

Mudanças Climáticas Futuras Afetarão a Produtividade de Milho em Minas Gerais



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
180**

**Mudanças Climáticas Futuras Afetarão a
Produtividade de Milho em Minas Gerais**

Jennifer Alves Camilo
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
Tales Antônio Amaral
Sin Chan Chou
Christoph Hermann Passos Tigges
Marina Luciana Abreu de Melo
Axel Garcia y Garcia

*Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2018*

Esta publicação está disponível no endereço:
<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>

Embrapa Milho e Sorgo
Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
www.embrapa.br/fale-conosco/sa

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Sidney Netto Parentoni

Secretário-Executivo
Elena Charlotte Landau

Membros
Antonio Claudio da Silva Barros, Cynthia Maria Borges Damasceno, Maria Lúcia Ferreira Simeone, Roberto dos Santos Trindade e Rosângela Lacerda de Castro

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Lacerda de Castro (CRB 6/2749)

Tratamento das ilustrações
Tânia Mara Assunção Barbosa

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Tânia Mara Assunção Barbosa

Foto da capa
<https://pixabay.com/pt/users/Lichtmagnet-14706/>

1ª edição
Formato digital (2018)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Nome da unidade catalogadora

Mudanças climáticas futuras afetarão a produtividade de milho em Minas Gerais / Jennifer Alves Camilo ... [et al.]. – Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2018.

29 p. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 180).

1. *Zea mays*. 2. Produção. 3. Modelo de simulação. 4. Modelo matemático. 5. Clima. I. Camilo, Jennifer Alves. II. Andrade, Camilo de Leles Teixeira de. III. Amaral, Tales Antônio. IV. Chou, Sin Chan. V. Tigges, Christoph Hermann Passos. VI. Melo, Marina Luciana Abreu de. VII. Garcia y Garcia, Axel. VIII. Série.

CDD 633.15 (21. ed.)

Sumário

| | |
|------------------------------|----|
| Resumo | 4 |
| Abstract | 6 |
| Introdução..... | 7 |
| Material e Métodos | 8 |
| Resultados e Discussão | 10 |
| Conclusões..... | 23 |
| Referências | 24 |
| Literatura Recomendada | 29 |

Mudanças Climáticas Futuras Afetarão a Produtividade de Milho em Minas Gerais

Jennifer Alves Camilo¹

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade²

Tales Antônio Amaral³

Sin Chan Chou⁴

Christoph Hermann Passos Tigges⁵

Marina Luciana Abreu de Melo⁶

Axel Garcia y Garcia⁷

Resumo – Como a produção agrícola possui alto grau de sensibilidade ao clima, as alterações climáticas afetam o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas. Elementos do clima, como temperatura, radiação solar e precipitação pluvial, têm efeito direto no rendimento do milho, demandando avaliações que permitem o planejamento de estratégias de mitigação. O objetivo da pesquisa foi avaliar os impactos de cenários de mudanças climáticas na produtividade do milho cultivado em regime de sequeiro, na safra, em Minas Gerais. A estratégia de pesquisa consistiu no uso dos modelos de circulação global e regional, associados à modelagem de culturas. Foram utilizados os modelos de circulação global HadGEM2-ES e MIROC5, acoplados ao modelo regional Eta, para gerar dados meteorológicos futuros. Para cada modelo climático, foram simulados dois cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*) de emissão de gases de efeito estufa (GEE): RCP4.5, considerado otimista, no qual a força radiativa total estabiliza-se logo após o ano 2100; RCP8.5, considerado pessimista, no qual a concentração de GEE segue aumentando no século

¹ Graduanda em Eng. Agrônoma, Univ. Fed. de São João del-Rei.

² Pesquisador, PhD Eng. de Irrigação/Modelagem, Embrapa Milho e Sorgo.

³ Biólogo, Dr. em Agronomia.

⁴ Pesquisadora, PhD em Meteorologia, INPE/CPTEC.

⁵ Graduando em Eng. Agrônoma, Univ. Fed. de São João del-Rei.

⁶ Mestranda em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Univ. de São Paulo/ESALQ.

⁷ Professor assistente, Especialista em Sistema de Produção Sustentável, Departamento de Agronomia e Genética de Plantas, Universidade de Minnesota, EUA.

21. Os RCP's foram combinados com três períodos de tempo, 2008-2040, 2041-2070 e 2071-2098, além do período histórico, que foi diferente em cada localidade em decorrência da disponibilidade de dados observados. Os dados meteorológicos, gerados pelos modelos de circulação, foram utilizados como entrada no modelo da cultura do milho CSM-CERES-*Maize* que, por sua vez, foi empregado para avaliar a produtividade da cultura em regime sequeiro, na safra, em seis municípios de Minas Gerais. As saídas da modelagem permitiram estimar a produtividade média esperada frente às alterações climáticas nas localidades estudadas. Os resultados evidenciaram que as mudanças climáticas irão afetar negativamente a produtividade do milho em regime de sequeiro na safra. As menores reduções de produtividade deverão ocorrer nas localidades de Uberaba e Machado, enquanto as maiores reduções de produtividade ocorrerão nos municípios de Araçuaí e Janaúba.

Termos para indexação: aquecimento global; modelagem; DSSAT; *Zea mays* L.

Future Climate Changes will Affect Maize Productivity in the State of Minas Gerais, Brazil

Abstract – As agricultural production has a high degree of climate sensitivity, climate change affects the growth, development and productivity of crops. Elements of the climate, such as temperature, solar radiation and rainfall, have a direct effect on maize yield, requiring assessments that allow the planning of mitigating strategies. The objective of the research was to evaluate the impacts of climate change scenarios on rainfed maize yield in the state of Minas Gerais, Brazil. The research strategy consisted on using the global and regional circulation models associated to crop modeling. The global circulation models HadGEM2-ES and MIROC5, coupled with the Eta regional model, were used to generate future meteorological data. For each climate model, two scenarios (Representative Concentration Pathways) of greenhouse gas emissions (GEE) were simulated: RCP4.5, considered optimistic, in which the total radiative force stabilizes after the year 2100; RCP8.5, considered pessimistic, in which the GHG concentration continues to increase in the 21st century. CPRs were combined with three periods, 2008-2040, 2041-2070 and 2071-2098, in addition to the historical period, which was different in each locality due to the availability of observed data. The meteorological data generated by the circulation models, were used as input to the CSM-CERES-Maize maize crop model, which was used to evaluate the crop yield during the dry season in six Brazilian cities of Minas Gerais. The outputs of the modeling allowed estimating the expected average yield in face of the climatic changes in the studied localities. The results showed that the climatic changes would negatively affect maize yield in the rainy season. The lowest yield reductions should occur in Uberaba and Machado, while the greatest will occur in Araçuaí and Janaúba.

Index terms: global warming, modeling, DSSAT, *Zea mays* L.

Introdução

A produção de grãos é um setor de grande relevância para a economia brasileira, pois supre com matéria-prima importantes cadeias produtivas, além de fazer parte da pauta de exportações. O milho (*Zea mays* L.) ocupa a segunda posição entre os grãos mais produzidos internamente. Com uma produção total de 89,2 milhões de toneladas em aproximadamente 17 milhões de hectares, a produtividade média da cultura é de 5.359 kg ha⁻¹ (Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, 2018). Embora a produtividade do milho tenha aumentado sistematicamente, em razão do melhoramento e do aprimoramento das práticas de cultivo, a produtividade média atual ainda está muito abaixo do potencial genético das cultivares disponíveis no mercado.

A cultura do milho é bastante sensível às oscilações nos elementos do clima, como a precipitação pluviométrica, temperatura do ar e radiação solar. A temperatura do ar regula o seu desenvolvimento, podendo acelerá-lo, com a ocorrência de temperaturas elevadas, ou retardá-lo, sob efeito de temperaturas mais baixas (Magalhães, 2017). Por sua vez, a disponibilidade hídrica é um dos fatores que mais limitam a produção de milho, no regime de sequeiro. A deficiência hídrica afeta praticamente todos os processos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar e, conseqüentemente, diminuindo a fotossíntese (Bergamaschi, 1992; Galon et al., 2011; Bergamaschi; Matzenauer, 2014).

Por causa da dificuldade de se realizarem estudos experimentais sobre os impactos das alterações climáticas na produtividade agrícola, a modelagem é utilizada regularmente. A associação do conhecimento em climatologia com modelagem computacional possibilitou, por exemplo, a elaboração do zoneamento agrícola de risco climático para várias culturas (Chou et al., 2016). A combinação de modelagem de culturas e modelagem climática possibilita, portanto, avaliar a resposta de culturas a possíveis mudanças climáticas futuras, facilitando o prognóstico de seu rendimento (Streck; Alberto, 2006; Campos, 2010).

Modelos de simulação de culturas têm sido amplamente empregados, em diversas regiões do mundo, para avaliar os impactos das alterações climáticas

em culturas como trigo, café, milho, arroz e soja (Rio, 2014; Trnka et al., 2014; Walter et al., 2014; Bragança et al., 2016; Magalhães, 2017).

O objetivo da pesquisa foi avaliar os impactos de cenários de mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho cultivado em regime de sequeiro, em diferentes regiões do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Material e Métodos

O estudo envolveu os municípios de Araçuaí, Janaúba, Machado, Patos de Minas, Sete Lagoas e Uberaba, em Minas Gerais, Brasil. Séries históricas, contendo dados meteorológicos diários, incluindo temperatura mínima e máxima do ar, precipitação e radiação solar, para cada município, foram obtidas da base do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e serviram para fazer o prognóstico de condições climáticas futuras. Valores médios históricos observados, de um período de 33 anos (1981-2013), são apresentados na Tabela 1.

Utilizaram-se os modelos de circulação global, HadGEM2-ES (Collins et al., 2011; Martin et al., 2011) e MIROC5 (Watanabe et al., 2010), acoplados ao modelo regional Eta (Mesinger et al., 2012), para gerar dados climáticos futuros. Cada modelo de circulação global foi empregado para simular dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (GEE), conhecidos como RCP (*Representative Concentration Pathways*) (Allen et al., 2012). O cenário RCP4.5, otimista, considera que a força radiativa total gerada pelos GEE estabiliza-se logo após 2100, enquanto o RCP8.5, pessimista, pressupõe que a concentração de GEE segue aumentando no século 21. Os cenários RCP4.5 e RCP8.5 foram combinados com três períodos de tempo, 2008-2040, 2041-2070 e 2071-2098, além do período histórico, que varia em cada localidade. Como os modelos de circulação global fornecem representações tendenciosas da série temporal, correções foram realizadas de acordo com o procedimento descrito em Teutschbein e Seibert (2012).

Tabela 1. Valores médios anuais de temperatura, de precipitação e classificação climática dos municípios estudados.

| Município | Temperatura Máxima | Temperatura Mínima | Precipitação (mm) | Classificação Climática Köppen- Geiger ¹ |
|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--|
| | (°C) | | | |
| Araçuaí | 31,8 | 19,6 | 757 | Aw |
| Janaúba | 31,4 | 18,9 | 811 | Aw |
| Machado | 27,4 | 14,5 | 1.527 | Cwa |
| Patos de Minas | 28,1 | 16,5 | 1.461 | Aw |
| Sete Lagoas | 27,3 | 15,1 | 1.491 | Cwa |
| Uberaba | 29,4 | 16,8 | 1.660 | Aw |

¹Fonte: Sá Júnior (2009).

A partir das projeções corrigidas dos modelos globais, criou-se um banco de dados com as variáveis meteorológicas, que foram utilizadas como entrada do modelo CSM-CERES-*Maize*, versão 4.6.1.0 (Hoogenboom et al., 2015), do pacote DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (Jones et al., 2003). Considerou-se o genótipo de milho híbrido simples transgênico DKB 390PRO, cujos coeficientes genéticos foram previamente parametrizados com dados de Minas Gerais, Brasil (Andrade et al., 2016). O modelo foi programado para realizar sementeiras semanais, iniciando em 1º de agosto e estendendo-se por 52 semanas, até 24 de julho. Para todos os cenários simulados, admitiu-se o espaçamento de 0,7 m entre linhas e uma população de 68 mil plantas ha⁻¹. A adubação em cada sementeira consistiu em 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio, na forma de ureia; 140 kg ha⁻¹ de fósforo, como superfosfato simples e 80 kg ha⁻¹ de potássio, como cloreto de potássio. Em cobertura, assumiu-se a aplicação de 150 kg ha⁻¹ de nitrogênio, aos 25 dias após sementeira (DAS), e 150 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 70 kg ha⁻¹ de potássio, aos 40 DAS, na forma de sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente (Tigges et al., 2016). Os atributos do perfil do solo representativo do ecossistema do Cerrado Brasileiro, nas profundidades 0-0,05 m, 0,05-0,20 m, 0,20-0,40 m, 0,40-0,70 m e 0,70-1,00 m, também foram utilizados como entrada do modelo (Tabela 2). Avaliaram-se as produtividades simuladas de milho, obtidas nas datas de sementeira que proporcionaram as

maiores produtividades médias, para cada cenário de modelo e concentração de GEE.

Tabela 2. Atributos do solo utilizados como entrada no modelo de crescimento da cultura.

| Profundidade (m) | Ponto de murcha permanente | Capacidade de Campo (m ³ m ⁻³) | Satura- ção | pH em água | Densi- dade do solo (kg m ⁻³) |
|---------------------|----------------------------------|---|----------------|---------------|--|
| 0-0,05 | 0,191 | 0,300 | 0,611 | 6,09 | 910 |
| 0,05-0,20 | 0,249 | 0,362 | 0,551 | 5,95 | 1.050 |
| 0,20-0,40 | 0,234 | 0,359 | 0,583 | 5,93 | 970 |
| 0,40-0,70 | 0,229 | 0,354 | 0,605 | 5,60 | 930 |
| 0,70-1,0 | 0,168 | 0,276 | 0,604 | 5,49 | 910 |

Resultados e Discussão

Os dados prognosticados pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 indicaram aumento médio de temperatura máxima e mínima durante o ciclo da cultura nas regiões de estudo. Apontaram, também, mudança nos padrões médios de precipitação, com predominância de redução dos valores totais mensais (Tabelas 3 e 4). Esses resultados corroboram com estudos conduzidos na América do Sul e no Brasil, que sugerem tendência de aumento da temperatura do ar e incertezas em relação às alterações nos padrões de precipitação (Marengo et al., 2009; Chou et al., 2014; Brasil, 2015; Sánchez et al., 2015).

Tabela 3. Condições meteorológicas médias passadas e futuras durante o ciclo do milho, para o modelo HadGEM2-ES e dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (GEE).

| HADGEM RCP4.5 | | | | | | | |
|----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Municípios | Períodos | Precipitação ¹ | Alteração da Precipitação | Temperatura Máxima ² | Alteração da Temperatura Máxima | Temperatura Mínima ³ | Alteração da Temperatura Mínima |
| | | (mm) | (%) | | | (°C) | |
| Araquá | 1961-2005 | 528 | - | 32,1 | - | 21,2 | - |
| | 2008-2040 | 190 | -64 | 34,7 | +2,7 | 21,8 | +0,6 |
| | 2041-2070 | 220 | -58 | 35,1 | +3,0 | 22,7 | +1,5 |
| | 2071-2098 | 177 | -67 | 35,7 | +3,6 | 22,9 | +1,7 |
| Janaúba | 1977-2005 | 594 | - | 31,4 | - | 20,3 | - |
| | 2008-2040 | 281 | -47 | 34,6 | +3,1 | 21,0 | +0,7 |
| | 2041-2070 | 421 | -71 | 35,0 | +3,6 | 22,2 | +1,9 |
| | 2071-2098 | 367 | -62 | 35,9 | +4,5 | 22,7 | +2,4 |
| Machado | 1965-2005 | 985 | - | 28,5 | - | 17,2 | - |
| | 2008-2040 | 517 | -48 | 31,4 | +2,9 | 18,1 | +0,9 |
| | 2041-2070 | 640 | -35 | 31,6 | +3,1 | 19,0 | +1,7 |
| | 2071-2098 | 527 | -46 | 31,0 | +2,5 | 17,7 | +0,4 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 965 | - | 28,2 | - | 18,1 | - |
| | 2008-2040 | 477 | -51 | 31,6 | +3,4 | 19,8 | +1,7 |
| | 2041-2070 | 586 | -39 | 31,7 | +3,6 | 20,5 | +2,4 |
| | 2071-2098 | 536 | -44 | 32,5 | +4,3 | 20,9 | +2,8 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 570 | - | 28,9 | - | 17,1 | - |
| | 2008-2040 | 378 | -34 | 31,9 | +3,0 | 18,6 | +1,6 |
| | 2041-2070 | 415 | -27 | 32,1 | +3,3 | 19,4 | +2,3 |
| | 2071-2098 | 389 | -32 | 32,8 | +3,9 | 19,8 | +2,7 |
| Uberaba | 1970-2005 | 900 | - | 29,7 | - | 18,3 | - |
| | 2008-2040 | 575 | -36 | 33,4 | +3,7 | 20,6 | +2,3 |
| | 2041-2070 | 676 | -25 | 33,3 | +3,7 | 21,1 | +2,3 |
| | 2071-2098 | 583 | -35 | 33,9 | +4,2 | 21,1 | +2,8 |

Tabela 3 cont. Condições meteorológicas médias passadas e futuras durante o ciclo do milho, para o modelo HadGEM2-ES e dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (GEE).

| HADGEM RCP8.5 | | | | | | | |
|----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Municípios | Períodos | Precipitação ¹ | Alteração da Precipitação | Temperatura Máxima ² | Alteração da Temperatura Máxima | Temperatura Mínima ³ | Alteração da Temperatura Mínima |
| | | (mm) | (%) | (°C) | | | |
| Araçuaí | 1961-2005 | 528 | - | 32,1 | - | 21,2 | - |
| | 2008-2040 | 147 | -72 | 35,2 | +3,1 | 21,7 | +0,5 |
| | 2041-2070 | 217 | -59 | 37,0 | +4,9 | 23,1 | +1,9 |
| | 2071-2098 | 131 | -75 | 38,9 | +6,8 | 24,9 | +3,7 |
| Janaúba | 1977-2005 | 594 | - | 31,4 | - | 20,3 | - |
| | 2008-2040 | 200 | -34 | 35,4 | +4,0 | 20,5 | +0,2 |
| | 2041-2070 | 282 | -47 | 36,8 | +5,4 | 22,6 | +2,3 |
| | 2071-2098 | 212 | -36 | 39,5 | +8,0 | 24,5 | +4,2 |
| Machado | 1965-2005 | 985 | - | 28,5 | - | 17,2 | - |
| | 2008-2040 | 537 | -46 | 31,8 | +3,3 | 18,2 | +0,9 |
| | 2041-2070 | 588 | -40 | 32,6 | +4,1 | 19,4 | +2,1 |
| | 2071-2098 | 358 | -64 | 34,6 | +6,2 | 19,6 | +2,4 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 965 | - | 28,2 | - | 18,1 | - |
| | 2008-2040 | 485 | -50 | 32,2 | +4,0 | 20,1 | +2,0 |
| | 2041-2070 | 586 | -39 | 33,6 | +5,4 | 21,9 | +3,8 |
| | 2071-2098 | 382 | -60 | 36,5 | +8,4 | 23,9 | +5,8 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 570 | - | 28,9 | - | 17,1 | - |
| | 2008-2040 | 319 | -44 | 32,6 | +3,7 | 18,6 | +1,5 |
| | 2041-2070 | 369 | -35 | 33,7 | +4,9 | 20,4 | +3,3 |
| | 2071-2098 | 275 | -52 | 36,5 | +7,7 | 22,1 | +5,0 |
| Uberaba | 1970-2005 | 900 | - | 29,7 | - | 18,3 | - |
| | 2008-2040 | 519 | -42 | 34,0 | +4,3 | 20,7 | +2,3 |
| | 2041-2070 | 689 | -23 | 35,5 | +5,9 | 22,9 | +4,6 |
| | 2071-2098 | 314 | -65 | 37,3 | +7,7 | 23,2 | +4,8 |

¹Precipitação média acumulada no ciclo; ²Temperatura máxima média diária no ciclo; ³Temperatura mínima média diária no ciclo.

Tabela 4. Condições meteorológicas médias passadas e futuras, durante o ciclo do milho, para o modelo MIROC5 e dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (GEE).

| HADGEM RCP4.5 | | | | | | | |
|----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Municípios | Períodos | Precipitação ¹ | Alteração da Precipitação | Temperatura Máxima ² | Alteração da Temperatura Máxima | Temperatura Mínima ³ | Alteração da Temperatura Mínima |
| | | (mm) | (%) | | | (°C) | |
| Araçuaí | 1961-2005 | 522 | - | 31,9 | - | 21,1 | - |
| | 2008-2040 | 433 | -17 | 33,2 | +1,3 | 21,9 | +0,8 |
| | 2041-2070 | 450 | -14 | 34,2 | +2,3 | 22,7 | +1,6 |
| | 2071-2098 | 478 | -9 | 34,2 | +2,3 | 22,9 | +1,8 |
| Janaúba | 1977-2005 | 500 | - | 30,5 | - | 20,1 | - |
| | 2008-2040 | 418 | -16 | 32,2 | +1,7 | 21,1 | +1,1 |
| | 2041-2070 | 485 | -3 | 33,3 | +2,8 | 22,0 | +1,9 |
| | 2071-2098 | 400 | -20 | 33,5 | +3,0 | 22,2 | +2,1 |
| Machado | 1965-2005 | 1.016 | - | 28,6 | - | 17,4 | - |
| | 2008-2040 | 953 | -6 | 29,4 | +0,8 | 18,4 | +1,0 |
| | 2041-2070 | 1.027 | +1 | 30,0 | +1,4 | 19,0 | +1,6 |
| | 2071-2098 | 887 | -13 | 30,6 | +2,1 | 19,5 | +2,1 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 1.057 | - | 28,2 | - | 18,3 | - |
| | 2008-2040 | 842 | -20 | 29,2 | +1,0 | 19,3 | +0,9 |
| | 2041-2070 | 786 | -7 | 30,4 | +2,3 | 20,2 | +1,9 |
| | 2071-2098 | 725 | -8 | 30,6 | +2,4 | 20,1 | +1,7 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 595 | - | 28,9 | - | 17,1 | - |
| | 2008-2040 | 435 | -27 | 30,0 | +1,2 | 18,0 | +0,8 |
| | 2041-2070 | 454 | -24 | 30,6 | +1,7 | 18,6 | +1,5 |
| | 2071-2098 | 414 | -30 | 31,2 | +2,3 | 19,0 | +1,9 |
| Uberaba | 1970-2005 | 794 | - | 29,9 | - | 18,1 | - |
| | 2008-2040 | 873 | +10 | 30,8 | +0,9 | 19,9 | +1,8 |
| | 2041-2070 | 939 | +18 | 31,6 | +1,6 | 20,8 | +2,7 |
| | 2071-2098 | 805 | +1 | 32,2 | +2,3 | 20,9 | +2,8 |

Tabela 4 cont. Condições meteorológicas médias passadas e futuras, durante o ciclo do milho, para o modelo MIROC5 e dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (GEE).

| HADGEM RCP4.5 | | | | | | | |
|----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Municípios | Períodos | Precipitação ¹ | Alteração da Precipitação | Temperatura Máxima ² | Alteração da Temperatura Máxima | Temperatura Mínima ³ | Alteração da Temperatura Mínima |
| | | (mm) | (%) | | | (°C) | |
| Araçuaí | 1961-2005 | 522 | - | 31,9 | - | 21,1 | - |
| | 2008-2040 | 456 | -13 | 33,3 | +1,4 | 22,0 | +0,9 |
| | 2041-2070 | 426 | -18 | 35,0 | +3,1 | 23,3 | +2,1 |
| | 2071-2098 | 377 | -28 | 37,4 | +5,5 | 24,5 | +3,4 |
| Janaúba | 1977-2005 | 500 | - | 30,5 | - | 20,1 | - |
| | 2008-2040 | 400 | -20 | 32,4 | +1,9 | 21,2 | +1,2 |
| | 2041-2070 | 433 | -13 | 34,1 | +3,6 | 22,5 | +2,5 |
| | 2071-2098 | 490 | -2 | 36,1 | +5,6 | 23,9 | +3,8 |
| Machado | 1965-2005 | 1.016 | - | 28,6 | - | 17,4 | - |
| | 2008-2040 | 846 | -17 | 29,4 | +0,9 | 18,3 | +0,9 |
| | 2041-2070 | 971 | -5 | 30,6 | +2,1 | 19,7 | +2,2 |
| | 2071-2098 | 887 | -13 | 31,9 | +3,3 | 20,7 | +3,3 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 1.057 | - | 28,2 | - | 18,3 | - |
| | 2008-2040 | 792 | -25 | 29,5 | +1,4 | 19,4 | +1,1 |
| | 2041-2070 | 806 | +2 | 31,0 | +2,8 | 20,8 | +2,5 |
| | 2071-2098 | 780 | -3 | 32,6 | +4,4 | 22,3 | +3,9 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 595 | - | 28,9 | - | 17,1 | - |
| | 2008-2040 | 435 | -27 | 30,3 | +3,0 | 18,2 | +1,1 |
| | 2041-2070 | 480 | -19 | 31,1 | +3,3 | 19,3 | +1,6 |
| | 2071-2098 | 424 | -29 | 32,8 | +3,9 | 20,5 | +2,3 |
| Uberaba | 1970-2005 | 794 | - | 29,9 | - | 18,1 | - |
| | 2008-2040 | 792 | 0 | 31,1 | +1,1 | 20,0 | +1,9 |
| | 2041-2070 | 834 | +5 | 32,4 | +2,5 | 21,4 | +3,3 |
| | 2071-2098 | 498 | -37 | 33,1 | +3,1 | 20,6 | +2,5 |

¹Precipitação acumulada no ciclo; ²Temperatura máxima média diária no ciclo; ³Temperatura mínima média diária no ciclo.

Conforme as projeções do modelo HadGEM2-ES sob o cenário RCP4.5, a maior tendência de aquecimento ao longo dos anos foi obtida para condições de Janaúba, seguida de Patos de Minas e Uberaba. Nessas localidades, os maiores incrementos na temperatura do ar ocorrerão no período de 2071-2098. Em Janaúba, o modelo prevê um aquecimento médio de 4,5 °C e de 2,4 °C, nas temperaturas máxima e mínima média diária, respectivamente. Na região de Patos de Minas, as projeções indicaram um aquecimento de

4,3 °C, na temperatura máxima e de 2,8 °C, na temperatura mínima. Em Uberaba, são previstos aumentos de até 4,2 °C e 2,8 °C nas temperaturas máxima e mínima média diária, respectivamente. Os maiores incrementos na temperatura do ar foram obtidos para condições em Patos de Minas, seguida de Janaúba, Sete Lagoas e Uberaba, todas previstas para o período 2071-2098. Em Patos de Minas, as projeções indicaram incrementos da ordem de 8,4 °C na temperatura máxima e de 5,8 °C na mínima. Em Janaúba, o aumento da temperatura máxima média diária foi estimada em 8,0 °C e da mínima de 4,2 °C. Em Sete Lagoas, são previstos aumentos de 7,7 °C na temperatura máxima e 5,0 °C na temperatura mínima, enquanto na região de Uberaba o incremento na temperatura máxima e mínima foi estimada em 7,7 °C e 4,8 °C, respectivamente (Tabela 3).

Resultados obtidos com o modelo MIROC5, no cenário RCP4.5, indicam maiores tendências de aquecimento nas regiões de Janaúba e Patos de Minas, no período de 2071-2098. Em Janaúba, o aumento da temperatura máxima e mínima média diária foi estimada em 3,0 °C e 2,1 °C, respectivamente. Já em Patos de Minas, o modelo aponta aumentos de 2,4 °C e 1,7 °C, na temperatura máxima e mínima média diária, respectivamente. No cenário RCP8.5, prevê-se aquecimento maior, na região de Janaúba e Araçuaí, entre os anos de 2071-2098. Em Janaúba, o aumento na temperatura máxima média diária foi estimado em 5,6 °C e na temperatura mínima 3,8 °C, enquanto em Araçuaí, o incremento na temperatura máxima e mínima foi estimado em 5,5 °C e 3,4 °C, respectivamente. Nota-se, portanto, que o modelo HadGEM2-ES prevê cenários muito mais rigorosos de alteração da temperatura que os simulados pelo modelo MIROC5 (Tabelas 3 e 4).

Segundo estudos anteriores, projeções do modelo HadGEM2-ES indicaram alterações na temperatura do ar superiores a 6 °C para o cenário RCP8.5 em todo o Brasil, enquanto para o cenário RCP4.5 as alterações foram em torno 4,5 °C. Já o modelo MIROC5 indicou acréscimos na temperatura do ar em torno de 4,5 °C, para o RCP 8.5, e em torno de 2 °C, para o RCP 4.5 (Brasil, 2015).

Bender (2017), simulando projeções futuras do clima para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, em 31 regiões distribuídas ao longo de todo território brasileiro, também reportou tendências de aquecimento na temperatura média do ar. Sob cenário de emissão RCP4.5, o aumento na

temperatura máxima média diária poderia chegar a 2,52 °C, enquanto a elevação na temperatura mínima média diária atingiria 2,25 °C. Já no cenário RCP8.5, a elevação na temperatura máxima média diária seria de 4,61 °C e a temperatura mínima média diária atingiria 4,35 °C.

Quanto à precipitação pluvial, os dois modelos indicaram que, em algumas localidades, houve aumento no volume de precipitação durante o ciclo da cultura do milho, quando comparado com o período histórico. No entanto, predominou-se a redução das chuvas. As projeções do modelo HadGEM2-ES, no cenário RCP4.5, indicaram reduções na precipitação nas regiões de Janaúba, Araçuaí e Patos de Minas; 71% no período 2041-2070, 67% no período 2071-2098 e 51% no período 2008-2040, respectivamente. As projeções no cenário RCP8.5 indicaram reduções na precipitação nas regiões de Araçuaí, Uberaba e Machado da ordem de 75%, 65% e 64%, respectivamente, todas para o período de 2071-2098.

As simulações de clima futuro do modelo MIROC5/RCP4.5 indicam que as maiores reduções na precipitação poderiam ocorrer nas regiões de Sete Lagoas, Janaúba e Patos de Minas. Em Sete Lagoas e Janaúba, a diminuição na precipitação atingiria 30% e 20%, respectivamente, no período 2071-2098, enquanto na região de Patos de Minas prevê-se redução de 20% no período 2008-2040. Resultados do modelo MIROC5/RCP8.5 indicam uma maior redução na precipitação, em comparação com a média histórica, nas regiões de Uberaba, Sete Lagoas e Araçuaí de 37%, 29% e 28% no período 2071-2098, respectivamente.

Diferentemente do que foi constatado nesta pesquisa, que indicou reduções consideráveis no volume de chuvas, Silveira et al. (2016), trabalhando com diversos modelos climáticos globais e cenários RCP4.5 e RCP8.5, porém com foco na região da bacia hidrográfica do rio São Francisco, reportaram precipitação futura variando de -20% a 20% em períodos de 30 anos.

Evidencia-se que a elevação da temperatura máxima e mínima durante o ciclo da cultura acarretará consideráveis reduções de produtividade (Tabelas 5 e 6). Esses resultados concordam com os encontrados por Magalhães (2017), que associou a redução no rendimento do milho ao encurtamento do ciclo da cultura.

Tabela 5. Melhor data de semeadura, duração do ciclo fenológico, produtividade de grãos e alteração do ciclo fenológico e da produtividade, em relação ao período histórico, para o modelo HadGEM2-ES e dois cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

| Municípios | Períodos | HADGEM RCP4.5 | | | Produtividade Média ² (kg ha ⁻¹) | Alteração na Produtividade ³ (%) |
|----------------|-----------|--------------------------------|--------|--------------------|--|--|
| | | Data da Semeadura ¹ | Ciclo | Alteração no Ciclo | | |
| | | (dia/mês) | (dias) | (dias) | | |
| Araçuaí | 1961-2005 | 17/10 | 116 | - | 4.337 | - |
| | 2008-2040 | 16/01 | 106 | -10 | 2.102 | -51,5 |
| | 2041-2070 | 23/01 | 107 | -9 | 2.191 | -49,5 |
| | 2071-2098 | 30/01 | 108 | -8 | 1.578 | -63,6 |
| Janaúba | 1977-2005 | 24/10 | 119 | - | 4.581 | - |
| | 2008-2040 | 19/12 | 106 | -13 | 2.173 | -52,6 |
| | 2041-2070 | 05/12 | 107 | -12 | 2.375 | -48,2 |
| | 2071-2098 | 14/11 | 109 | -10 | 1.568 | -65,8 |
| Machado | 1965-2005 | 05/12 | 142 | - | 7.544 | - |
| | 2008-2040 | 02/01 | 125 | -17 | 5.461 | -27,6 |
| | 2041-2070 | 02/01 | 125 | -17 | 5.511 | -26,9 |
| | 2071-2098 | 30/01 | 139 | -3 | 5.485 | -27,3 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 05/12 | 140 | - | 7.433 | - |
| | 2008-2040 | 26/12 | 118 | -22 | 4.813 | -35,2 |
| | 2041-2070 | 02/01 | 120 | -20 | 5.070 | -31,8 |
| | 2071-2098 | 09/01 | 120 | -20 | 4.524 | -39,1 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 10/10 | 134 | - | 6.650 | - |
| | 2008-2040 | 14/11 | 116 | -18 | 4.443 | -33,2 |
| | 2041-2070 | 19/12 | 116 | -18 | 4.614 | -30,6 |
| | 2071-2098 | 09/01 | 117 | -17 | 4.157 | -37,5 |
| Uberaba | 1970-2005 | 26/12 | 134 | - | 8.000 | - |
| | 2008-2040 | 02/01 | 113 | -21 | 5.924 | -26,0 |
| | 2041-2070 | 09/01 | 114 | -20 | 5.591 | -30,1 |
| | 2071-2098 | 23/01 | 117 | -13 | 5.297 | -33,8 |

Tabela 5 cont. Melhor data de semeadura, duração do ciclo fenológico, produtividade de grãos e alteração do ciclo fenológico e da produtividade, em relação ao período histórico, para o modelo HadGEM2-ES e dois cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

| Municípios | Períodos | HADGEM RCP8.5 | | | Produtividade Média ² (kg ha ⁻¹) | Alteração na Produtividade ³ (%) |
|----------------|-----------|--------------------------------|-------|--------------------|--|--|
| | | Data da Semeadura ¹ | Ciclo | Alteração no Ciclo | | |
| | | (dia/mês) | | (dias) | | |
| Araquai | 1961-2005 | 17/10 | 116 | - | 4.337 | - |
| | 2008-2040 | 30/01 | 103 | -13 | 1.596 | -63,2 |
| | 2041-2070 | 05/12 | 101 | -15 | 1.428 | -67,1 |
| | 2071-2098 | 23/01 | 103 | -13 | 660 | -84,8 |
| Janaúba | 1977-2005 | 24/10 | 119 | - | 4.581 | - |
| | 2008-2040 | 05/12 | 102 | -17 | 1.458 | -68,2 |
| | 2041-2070 | 05/12 | 102 | -17 | 1.650 | -64,0 |
| | 2071-2098 | 19/12 | 101 | -18 | 523 | -88,6 |
| Machado | 1965-2005 | 05/12 | 142 | - | 7.544 | - |
| | 2008-2040 | 09/01 | 120 | -22 | 4.901 | -35,0 |
| | 2041-2070 | 16/01 | 121 | -21 | 5.029 | -33,3 |
| | 2071-2098 | 13/02 | 129 | -13 | 2.333 | -69,1 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 05/12 | 140 | - | 7.433 | - |
| | 2008-2040 | 28/11 | 110 | -30 | 4.262 | -42,7 |
| | 2041-2070 | 19/12 | 111 | -29 | 4.438 | -40,3 |
| | 2071-2098 | 09/01 | 111 | -29 | 1.875 | -74,8 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 10/10 | 134 | - | 6.650 | - |
| | 2008-2040 | 23/01 | 111 | -23 | 3.676 | -44,7 |
| | 2041-2070 | 16/01 | 111 | -23 | 3.954 | -40,5 |
| | 2071-2098 | 16/01 | 110 | -24 | 1.954 | -70,6 |
| Uberaba | 1970-2005 | 26/12 | 134 | - | 8.000 | - |
| | 2008-2040 | 16/01 | 105 | -29 | 5.251 | -34,4 |
| | 2041-2070 | 19/12 | 104 | -30 | 4.465 | -44,2 |
| | 2071-2098 | 20/02 | 113 | -21 | 1.867 | -76,7 |

¹Data de semeadura que permitiu o maior rendimento médio; ²Rendimento médio da melhor data de semeadura; ³Varição no rendimento médio em relação ao rendimento médio do período histórico.

Tabela 6. Melhor data de semeadura, duração do ciclo fenológico, produtividade de grãos e alteração do ciclo fenológico e da produtividade, em relação ao período histórico, para o modelo MIROC5 e dois cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

| Municípios | Períodos | MIROC RCP4.5 | | | Produtividade Média ² (kg ha ⁻¹) | Alteração na Produtividade ³ (%) |
|----------------|-----------|---|-------|------------------------------|--|--|
| | | Data da semeadura ¹ (dia/mês) | Ciclo | Alteração no Ciclo (dias) | | |
| Araçuaí | 1961-2005 | 10/10 | 116 | - | 4.642 | - |
| | 2008-2040 | 24/10 | 109 | -7 | 3.821 | -17,7 |
| | 2041-2070 | 10/10 | 109 | -7 | 3.613 | -22,2 |
| | 2071-2098 | 24/10 | 109 | -7 | 3.412 | -26,5 |
| Janaúba | 1977-2005 | 17/10 | 121 | - | 4.576 | - |
| | 2008-2040 | 07/11 | 112 | -9 | 4.339 | -5,2 |
| | 2041-2070 | 28/11 | 111 | -10 | 4.049 | -11,5 |
| | 2071-2098 | 24/10 | 112 | -9 | 4.203 | -8,2 |
| Machado | 1965-2005 | 28/11 | 140 | - | 7.726 | - |
| | 2008-2040 | 07/11 | 129 | -11 | 7.109 | -8,0 |
| | 2041-2070 | 17/10 | 130 | -10 | 6.795 | -12,1 |
| | 2071-2098 | 14/11 | 129 | -11 | 6.622 | -14,3 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 31/10 | 136 | - | 7.373 | - |
| | 2008-2040 | 31/10 | 126 | -10 | 6.834 | -7,3 |
| | 2041-2070 | 03/10 | 126 | -10 | 6.674 | -9,5 |
| | 2071-2098 | 05/12 | 127 | -9 | 6.142 | -16,7 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 03/10 | 135 | - | 7.533 | - |
| | 2008-2040 | 24/10 | 124 | -11 | 6.950 | -7,7 |
| | 2041-2070 | 07/11 | 124 | -11 | 6.850 | -9,1 |
| | 2071-2098 | 31/10 | 123 | -12 | 6.133 | -18,6 |
| Uberaba | 1970-2005 | 05/09 | 131 | - | 8.182 | - |
| | 2008-2040 | 05/12 | 120 | -11 | 7.328 | -10,4 |
| | 2041-2070 | 24/10 | 120 | -11 | 7.029 | -14,1 |
| | 2071-2098 | 05/12 | 120 | -11 | 6.591 | -19,4 |

Tabela 6 cont. Melhor data de semeadura, duração do ciclo fenológico, produtividade de grãos e alteração do ciclo fenológico e da produtividade, em relação ao período histórico, para o modelo MIROC5 e dois cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

| Municípios | Períodos | MIROC RCP4.5 | | | Produtividade Média ² (kg ha ⁻¹) | Alteração na Produtividade ³ (%) |
|----------------|-----------|---|-------|------------------------------|--|--|
| | | Data da semeadura ¹ (dia/mês) | Ciclo | Alteração no Ciclo (dias) | | |
| Araçuaí | 1961-2005 | 10/10 | 116 | - | 4.642 | - |
| | 2008-2040 | 17/10 | 107 | -9 | 3.955 | -14,8 |
| | 2041-2070 | 10/10 | 107 | -9 | 3.126 | -32,7 |
| | 2071-2098 | 17/10 | 107 | -9 | 1.769 | -61,9 |
| Janaúba | 1977-2005 | 17/10 | 121 | - | 4.576 | - |
| | 2008-2040 | 31/10 | 109 | -12 | 4.351 | -4,9 |
| | 2041-2070 | 28/11 | 108 | -13 | 3.355 | -26,7 |
| | 2071-2098 | 28/11 | 108 | -13 | 2.335 | -49,0 |
| Machado | 1965-2005 | 28/11 | 140 | - | 7.726 | - |
| | 2008-2040 | 17/10 | 125 | -15 | 6.981 | -9,6 |
| | 2041-2070 | 31/10 | 125 | -15 | 6.447 | -16,6 |
| | 2071-2098 | 05/12 | 126 | -14 | 6.032 | -21,9 |
| Patos de Minas | 1965-2005 | 31/10 | 136 | - | 7.373 | - |
| | 2008-2040 | 24/10 | 121 | -15 | 6.755 | -8,4 |
| | 2041-2070 | 24/10 | 121 | -15 | 6.408 | -13,1 |
| | 2071-2098 | 07/11 | 122 | -14 | 5.455 | -26,0 |
| Sete Lagoas | 1964-2004 | 03/10 | 135 | - | 7.533 | - |
| | 2008-2040 | 17/10 | 119 | -16 | 6.897 | -8,4 |
| | 2041-2070 | 24/10 | 119 | -16 | 6.618 | -12,1 |
| | 2071-2098 | 31/10 | 120 | -15 | 5.317 | -29,4 |
| Uberaba | 1970-2005 | 05/09 | 131 | - | 8.182 | - |
| | 2008-2040 | 17/10 | 115 | -16 | 7.075 | -13,5 |
| | 2041-2070 | 24/10 | 115 | -16 | 6.394 | -21,9 |
| | 2071-2098 | 30/01 | 123 | -8 | 5.510 | -32,7 |

¹Data de semeadura que permitiu o maior rendimento médio; ²Rendimento médio da melhor data de semeadura;

³Varição no rendimento médio em relação ao rendimento médio do período histórico.

Conforme as projeções do modelo HadGEM2-ES/RCP4.5, a partir da data de semeadura, notou-se que nas regiões de Janaúba e Araçuaí, onde os modelos preveem maiores quedas na produtividade, dentre os cenários simulados, o encurtamento do ciclo, em comparação ao período histórico, foi de 10 e 8 dias, respectivamente. No cenário RCP8.5, a redução foi de 18 dias, na região de Janaúba, e de 13 dias, na região de Araçuaí. Considerando as projeções do modelo MIROC5/RCP4.5, em Janaúba e Araçuaí, o ciclo da

cultura do milho foi reduzido de 10 e 7 dias, respectivamente. Simulações com o MIROC5/RCP8.5, indicaram redução de 13 dias no ciclo da cultura na região de Janaúba e de 9 dias na região de Araçuaí.

Com a elevação das médias diárias de temperatura, o ciclo de desenvolvimento do milho tendeu a encurtar, pelo aumento de temperatura do ar. Quanto mais curta for a fase de crescimento e desenvolvimento da cultura, menor é a capacidade da planta em acumular e translocar fotoassimilados ao grão, reduzindo, assim, a produtividade (Cruz et al., 2011).

Nossos resultados corroboram com os encontrados por Fenner et al. (2014) que, avaliando a soma térmica no desenvolvimento da cultura do milho em três municípios do Mato Grosso, constataram que, com o aumento da temperatura média do ar, ocorre o encurtamento das fases fenológicas e a redução do ciclo total da cultura. Adicionalmente, Tripathy et al. (2009), realizando um estudo numérico aplicado às culturas de trigo, arroz, milho e milheto, na Índia, evidenciaram esse mesmo efeito. De acordo com os resultados obtidos por esses autores, o milho foi a cultura que, dentre as analisadas, apresentou maior sensibilidade, com redução na duração do ciclo de 8 a 25 dias, o que implicou queda na produtividade.

Além de reduzir o ciclo da cultura, a elevação da temperatura também contribui diretamente na redução da taxa fotossintética líquida em função do aumento da respiração, o que afeta a produção. Temperaturas noturnas elevadas implicam alto consumo energético, por causa do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados e promovendo uma redução significativa no rendimento da cultura (Fancelli, 2000).

A redução na produtividade do milho nos diferentes cenários de mudanças climáticas também pode ser atribuída às condições hídricas do solo. De acordo com os cenários gerados pelos dois modelos de circulação global, no futuro há tendência de restrições hídricas para a produção de milho, o que resultará em queda na produtividade. Santos et al. (2011) encontraram efeitos negativos sobre a produtividade da cultura do milho ao se avaliar o efeito da seca em cenários de mudanças climáticas para Minas Gerais. De acordo com Sans e Santana (2002), o requerimento hídrico do milho varia de 500 a 800 mm. Em cultivos sob condições de sequeiro, a reposição da água no solo é totalmente dependente da precipitação pluvial. Nas regiões onde os valores de precipitação acumulada estão abaixo do requerido pela cultura

ocorrerá estresse hídrico (Amudha et al., 2011). O estresse hídrico afeta todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a taxa fotossintética, por causa de diminuição da área foliar, fechamento dos estômatos e redução da evapotranspiração da cultura, além de interferir em vários outros processos fisiológicos, ocasionando queda na produtividade (Bergamaschi, 1992; Floss, 2011).

Embora algumas regiões estudadas registrassem totais de precipitação acima dos 500 mm, houve decréscimo na produtividade futura. Essa queda no rendimento se deve ao efeito da má distribuição da precipitação ao longo do ciclo da cultura, causando estresse hídrico nas fases fenológicas do milho consideradas críticas quanto à necessidade de água. Alves et al. (2011), avaliando os fatores meteorológicos que afetam a produtividade do milho, observaram que há estreita relação entre a quantidade de precipitação e o rendimento do milho de sequeiro, e que, sob condições ótimas de disponibilidade de água, os fatores climáticos que mais influenciam na produtividade da cultura são a temperatura e a radiação solar.

De modo geral, em comparação com o período histórico, todas as produtividades simuladas indicaram menor produtividade nos cenários futuros, mesmo utilizando as melhores datas de semeadura. Os menores valores de produtividade simulada por ambos modelos na melhor data de semeadura indicam maiores quedas nas regiões de Janaúba e Araçuaí. Com o modelo HadGEM2-ES, no período 2071-2098, espera-se produtividade de 1.568 kg ha⁻¹, no cenário RCP4.5 e de 523 kg ha⁻¹, no RCP8.5 na região de Janaúba. Em Araçuaí, no mesmo período, espera-se produtividade de 1.578 kg ha⁻¹ e 660 kg ha⁻¹, no RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente.

De acordo com as projeções do modelo MIROC5/RCP4.5, espera-se produtividade de 3.412 kg ha⁻¹, no período 2071-2098 em Aracuaí e de 4049 kg ha⁻¹ no período 2041-2070 em Janaúba. Já no cenário MIROC5/RCP8.5, a produtividade esperada em Araçuaí e Janaúba é de 1.769 kg ha⁻¹ e 2.335 kg ha⁻¹, respectivamente, ambas registradas no período 2071-2098. Segundo dados do IBGE (2016), a produtividade de milho em Araçuaí e Janaúba é de 1.200 e 2.563 kg ha⁻¹, respectivamente, valores baixos mesmo nas condições atuais de clima, principalmente em razão de fatores climáticos adversos, economia agrícola centrada na pecuária extensiva e na agricultura de subsistência e sistemas de produção com baixa utilização de insumos e o

uso de práticas agrícolas bastante rudimentares (Garcia et al., 2006; Bastos; Gomes, 2011).

Os maiores valores de produtividade simulada, em ambos os modelos, foram registrados em Uberaba e Machado. Em Uberaba, 5.924 kg ha⁻¹ no cenário HadGEM2-ES /RCP4.5 e 5.251 kg ha⁻¹, no cenário HadGEM2-ES/RCP8.5, ambas no período 2008-2040. Em Machado, cenário RCP4.5, a produtividade foi de 5.485 kg ha⁻¹, entre os anos de 2071-2098 e no RCP8.5, 5.029 kg ha⁻¹, no período entre 2041-2070.

As projeções do modelo MIROC5 indicam que em Uberaba espera-se produtividade de 7.328 kg ha⁻¹, no cenário RCP4.5, e de 7.075 kg ha⁻¹, no RCP8.5, ambas no período 2008-2040. Em Machado, a produtividade esperada é de 7.109 kg ha⁻¹ e 6.981 kg ha⁻¹, no RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, no período 2008-2040. De acordo com o IBGE (2016), produtividades de grãos de milho são estimadas em 5.744 kg ha⁻¹ em Uberaba e até 5.891 kg ha⁻¹ em Machado. Tigges et al. (2016), utilizando o modelo CSM-CERES-Maize para estabelecer o melhor período de semeadura de milho em plantios de sequeiro e irrigado em 19 municípios de Minas Gerais, verificaram produtividades média máxima de 5.689, 8.382, 8.989, 8.430 e 9.300 kg ha⁻¹, para o regime de sequeiro, nas regiões de Janaúba, Machado, Patos de Minas, Sete Lagoas e Uberaba, respectivamente

Conclusões

Os dados prognosticados pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 indicam aumentos médios de temperatura máxima e mínima do ar em regiões de Minas Gerais, nos dois cenários de emissão de gases de efeito estufa. Os modelos também indicaram mudanças nos padrões médios de precipitação com predominância de redução dos totais mensais. O modelo HadGEM2-ES prevê cenários mais rigorosos de alteração da temperatura e da precipitação que os simulados pelo modelo MIROC5.

Prevê-se de 5% a 26% de redução na produtividade da cultura do milho na safra de verão no cenário otimista de emissão de gases de efeito estufa prognosticado pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5. As simulações indicaram que as maiores quedas de produtividade deverão ocorrer em regiões secas e quentes. As reduções na produtividade ocorrerão por causa

do encurtamento do ciclo da cultura, provocado pelo aumento da temperatura do ar e também como consequência do aumento do déficit hídrico.

Referências

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] GRÃOS: safra 2017/18: nono levantamento. Brasília, DF: Conab, v. 5, n. 9, jun. 2018. 174 p.

ALLEN, S. K.; BARROS, V.; BURTON, I.; CAMPBELL-LENDRUM, D.; CARDONA, O.-D.; CUTTER, S. L.; WILBANKS, T. J. Summary for policymakers. In: FIELD, C. B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; DAHE, Q.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G. K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (Ed.). **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York: Cambridge University Press, 2012. p. 3-21.

ALVES, M. E. B.; ANDRADE, C. de L. T. de; RUIZ-CÁRDENAS, R.; AMARAL, T, L.; SILVA, D. F. Identificação e quantificação do efeito de fatores ambientais na produtividade da cultura do milho na região de Janaúba, MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 3, p. 188-201, 2011.

AMUDHA, J.; BALASUBRAMANI, G. Recent molecular advances to combat abiotic stress tolerance in crop plants. **Biotechnology and Molecular Biology Reviews**, v. 6, n. 2, p. 31-58, 2011.

ANDRADE, C. de L. T. de; SILVA, P. P. G. da; MAGALHÃES, B. G.; PAIXÃO, J. S.; MELO, B. F. de; TIGGES, C. H. Parametrização do modelo CSM-CERES-Maize para uma cultivar de alta produtividade. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar: anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.

BASTOS, S. Q. A.; GOMES, J. E. Dinâmica da agricultura no Estado de Minas Gerais. Análise estrutural-diferencial para o período 1994-2008. **Ruris**, v. 5, n. 2, p. 45-76, 2011.

BENDER, F. D. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura do milho e estratégias de manejo para minimização de perdas**

em diferentes regiões brasileiras. 2017. 183 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 25-32.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. O milho e o clima. Porto Alegre: Emater, 2014. 85 p.

BRAGANÇA, R.; SANTOS, A. R.; SOUZA, E. F.; CARVALHO, A. J. C.; LUPPI, A. S. L.; SILVA, R. G. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimatológico do café arábica no Espírito Santo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 77-82, 2016.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima: resumo executivo.** Brasília, DF, 2015.

CAMPOS, J. H. B. C. **Impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica.** 2010. 93 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; **GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O’CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S.** Development and evaluation of an Earth-System Model-HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014.

CHOU, C. S.; SILVA, A. J. da; LYRA, A. de A.; MOURÃO, C. F.; DERECZYNSKI, C. P.; RODRIGUES, D. C.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; CHAGAS, G. S.;

SUEIRO, G.; PILLOTO, I.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. da S. Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul. In: TEIXEIRA, B. S.; ORSINI, J. A. M.; CRUZ, M. R. da (Ed.). **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. p. 49-90.

CRUZ, J. C.; MAGALHÃES, P. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; MOREIRA, J. A. A. (Ed.). **Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

FANCELLI, A. L. Fisiologia, nutrição e adubação do milho para alto rendimento. In: SIMPÓSIO DE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 1., 2000, Piracicaba **Anais... Piracicaba: POTAFOS, 2000**.

FENNER, W.; DALLACORT, R.; MOREIRA, P. S. P.; QUEIROZ, T. M. de; FERREIRA, F. D. S.; BENTO, T. S.; CARVALHO, M. A. C. de. Índices de satisfação de necessidade de água para o milho segunda safra em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, p. 109-121, 2014.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê**. 5. ed. Passo Fundo: UPF, 2011. 734 p.

GALON, L.; TIRONI, S. P.; ROCHA, A. A.; SOARES, E. R.; CONCEIÇÃO, G.; ALBERTO, C. M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 4, n. 3, p. 18-38, 2011.

GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J.; DUARTE, J. O. Importância do milho em Minas Gerais. cultivo do milho no sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, v. 27, n. 233, p. 7-12, 2006.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. I.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KOO, J.; SHELIA, V.; TSUJI, G. Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT): version 4.6**. Washington: DSSAT Foundation, 2015. Disponível em: <<http://dssat.net>>. Acesso em: 10 out. 2018.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**: tabela 839 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida e rendimento médio de milho, 1ª e 2ª safras. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/839#resultado>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3, p. 235-265, 2003.

MAGALHÃES, B. G. **Simulação de estratégias de manejo da cultura do milho para mitigar efeitos de mudanças climáticas**. 2017. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, 2017.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241-2255, 2009.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S. C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; McDONALD, R. E.; MCLAREN, A. J.; O'CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M. et al. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, 723-757, 2011.

MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.

RIO, A. **Aquecimento global: impactos na produtividade da cultura da soja e ações estratégicas de manejo para sua minimização em diferentes regiões produtoras do sul do Brasil**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SÁ JÚNIOR, A. de. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais**. 2009. 113 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. **Cultivo do milho**: clima e solo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 38).

SANTOS, R. S. D.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; OLIVEIRA, R. A. D.; JUSTINO, F. B. Avaliação da relação seca/produzitividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 313321, 2011.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A. R. C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; ROCHA, R. P. da; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; CASTRO, M. de; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twentyfirst century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v. 45, p. 2193-2212, 2015.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na Bacia do Rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416-428, abr./jun. 2016.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.9, p. 1351-1359, set. 2006.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456/457, p. 12-29, 2012.

TIGGES, C. H. P.; ANDRADE, C. de L. T. de; MELO, B. F.; AMARAL, T. A. **Épocas de semeadura de milho em plantios de sequeiro e irrigado em Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 20 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 225).

TRIPATHY, R.; RAY, S. S.; SINGH, A. K. Analysing the impact of rising temperature and CO₂ on growth and yield of major cereals crops using

simulation model. In: WORKSHOP ON IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE, 2008, Ahmedabad. **Proceedings...** Ahmedabad: ISRO and Indian Society of Remote Sensing, 2009.

TRNKA, M.; ROTTER, R. P.; RUIZ-RAMOS, M.; KERSEBAUM, K. C.; OLESEN, J. E.; ZALUD, Z.; SEMENOV, M. A. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 637-643, 2014.

WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; FERRAZ, S. E. T.; CERA, J. C. Mudanças climáticas e seus efeitos no rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 12, p. 915-924, 2014.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R. KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

Literatura Recomendada

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F. de; SANTANA, D. P. **Manejo da cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 12 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 87).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change: synthesis report**. Geneva, 2014. 104 p. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

Embrapa

Milho e Sorgo



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

