al. O USO DO SISTEMA AGROFLORESTAL TAUNGYA NA RESTAURAÇÃO DE RESERVAS LEGAIS: INDICADORES ECONÔMICOS. **FLORESTA**, [S.l.], set. 2008.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. O agronegócio será ecológico. **O mundo rural no Brasil do século: a formação de um novo padrão agrário e agrícola**, v. 21, p. 509-530, 2014.

ROODMAN, David et al. How to Do xtabond2. In: **North American Stata Users' Group Meetings 2006**. Stata Users Group, 2006.

ROSENSTOCK, Todd S. et al. **The scientific basis of climate-smart agriculture: A systematic review protocol**. 2016.

SÁ, Jocelito S. de; CRUCIANI, Décio Eugênio; MINAMI, Keigo. Efeitos de inundações temporárias do solo em plantas de ervilha. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n.1, p. 50-54, 2004.

SALTON, Julio C.; HERNANI, Luis C.; FONTES, Clarice Z. **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998., 1998.

SAMBUICHI, Regina Helena Rosa et al. A diversificação produtiva como forma de viabilizar o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar no Brasil. In: **Brasil em desenvolvimento**, p. 61-84, 2014.

SAMBUICHI, Regina Helena Rosa et al. **Diversidade da Produção nos Estabelecimentos da Agricultura Familiar no Brasil**: uma análise econométrica baseada no cadastro da Declaração de Aptidão ao Pronaf (DAP). Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), No. 2202. 2016.

SANCHEZ, Pedro A. Science in agroforestry. **Agroforestry systems**, v. 30, n. 1-2, p. 5-55, 1995.

SANTILLI, Juliana. **Agrobiodiversidade e direitos dos agricultores**. São Paulo: Petrópolis, 2009.

SCHEMBERGUE, Altamir et al. Sistemas agrofloretais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 1, p. 9-30, 2017. doi: 10.1590/1234-56781806-94790550101

SCHLENKER, Wolfram. Crop responses to climate and weather: cross-section and panel models. En **Climate Change and Food Security**. Springer, Dordrecht, p. 99-108, 2010.

SCHNEIDER, Sergio. A importância da pluriatividade para as políticas públicas no Brasil. **Revista de política agrícola**, v. 16, n. 3, p. 14-33, 2007.

SCHNEIDER, Sergio. A pluriatividade como estratégia de reprodução social da agricultura familiar no Sul do Brasil. **Estudos sociedade e agricultura**. Rio de Janeiro, RJ. N. 16 (abr. 2001), p. 164-184, 2001.

SCHOUTEN, Marleen et al. Resilience-based governance in rural landscapes: experiments with agri-environment schemes using a spatially explicit agent-based model. **Land Use Policy**, v. 30, n. 1, p. 934-943, 2013.

SEDIYAMA, Maria Aparecida Nogueira; DOS SANTOS, Izabel Cristina; DE LIMA, Paulo César. Cultivo de hortaliças no sistema orgânico. **Ceres**, v. 61, n. 7, 2015.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Total emissões. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission> Acesso em: 9 out. 2019.

SEO, S. N. A geographically scaled analysis of adaptation to climate change with spatial models using agricultural systems in Africa. **The Journal of Agricultural Science**, vol. 149, no 4, p. 437, 2011.

SEO, S. Niggol. A microeconomic analysis of adapting portfolios to climate change: adoption of agricultural systems in Latin America. **Applied Economic Perspectives and Policy**, vol. 32, no 3, p. 489-514, 2010.

SEO, S. Niggol; MENDELSON, Robert. An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms. **Ecological economics**, v. 67, n. 1, p. 109-116, 2008.

SHEFFIELD, Justin; GOTETI, Gopi; WOOD, Eric F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. **Journal of Climate**, v. 19, n. 13, p. 3088-3111, 2006.

SHUKLA P.R.; SKEA, J.; SLADE R.; VAN DIEMEN, R.; HAUGHEY, E.; MALLEY, J.; PATHAK, M.; PORTUGAL PEREIRA, J. (eds.) Technical Summary. In: **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. In press. 2019.

SINGH, N. P.; KUMAR, Ranjit; SINGH, R. P. Diversification of Indian agriculture: composition, determinants and trade implications. **Agricultural Economics Research Review**, v. 19, n. 347-2016-16742, p. 23-36, 2006.

SMIT, Barry; SKINNER, Mark W. Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 7, n. 1, p. 85-114, 2002.

SMITH, Pete et al. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? **Global Change Biology**, v. 19, n. 8, p. 2285-2302, 2013.

SOUZA PIAO, Roberta et al. Green Growth and Agriculture in Brazil. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1162, 2021.

SOUZA, Elvanio Costa de et al. Impacto das mudanças climáticas sobre o bem-estar relacionado à saúde no Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico – PPE** 2013; 43(1):49-87.

SOUZA, Priscila Teixeira de; SALLES, Maria Gorete Flores; ARAÚJO, Airton Alencar de. Impacto do estresse térmico sobre a fisiologia, reprodução e produção de caprinos. **Ciência Rural**, v. 42, n. 10, p. 1888-1895, 2012.

TAFFESSE, A.S.; DOROSH, P.; GEMESSA, S.A. Crop production in Ethiopia: Regional patterns and trends. In: DOROSH, Paul; RASHID, Shahidur (Ed.). **Food and agriculture in Ethiopia: Progress and policy challenges**. University of Pennsylvania Press, 2013.

TAIZ, Lincoln.; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal 4 ed**. Porto Alegre: Artmed, v. 719, 2009.

TAKESHIMA, Hiroyuki; HATZENBUEHLER, Patrick L.; EDEH, Hyacinth O. Effects of agricultural mechanization on economies of scope in crop production in Nigeria. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102691, 2020. doi: [10.1016/j.agsy.2019.102691](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102691)

TEKLEWOLD, Hailemariam et al. Does adoption of multiple climate-smart practices improve farmers' climate resilience? Empirical evidence from the Nile basin of Ethiopia. **Climate Change Economics**, v. 8, n. 01, p. 1750001, 2017.

TESFAYE, Wondimagegn; TIRIVAYI, Nyasha. Crop diversity, household welfare and consumption smoothing under risk: Evidence from rural Uganda. **World Development**, v. 125, p. 104686, 2020.

THAMO, Tas et al. Climate change impacts and farm-level adaptation: Economic analysis of a mixed cropping–livestock system. **Agricultural Systems**, v. 150, p. 99-108, 2017.

THORNTON, Philip K. et al. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. **Global Change Biology**, v. 20, n. 11, p. 3313-3328, 2014.

TOL, Richard SJ. The Economic Impacts of Climate Change. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 12, n. 1, p. 4-25, 2018.

VAN ASTEN, P. J. A. et al. Agronomic and economic benefits of coffee–banana intercropping in Uganda’s smallholder farming systems. **Agricultural systems**, v. 104, n. 4, p. 326-334, 2011.

VAN DUSEN, M. Eric; TAYLOR, J. Edward. Missing markets and crop diversity: evidence from Mexico. **Environment and Development Economics**, p. 513-531, 2005.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. Transformação histórica e padrões tecnológicos da agricultura brasileira. **O mundo rural do Brasil no século 21: a formação de um novo padrão agrário e agrícola**, 2014.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; FISHLOW, Albert. **Agricultura e indústria no Brasil: inovação e competitividade**. 2017

VIEIRA, Thiago Almeida et al. ADOÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA AGRICULTURA FAMILIAR, EM IGARAPÉ-AÇU, PARÁ, BRASIL. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, v. 47, n. 1, p. 9-22, 2007.

VILELA, Lourival et al. Sistemas de integração lavoura pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2012.

VILLANO, Renato; FLEMING, Euan; FLEMING, Pauline. Evidence of farm-level synergies in mixed-farming systems in the Australian Wheat-Sheep Zone. **Agricultural Systems**, v. 103, n. 3, p. 146-152, 2010.

VINHOLIS, Marcela de Mello Brandão et al. The effect of meso-institutions on adoption of sustainable agricultural technology: A case study of the Brazilian Low Carbon Agriculture Plan. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124334, 2021.

WAHA, Katharina et al. Agricultural diversification as an important strategy for achieving food security in Africa. **Global change biology**, v. 24, n. 8, p. 3390-3400, 2018. doi: [10.1111/gcb.14158](https://doi.org/10.1111/gcb.14158)

WELDEGEBRIEL, Zerihun Berhane; PROWSE, Martin. Climate variability and livelihood diversification in northern Ethiopia: a case study of Lasta and Beyeda districts. **The Geographical Journal**, v. 183, n. 1, p. 84-96, 2017.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION -. Commission for climatology: Frequently Asked Questions (FAQS). What is climate variability? 2017. Disponível em: <<http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.php>>. Acesso em: 25 de setembro de 2018.

WREGE, Marcos Silveira et al. RISCO DE OCORRÊNCIA DE GEADAS NA REGIÃO CENTRO-SUL DO BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

YANG, Xiaolin et al. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain. **Journal of Cleaner Production**, v. 76, p. 131-139, 2014.

8. ANEXOS

Anexo 1. Correlação percentual de estabelecimentos por grupos de área e especialização agropecuária (Simpson) no Brasil e suas regiões em 2006 e 2017

Região	0 a 5 ha	5 a 10 ha	10 a 50 ha	50 a 100ha	100 a 1000 ha	>1000 ha
Brasil	0.10***	0.06***	-0.009	-0.084***	-0.17***	-0.106***
Norte	0.17***	0.13***	-0.119**	0.028	-0.146***	-0.23***
Nordeste	0.044*	-0.034	-0.006	-0.011	-0.129***	-0.137***
Sudeste	0.08**	0.08***	-0.06**	-0.07***	-0.075***	-0.06**
Sul	0.17***	0.23***	0.05*	-0.23***	-0.345***	-0.285***
Centro-Oeste	0.16***	0.18***	0.16***	-0.106**	-0.232***	-0.155***

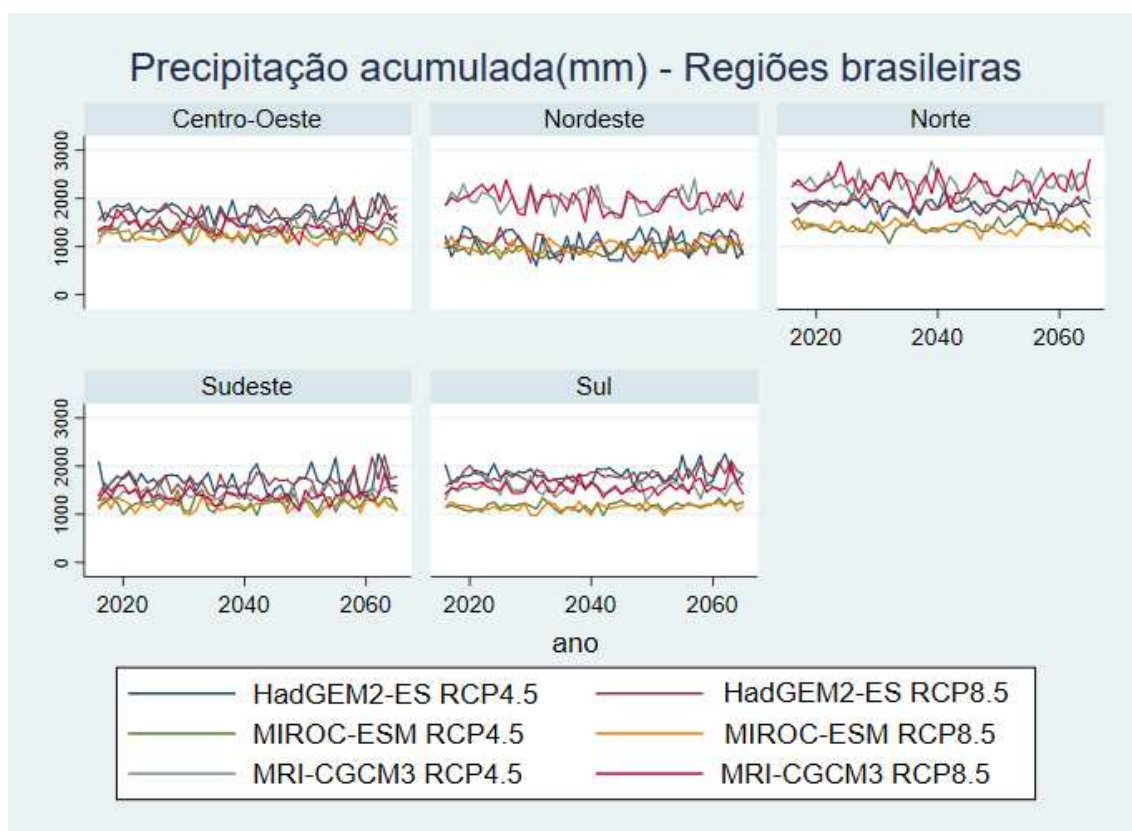
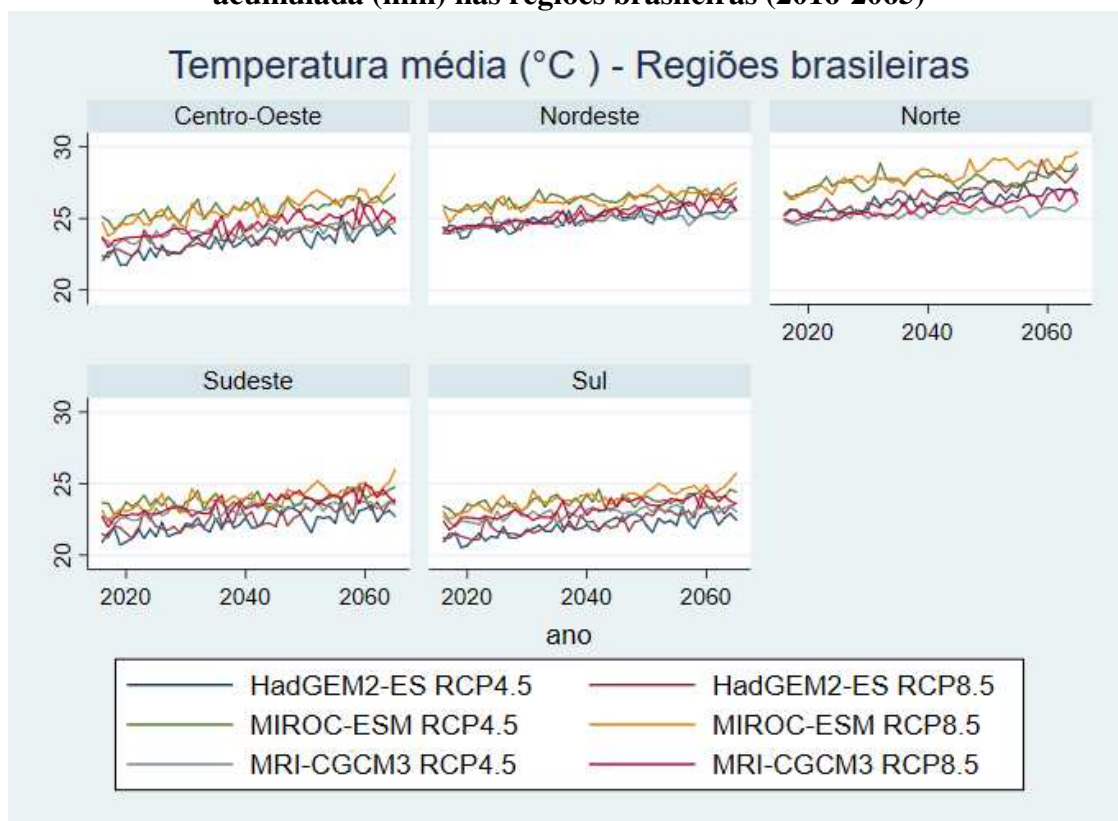
Nota: Nível de significância ***1%, **5%, *10%.

Fonte: Resultados da pesquisa, com dados do IBGE (2006, 2017)

Anexo 2. Estatística descritiva por Regiões Brasileiras por anos 1996, 2006 e 2017

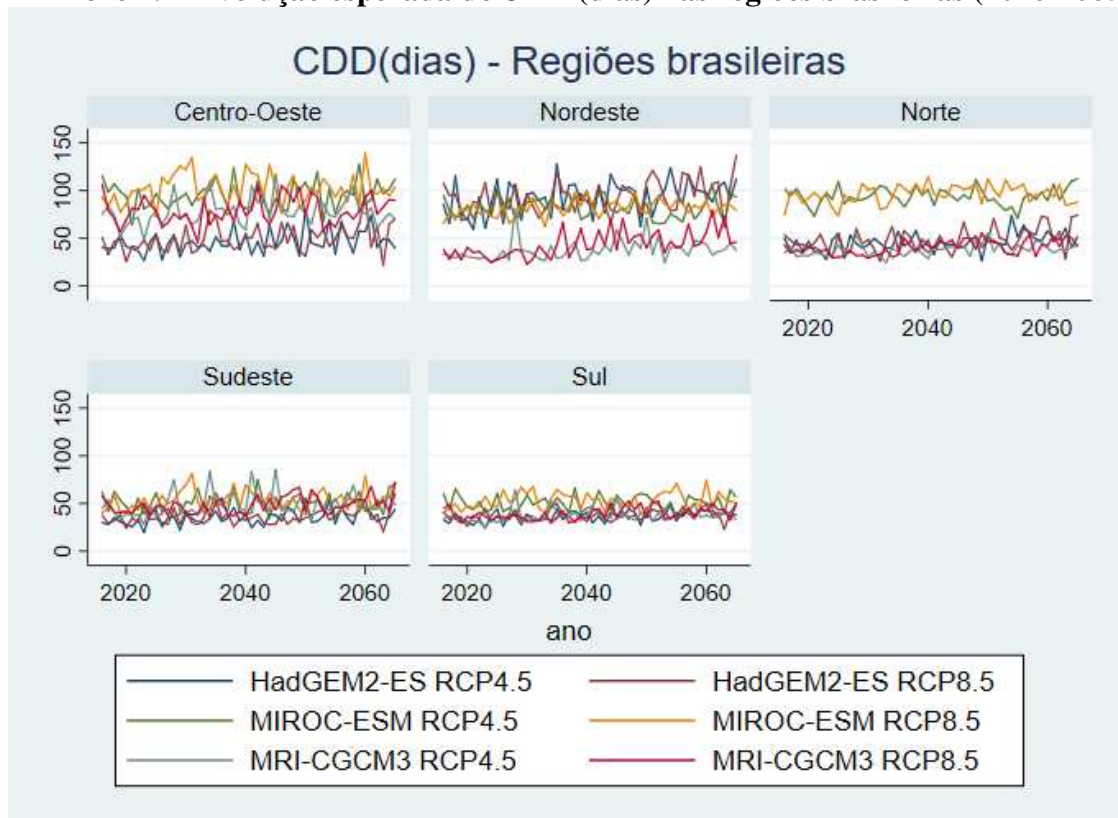
Variáveis	Norte			Nordeste			Sudeste			Sul			Centro-Oeste		
	1996	2006	2017	1996	2006	2017	1996	2006	2017	1996	2006	2017	1996	2006	2017
	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Índice de Simpson	0,64	0,57	0,62	0,70	0,64	0,67	0,68	0,58	0,58	0,72	0,69	0,67	0,62	0,48	0,59
Características socioeconômicas															
Assistência técnica	169,7	425,0	348,1	71,8	155,6	130,8	183,3	201,6	197,5	726,4	726,4	617,2	171,7	372,2	318,8
Condição legal	2059,9	2162,1	2830,9	1130,9	1272,3	1355,9	519,1	564,1	574,5	1208,4	1251,3	1097,7	828,6	1007,2	1090,2
Características agrícolas															
Tamanho do estabelecimento	174,8	136,9	122,5	53,1	41,6	39,7	91,6	77,8	83,1	51,4	47,3	54,3	399,6	295,7	274,2
Irrigação	16,9	67,8	205,5	86,3	106,6	173,9	74,5	81,2	115,5	80,2	75,8	88,3	34,0	56,6	71,6
Características de mercado															
Estabelecimentos com milho	990,2	488,4	488,3	934,3	874,1	726,3	253,3	161,1	127,8	1030,1	775,5	579,4	334,5	167,5	160,8
Características climáticas															
FD_5ma	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,16	0,58	0,11	0,81	0,00	0,00	0,17
Rn1mm_5ma	131,5	125,3	147,1	248,1	235,6	222,9	230,4	232,3	205,2	221,3	227,0	205,1	218,2	223,6	201,8
R20mm_5ma	22,0	20,8	13,4	9,7	9,6	4,3	21,0	18,5	8,4	24,4	22,4	13,8	22,6	22,1	9,6
TX90p_5ma	5,4	12,4	16,3	6,8	8,9	16,8	8,0	10,9	20,5	6,3	8,9	27,7	6,5	11,8	15,1
CDD_5ma	26,2	25,4	34,3	47,0	40,5	48,8	35,0	33,2	37,3	16,3	16,6	30,5	54,9	52,6	53,0
Temperatura anual	27,2	27,7	26,5	25,9	26,2	25,1	22,6	23,0	23,2	20,4	21,0	22,7	25,4	26,0	24,8
Precipitação anual	2245,0	2284,0	2148,1	959,4	997,1	1001,5	1534,2	1421,3	1409,5	1726,3	1614,7	1544,3	1631,4	1605,2	1585,1
Precipitação no inverno	97,0	95,9	92,3	73,2	73,3	60,1	22,0	22,2	43,9	104,0	91,3	96,7	16,9	13,4	39,1
Precipitação no verão	267,1	269,6	250,5	84,0	101,6	104,3	229,0	233,1	206,2	179,2	168,0	173,4	244,9	260,0	234,9
Temperatura no inverno	27,2	27,8	25,9	24,6	24,8	23,4	20,1	20,8	20,9	16,4	17,5	19,8	24,1	24,8	23,1
Temperatura no verão	26,8	27,3	26,7	26,8	27,0	26,5	24,5	24,7	25,2	24,1	24,3	25,3	26,0	26,4	26,0
Variabilidade da temperatura	7,9	7,7	6,3	6,5	6,2	4,5	10,2	9,6	5,9	10,8	10,5	7,0	9,7	10,4	6,5
Variabilidade da precipitação	1,0	1,1	1,7	1,4	1,4	2,0	2,3	2,3	2,6	3,6	3,6	3,1	1,8	1,8	2,5

Anexo 3. Evolução esperada da temperatura média anual (°C) e precipitação acumulada (mm) nas regiões brasileiras (2016-2065)



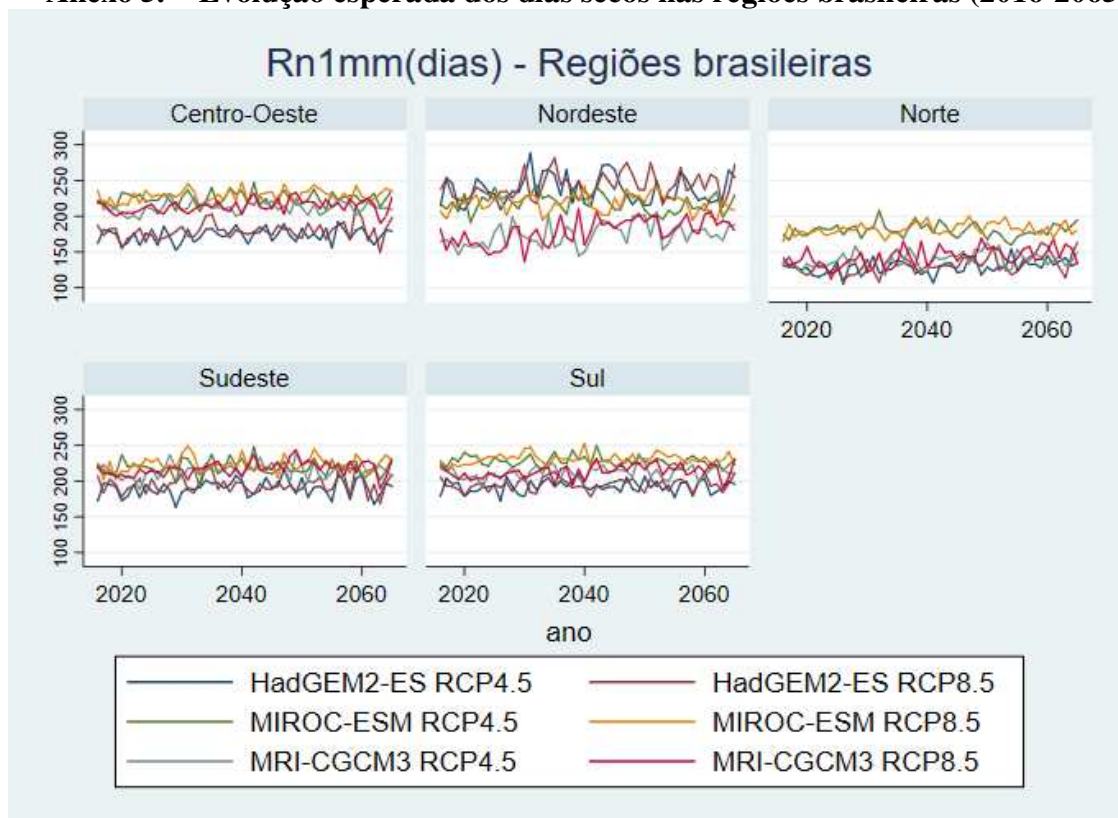
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

Anexo 4. Evolução esperada do CDD (dias) nas regiões brasileiras (2016-2065)



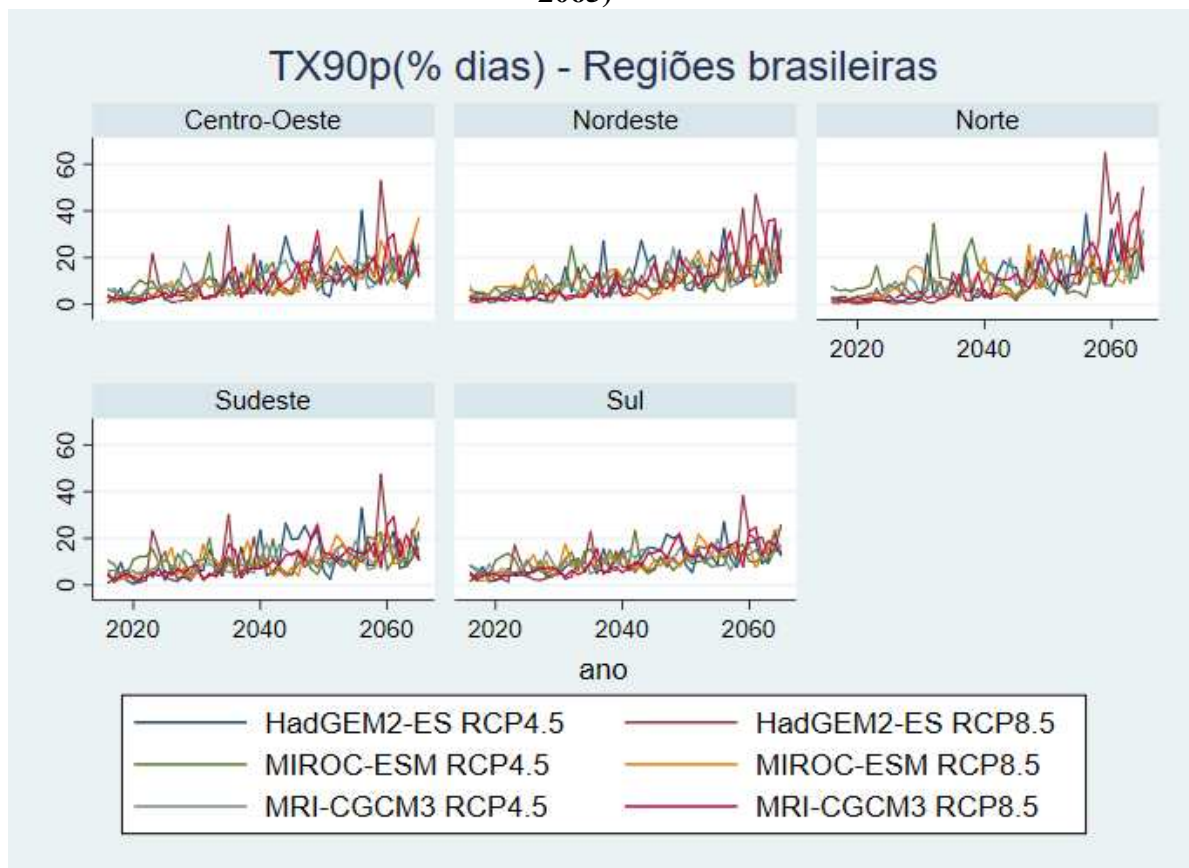
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

Anexo 5. Evolução esperada dos dias secos nas regiões brasileiras (2016-2065)



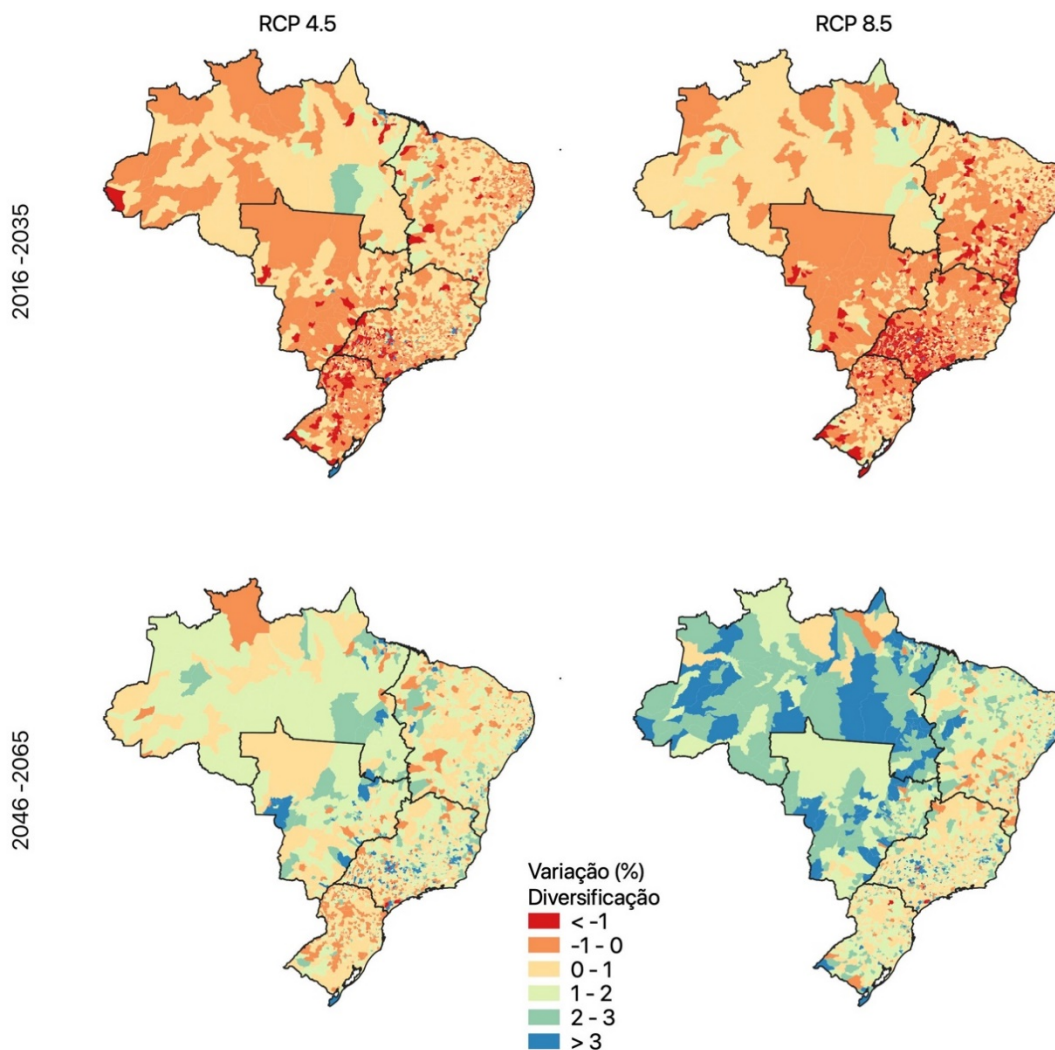
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

Anexo 6. Evolução esperada dos dias quentes nas regiões brasileiras (2016-2065)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model versão 2; MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate; MRI-CGCM3 – Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model versão 3

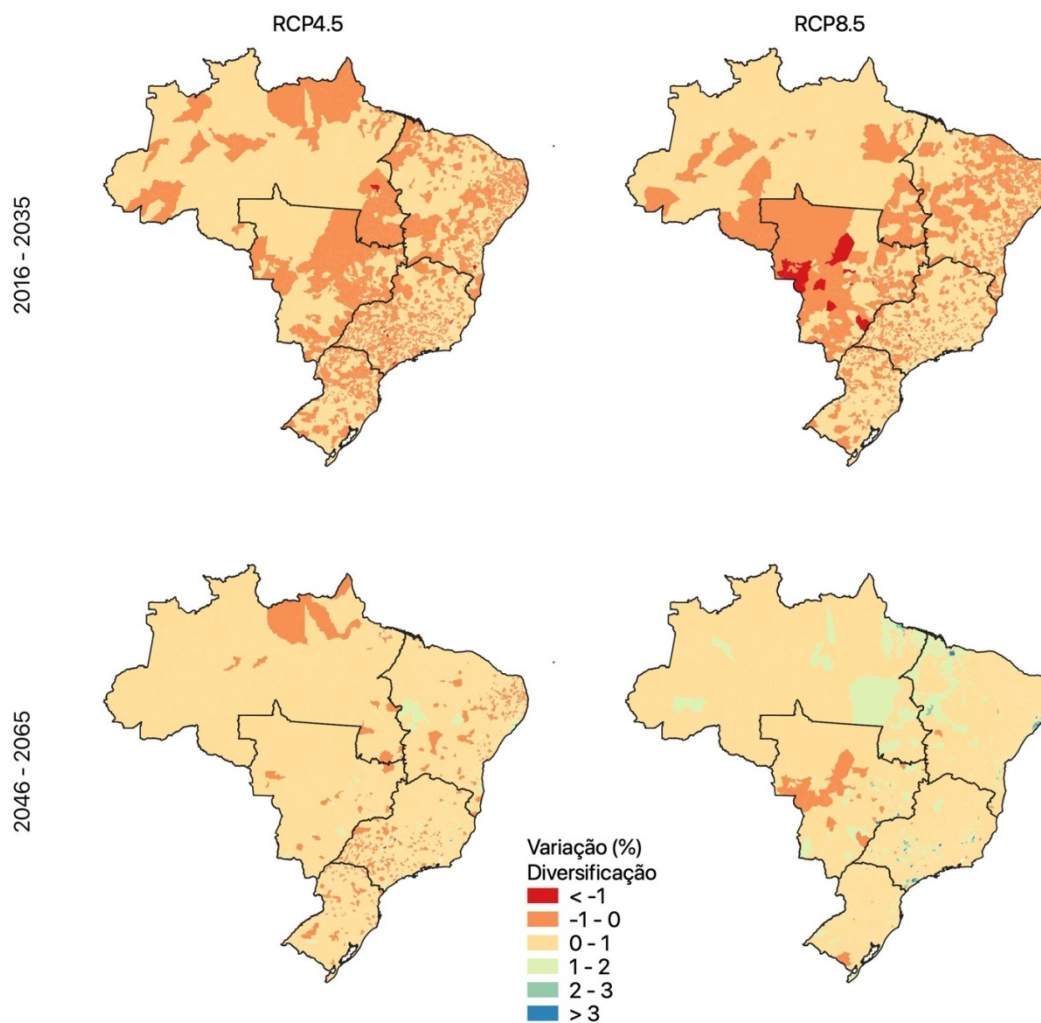
Anexo 7. Variação porcentual da diversificação agropecuária no Brasil sob cenários de clima futuro de médias sazonais



Nota: Os valores foram calculados em média nas três projeções do modelo climático global (HadGEM2-ES; MIROC-ESM e MRI-CGCM3) e em dois cenários de emissão (RCP4.5 e RCP8.5)

Fonte: Resultados da pesquisa

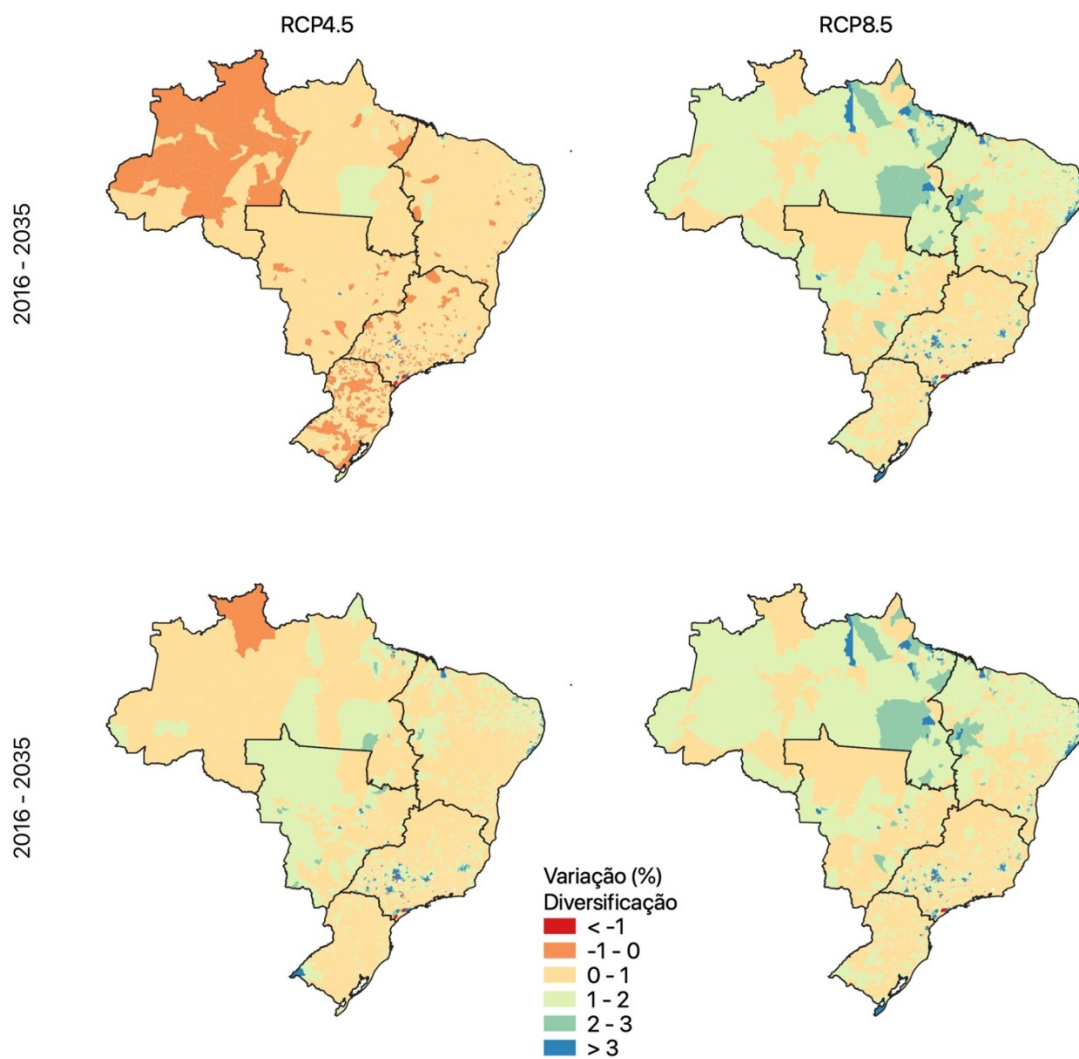
Anexo 8. Variação porcentual da diversificação agropecuária no Brasil sob cenários de clima futuro de *CDD*



Nota: Os valores foram calculados em média nas três projeções do modelo climático global (HadGEM2-ES; MIROC-ESM e MRI-CGCM3) e em dois cenários de emissão (RCP4.5 e RCP8.5)

Fonte: Resultados da pesquisa

Anexo 9. Variação porcentual da diversificação agropecuária no Brasil sob cenários de clima futuro de *Rn1mm*



Nota: Os valores foram calculados em média nas três projeções do modelo climático global (HadGEM2-ES; MIROC-ESM e MRI-CGCM3) e em dois cenários de emissão (RCP4.5 e RCP8.5)

Fonte: Resultados da pesquisa