



BRUNA GOMES MAGALHÃES

SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA CULTURA DO MILHO PARA MITIGAR EFEITOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

**SETE LAGOAS
2017**

BRUNA GOMES MAGALHÃES

SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA CULTURA DO MILHO PARA MITIGAR EFEITOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Sete Lagoas, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela de Carvalho Lopes
Coorientador: Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

**SETE LAGOAS
2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e
Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Magalhães, Bruna Gomes.

M188s Simulação de Estratégias de Manejo da Cultura do
Milho para Mitigar Efeitos de Mudanças Climáticas /
Bruna Gomes Magalhães ; orientadora Daniela de
Carvalho Lopes; coorientador Camilo de Lelis
Teixeira de Andrade. -- Sete Lagoas, 2017.

75 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências Agrárias) -- Universidade Federal de São
João del-Rei, 2017.

1. Aquecimento Global. 2. Modelagem Matemática.
3. Zea mays L. 4. Estratégias de Mitigação. I. Lopes,
Daniela de Carvalho, orient. II. Andrade, Camilo de
Lelis Teixeira de, co-orient. III. Título.

BRUNA GOMES MAGALHÃES

SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA CULTURA DO MILHO PARA MITIGAR EFEITOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Sete Lagoas, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela de Carvalho Lopes
Coorientador: Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Sete Lagoas, 11 de julho de 2017.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Antonio José Steidle Neto – UFSJ

Dr. Tales Antônio Amaral – Embrapa Milho e Sorgo

Profa. Dra. Daniela de Carvalho Lopes
Orientadora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 A cultura do milho	6
2.2 Mudanças climáticas globais e potenciais efeitos na produção agrícola	7
2.3 Estratégias de mitigação dos efeitos climáticos na cultura do milho	9
2.4 Modelos de simulação de crescimento de culturas	10
2.5 O modelo CSM-CERES-Maize	102
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Caracterização do clima e do solo	24
4.2 Efeito das alterações na precipitação	26
4.3 Efeito das alterações na temperatura	36
4.4 Efeito das alterações na concentração de CO₂	45
4.5 Efeito das alterações na radiação solar	49
5 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE	66

SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA CULTURA DO MILHO PARA MITIGAR EFEITOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO - As alterações climáticas em curso influenciam na produção do milho. A precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar são os fatores aos quais a cultura apresenta maior sensibilidade. Algumas estratégias de manejo cultural, como o uso do sistema de plantio direto na palha, a correção da acidez do solo e o emprego de cultivares com sistema radicular mais profundo, têm sido utilizadas para minorar estes efeitos. Objetivou-se com este trabalho avaliar, utilizando modelagem, estratégias de manejo da cultura com potencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. O estudo abrangeu 10 mesorregiões do estado de Minas Gerais. Aplicou-se o modelo CSM-CERES-Maize, do sistema DSSAT, previamente parametrizado para o híbrido de alto rendimento DKB390PRO, em 10 municípios. Foram simuladas alterações no regime de chuva, nas temperaturas mínimas e máximas do ar, na radiação solar diária e na concentração de CO₂ na atmosfera. Juntamente com esses cenários de variação dos elementos do clima, foi avaliada a utilização de cultivares com sistema radicular concentrado nos 0,30 m, 0,50 m e 0,70 m do perfil do solo e também a manutenção de 0 t ha⁻¹, 2 t ha⁻¹ e 4 t ha⁻¹ de palhada na superfície do solo. Os resultados simulados foram comparados estatisticamente. A redução na quantidade de precipitação reduziu o rendimento médio de grãos. Entretanto, o uso do sistema de plantio direto bem consolidado em um solo com pH e toxidez por alumínio corrigidos em profundidade, ou o uso de uma cultivar com maior potencial de crescimento radicular se mostraram promissores para mitigar o efeito de redução moderada da precipitação. Incrementos na temperatura do ar reduziram a produtividade e o aprofundamento do sistema radicular e o uso de palhada na superfície do solo atenuou parcialmente tal efeito. Entretanto, por apresentar um maior número de interações significativas, sistemas radiculares mais profundos se mostraram mais efetivos que a palhada na mitigação dos efeitos da temperatura. O aumento na concentração de CO₂ favoreceu a produtividade do milho, porém o incremento não ultrapassou 13,51%, o que era esperado, pois o milho é uma planta C4, que já apresenta maior eficiência fotossintética. Não se verificou quaisquer efeitos das estratégias de manejo no rendimento de grãos para os diferentes cenários de concentração de CO₂. O aumento da radiação solar também tendeu a favorecer o incremento da produtividade. Tanto a profundidade de sistema radicular, quanto a quantidade de palhada na superfície do solo apresentaram interação significativa com variações na radiação solar e, portanto, se mostraram com potencial para mitigar os efeitos das alterações na radiação solar incidente.

Palavras-chave: Aquecimento global. Modelagem matemática. *Zea mays L.* Estratégias de mitigação.

SIMULATION OF MAIZE CULTURE MANAGEMENT STRATEGIES TO MITIGATE THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE

ABSTRACT - Climate change influences maize production. Precipitation, air temperature and solar radiation are the factors which the crop is most sensitive. Some strategies of cultural management, such as the use of no-till system, correction of soil acidity and the use of cultivars with a deeper root system, have been used to mitigate these effects. The goal of this work was to evaluate, using modeling, crop management strategies with potential to mitigate the effects of climate change. The study covered 10 mesoregions of the state of Minas Gerais. The CSM-CERES-Maize model, from the DSSAT system, previously parameterized for the high performance hybrid DKB390PRO, was applied in 10 municipalities. Changes in rainfall, minimum and maximum air temperatures, daily solar radiation and CO₂ concentration in the atmosphere were simulated. Together with these scenarios of variation of the elements of the climate, we evaluated the use of cultivars with a root system in the 0,30 m, 0,50 m and 0,70 m of the soil profile and also the maintenance of 0 t ha⁻¹, 2 t ha⁻¹ and 4 t ha⁻¹ of residue on the soil surface. The simulated results were compared statistically. Reduction in the amount of precipitation reduced the average grain yield. However, the use of no-tillage system in a soil with pH corrected and depth-corrected aluminum toxicity, or the use of a cultivar with greater root growth potential, has shown to be promising to mitigate the effect of moderate reduction of precipitation. Increases in the temperature of the air reduced the productivity and the deepening of the root system and the use of straw on the surface of the ground partially attenuated this effect. However, because of the greater number of significant interactions, deeper root systems proved to be more effective than mitigation of temperature effects. The increase in CO₂ concentration favored maize productivity, but the increase did not exceed 13.51%, which was expected, since maize is a C4 plant, which already has greater photosynthetic efficiency. There were no effects of management strategies on grain yield for the different CO₂ concentration scenarios. The increase of solar radiation also tended to favor the increase of productivity. Both the depth of the root system and the amount of straw at the soil surface showed significant interaction with changes in solar radiation and, therefore, showed potential to mitigate the effects of changes in incident solar radiation

Key-words: Global warming. Mathematical modeling. *Zea mays* L. Mitigation strategies.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela de Carvalho Lopes
Coorientador: Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

1 INTRODUÇÃO

Apesar do crescente número de ações políticas para se minimizar os potenciais efeitos das alterações climáticas, a emissão de gases de efeito estufa (GEE), oriunda de ações antropogênicas, tem aumentado nos últimos anos. Conforme relatório elaborado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, entre os anos de 1970 e 2000, houve um aumento médio anual de emissão de GEE em torno de 1,3%. Já na década seguinte, esse aumento passou a ser de 2,2% ao ano, podendo ser considerado um incremento expressivo (IPCC, 2014). O aumento na concentração de GEE na atmosfera terrestre intensifica o efeito estufa implicando em alterações, principalmente, na temperatura e no regime pluviométrico (PELLEGRINO et al., 2007).

Essas alterações climáticas influenciam na produção agrícola de um modo geral. Todavia, os efeitos são diferentes para cada cultura, já que a produtividade destas depende das interações da planta com as variáveis meteorológicas (CASTILLO, 2016). Para a cultura do milho (*Zea mays* L.) os principais fatores climáticos que podem afetar negativamente sua produção, seja por ação individual ou conjunta, são a precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar (MALDANER et al., 2014).

A cultura do milho possui considerável importância para a alimentação animal e humana assim como para a pauta de exportações do Brasil. No entanto, no estado de Minas Gerais, tem-se observado diminuição da produtividade. No ano de 2015, o rendimento de grãos no estado foi de 5.638 kg ha⁻¹, enquanto nos anos de 2012, 2013 e 2014, foi de 6.250, 6.232 e 5.499 kg ha⁻¹, respectivamente (IBGE, 2017). A redução na produtividade está associada à variabilidade meteorológica intra e interanual, com especial ênfase na escassez hídrica que vem ocorrendo na região Sudeste nos últimos anos. Apesar do ligeiro aumento observado entre os anos 2014 e 2015, se não forem implementadas medidas de adaptação ou de mitigação, a redução no rendimento médio pode continuar devido ao efeito da mudança do clima terrestre em curso.

Medidas podem ser tomadas com a finalidade de minorar esses e outros efeitos das mudanças climáticas na cultura do milho. Uma delas é a escolha de uma época de semeadura mais adequada, possibilitando que esta ocorra em períodos cujas condições climáticas se mostrem mais favoráveis à cultura. Dentre as medidas mitigadoras, ressalta-se o uso do sistema de plantio direto na palha, que auxilia na regulação térmica e na retenção de água no

solo; o uso da irrigação, a correção da acidez do solo e o emprego de cultivares com sistema radicular mais profundo que favorece a absorção de água e de nutrientes.

Levando-se em consideração a interação existente entre os fatores que afetam a produção agrícola e a necessidade de se avaliarem cenários futuros de variações meteorológicas, o uso da modelagem se mostra como uma abordagem adequada, pois permite minimizar custos com experimentação e otimizar o tempo de análise. Neste sentido, o modelo de crescimento de culturas, *Decision Support System for Agrotechnology Transfer - DSSAT* (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2014) se destaca, pois, permite avaliar a dinâmica da água e nutrientes no solo e os efeitos de estratégias de manejo no rendimento das culturas.

Muitos trabalhos já foram desenvolvidos para avaliar os efeitos das mudanças climáticas em culturas como soja, trigo, milho, cana-de-açúcar, mandioca, arroz e café (STRECK, 2005, STRECK e ALBERTO, 2006, MORAES et al., 2011, STRECK et al., 2012, ARAÚJO et al., 2014, FOLBERTH et al., 2014, WALTER et al., 2014, BRAGANÇA et al., 2016, CASTILLO, 2016). Os impactos do clima, em condições atuais e em projeções de aquecimento global, na safra de milho em Minas Gerais também foram estudados, empregando modelagem (AMORIM, 2008). Observou-se que a redução no regime de chuvas e o aumento da temperatura causou redução expressiva na duração do ciclo e no índice de área foliar e, conseqüentemente, na produtividade da cultura do milho. Costa et al. (2009), através de simulações para a região Sudeste do Brasil, demonstraram que o aumento da concentração de CO₂ atmosférico pode compensar os efeitos do aumento da temperatura do ar na cultura do feijão. A mesma magnitude de resposta não foi, todavia, verificada para a cultura do milho, isso por se tratar de uma planta C4 e já possuir maior eficiência energética. Os autores concluíram que o uso de estratégias de manejo de solo e de cultura e o melhoramento genético poderão mitigar os efeitos das mudanças climáticas

Embora existam estudos avaliando os efeitos deletérios da mudança de clima para a agricultura, são escassas as pesquisas, principalmente no Brasil, que tenham avaliado o uso de estratégias de manejo cultural e de adaptação para mitigar o efeito de tais alterações das condições meteorológicas no desempenho das culturas (CAIRNS et al., 2013, AMARAL et al., 2014a, 2014b, CHALLINOR et al., 2014, SILVA et al., 2014; SOUZA et al., 2014, BABEL e TURİYATUNGA, 2015, RURINDA et al., 2015, KASSIE et al., 2015). Santos et al., (2011) ressaltam que há pouca pesquisa no país relacionada à agricultura e às mudanças

climáticas, tendo em vista a relevância desses estudos em um país cuja agricultura tem alta representatividade na economia.

Considerando a importância social e econômica da cultura do milho para o país e a sua suscetibilidade aos efeitos das mudanças climáticas, objetivou-se com este trabalho avaliar, utilizando modelagem, estratégias de manejo da cultura com potencial para mitigar tais efeitos. E como objetivos específicos: conhecer a resposta da cultura do milho a diferentes cenários simulados com alterações em variáveis climáticas (temperaturas mínimas e máximas do ar, radiação solar diária, precipitação e concentração de CO₂ na atmosfera); verificar a resposta da cultura do milho sob os diferentes cenários de alterações climáticas após a adoção das estratégias de mitigação (manutenção de palhada, correção do solo e seleção de genótipos com sistemas radiculares mais profundos) e por fim definir qual estratégia atenua de maneira mais eficiente, os efeitos das mudanças climáticas sob cada cenário simulado, considerando as alterações na duração do ciclo e no rendimento de grãos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.), uma planta pertencente à família *Poaceae*, também conhecida como família das gramíneas. A planta possui um sistema radicular fasciculado através do qual a planta obtém água e nutrientes necessários ao seu crescimento (MAGALHÃES et al., 2002). No Brasil é uma das culturas mais semeadas e está presente nas diversas regiões do país. Possui grande importância por se tratar de insumo para uma infinidade de produtos, além de ser uma cultura que é conhecida por ser produzida em uma grande diversidade de solos, clima e com variadas tecnologias de manejo cultural.

Um dos fatores que influenciam na produção da cultura é a temperatura. Segundo Kiniry (1991), o crescimento máximo da cultura ocorre entre 26°C e 34°C, sendo os limites extremos 8°C e 44°C. De acordo com Embrapa (2004), a temperatura para a fase da germinação até a fase de maturação deve estar em torno de 25°C. Na fase da maturação dos grãos, a temperatura abaixo de 15°C implica em retardamento do processo. Em relação às temperaturas noturnas, ressalta-se que, quando estas são superiores a 24°C, aumenta-se a taxa respiratória e, por consequência, reduz-se a taxa de fotoassimilados, resultando em queda na produção (SANS, 2009).

A cultura requer em torno de 600 mm de água ao longo do seu ciclo. Em condições de clima seco e quente, o uso diário de água fica em torno de 3 mm dia⁻¹ no início do ciclo. Já nos períodos entre a iniciação floral e a maturação, esse uso diário pode alcançar 7 mm dia⁻¹ (SANS, 2009). Caso não seja fornecida à planta a quantidade de água necessária, o déficit hídrico ocorre. Para a cultura do milho, as fases do ciclo que são mais sensíveis ao déficit hídrico são a iniciação floral, a floração e o início do desenvolvimento dos grãos (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

Por pertencer ao grupo de plantas C4, o milho apresenta taxa fotossintética elevada. A curva que relaciona a fotossíntese com a concentração de CO₂ apresenta um ponto de compensação no qual a fotossíntese líquida é nula e a partir desse ponto, a fotossíntese líquida se torna positiva e há a produção de fotoassimilados. O ponto de compensação para plantas C4 é em torno de 5 ppm. Este valor é baixo quando comparado às plantas C3 que necessitam de 50 ppm de CO₂ para que haja acúmulo de matéria seca (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

2.2 Mudanças climáticas globais e potenciais efeitos na produção agrícola

Como a produção agrícola possui uma relação intrínseca com as variáveis climáticas, os rendimentos são vulneráveis a qualquer alteração no clima. As emissões de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa que aumentaram nas últimas décadas, influenciam o regime de chuvas e a temperatura. Os principais problemas advindos das mudanças climáticas para a produção agrícola são o aumento da temperatura, mudanças nos padrões de chuva, além de eventos extremos como geadas, secas e inundações (IPCC, 2014, CASTILLO, 2016).

Um aumento na concentração de CO₂ na atmosfera pode ser benéfico no desenvolvimento de diversas espécies de plantas, pois favorece o incremento na atividade fotossintética, uma vez que o CO₂ é um dos substratos desse processo (TAIZ e ZEIGER, 1991). No entanto, o acréscimo da concentração de gases de efeito estufa favorece o aumento da temperatura, o que pode comprometer o desenvolvimento da cultura, principalmente no que diz respeito à duração do ciclo (STRECK, 2005). Em estudo envolvendo a resposta de algumas culturas à cenários de alterações climáticas verificou-se que o potencial benéfico do aumento CO₂ pode ser anulado pelo aumento da temperatura (STRECK e ALBERTO, 2006).

As alterações na temperatura influenciam principalmente o ciclo das plantas. Cada cultura tem a faixa de temperatura ideal para o seu desenvolvimento e fora desses valores, a planta pode ter seu desenvolvimento comprometido. Isso ocorre devido a uma constante térmica que é a quantidade de energia acumulada, necessária para que a planta alcance cada fase de seu ciclo. Com temperaturas maiores, a planta irá acelerar suas reações metabólicas e completará seu ciclo mais rapidamente, reduzindo a oportunidade de acumular fotoassimilados e, conseqüentemente, comprometendo o seu rendimento, além de outros danos que condições térmicas desfavoráveis podem acarretar à planta. Caso ocorra temperaturas menores que as requeridas pelas culturas, o desenvolvimento reduz e pode paralisar quando esta cai abaixo da temperatura basal inferior. Sob baixas temperaturas pode haver um retardamento dos processos metabólicos, ocorrendo uma demora para se completar as fases fenológicas. Para que a cultura atinja a maturidade fisiológica, por exemplo, é preciso uma quantidade determinada de graus-dia ou de soma térmica. Com baixas temperaturas, demora-se mais dias para completar a soma térmica para atingir a maturidade, causando uma desuniformidade no processo que pode comprometer o enchimento do grão e a produção (SANS, 2009, CRUZ, et al., 2011, STRECK et al., 2012, BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

Alterações nas taxas de radiação podem comprometer também o desenvolvimento da planta, devido à influência no processo fotossintético. O excesso de radiação implica em um estresse luminoso em um complexo denominado fotossistema, onde ocorrem as reações iniciais da fotossíntese. A quantidade excessiva de fótons pode ocasionar uma excitação elevada nas moléculas de clorofila. Apesar de a planta apresentar alguns mecanismos de defesa, esse excesso de fótons pode propiciar a formação de espécies reativas de oxigênio, que são tóxicas à planta (TAIZ e ZEIGER, 1991). O aumento da radiação também pode aumentar a evapotranspiração que (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014), com um mesmo volume de precipitação e uma mesma retenção de água no solo, acarretará também em queda no rendimento de grãos. Por outro lado, pode ocorrer redução no rendimento em decorrência da menor radiação solar incidente (ALVES et al., 2011), mesmo quando os demais elementos climáticos e a umidade do solo estejam adequados à cultura. O rendimento de grãos de determinada cultura, está relacionado com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) que é absorvida pelas folhas e com a eficiência com que essas folhas utilizam essa radiação no processo fotossintético (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

A mudança nos padrões de chuva é outro sério problema advindo das alterações climáticas. Culturas que são produzidas em sistema de sequeiro são totalmente dependentes das variações meteorológicas e são influenciadas, inevitavelmente, pela quantidade, intensidade e distribuição pluviométrica. Em caso de períodos longos de estiagem pode ocorrer estresse hídrico com a redução da quantidade de água no tecido vegetal, resultando em fechamento de estômatos, comprometimento do desenvolvimento, perda de turgescência e redução da produtividade (BERGAMASCHI et al., 2006). Ressalta-se que os efeitos podem ser maiores quando se tem a ação de mais de um fator abiótico comprometendo o desenvolvimento da planta (COELHO, 2013), como por exemplo, a redução da precipitação associada com aumento da temperatura. Por outro lado, o encharcamento do solo, decorrente da ocorrência de grandes volumes de precipitação em um curto espaço de tempo, apresenta também efeito deletério à cultura. Nesse caso, o oxigênio no solo é o principal fator que pode comprometer o desenvolvimento da planta e a produção de grãos. Em solos encharcados há uma condição de hipóxia, que se caracteriza pela baixa concentração de oxigênio, elemento imprescindível no processo de respiração nas raízes para absorção de água e nutrientes (GALON et al., 2010).

2.3 Estratégias de mitigação dos efeitos climáticos na cultura do milho

Algumas medidas podem ser tomadas a fim de minorar os efeitos causados pelas mudanças climáticas globais na cultura do milho. Entre as medidas mitigadoras possíveis destacam-se a escolha da época de semeadura mais adequada, o uso do sistema de plantio direto na palha, a correção da acidez do solo, o uso de cultivares com sistema radicular mais profundo e mesmo o uso da irrigação.

A época de semeadura, que é de fácil adoção e sem muito impacto nos custos de produção, consiste em selecionar períodos em que as condições climáticas dominantes indicam disponibilidade de água para os períodos mais críticos da cultura (SANS et al., 2001; MENEGATI, 2013). A implementação de medidas que sejam viáveis, tanto economicamente, quanto em termos de manejo, é de suma importância tendo em vista que é necessária uma predisposição por parte dos produtores em adotá-las. Ensaio em campo de épocas de semeadura podem ser conduzidos para este fim. Entretanto, estas são pesquisas caras e laboriosas. Uma maneira alternativa de se determinar janelas de semeadura é com o uso de modelos de simulação baseados em processos. Exemplos de aplicação bem-sucedida deste tipo de ferramenta são descritos na literatura (AMARAL et al., 2009; PAIXÃO et al., 2014).

O uso da irrigação é também uma alternativa de manejo capaz de mitigar alguns dos efeitos das mudanças climáticas, pois elimina o risco de redução da produtividade decorrente de estresses hídricos (CUNHA et al., 2014, MA et al., 2017). Entretanto, esta prática não garante altas produtividades de milho, pois outros fatores como temperatura noturna alta e baixa insolação, podem afetar negativamente o desempenho da lavoura, além do custo da irrigação que, em determinadas situações, se torna oneroso. A temperatura noturna alta limita a produtividade por causa do aumento da taxa respiratória e consequente redução na fotossíntese líquida (SANS, 2009).

Existem medidas que podem ser também efetivas na mitigação desses efeitos, como o sistema de plantio direto com a manutenção de palhada na superfície do solo, a correção do perfil do solo e, ainda, a seleção de genótipos com sistema radicular mais profundo.

O sistema de plantio direto, nada mais é do que semear as culturas sem o revolvimento do solo e com a presença de resíduos da cultura anterior (SALTON, et al., 1998). Nesse sistema, a palha protege a superfície do solo, favorece a infiltração de água através da mudança na geometria porosa do solo, reduz as variações de temperatura devido ao aumento

do coeficiente de reflexão (albedo); e diminui a evaporação da água do perfil do solo (SILVA et al., 2006, MOREIRA et al., 2011).

Outra medida mitigadora promissora é a seleção de genótipos com maior capacidade de desenvolvimento radicular. A busca da planta por água e nutrientes, depende de maneira primordial da distribuição de raízes no perfil do solo que, por sua vez, depende das condições físicas e químicas, as quais são suscetíveis a alterações em função do manejo aplicado (ALVARENGA e CRUZ, 2003). Sistemas radiculares que têm um maior desenvolvimento em profundidade podem obter água de camadas mais profundas e tornar a cultura menos suscetível a períodos mais longos sem chuva. De modo geral, a profundidade do sistema radicular da cultura do milho varia de 40 a 50 cm (ALBUQUERQUE e RESENDE, 2002).

Um dos fatores que influenciam no desenvolvimento do sistema radicular das culturas é a presença de alumínio tóxico (Al^{3+}) e pH ácido no perfil do solo. O processo utilizado para corrigir esse problema é a calagem, que eleva o pH do solo, neutraliza o alumínio tóxico, além da gessagem, que fornece cálcio e magnésio, fundamentais para o crescimento de raízes (ZANDONÁ et al., 2015). Portanto, duas estratégias apresentam o mesmo potencial para mitigar os efeitos de possíveis estresses hídricos decorrentes de mudanças climáticas: o uso de cultivares tolerantes ao Al^{3+} e a correção, em profundidade, do perfil do solo. Ambas têm o potencial de favorecer o crescimento vertical do sistema radicular das culturas e são especialmente importantes onde as condições de suprimento de água às lavouras são irregulares.

2.4 Modelos de simulação de crescimento de culturas

Os modelos de simulação se fundamentam na premissa de que os sistemas biológicos, sobretudo as relações entre o solo, a planta, o clima e as práticas culturais, podem ser descritos por expressões matemáticas (ANDRADE et al., 2009). O sistema DSSAT (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2014) é uma ferramenta que contém em seu pacote, modelos de simulação de crescimento de 42 culturas diferentes. A ferramenta combina bases de dados de culturas, solo e clima, com os modelos e programas de aplicação para simular os efeitos de estratégia de manejo no crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas (ANDRADE et al., 2009).

Assim como as ferramentas APSIM (KEATING et al., 2003), CROPSYST (STOCKLE et al., 2003) e ORYZA, específico para a cultura do arroz (BOUMAN et al. 2001), os modelos

presentes no pacote DSSAT são considerados modelos dinâmicos (JONES et al., 2015). Eles têm como característica o emprego de equações diferenciais para descrição do sistema solo-planta-atmosfera. Esses modelos apresentam a vantagem de permitir que fases intermediárias dos processos relacionados ao crescimento das culturas possam ser avaliadas (ANDRADE et al., 2009). Vários exemplos bem-sucedidos de aplicação do modelo DSSAT, para auxílio à tomada de decisão, são descritos na literatura. Para Sete Lagoas, MG, resultados de simulações com o modelo CSM-CERES-Maize, do sistema DSSAT, foram utilizados para o desenvolvimento de uma metodologia para estabelecer o período de semeadura de milho (AMARAL et al., 2009). Cenários de períodos de semeadura para o milho cultivado em sequeiro foram simulados para 20 municípios do estado de Minas Gerais e os resultados de produtividade foram utilizados para determinar a aptidão desses municípios para o cultivo do milho (PAIXÃO et al., 2016). O potencial da irrigação suplementar como estratégia para aumentar a produção de milho foi avaliado para alguns municípios de Minas Gerais (SILVA et al., 2016). Também foram determinadas as janelas de semeadura para a cultura do milho, nos regimes de sequeiro e irrigado, para municípios de Minas Gerais (MELO et al., 2016; TIGGES et al., 2016)

Especificamente no caso de mudanças climáticas, simulações foram realizadas com o modelo CSM-CERES-Maize em Uganda e Etiópia, África, para avaliar os impactos potenciais das alterações climáticas na cultura do milho. Observou-se que, em ambas as regiões, o rendimento da cultura do milho reduziu em cenários futuros de condições de clima. Em Uganda, o uso de data de semeadura apropriada e de irrigação suplementar foi capaz de mitigar os efeitos das alterações climáticas (BABEL e TURİYATUNGA 2015). Na Etiópia, o uso de doses maiores de fertilizantes, de datas adequadas de semeadura e de irrigação demonstrou potencial para atenuar os efeitos das mudanças climáticas. Entretanto, o uso de cultivares com diferentes ciclos não demonstrou ser efetivo (KASSIE et al., 2015).

Em outro estudo, sob alterações em variáveis climatológicas por meio da modelagem, observou-se que a produtividade do sorgo granífero foi sensível a alterações na precipitação, na radiação solar e na concentração de CO₂ (GROSSI et al., 2015). O aumento da concentração de CO₂ atmosférico tendeu a compensar o aumento da temperatura do ar em situações sem estresse hídrico.

No Brasil, estudos preliminares foram realizados para avaliar a efetividade do uso de cultivares com diferentes profundidades de sistema radicular e da manutenção de diferentes quantidades de palhada na superfície do solo para mitigar alterações na temperatura máxima e

mínima do ar, na precipitação, na radiação solar e na concentração de CO₂ atmosférico através de simulações (AMARAL et al., 2014a, 2014b; SILVA et al., 2014; SOUZA et al., 2014). O modelo demonstrou ser uma ferramenta útil neste tipo de estudo, pois levou em consideração as interações entre os diversos fatores que controlam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho. O uso de cultivares com sistema radicular mais profundo, em combinação com a manutenção de palhada na superfície do solo, foi efetivo para atenuar elevações de até 3°C na temperatura do ar e reduções nos índices pluviométricos em Sete Lagoas, MG. Observa-se, entretanto, que são poucos os estudos relacionados à avaliação de estratégias de mitigação dos efeitos de mudanças climáticas na cultura do milho.

2.5 O modelo CSM-CERES-Maize

O modelo CSM-CERES-Maize faz parte do grupo de modelos CERES (*Crop Environment Resource Syntesis*), presente no pacote DSSAT. Os modelos CERES simulam o crescimento diário de gramíneas entre as quais o milho (JONES et al., 2003). Trata-se de um modelo determinístico que é capaz de realizar, além de simulações relativas ao crescimento da cultura do milho, avaliações da dinâmica do nitrogênio e da água no solo (JONES et al., 1986).

Para proceder as simulações, o modelo se baseia em algumas informações de entrada, como dados meteorológicos, de solo, de manejo da lavoura e dados referentes aos genótipos ou cultivares. As informações de saída podem ser, por exemplo, data da colheita, rendimento de grãos, além de outras informações agrônômicas e ambientais (ANDRADE et al., 2009).

O pacote DSSAT apresenta ferramentas que possibilitam a simulação de sucessão de cultivos (modo sequencial), a análise das variações interanuais (modo sazonal) e também a análise das variações espaciais (modo espacial) (HOOGENBOOM et al., 2014).

O modelo possibilita ainda simulações de alterações nos elementos climatológicos. Na opção *Environmental Modifications*, há a possibilidade de se alterar de modo linear os valores de radiação solar, temperaturas máximas e mínimas do ar, precipitação e concentração de CO₂, por exemplo. Para os aumentos percentuais utiliza-se a opção *multiply*, multiplicando-se os dados pelo valor desejado. Existe também a opção *replace*, que substitui os valores do arquivo de clima por valores fornecidos pelo usuário e, por último, a opção *add*, que adiciona ao dado climático um determinado valor desejado. Para que o modelo simule essas alterações,

é necessário combiná-las com as informações sobre solo, cultura e manejo na ferramenta *Treatments*, que originará a quantidade e a discriminação de tratamentos que serão avaliados na simulação.

O modelo leva em consideração os coeficientes genéticos que são parâmetros de calibração para diferentes variedades de milho. Ou seja, valores relacionados à fenologia e taxa de crescimento da cultura que variam de uma cultivar para outra (SALVADOR, 1993). Os coeficientes para a cultura do milho são P1, P2, P5, PHINT, G2 e G3. Enquanto P1, P2, P5 e PHINT dizem respeito à fenologia, G2 e G3, estão relacionados ao rendimento de grãos. Estes coeficientes representam: a soma térmica desde a emergência até o fim da fase juvenil (P1); a sensibilidade ao fotoperíodo (P2); a soma térmica entre o florescimento e a maturidade fisiológica (P5), o número máximo de grãos por planta (G2); a taxa potencial de crescimento de grãos (G3); e soma térmica para o aparecimento sucessivo de folhas subsequentes (PHINT).

Uma vez configuradas as informações referentes à cultura, clima, solo e manejo da cultura nos arquivos correspondentes, a simulação pode ser executada, resultando em arquivos contendo as informações agronômicas do cultivo simulado, bem como informações ambientais, como lixiviação de nitratos, por exemplo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Núcleo de Água, Solo e Sustentabilidade Ambiental (NSAM) da Embrapa Milho e Sorgo e abrangeu o estado de Minas Gerais. Foi utilizado modelo CSM-CERES-Maize, do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (JONES et al., 2003), para simular cenários de diferentes estratégias de manejo que têm potencial para mitigar os eventuais efeitos negativos de mudanças climáticas na produtividade de grãos e envolveu dez municípios das mesorregiões do estado de Minas Gerais (Tabela 1, Figura 1). As mesorregiões Oeste de Minas e Vale do Mucuri não tiveram municípios representantes devido à indisponibilidade de dados meteorológicos e de solo em localidades dessas regiões ou os dados disponíveis se mostraram inconsistentes após as simulações realizadas.

Tabela 1 - Altitude e classificação climática de municípios representantes de mesorregiões do estado de Minas Gerais.

Nº da Mesorregião	Mesorregiões do estado de Minas Gerais	Município selecionado	Classificação climática Köppen-Geiger*
1	Noroeste de Minas	Paracatu	Aw
2	Norte de Minas	Janaúba	Aw
3	Jequitinhonha	Araçuaí	Aw
4	Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba	Uberaba	Aw
5	Central Mineira	Pompéu	Aw
6	Metropolitana de Belo Horizonte	Sete Lagoas	Cwa
7	Vale do Rio Doce	Aimorés	Aw
8	Sul / Sudoeste de Minas	Machado	Cwa
9	Campo das Vertentes	Lavras	Cwa
10	Zona da Mata	Viçosa	Cwa

*(JUNIOR, 2009)

Séries históricas dos dez municípios, contendo 33 anos de dados meteorológicos diários, incluindo temperaturas do ar mínima e máxima, precipitação e horas de brilho solar, foram obtidas junto à base do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para cada município. A consistência dos dados foi avaliada e as falhas de até sete dias foram preenchidas empregando a ferramenta *WeatherMan* (PICKERING et al., 1994) do DSSAT. Falhas por períodos superiores a sete dias foram preenchidas com dados de estações meteorológicas próximas, com altitude similar. Os dados consistidos foram preparados no formato de arquivos de clima do modelo DSSAT.

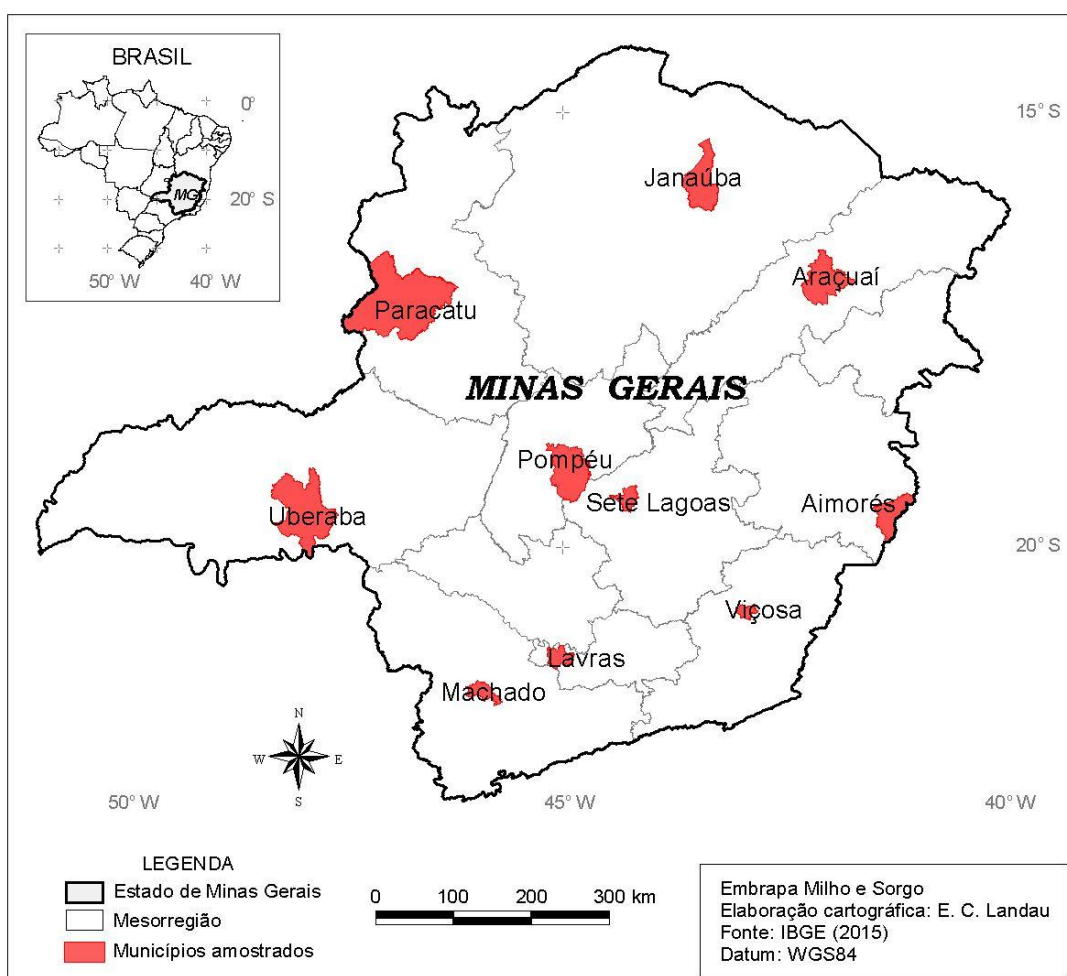


Figura 1 – Localização geográfica dos municípios amostrados no Estado de Minas Gerais, Brasil.

Em propriedades agrícolas e estações experimentais de institutos federais de educação dos mesmos municípios foram coletadas, com a ajuda da Emater-MG, amostras em cinco camadas do perfil do solo (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) para determinação dos atributos físico-hídricos e químicos do solo. Foram avaliados, textura,

densidade de partículas, densidade do solo, limite superior e inferior de água disponível, condutividade hidráulica do solo saturado, fertilidade completa e nitrogênio total. Os dados foram tabulados e preparados no formato de arquivos de perfil de solo do modelo DSSAT.

O modelo CSM-CERES-Maize, do sistema DSSAT, versão 4.6.1, foi parametrizado e avaliado para o híbrido simples DKB390PRO, empregando dados de 15 ensaios experimentais conduzidos em Sete Lagoas, Papagaios, Patos de Minas e Paracatu, Minas Gerais e Rio Verde, Goiás (ANDRADE et al., 2016). Trata-se de uma cultivar de ciclo precoce, com excelente sistema radicular e potencial produtivo. O grão é considerado duro, com coloração amarelo-alaranjado e um porte de crescimento aproximado de 2,20 m (DEKALB, 2015). A soma térmica desta cultivar desde a emergência até o fim da etapa juvenil foi 263 graus-dia, enquanto a taxa de enchimento de grãos sob condições ótimas de crescimento foi 4,97 mg dia⁻¹ (Tabela 2).

Tabela 2 – Coeficientes genéticos da cultivar DKB390PRO.

Coeficiente genético	Descrição	Unidade	Valor estimado
P1	Soma térmica desde a emergência até o fim da fase juvenil.	Graus-Dia	263
P2	Sensibilidade ao fotoperíodo.	Dias	0,5
P5	Soma térmica entre o florescimento e a maturidade fisiológica.	Graus-dia	1087
G2	Número máximo de grãos por planta.	-	713
G3	Taxa potencial de crescimento de grãos.	Mg dia ⁻¹	4,97
PHINT	Soma térmica para o aparecimento sucessivo de folhas subsequentes.	Graus-dia	45,50

Dados obtidos em condições sem estresse biótico e abiótico foram utilizados no processo de ajuste dos coeficientes (P1, P2, P5, PHINT, G2 e G3), enquanto dados coletados com algum tipo de estresse hídrico foram empregados para avaliar a capacidade preditiva do

modelo. O modelo foi capaz de simular com razoável acurácia os processos de crescimento e desenvolvimento da cultivar de milho, incluindo duração do ciclo e produtividade de grãos (ANDRADE et al., 2016). Nesta etapa foram gerados 21 arquivos de dados utilizados como entrada do modelo.

As simulações foram programadas para iniciar 30 dias antes da data de semeadura para que o balanço de água e de nitrogênio no solo se aproximasse das condições reais de campo e foi utilizado o modo sazonal para considerar a variação interanual. Foi considerada uma lavoura de milho de alta produtividade, semeada em sistema de plantio direto, compatível com o elevado potencial produtivo do híbrido DKB390PRO. A população de plantas foi de 68 mil plantas por hectare, com um espaçamento entre fileiras de 0,70 metros. As sementes foram colocadas a uma profundidade de 0,05 metros e a semeadura foi realizada na melhor data, obtida mediante simulações prévias, para cada município, em condições de sequeiro (Tabela 3).

Tabela 3 - Municípios com suas respectivas datas de semeadura que proporcionaram as maiores produtividades.

Município	Data de semeadura
Aimorés	17 de outubro
Araçuaí	17 de outubro
Janaúba	17 de outubro
Lavras	12 de setembro
Machado	31 de outubro
Paracatu	17 de outubro
Pompéu	17 de outubro
Sete Lagoas	10 de outubro
Uberaba	02 de janeiro
Viçosa	03 de outubro

A adubação nitrogenada consistiu em 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), na forma de monoamônio-fosfato (MAP), aplicada na semeadura, 150 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, aplicada em cobertura aos 25 dias após a semeadura (DAS) e 150 kg ha⁻¹ de N, na forma de sulfato de

amônio, aplicada em cobertura aos 40 DAS. Não foram simulados os efeitos de fertilizações com fósforo e potássio e nem o efeito de estresses decorrentes de pragas, doenças e plantas invasoras.

Independentemente da data de semeadura e do município, considerou-se como condição inicial que o solo estava com 50% da sua capacidade de água disponível. A quantidade inicial de nitrogênio disponível às plantas foi estimada a partir do teor de carbono orgânico do solo.

O modelo foi programado para simular diferentes cenários de estratégias de manejo da cultura as quais têm o potencial de mitigar os efeitos de mudanças climáticas:

- Cultivar com sistema radicular concentrado na camada de 0 a 0,30 m do perfil do solo; equivale a uma cultivar com pouca tolerância ao Al^{3+} e ao pH baixo ou um solo que não tenha sido adequadamente corrigido para Al^{3+} e pH (trata-se de um efeito indireto, visto que o modelo não simula condições de acidez do solo);
- Cultivar com sistema radicular concentrado na camada de 0 a 0,50 m do perfil do solo; cenário básico ou *baseline*, típico de uma lavoura de milho;
- Cultivar com um sistema radicular concentrado na camada de 0 a 0,70 m do perfil do solo; equivalente a uma cultivar melhorada para aprofundar o sistema radicular ou um solo muito bem corrigido empregando, por exemplo, gessagem (trata-se de um efeito indireto, visto que o modelo não simula condições de acidez do solo);
- Um sistema de plantio direto inadequado, que não deixa palhada na superfície do solo;
- Um sistema de plantio direto mediano, que deixa 2 t ha^{-1} de palhada na superfície do solo; cenário básico ou *baseline*;
- Um sistema de plantio direto bem conduzido, que deixa 4 t ha^{-1} de palhada na superfície do solo.

No modelo DSSAT dados históricos de clima podem ser alterados de forma linear, o que permite uma avaliação simples e rápida da resposta das culturas às alterações dos elementos do clima, de forma conjunta ou isolada. Considerando esta facilidade, o modelo foi programado para modificar os dados de precipitação, temperatura mínima e máxima, radiação solar e concentração de CO_2 atmosférico. Para a temperatura foi utilizada a opção *add* na ferramenta *Environmental Modifications*, adicionando às temperaturas históricas os valores de acréscimo. Para CO_2 , foi utilizada a opção *replace* e para radiação solar e precipitação a opção *multiply*. As alterações foram procedidas da seguinte forma:

- Precipitação: -50%, -25%, 0%, +25%, +50% (5 cenários);
- Temperaturas mínimas e máximas do ar: -3, 0, +3, +6, +9 °C (5 cenários);
- Radiação solar diária: -25%, 0%, +25%, +50% (4 cenários);
- Concentração de CO₂: 350, 380 (*baseline*), 450, 550, 650 e 750 ppm (6 cenários).

Esses cenários simulados seguem a orientação prevista no esforço para comparação de modelos de simulação de culturas AgMIP (*The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*)¹.

Trata-se de um protocolo internacional a ser seguido que possui o intuito de incorporar estudos relacionados às mudanças climáticas e modelos de simulação de culturas. A perturbação linear dos dados de clima prevista por esse esforço internacional apresenta algumas alterações extremas. Conforme a tendência real, não se espera, por exemplo, mudanças tão exacerbadas na radiação solar diária de 50%, ou aumentos de 9°C nas temperaturas máximas e mínimas.

Em relação ao CO₂, a concentração atual na atmosfera é pouco mais de 409 ppm (NOAA, 2017), e tem-se alterações realizadas com valores abaixo da concentração atual. Esses cenários extremos de alteração foram escolhidos, a fim de se avaliar a capacidade preditiva dos modelos de simulação. O presente estudo seguiu o protocolo desse esforço tendo como enfoque principal, as respostas da cultura nas faixas de alteração de clima que apresentam uma tendência mais realista e prováveis de ocorrer. Assim considerou-se que o aumento na concentração de CO₂ resulta em aumento na temperatura. Ainda, conforme o IPCC (204) há a tendência de aumento na temperatura do ar de 4°C e conseqüentes alterações no regime de chuvas, assim como o aumento da nebulosidade devido às alterações nas chuvas diminui a radiação solar.

As diferentes quantidades de palhada e profundidades de sistema radicular combinadas com alterações em variáveis do clima geraram 180 cenários em que se avaliou a efetividade dos mesmos como medidas mitigadoras (Tabelas 4, 5, 6 e 7). As alterações foram realizadas, uma de cada vez, ou seja, alterando-se os dados de precipitação, depois temperatura mínima e máxima simultaneamente e com igual magnitude mantendo a amplitude térmica, depois radiação solar e, finalmente, a concentração de CO₂ atmosférico. As rodadas com alterações na precipitação, temperatura e radiação solar foram realizadas considerando a concentração de carbono mais recente que acompanha a versão 4.6.1 do modelo utilizada na parametrização da cultivar DKB390PRO.

¹ <http://www.agmip.org/>

Tabela 4 - Cenários com alterações na precipitação.

		Profundidade do Sistema Radicular (m)				
		0,3	0,5	0,7		
Alterações Percentuais na precipitação (%)	-50	Rz30Cob0P-50	Rz50Cob0P-50	Rz70Cob0P-50	0	Palhada (t ha⁻¹)
		Rz30Cob2P-50	Rz50Cob2P-50	Rz70Cob2P-50	2	
		Rz30Cob4P-50	Rz50Cob4P-50	Rz70Cob4P-50	4	
	-25	Rz30Cob0P-25	Rz50Cob0P-25	Rz70Cob0P-25	0	
		Rz30Cob2P-25	Rz50Cob2P-25	Rz70Cob2P-25	2	
		Rz30Cob4P-25	Rz50Cob4P-25	Rz70Cob4P-25	4	
	0	Rz30Cob0P0	Rz50Cob0P0	Rz70Cob0P0	0	
		Rz30Cob2P0	Rz50Cob2P0	Rz70Cob2P0	2	
		Rz30Cob4P0	Rz50Cob4P0	Rz70Cob4P0	4	
	+25	Rz30Cob0P+25	Rz50Cob0P+25	Rz70Cob0P+25	0	
		Rz30Cob2P+25	Rz50Cob2P+25	Rz70Cob2P+25	2	
		Rz30Cob4P+25	Rz50Cob4P+25	Rz70Cob4P+25	4	
+50	Rz30Cob0P+50	Rz50Cob0P+50	Rz70Cob0P+50	0		
	Rz30Cob2P+50	Rz50Cob2P+50	Rz70Cob2P+50	2		
	Rz30Cob4P+50	Rz50Cob4P+50	Rz70Cob4P+50	4		

Legenda: Rz30 – Sistema radicular concentrado em 0,3 m no solo/Rz50 – Sistema radicular concentrado em 0,5 m no solo/Rz70 – Sistema radicular concentrado em 0,7 m no solo/Cob0 – Plantio direto inadequado/ Cob2 – Sistema de plantio direto que deixa 2 t ha⁻¹ de palhada no solo/Cob 4 – Sistema de plantio direto que deixa 2 t ha⁻¹ de palhada no solo/P-50 – Redução de 50% na precipitação/P-25 - Redução de 25% na precipitação/P0 – Nenhuma alteração na precipitação/P+25 - Aumento de 50% na precipitação/P+50 - Aumento de 50% na precipitação.

Os resultados simulados foram comparados estatisticamente para se identificar qual combinação de manejo da cultura é mais eficaz para mitigar os efeitos nas alterações nos elementos do clima. Os dados de 33 anos gerados pelo modelo foram submetidos à análise de variância em esquema fatorial no delineamento de blocos casualizados. Posteriormente, foi aplicado o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação de médias. Cada município foi avaliado individualmente, comparando entre si os seus tratamentos (cenários). A ANOVA

e os testes comparativos de médias foram executados no programa SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

Tabela 5 - Cenários com alterações nas temperaturas máximas e mínimas do ar.

		Profundidade do Sistema Radicular (m)				
		0,3	0,5	0,7		
Alterações Temperaturas máximas e mínimas do ar (°C)	-3	Rz30Cob0T-3	Rz50Cob0T-3	Rz70Cob0T-3	0	Palhada (t ha⁻¹)
		Rz30Cob2T-3	Rz50Cob2T-3	Rz70Cob2T-3	2	
		Rz30Cob4T-3	Rz50Cob4T-3	Rz70Cob4T-3	4	
	0	Rz30Cob0T0	Rz50Cob0T0	Rz70Cob0T0	0	
		Rz30Cob2T0	Rz50Cob2T0	Rz70Cob2T0	2	
		Rz30Cob4T0	Rz50Cob4T0	Rz70Cob4T0	4	
	+3	Rz30Cob0T+3	Rz50Cob0T+3	Rz70Cob0T+3	0	
		Rz30Cob2T+3	Rz50Cob2T+3	Rz70Cob2T+3	2	
		Rz30Cob4T+3	Rz50Cob4T+3	Rz70Cob4T+3	4	
	+6	Rz30Cob0T+6	Rz50Cob0T+6	Rz70Cob0T+6	0	
		Rz30Cob2T+6	Rz50Cob2T+6	Rz70Cob2T+6	2	
		Rz30Cob4T+6	Rz50Cob4T+6	Rz70Cob4T+6	4	
	+9	Rz30Cob0T+9	Rz50Cob0T+9	Rz70Cob0T+9	0	
		Rz30Cob2T+9	Rz50Cob2T+9	Rz70Cob2T+9	2	
		Rz30Cob4T+9	Rz50Cob4T+9	Rz70Cob4T+9	4	

Legenda: Rz30 – Sistema radicular concentrado em 0,3 m no solo/Rz50 – Sistema radicular concentrado em 0,5 m no solo/Rz70 – Sistema radicular concentrado em 0,7 m no solo/Cob0 – Plantio direto inadequado/ Cob2 – Sistema de plantio direto que deixa 2 t ha⁻¹ de palhada no solo/Cob 4 – Sistema de plantio direto que deixa 2 t ha⁻¹ de palhada no solo/T-3 – Redução de 3°C na temperatura/T0 – Nenhuma alteração na temperatura/T+3 – Aumento de 3°C na temperatura/T+6 - Aumento de 6°C na temperatura/T+9 - Aumento de 9°C na temperatura.

Tabela 6 - Cenários com alterações na radiação solar diária.

		Profundidade do Sistema Radicular (m)				
		0,3	0,5	0,7		
Alterações radiação solar diária (%)	-25	Rz30Cob0Rad-25	Rz50Cob0Rad-25	Rz70Cob0Rad-25	0	Palhada (t ha⁻¹)
		Rz30Cob2Rad-25	Rz50Cob2Rad-25	Rz70Cob2Rad-25	2	
		Rz30Cob4Rad-25	Rz50Cob4Rad-25	Rz70Cob4Rad-25	4	
	0	Rz30Cob0Rad0	Rz50Cob0Rad0	Rz70Cob0Rad0	0	
		Rz30Cob2Rad0	Rz50Cob2Rad0	Rz70Cob2Rad0	2	
		Rz30Cob4Rad0	Rz50Cob4Rad0	Rz70Cob4Rad0	4	
	+25	Rz30Cob0Rad+25	Rz50Cob0Rad+25	Rz70Cob0Rad+25	0	
		Rz30Cob2Rad+25	Rz50Cob2Rad+25	Rz70Cob2Rad+25	2	
		Rz30Cob4Rad+25	Rz50Cob4Rad+25	Rz70Cob4Rad+25	4	
	+50	Rz30Cob0Rad+50	Rz50Cob0Rad+50	Rz70Cob0Rad+50	0	
		Rz30Cob2Rad+50	Rz50Cob2Rad+50	Rz70Cob2Rad+50	2	
		Rz30Cob4Rad+50	Rz50Cob4Rad+50	Rz70Cob4Rad+50	4	

Legenda: Rz30 – Sistema radicular concentrado em 0,3 m no solo/Rz50 – Sistema radicular concentrado em 0,5 m no solo/Rz70 – Sistema radicular concentrado em 0,7 m no solo/Cob0 – Plantio direto inadequado/ Cob2 – Sistema de plantio direto que deixa 2 t ha⁻¹ de palhada no solo/Cob 4 – Sistema de plantio direto que deixa 4 t ha⁻¹ de palhada no solo/Rad-25 – Redução de 25% na radiação solar/Rad0 – Nenhuma alteração na radiação solar/Rad+25 - Aumento de 25% na radiação solar/Rad+50 - Aumento de 50% na radiação solar.

Tabela 7 - Cenários com alterações na concentração de CO₂ atmosférico.

		Profundidade do Sistema Radicular (m)				
		0,3	0,5	0,7		
Alterações na Concentração de CO₂ (ppm)	350	Rz30Cob0C350	Rz50Cob0C350	Rz70Cob0C350	0	Palhada (t ha⁻¹)
		Rz30Cob2C350	Rz50Cob2C350	Rz70Cob2C350	2	
		Rz30Cob4C350	Rz50Cob4C350	Rz70Cob4C350	4	
	380	Rz30Cob0C380	Rz50Cob0C380	Rz70Cob0C380	0	
		Rz30Cob2C380	Rz50Cob2C380	Rz70Cob2C380	2	
		Rz30Cob4C380	Rz50Cob4C380	Rz70Cob4C380	4	
	450	Rz30Cob0C450	Rz50Cob0C450	Rz70Cob0C450	0	
		Rz30Cob2C450	Rz50Cob2C450	Rz70Cob2C450	2	
		Rz30Cob4C450	Rz50Cob4C450	Rz70Cob4C450	4	
	550	Rz30Cob0C550	Rz50Cob0C550	Rz70Cob0C550	0	
		Rz30Cob2C550	Rz50Cob2C550	Rz70Cob2C550	2	
		Rz30Cob4C550	Rz50Cob4C550	Rz70Cob4C550	4	
	650	Rz30Cob0C650	Rz50Cob0C650	Rz70Cob0C650	0	
		Rz30Cob2C650	Rz50Cob2C650	Rz70Cob2C650	2	
		Rz30Cob4C650	Rz50Cob4C650	Rz70Cob4C650	4	
	750	Rz30Cob0C750	Rz50Cob0C750	Rz70Cob0C750	0	
		Rz30Cob2C750	Rz50Cob2C750	Rz70Cob2C750	2	
		Rz30Cob4C750	Rz50Cob4C750	Rz70Cob4C750	4	

Legenda: Rz30 – Sistema radicular concentrado em 0,3 m no solo/Rz50 – Sistema radicular concentrado em 0,5 m no solo/Rz70 – Sistema radicular concentrado em 0,7 m no solo/Cob0 – Ausência de plantio direto/ Cob2 – Sistema de plantio direto que deixa 2 t ha⁻¹ de palhada no solo/Cob4 – Sistema de plantio direto que deixa 4 t ha⁻¹ de palhada no solo/C350, C380, C450, C550, C650 e C750 – Concentração de CO₂ em 350, 380, 450, 550, 650 e 750 ppm, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do clima e do solo

A análise dos dados de clima indicou que as maiores precipitações anuais médias de 1650, 1528 e 1498 mm foram observadas para os municípios de Uberaba, Machado e Lavras, respectivamente. As menores médias pluviométricas foram registradas em Janaúba, (797 mm), e Araçuaí, (758 mm), locais mais secos que tornam a cultura do milho mais propensa ao estresse hídrico (Tabela 8). O município de Aimorés apresentou as maiores médias de temperatura máxima e mínima, o que está relacionado com a menor altitude (83m), em comparação aos demais municípios. Machado apresentou a maior altitude (873 m) e registrou a menor temperatura mínima média de 14,5 °C.

Tabela 8 - Temperaturas máximas e mínimas e precipitação dos municípios estudados.

Municípios	Temperatura máxima média anual em 33 anos (°C)	Temperatura mínima média anual em 33 anos (°C)	Temperatura média anual em 33 anos (°C)	Precipitação anual média em 33 anos (mm)	Altitude da estação climatológica (m)
Aimorés	31,8	20,3	26,0	978	712
Araçuaí	31,7	19,6	25,7	758	516
Janaúba	31,4	19,0	25,2	797	289
Lavras	27,3	15,1	21,2	1498	737
Machado	27,4	14,5	21,0	1528	691
Paracatu	29,9	18,2	24,1	1466	732
Pompéu	29,8	16,9	23,3	1243	83
Sete Lagoas	28,6	16,2	22,4	1384	873
Uberaba	29,4	16,8	23,1	1650	919
Viçosa	26,9	15,8	21,4	1327	690

Com relação à água disponível no solo (capacidade de campo menos o ponto de murcha permanente), o município de Uberaba foi o que apresentou os maiores valores, seguido de

Pompéu (Tabela 9). O menor valor foi observado em Aimorés, localidade cujo solo apresenta menor capacidade de retenção de água. Em relação à densidade do solo, pode-se observar que os valores variaram entre localidades e profundidades. O solo com a menor média de densidade (954 kg m^{-3}) foi o de Sete Lagoas, apresentando menor resistência ao crescimento de raízes e maior porosidade. Esse valor médio considerou as densidades de cada camada. Já o município de Araçuaí, apresentou a maior densidade média (1.610 kg m^{-3}), indicando uma menor porosidade, em comparação aos demais municípios. Em relação ao percentual de nitrogênio (N) total, os municípios que apresentaram os maiores valores médios foram Sete Lagoas e Viçosa, 0,362 e 0,576%, respectivamente.

Tabela 9 - Atributos físicos e químicos dos solos dos municípios estudados.

Profundidade (m)	Ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	Saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	Densidade (kg m^{-3})	Carbono orgânico (%)	Nitrogênio total (%)
Aimorés						
0,05	0,166	0,286	0,512	1200	1,490	0,190
0,20	0,203	0,355	0,464	1370	1,190	0,140
0,40	0,204	0,295	0,391	1560	0,740	0,140
0,70	0,058	0,091	0,466	1360	0,150	0,100
1,00	0,122	0,204	0,332	1770	0,080	0,100
Araçuaí						
0,05	0,105	0,240	0,466	1370	1,270	0,120
0,20	0,137	0,283	0,357	1610	1,190	0,120
0,40	0,130	0,274	0,381	1610	0,590	0,080
0,70	0,143	0,255	0,312	1700	0,370	0,060
1,00	0,162	0,248	0,324	1760	0,220	0,040
Janaúba						
0,05	0,195	0,353	0,446	1380	2,150	0,260
0,20	0,219	0,322	0,392	1540	1,190	0,220
0,40	0,216	0,324	0,414	1460	0,740	0,140
0,70	0,211	0,331	0,401	1520	0,450	0,190
1,00	0,180	0,316	0,437	1360	0,300	0,090
Lavras						
0,05	0,179	0,337	0,551	1030	2,650	0,170
0,20	0,207	0,321	0,542	1100	1,440	0,090
0,40	0,201	0,326	0,562	1050	1,140	0,070
0,70	0,205	0,329	0,593	1010	0,910	0,070
1,00	0,197	0,280	0,602	930	0,680	0,050

Machado						
0,05	0,187	0,344	0,570	1040	2,190	0,150
0,20	0,226	0,337	0,510	1190	1,290	0,100
0,40	0,228	0,332	0,530	1110	0,990	0,080
0,70	0,251	0,361	0,537	1140	0,830	0,060
1,00	0,221	0,332	0,605	980	0,680	0,060
Paracatu						
0,05	0,254	0,363	0,549	1140	2,270	0,170
0,20	0,256	0,364	0,545	1120	1,060	0,110
0,40	0,248	0,357	0,576	1060	0,990	0,100
0,70	0,231	0,344	0,590	1000	0,680	0,080
1,00	0,238	0,340	0,596	1000	0,600	0,080
Pompéu						
0,05	0,243	0,359	0,502	1250	2,230	0,180
0,20	0,222	0,333	0,507	1170	1,270	0,140
0,40	0,227	0,372	0,534	1130	0,820	0,190
0,70	0,243	0,397	0,505	1190	0,590	0,100
1,00	0,232	0,349	0,548	1110	0,590	0,140
Sete Lagoas						
0,05	0,191	0,300	0,611	910	3,450	0,370
0,20	0,249	0,362	0,551	1050	1,720	0,300
0,40	0,234	0,359	0,583	970	0,970	0,140
0,70	0,229	0,354	0,605	930	0,820	0,350
1,00	0,168	0,276	0,604	910	0,750	0,650
Uberaba						
0,05	0,110	0,254	0,439	1500	1,060	0,070
0,20	0,117	0,263	0,432	1520	0,380	0,040
0,40	0,110	0,238	0,510	1320	0,600	0,040
0,70	0,113	0,251	0,534	1260	0,680	0,040
1,00	0,127	0,280	0,517	1300	0,380	0,040
Viçosa						
0,05	0,227	0,336	0,513	1200	1,280	0,490
0,20	0,263	0,354	0,437	1420	0,670	0,370
0,40	0,286	0,372	0,498	1270	0,520	0,680
0,70	0,310	0,411	0,466	1280	0,750	0,670
1,00	0,346	0,461	0,466	1290	0,670	0,670

4.2 Efeito das Alterações na Precipitação

As produtividades simuladas foram diferentes para cada localidade indicando que a cultura do milho apresentou respostas distintas às alterações na precipitação e às medidas

mitigadoras (Figura 2). Com a diminuição da precipitação em 25 e 50% foi observado que, para todas as localidades, houve uma queda na produtividade em comparação ao *baseline* (cenário sem alteração em precipitação), para todas as estratégias de manejo avaliadas. Santos et al. (2011) também 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.

O cenário com um sistema radicular concentrado nos 0,3 m do perfil do solo e sem cobertura (Rz30Cob0) foi o que apresentou as maiores quedas na produtividade dentre os cenários de manejo testados, em comparação ao *baseline*, para todos os municípios, indicando a importância de se corrigir o perfil e manter palhada na superfície do solo. Nesse cenário, dentre os municípios, Janaúba foi o que apresentou a maior redução na produtividade (59%), em decorrência da redução de 50% na precipitação (Figura 2C). As reduções no rendimento de grãos com maiores percentuais foram para Aimorés e Araçuaí, além de Janaúba (Figura 2A,2B E 2C). Esses municípios apresentam em comum temperaturas elevadas e as menores pluviosidades.

A menor redução na produtividade, dentre as localidades, foi observada em Uberaba (Figura 2I). Apesar da redução da precipitação em 50%, a produtividade simulada para essa localidade apresentou uma queda de apenas 35%, em relação ao *baseline*.

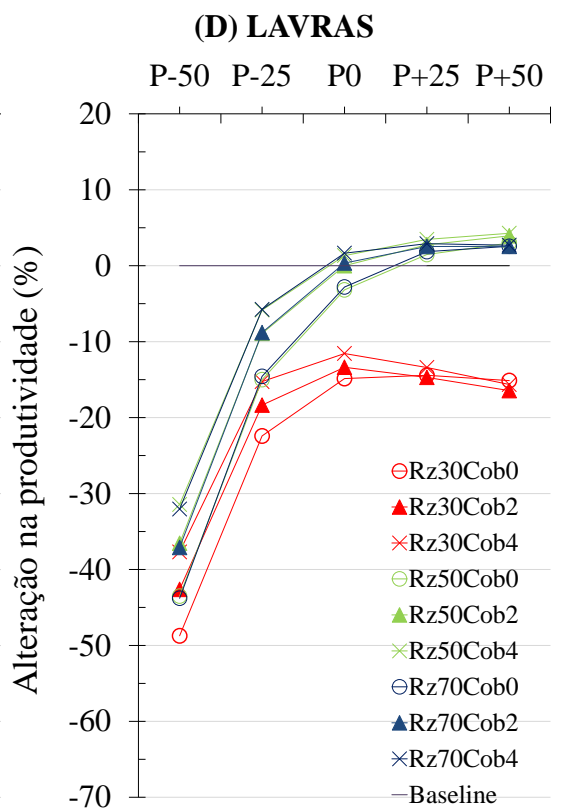
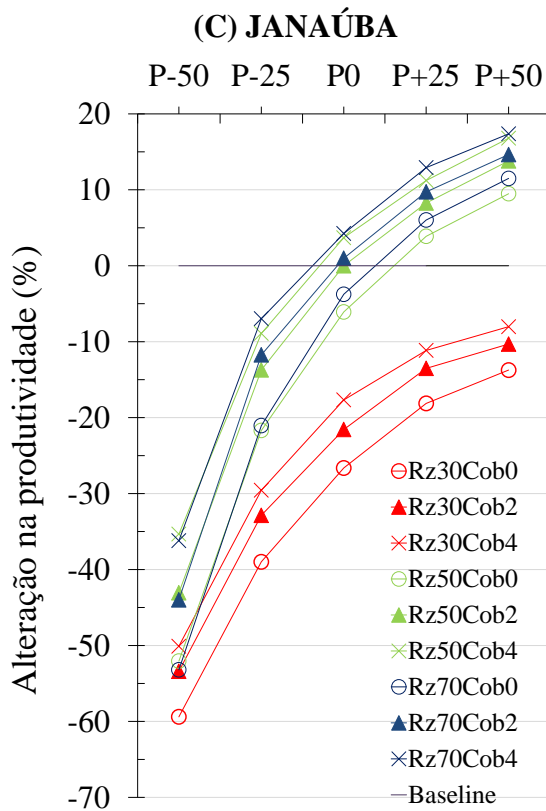
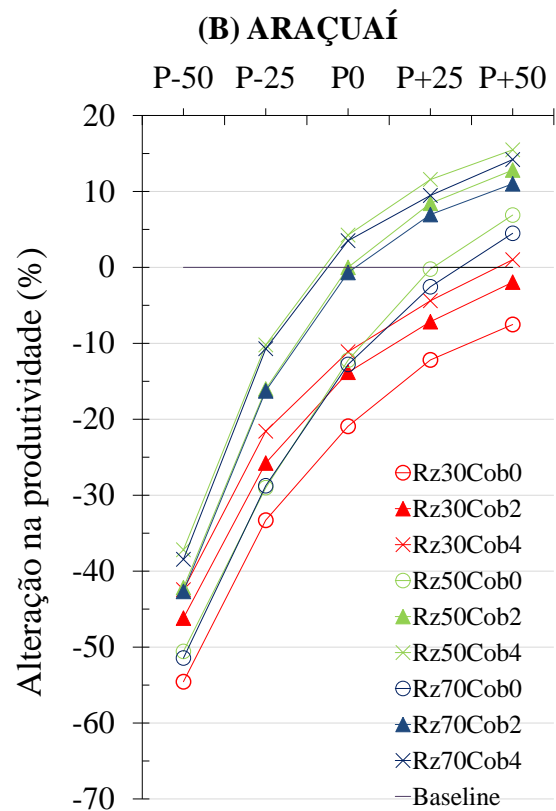
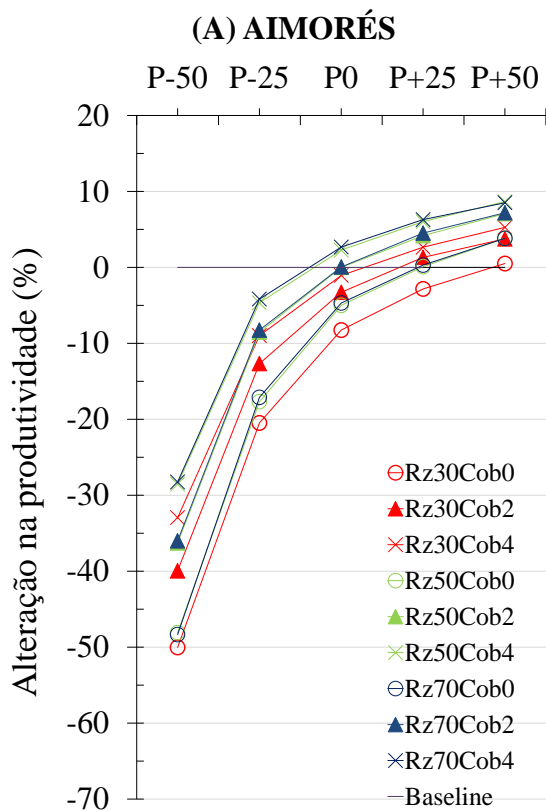
À medida que foram sendo testados cenários com sistemas radiculares mais profundos e com presença de uma quantidade maior de palhada na superfície do solo, a queda no rendimento de grãos foi sendo atenuada, mesmo com decréscimos drásticos na precipitação pluviométrica, denotando o potencial mitigador destas estratégias de manejo nesses efeitos. De um modo geral, os cenários de medidas mitigadoras que apresentaram as menores quedas na produtividade para todos os municípios testados foram os que consideraram uma cobertura de 4 t ha⁻¹ de palhada e sistemas radiculares de 0,5 e 0,7 m. O município em que o potencial mitigador do cenário com raiz de 0,7 m e 4 t ha⁻¹ de palhada na cobertura (Rz70Cob4) pôde ser mais notado foi Machado (Figura 2E). Com essa estratégia de manejo, mesmo reduzindo a precipitação em 25%, foi observada uma queda no rendimento de grãos de menos de 1%. Com essa mesma queda na precipitação, para o mesmo município, foi observada quebra da produtividade de mais de 20% quando se avaliou uma cultivar com sistema radicular raso e ausência total de cobertura (Rz30Cob0). Isso remete ao grande potencial mitigador de se utilizarem cultivares que cresçam mais profundamente o sistema radicular, além da manutenção de palhada na superfície do solo, num cenário de regime pluviométrico alterado, com conseqüente redução na disponibilidade hídrica no solo. Essa maior efetividade do

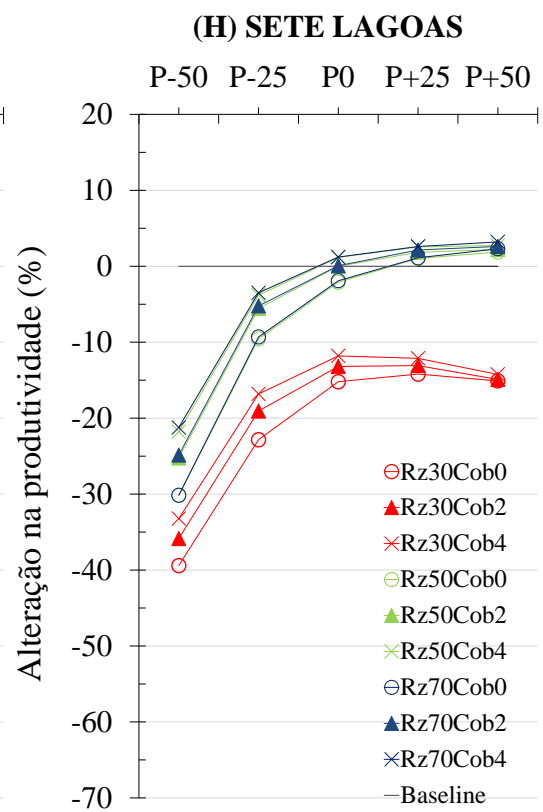
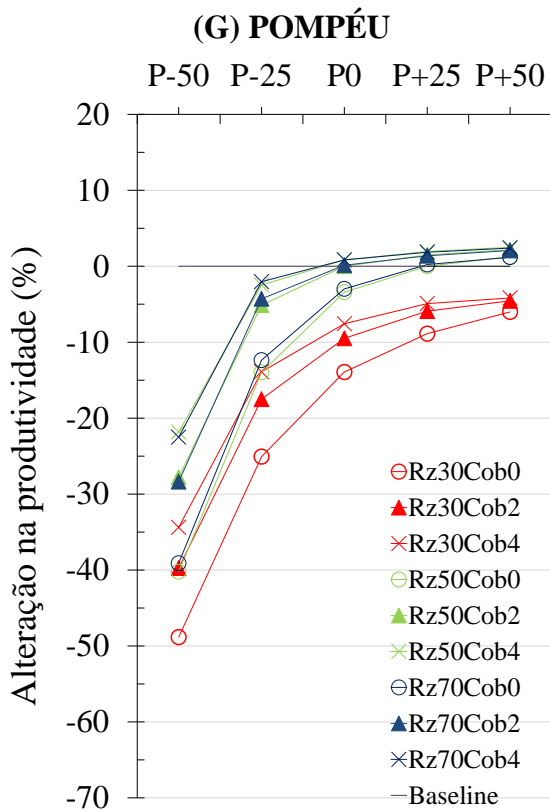
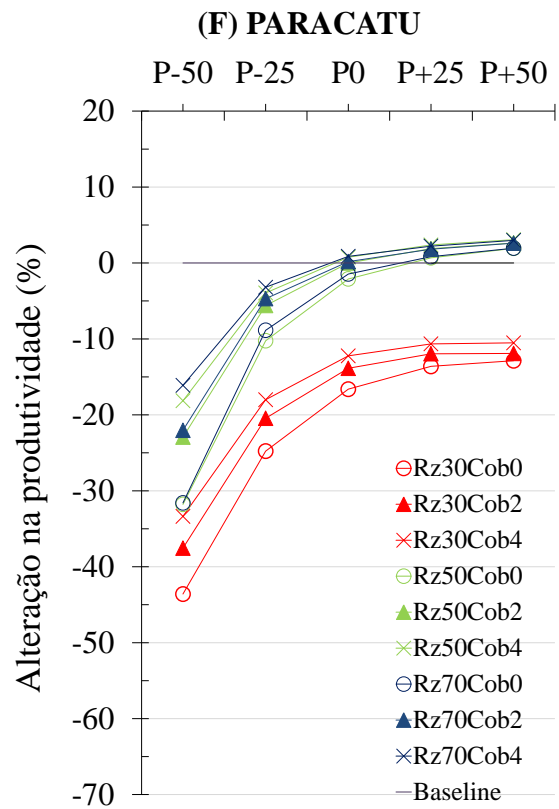
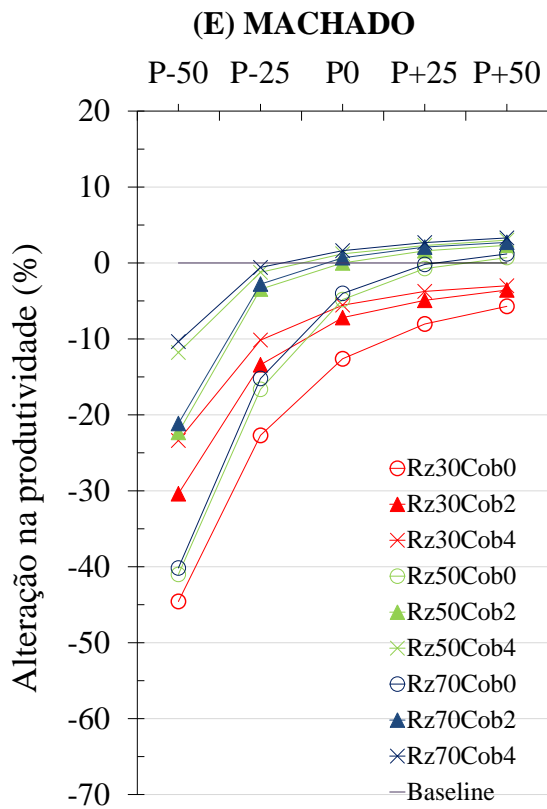
manejo citado (Rz70Cob4) como medida mitigadora em Machado pode ter sido favorecida por uma combinação de fatores, como o maior volume de chuvas e a altitude mais elevada, que propicia temperaturas mais amenas, sobretudo no período noturno (Tabela 8). Temperaturas noturnas altas aumentam a taxa respiratória e reduz a fotossíntese líquida (SANS, 2009). O aprofundamento do sistema radicular e o aumento da quantidade de palhada mantida como cobertura do solo favoreceu a atenuação da quebra de produtividade em todos os municípios.

Com o aumento nos percentuais de precipitação, a resposta da cultura também foi diferente em cada localidade e de acordo com o manejo adotado. O município de Janaúba apresentou um ganho em produtividade de mais de 17%, em resposta ao aumento de 50% na precipitação, para o cenário de cultivar com sistema radicular mais profundo e manutenção de 4 t ha^{-1} de palhada na superfície do solo (Figura 2C). Em regiões com restrições hídricas para a cultura do milho, o aumento da precipitação tem um efeito considerável.

Os municípios de Lavras e Sete Lagoas (Figuras 2D e 2H) apresentaram queda na produtividade com o aumento da precipitação nos cenários com sistema radicular raso, ou seja, aqueles com perfil do solo corrigido inadequadamente ou com algum impedimento ao crescimento radicular (Rz30Cob0, Rz30Cob2 e Rz30Cob4). Isso pode ser devido ao fato de que, com o aumento no volume de chuvas nesses locais, que já possuem bons índices pluviométricos médios anuais (Tabela 8), nitratos sejam lixiviados afetando a produtividade. Com o sistema radicular raso, a planta tem uma menor chance de absorção do nitrogênio, pois os nitratos se tornam rapidamente indisponíveis nas camadas superficiais e, portanto, acabam por apresentar rendimento médio de grãos aquém do esperado. É sabido que caso haja restrição no crescimento das raízes, a planta pode ter o seu desenvolvimento comprometido (MORAES, 2017). Observa-se que nas estratégias de mitigação que envolveu sistemas radiculares mais profundos, isso não ocorreu.

Souza et al. (2014) avaliaram, através de simulações, os impactos de alterações na precipitação sobre a produtividade de milho no município de Sete Lagoas. Foram simulados cenários com aumento e diminuição percentual na precipitação diária e como forma de atenuação dos efeitos dessas alterações, diferentes profundidades de sistema radicular e quantidades de palhada deixada no solo. Eles também observaram que, tanto o aumento, quanto a redução na precipitação causam efeitos consideráveis na produtividade de milho e que, para Sete Lagoas, a profundidade do sistema radicular apresentou maior potencial para mitigar os efeitos de alteração na precipitação, em comparação à quantidade de palhada.





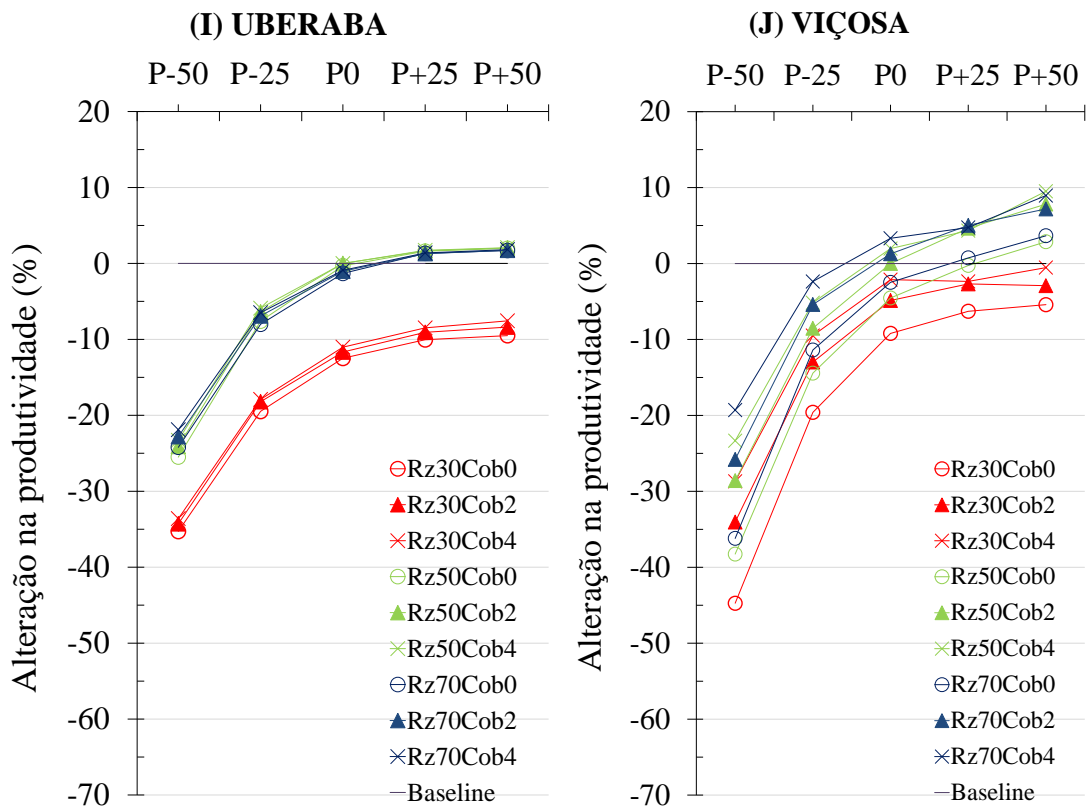


Figura 2 – Alteração percentual na produtividade da cultura do milho para diferentes cenários de alteração da precipitação e de medidas mitigadoras.

Mesmo com o aumento na precipitação, os cenários que apresentaram os maiores incrementos de produtividade, para todas as localidades, foram aqueles que envolveram sistemas radiculares mais profundos (0,5 e 0,7 m) e cobertura de 4 t ha⁻¹ de palhada na superfície do solo.

A cultura do milho requer grande quantidade de água, demandando entre 500 e 800 mm para a obtenção de maiores produtividades (SANS e SANTANA, 2002). Com a redução da precipitação em 25%, os municípios de Araçuaí e Janaúba apresentariam precipitação média anual de 568 e 598 mm, respectivamente. Se for assumido que as chuvas seriam bem distribuídas ao longo do ciclo do milho, nota-se que estes valores estariam então, bem próximo no limite mínimo requerido para se obter as maiores produtividades (Tabela 10). Já com a redução em 50% no regime pluviométrico observa-se que, para todas as localidades, a situação seria mais crítica. Aimorés, Araçuaí e Janaúba apresentariam precipitações anuais de 489, 379 e 399 mm, respectivamente, valores bem abaixo do requerido pela cultura e que, portanto, afetariam o rendimento de grãos de milho (Tabela 10).

Em Uberaba a precipitação passaria de 1650 mm médios anuais para 825 mm com a redução de 50% (Tabela 10). Possivelmente essa localidade não apresentaria quedas consideráveis de rendimentos porque a precipitação, mesmo com a redução, seria suficiente para a cultura do milho durante o seu ciclo.

Lavras, Machado, Pompéu, Paracatu, Sete Lagoas e Viçosa, mesmo após a redução da precipitação em 50% apresentariam valores médios anuais de 749, 764, 621, 692 e 663 mm, respectivamente (Tabela 10). Tais valores estão dentro dos limites requeridos pela cultura em seu ciclo para obtenção das maiores produtividades (500 – 800 mm), o que não apresentaria potencial para queda de produtividade. Vale ressaltar, no entanto que, apesar das precipitações obtidas com as reduções em 25% e 50% nas precipitações estarem dentro do que a cultura requer, outros fatores podem comprometer a produtividade, como por exemplo, a distribuição dessa precipitação ao longo do ano e ao longo do ciclo da cultura

Tabela 10 – Precipitação média anual, em mm, de cada município estudado, após alterações percentuais simuladas.

Município	Precipitação média anual (mm)				
	Cenários				
	P-50	P-25	P0	P+25	P+50
Aimorés	489	733	978	1222	1467
Araçuaí	379	568	758	947	1136
Janaúba	399	598	797	997	1196
Lavras	749	1123	1498	1872	2246
Machado	764	1146	1528	1910	2292
Paracatu	733	1099	1466	1832	2198
Pompéu	621	932	1243	1553	1864
Sete Lagoas	692	1038	1384	1730	2076
Uberaba	825	1238	1650	2063	2475
Viçosa	663	995	1327	1658	1990

As análises estatísticas indicaram que não houve interação significativa, a 5% de probabilidade, entre profundidades de sistema radicular, precipitação e quantidades de palhada, para nenhum município estudado (Apêndice 1 - Tabela 1). O mesmo ocorreu para interação entre profundidade de sistema radicular e quantidade de palhada.

As interações que se mostraram significativas na análise de variância (prof. raiz x precipitação e cobertura x precipitação) foram desdobradas a fim de se avaliarem os efeitos de suas interações sobre a produtividade do milho (Tabelas 11 e 12). Sendo assim, foram realizados testes de Tukey, a 5% de probabilidade, para cobertura, precipitação e profundidade de raiz, obtendo-se interações significativas entre a precipitação e profundidade do sistema radicular para Araçuaí, Janaúba e Lavras (Tabela 11).

Lavras e Janaúba apresentaram resultados parecidos. Independentemente da alteração na precipitação (-50%, -25%, nenhuma alteração, 25% ou +50%), a produtividade obtida, considerando uma cultivar com sistema radicular de 0,3 m, diferiu estatisticamente, enquanto que para cultivares com sistemas radiculares de 0,5 e 0,7 m, não houve diferença estatística significativa (Tabela 11). Dessa forma, o uso de cultivar com um sistema radicular com profundidade 0,5 m tende a ser suficiente para atenuar os efeitos negativos da redução no volume de chuvas. Isso porque, estatisticamente, não há diferença entre as produtividades obtidas com sistema radicular de 0,5 e 0,7 m nessas cidades. Para Araçuaí, observou-se a mesma situação, exceto quando se reduziu a precipitação em 50%. Nesse caso de redução drástica do regime pluviométrico, o sistema radicular de 0,3, 0,5 ou 0,7 m não apresentou diferença estatística significativa e, portanto, o aprofundamento do sistema radicular até 0,7 m não foi suficiente para atenuar os efeitos deste nível de redução no volume de chuvas (Tabela 11).

Quando se comparou o rendimento médio de grãos obtido com cada uma das alterações na precipitação (Tabela 11), verificou-se que, para os municípios Araçuaí e Janaúba e para as três profundidades de sistema radicular testadas (0,3, 0,5 e 0,7 m), o comportamento foi semelhante. Cada alteração negativa na precipitação (P-50, P-25 e P0) apresentou diferentes produtividades, exceto ao se aumentar a precipitação. O aumento em 25% ou 50% não gerou produtividades estatisticamente diferentes. Já para Lavras, para todos os sistemas radiculares avaliados, houve diferença estatística no rendimento de grãos apenas ao se reduzir a precipitação em 25% e 50%, o que não ocorreu para as demais alterações.

Ao se avaliar a interação entre a quantidade de palhada deixada no solo e as alterações na precipitação (Tabela 12) observou-se que, para o cenário de redução de 50% no volume de chuvas os municípios de Aimorés, Lavras, Machado, Paracatu, Pompéu e Viçosa, apresentaram produtividades simuladas estatisticamente diferentes para os diferentes cenários de quantidade de palhada (0; 2 e 4 t ha⁻¹). Ou seja, nesse nível de escassez hídrica, o aumento da quantidade de palhada de 0 para 2 e de 2 para 4 t ha⁻¹ tende a ser muito importante como

mitigação dos efeitos da alteração climática. Isso porque a adoção de sistemas de plantio direto bem consolidado tende a proteger a superfície do solo com a presença da palhada, favorecer a infiltração de água e, ainda, reduzir a evaporação da água pela superfície do solo (MOREIRA et al., 2011).

Tabela 11 - Desdobramento da análise de variância para interação entre profundidade do sistema radicular e a alteração na precipitação.

Municípios	Alteração climática	Profundidade do sistema radicular (m)		
		0,3	0,5	0,7
Araçuaí	P -50	2694Aa	2922Aa	2877Aa
	P - 25	3769Ab	4205Bb	4197Bb
	P0	4366Ac	5017Bc	4983Bc
	P+25	4746Ad	5494Bd	5393Bd
	P+50	5009Ad	5759Bd	5664Bd
Janaúba	P -50	2462Aa	3045Ba	2992Ba
	P - 25	3566Ab	4591Bb	4673Bb
	P0	4205Ac	5344Bc	5414Bc
	P+25	4619Ad	5807Bd	5902Bd
	P+50	4811Ad	6107Bd	6169Bd
Lavras	P -50	5348Aa	5896Ba	5852Ba
	P - 25	7632Ab	8454Bb	8473Bb
	P0	8140Ac	9327Bc	9360Bc
	P+25	8054Abc	9625Bc	9612Bc
	P+50	7908Abc	9735Bc	9629Bc

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Touch et al., (2015), também observaram efeito positivo do incremento da quantidade de palhada sobre o rendimento médio de grãos de milho ao simularem alternativas estratégicas de adaptação da cultura do milho a mudanças climáticas. Os autores utilizaram o modelo de crescimento de culturas APSIM e realizaram as simulações para Cambodia, verificando também o potencial do uso de resíduos culturais como medida mitigadora. Em outro estudo avaliando a retenção de água no solo e a disponibilidade hídrica para as plantas em sistema de plantio direto, comparando-se ao plantio convencional (as parcelas foram cultivadas com milho no verão e aveia preta e ervilhaca no inverno). Dalmago et al., (2009) verificaram que tanto a retenção de água no solo quanto a disponibilidade de água para as plantas é maior no cultivo com plantio direto do que no plantio convencional, para as camadas

mais superficiais. Tal resultado reitera a relevância do uso de palhada no solo como estratégia de se reduzir impactos de escassez hídrica para as plantas, por causa da barreira formada pela palha no solo que reduz a evaporação da água na superfície do solo, dentre outros benefícios.

Tabela 12 - Desdobramento da análise de variância para interação entre palhada e a alteração na precipitação.

Municípios	Alteração climática	Cobertura de palhada (t ha ⁻¹)		
		0	2	4
Aimorés	P -50	2690Aa	3290Ba	3684Ca
	P - 25	4288Ab	4741Bb	4944Bb
	P0	4942Ac	5200Bc	5325Bc
	P+25	5214Ad	5432Bcd	5519Bcd
	P+50	5400Ad	5573ABd	5650Bd
Lavras	P -50	5129Aa	5747Ba	6220Ca
	P - 25	7758Ab	8256Bb	8544Bb
	P0	8732Ac	8977ABc	9116Bc
	P+25	9037Ac	9090Ac	9165Ac
	P+50	9085Ac	9073Ac	9113Ac
Machado	P -50	4928Aa	6396Ba	7197Ca
	P - 25	6942Ab	7930Bb	8146Bb
	P0	7878Ac	8301Bc	8408Bbc
	P+25	8232Ad	8450ABc	8520Bc
	P+50	8377Ad	8527Ac	8578Ac
Paracatu	P -50	4989Aa	5621Ba	6006Ca
	P - 25	6620Ab	6960Bb	7104Bb
	P0	7233Ac	7401ABc	7480Bc
	P+25	7442Acd	7541Ac	7598Ac
	P+50	7522Ad	7582Ac	7639Ac
Pompéu	P -50	4758Aa	5651Ba	6127Ca
	P - 25	6884Ab	7561Bb	7797Bb
	P0	7744Ac	8047Bc	8143Bc
	P+25	8068Acd	8222Ac	8275Ac
	P+50	8208Ad	8298Ac	8326Ac
Viçosa	P -50	4100Aa	4798Ba	5186Ca
	P - 25	5773Ab	6193Bb	6417Bb
	P0	6436Ac	6722Bc	6875Bc
	P+25	6672Acd	6962Bcd	6956Bcd
	P+50	6829Ad	7078ABd	7210Bd

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao se diminuir a precipitação em 25%, as produtividades simuladas para esses locais só foram estatisticamente diferentes no cenário com ausência do sistema de plantio direto.

Quando se aumentou a precipitação em 25 e 50%, foram observados dois comportamentos distintos. Para Aimorés e Viçosa, houve diferença estatística significativa entre as produtividades obtidas para o plantio que não deixa resíduo cultural no solo (Cob0) e os demais cenários (Cob2 e Cob4). O mesmo não ocorreu para Lavras, Machado, Paracatu e Pompéu. Nesses locais, não se verificou diferença no rendimento de grãos para os cenários com 0, 2 e 4 t ha⁻¹ de palhada (Tabela 12). Isso indica que o uso do sistema de plantio direto, apenas com o intuito de conservar água para as plantas, não é relevante num cenário de abundância de chuvas, como é o caso dessas localidades. Comparando-se as produtividades médias, obtidas para cada uma das alterações na precipitação, nota-se que houve diferença entre os rendimentos simulados para os cenários em que se reduziu em 50% e 25% a precipitação. Esse resultado é observado para todas as quantidades de palhada avaliadas. Ou seja, as reduções nos percentuais de precipitação foram efetivamente prejudiciais para o rendimento de grãos de milho nas localidades estudadas, independentemente da quantidade de palhada mantida na superfície do solo (Tabela 12).

4.3 Efeito das Alterações na Temperatura

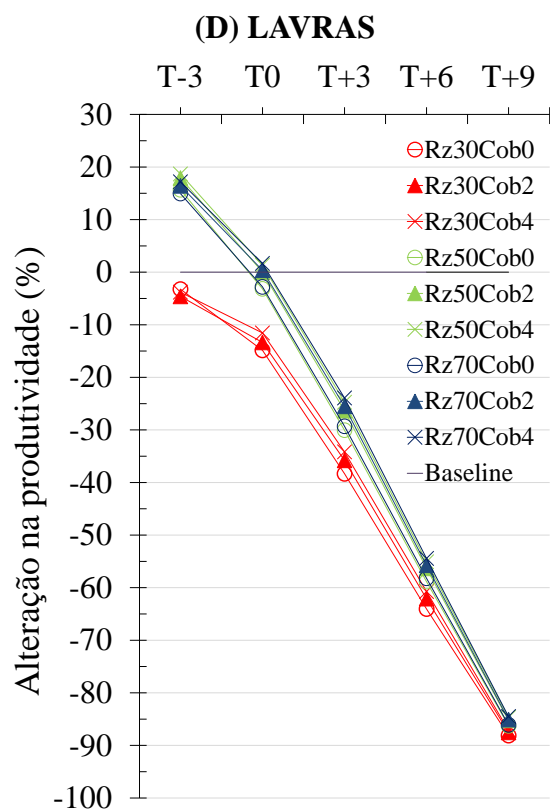
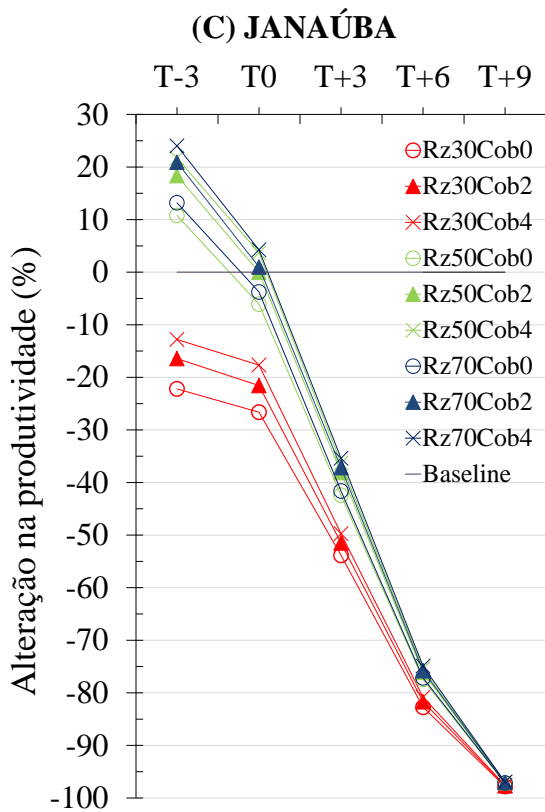
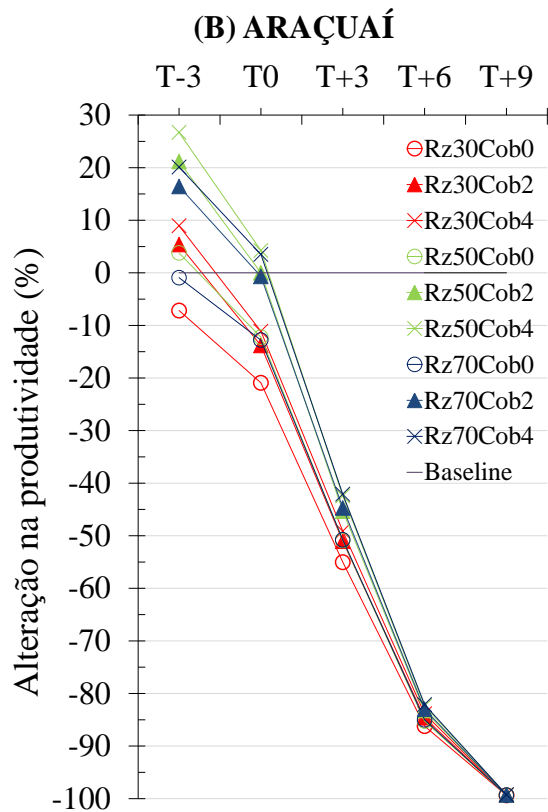
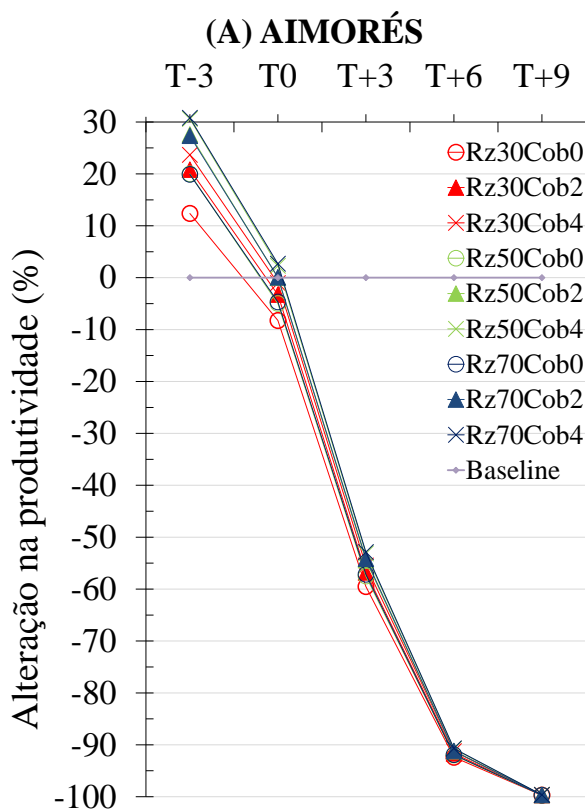
O efeito das alterações na variável temperatura sobre o rendimento médio de grãos da cultura do milho foi similar entre os municípios estudados (Figura 3). Os incrementos nas temperaturas máximas e mínimas geraram grandes quedas de produtividade. Aimorés e Araçuaí foram os municípios que apresentaram as maiores reduções na produtividade em função do aumento na temperatura (Figura 3A e 3B). Ao se aumentar a temperatura em 9°C, a defasagem na produtividade chegou a 99,65% e 99,25%, para Aimorés e Araçuaí, respectivamente. Com o aumento da temperatura em 6°C a redução no rendimento médio de grãos foi de 90,70% em Aimorés e 82,11% em Araçuaí. Esta diminuição drástica na produtividade foi observada no cenário que representa um solo bem corrigido, sem restrição ao crescimento radicular (Rz70) e com um sistema de plantio direto bem consolidado que deixa 4 t ha⁻¹ de restos culturais no solo. Mesmo com o potencial mitigador desse cenário (Rz70Cob4), foi observada queda no rendimento de grãos de milho. Com o aumento drástico da temperatura, o município de Machado foi o que apresentou a menor queda na

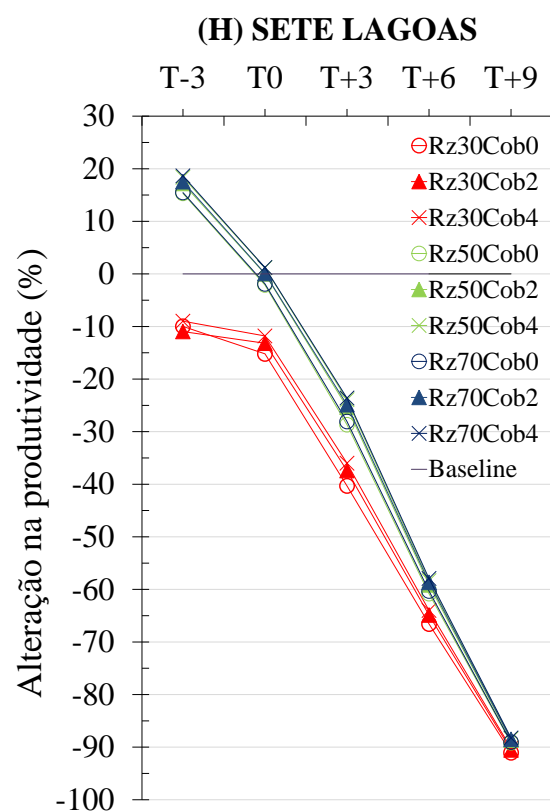
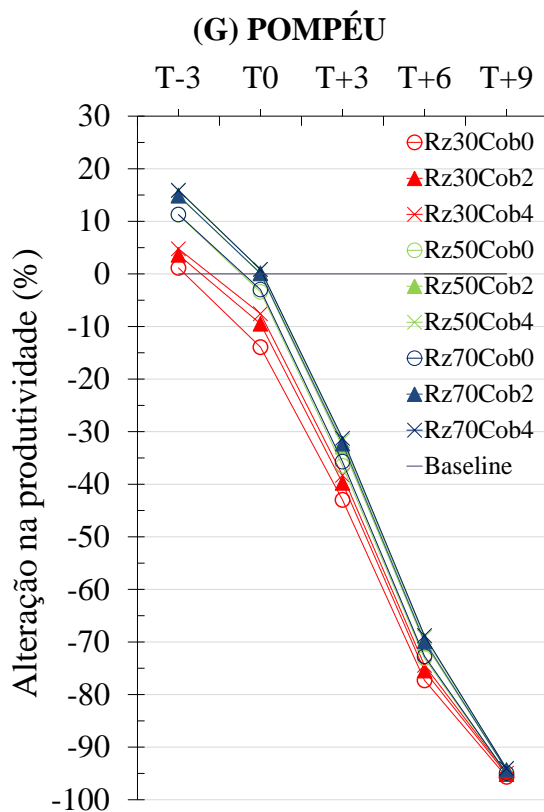
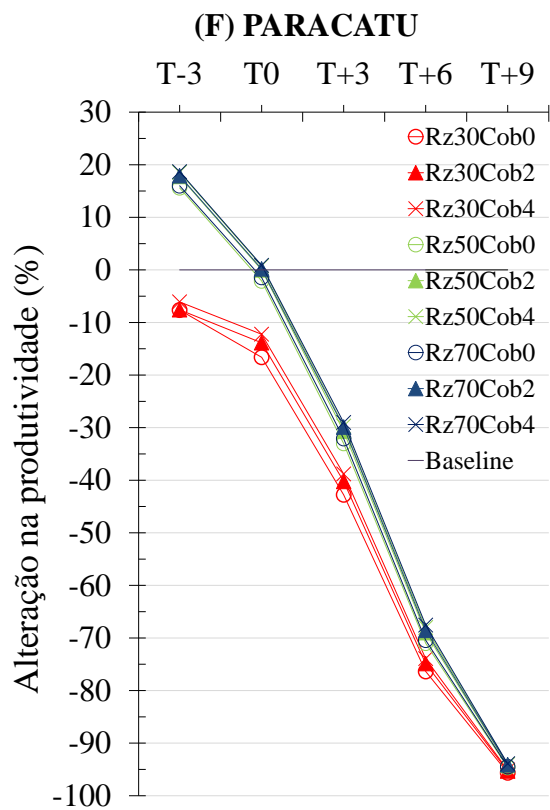
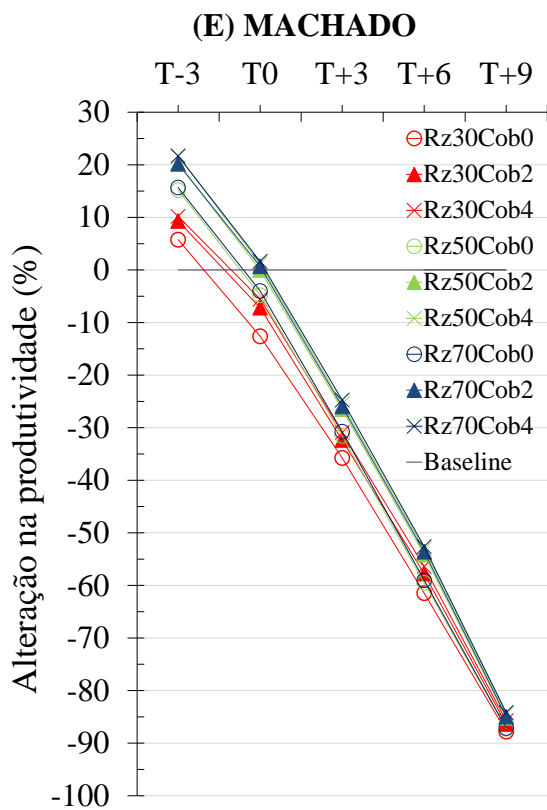
produtividade (Figura 3E), de 52,61% para o cenário em que considera boa quantidade de palhada e um sistema radicular crescendo sem limitações (Rz70Cob4).

Com um incremento mais moderado da temperatura (T+3°C), observou-se uma redução menor no rendimento médio de grãos. No cenário considerado *baseline* (Rz50Cob2), os municípios de Araçuaí e Aimorés apresentaram as maiores reduções na produtividade, de 45,33% e 54,41%, respectivamente. Lavras apresentou a menor redução na produtividade (26,36%) nesse cenário, seguido de Machado (26,51%). O aprofundamento do sistema radicular e o aumento da cobertura pouco atenuou a queda da produtividade. Para o cenário Rz70Cob4, Aimorés passou a ter uma queda na produtividade de 52,88% e Araçuaí de 42,10%. Lavras e Machado apresentaram redução na produtividade de 23,92% e 24,75%, respectivamente (Figura 3A, 3B, 3D e 3E).

Kim et al., (2007) realizaram um estudo nos Estados Unidos objetivando determinar a resposta da cultura milho à cenários de diferentes concentrações de dióxido de carbono e temperaturas em câmaras do tipo *Soil-plant-atmosphere research – SPAR*. Eles avaliaram duas concentrações diferentes de CO₂ (370 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 750 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e cinco cenários de temperatura (19/13, 25/19, 31/25, 35/29 e 38,5/32,5 °C). O total de massa seca da parte aérea passou de 159,2 g planta⁻¹ no cenário de 19/13°C para 75,6 g planta⁻¹ no cenário de 38/32,5°C, uma redução de 52,4 % no total de massa seca da parte aérea. Os autores concluíram que o crescimento, o desenvolvimento e a fotossíntese de plantas de milho foram significativamente afetados pelo aumento da temperatura.

A redução da produtividade, decorrente do incremento da temperatura, se deve ao encurtamento do ciclo da cultura do milho. Temperaturas mais elevadas aceleram as reações metabólicas e fisiológicas fazendo com que as fases fenológicas da cultura sejam atingidas mais rapidamente. Este mecanismo é, normalmente, quantificado empregando-se o conceito de graus-dia com base na soma térmica. Cada cultura e mesmo cada cultivar requer uma certa soma térmica para completar fases específicas de seu ciclo. Com o aumento da temperatura do ar, gasta-se menos dias para atingir as somas térmicas requeridas em cada fase e, com isso, o ciclo encurta. O encurtamento do ciclo reduz a capacidade da planta em acumular e translocar fotoassimilados ao grão, reduzindo, assim, a produtividade (CRUZ et al., 2011). Streck et al., (2012) simularam cenários para avaliar o efeito da elevação das temperaturas máximas e mínimas diárias na cultura do milho em Santa Maria, RS. Eles observaram que quando os períodos de semeadura e a emergência são em setembro, outubro, janeiro e fevereiro, o desenvolvimento vegetativo do milho é acelerado com o incremento na temperatura.





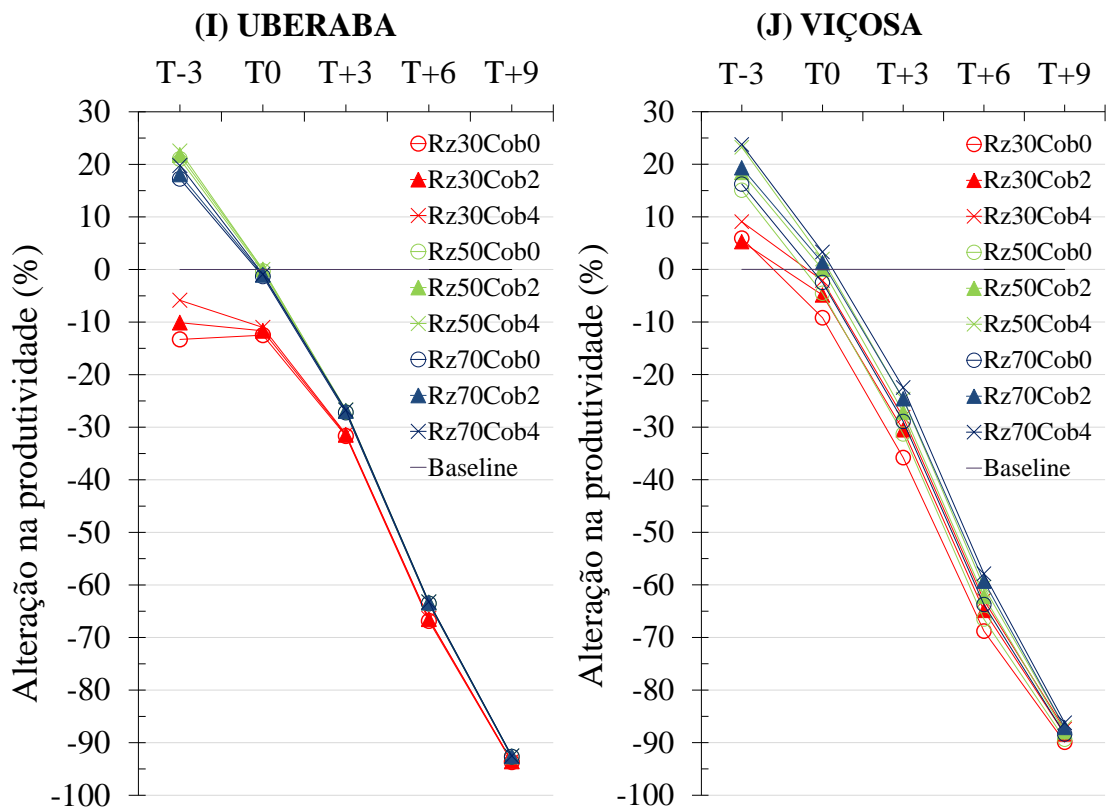


Figura 3 - Alteração percentual na produtividade da cultura do milho para diferentes cenários de alteração da temperatura e de medidas mitigadoras.

Como esperado, em todas as localidades observou-se redução na duração do ciclo da cultura do milho, em decorrência do aumento da temperatura (Figura 4). Sem alteração na temperatura (T0), destacaram-se as durações do ciclo da cultura do milho para Machado, Aimorés e Paracatu foram de 138, 112 e 125 dias, respectivamente. Aumentando-se em 9°C a temperatura, as essas durações do ciclo passaram a ser de 95, 62 e 81 dias. Com a diminuição do ciclo, cada fase é reduzida, inclusive no enchimento de grãos para acúmulo de biomassa. O tempo para produzir e translocar fotoassimilados para o grão é menor. Isso porque, com os incrementos nas temperaturas, a planta acelera suas reações metabólicas e completará seu ciclo mais rapidamente pelo acúmulo de graus-dia, reduzindo a oportunidade de acumular fotoassimilados (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

Silva et al, (2014) avaliaram, através de simulações, o efeito da variação da temperatura do ar e de estratégias mitigadoras na produtividade do milho no município de Sete Lagoas, MG. Eles observaram a redução quase que linear no comprimento do ciclo da cultura devido ao aumento da temperatura. Essa redução na duração do ciclo chegou a

aproximadamente 30%. MINUZZI e LOPES (2005) avaliaram, através de simulações, o desempenho agrônomo da cultura do milho no Centro-Oeste do Brasil em cenários climáticos diversos. Foi observada a redução na duração do ciclo da cultura do milho de dois a oito dias em um cenário de alteração climática a curto prazo e de seis a 11 dias em médio prazo.

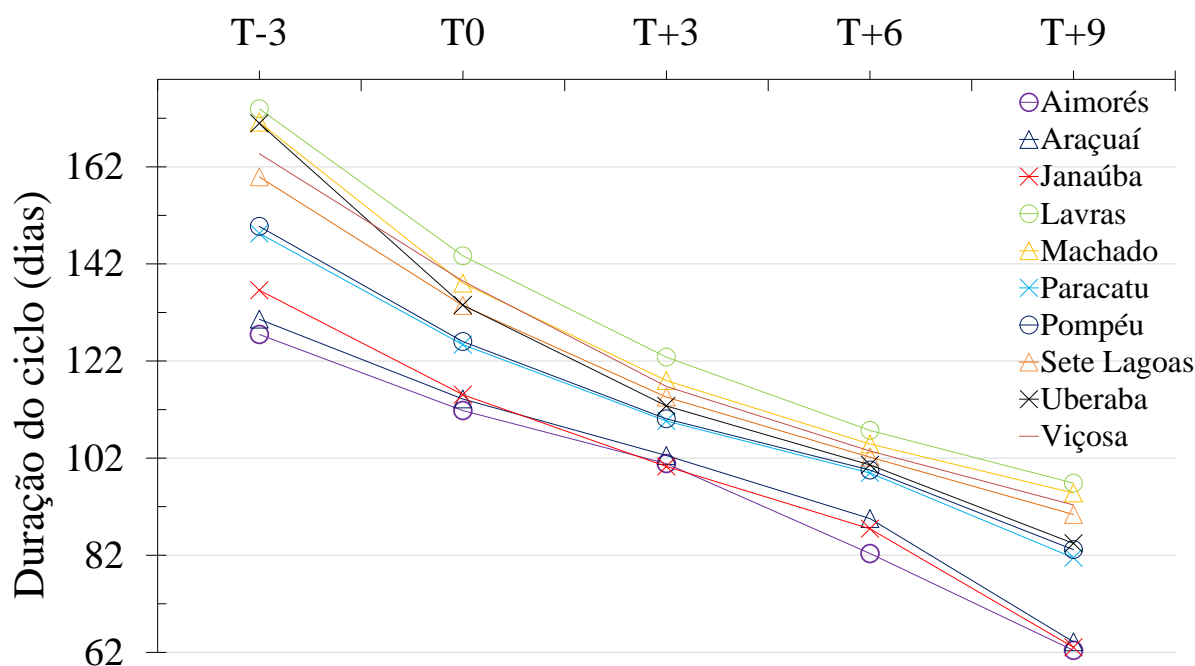


Figura 4 - Duração média do ciclo da cultura do milho em cada município em função das alterações na temperatura do ar.

Além dos cenários de aumento da temperatura, foi simulado também um cenário com diminuição das temperaturas máximas e mínimas diárias em 3°C. No cenário com maior potencial para mitigar os efeitos das mudanças do clima (Rz70Cob4), houve acréscimo em produtividade de 24% em Janaúba, 19% em Paracatu, 24% em Viçosa, 22% em Machado e 16% em Pompéu.

Segundo Kinry (1991), os limites inferior e superior de temperatura para o crescimento do milho são 8°C e 44°C, respectivamente. No entanto a faixa de temperatura em que a cultura tem seu crescimento máximo está entre 26°C e 34°C. Nenhum dos municípios apresentou temperaturas médias fora dos limites para que a cultura do milho se desenvolva nas simulações realizadas (Tabela 13). Apenas algumas localidades apresentaram temperaturas fora da faixa de crescimento ótimo. No entanto, observaram-se quedas expressivas no rendimento de grãos nos cenários simulados com o aumento da temperatura.

Isso pode ser explicado pelo efeito do aumento da temperatura do ar no encurtamento do ciclo, fazendo com que a cultura tenha menos tempo para acumular e translocar fotoassimilados.

Tabela 13 - Temperatura média anual, em °C, de cada município estudado, após alterações percentuais simuladas.

Município	Temperatura média anual 33 anos (°C)				
	Cenários				
	T-3	T0	T+3	T+6	T+9
Aimorés	23,0	26,0	29,0	32,0	35,0
Araçuaí	22,7	25,7	28,7	31,7	34,7
Janaúba	22,2	25,2	28,2	31,2	34,2
Lavras	18,2	21,2	24,2	27,2	30,2
Machado	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0
Paracatu	21,1	24,1	27,1	30,1	33,1
Pompéu	20,3	23,3	26,3	29,3	32,3
Sete Lagoas	19,4	22,4	25,4	28,4	31,4
Uberaba	20,1	23,1	26,1	29,1	32,1
Viçosa	18,4	21,4	24,4	27,4	30,4

As análises estatísticas indicaram que não houve interação significativa, a 5% de probabilidade, entre profundidade de sistema radicular, temperatura e quantidade de palhada, para nenhum município estudado (Apêndice 1- Tabela 2). O mesmo ocorreu para interação entre profundidade de sistema radicular e quantidade de palhada. As interações que se mostraram significativas pela análise de variância (prof. raiz x temperatura e palhada x temperatura) foram desdobradas a fim de se avaliarem os efeitos de suas interações sobre a produtividade do milho (Tabelas 14 e 15). Para isso, foram realizados testes de Tukey, a 5% de probabilidade, para palhada, temperatura e profundidade de raiz.

O único município que apresentou interação significativa entre a cobertura de palhada e as alterações na temperatura foi Araçuaí. Quando se reduziu a temperatura (T-3°C), houve diferença estatística apenas para a produtividade obtida em um sistema que corresponde a ausência total de palhada (Cob0). As produtividades obtidas para Cob2 e Cob4 não diferiram significativamente. Sendo assim, nessa condição climática (T-3°C), o uso da palhada tem efeito benéfico e significativo. No entanto, o efeito é o mesmo com o uso de 2 ou de 4 t ha⁻¹ de palhada, em Araçuaí (Tabela 14).

Tabela 14 - Desdobramento da análise de variância para interação entre palhada e a alteração na temperatura.

Municípios	Alteração climática	Cobertura de palhada (t ha ⁻¹)		
		0	2	4
Araçuaí	T-3	5080Aa	5893Ba	6112Ba
	T0	4365Ab	4905Bb	5097Bb
	T+3	2462Ac	2730ABc	2858Bc
	T+6	748Ad	844Ad	887Ad
	T+9	33Ae	36Ae	38Ae

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha e minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para as simulações relacionadas à Araçuaí (Tabela 14), com o aumento da temperatura (T+6 e T+9), observou-se que as produtividades não diferiram estatisticamente para as quantidades de palhada avaliadas. Nesses níveis de aumento de temperatura, o uso de cobertura tende a não amenizar os efeitos sobre a produtividade. Já para o aumento em 3°C (T+3), houve uma diferença entre as produtividades obtidas com nenhuma palhada e com a presença de palhada (2 ou de 4 t ha⁻¹) sendo assim o uso da palhada tem efeito benéfico e significativo.

Avaliando os efeitos das alterações na temperatura sobre a produtividade, verificou-se que, os rendimentos médios de grãos foram estatisticamente diferentes. Sendo assim, cada alteração na temperatura (T-3, T0, T+3, T+6 e T+9) apresentou efeitos significativos sobre a produtividade para todas as quantidades de palhada avaliadas.

As localidades que apresentaram interação entre as alterações na temperatura e a profundidade do sistema radicular foram Araçuaí, Janaúba, Lavras, Machado, Paracatu, Pompéu, Sete Lagoas, Uberaba e Viçosa. Para essas localidades, ao se aumentar a temperatura em 3°C (T+3), o comportamento foi semelhante. A única produtividade que foi estatisticamente diferente foi a obtida para a profundidade do sistema radicular concentrado nos 0,3 m do solo, que corresponde a um solo mal corrigido e com algum tipo de resistência ao crescimento radicular. O aprofundamento do sistema radicular para 0,5 m apresentou produtividade estatisticamente diferente, mostrando potencial de minorar o efeito do aumento da temperatura. Não houve diferença significativa entre o rendimento de grãos obtidos para 0,5 e 0,7 m de profundidade de raiz. A exceção foi Araçuaí cujos resultados não apontaram efeito significativo sobre a produtividade ao se aprofundar o sistema radicular de 0,3 m para 0,5 m (Tabela 15).

Para aumento na temperatura mais expressivo (T+9), o aprofundamento do sistema radicular não apresentou potencial como mitigador dos efeitos climáticos sobre a produtividade. Ou seja, para todos os municípios, não houve diferença estatística entre as produtividades obtidas para os sistemas radiculares concentrados em 0,3; 0,5 e 0,7 m do perfil do solo (Tabela 15).

Avaliando os efeitos das alterações na temperatura sobre a produtividade, verificou-se que, os rendimentos médios de grãos foram estatisticamente diferentes. Sendo assim, cada alteração na temperatura (T-3, T0, T+3, T+6 e T+9) apresentou efeitos significativos sobre a produtividade para todas as profundidades de sistema radicular. Uberaba, Sete Lagoas e Janaúba apresentaram uma ligeira diferença dos demais municípios com relação ao sistema radicular de 0,3 m, em que não houve diferença significativa entre as produtividades ao se diminuir em 3°C a temperatura (T-3). O efeito dessa redução na temperatura não foi significativo para um sistema radicular raso (Rz30) em Uberaba, Sete Lagoas e Janaúba (Tabela 15).

Tabela 15 - Desdobramento da análise de variância para interação entre profundidade do sistema radicular e a alteração na temperatura.

Municípios	Alteração climática	Profundidade do sistema radicular (m)		
		0,3	0,5	0,7
Araçuaí	T-3	5277Aa	6042Ba	5766Ba
	T0	4366Ab	5017Bb	4983Bb
	T+3	2487Ac	2772Ac	2790Ac
	T+6	778Ad	844Ad	857Ad
	T+9	35Ae	36Ae	36Ae
Janaúba	T-3	4464Aa	6301Ba	6431Ba
	T0	4205Aa	5344Bb	5414Bb
	T+3	2603Ab	3289Bc	3337Bc
	T+6	983Ac	1276Ad	1295Ad
	T+9	124Ad	156Ae	159Ae
Lavras	T-3	9020Aa	11019Ba	10902Ba
	T0	8140Ab	9327Bb	9360Bb
	T+3	5997Ac	6846Bc	6920Bc
	T+6	3538Ad	4058Bd	4116Bd
	T+9	1164Ae	1369Ae	1385Ae

Machado	T-3	9199Aa	10102Ba	10111Ba
	T0	7767Ab	8383Bb	8437Bb
	T+3	5684Ac	6121Bc	6181Bc
	T+6	3517Ad	3769Ad	3811Ad
	T+9	1134Ae	1220Ae	1236Ae
Paracatu	T-3	7204Aa	9097Ba	9113Ba
	T0	6650Ab	7719Bb	7744Bb
	T+3	4606Ac	5340Bc	5402Bc
	T+6	1934Ad	2377Bd	2416Bd
	T+9	360Ae	441Ae	451Ae
Pompéu	T-3	8571Aa	9475Ba	9470Ba
	T0	7448Ab	8235Bb	8251Bb
	T+3	4955Ac	5508Bc	5558Bc
	T+6	2015Ad	2426Bd	2454Bd
	T+9	394Ae	459Ae	460Ae
Sete Lagoas	T-3	7729Aa	10043Ba	10065Ba
	T0	7436Aa	8559Bb	8569Bb
	T+3	5332Ab	6355Bc	6395Bc
	T+6	2992Ac	3483Bd	3523Bd
	T+9	807Ad	965Ae	978Ae
Uberaba	T-3	8627Aa	11641Ba	11316Ba
	T0	8439Aa	9549Bb	9456Bb
	T+3	6550Ab	6988Bc	6981Bc
	T+6	3195Ac	3501Ad	3502Ad
	T+9	612Ad	706Ae	707Ae
Viçosa	T-3	7264Aa	8090Ba	8149Ba
	T0	6436Ab	6745ABb	68510Bb
	T+3	4662Ac	4918Abc	5080Bc
	T+6	2345Ad	2515Ad	2700Ad
	T+9	778Ae	806Ae	867Ae

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.4 Efeito das Alterações na concentração de CO₂

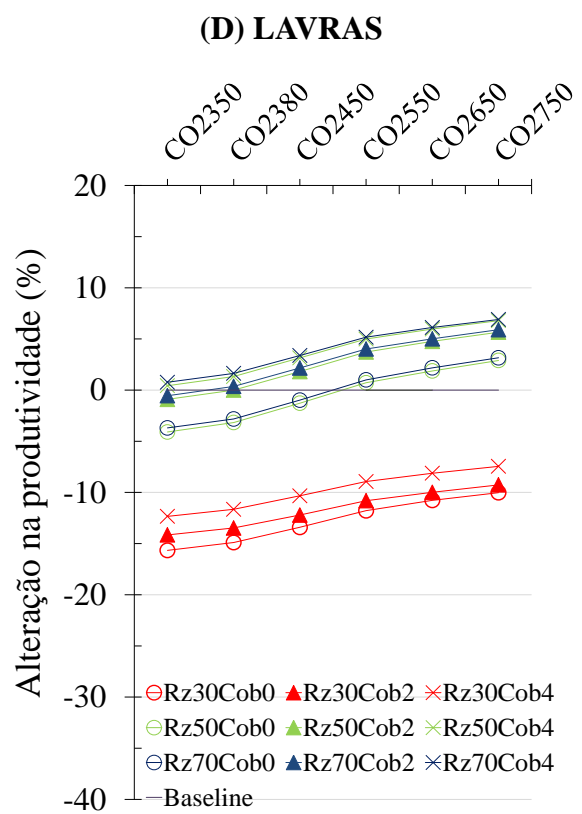
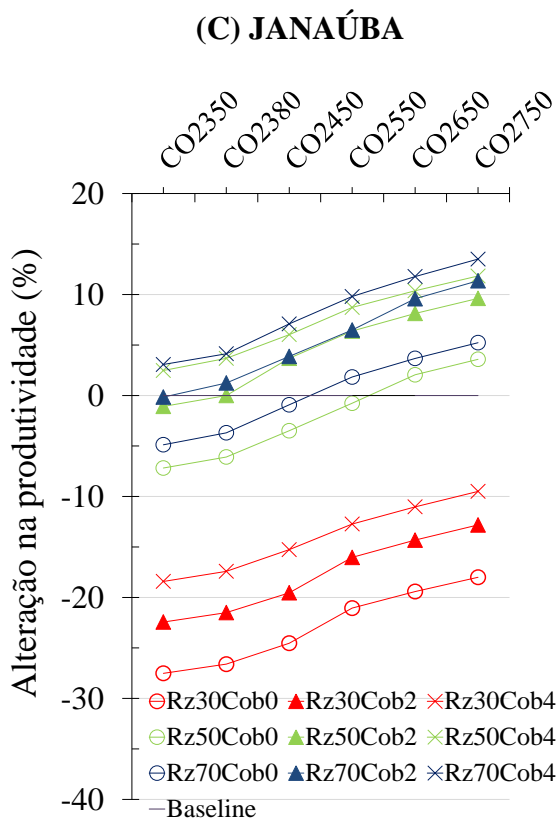
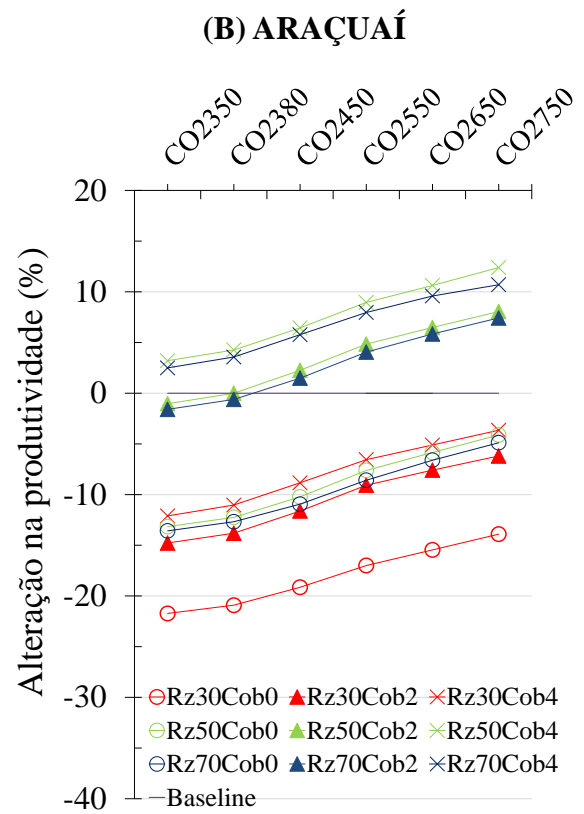
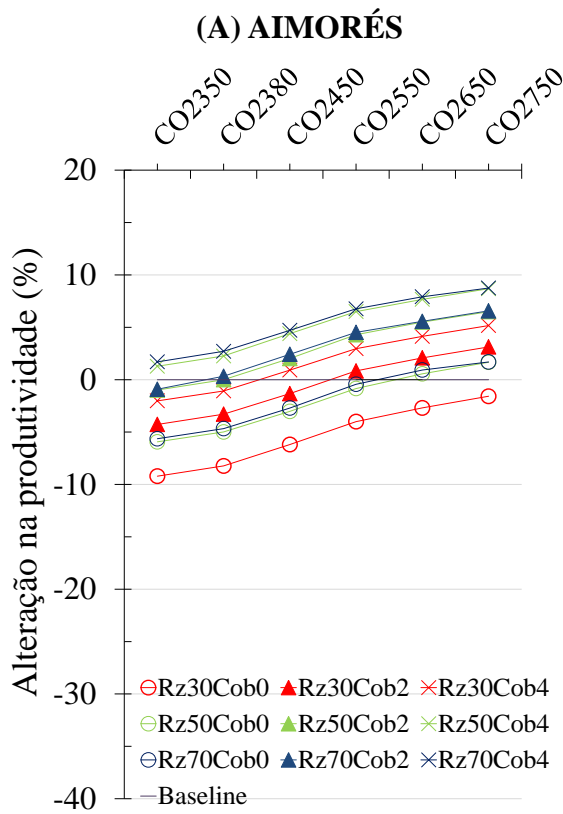
A concentração atual de CO₂ na atmosfera é de 406 ppm (NOAA, 2017) e a projeção global com as mudanças climáticas é que esse valor aumente. É esperado que um incremento na concentração de dióxido de carbono na atmosfera seja benéfico para as plantas, porque se trata do insumo principal para a fotossíntese. O problema advindo desse aumento de CO₂ é a consequente alteração na temperatura. Com uma concentração de 400 ppm, é esperado um

aumento na temperatura de aproximadamente 2 °C (IPCC, 2007). Há uma relação, portanto, de que a cada 100 ppm de dióxido de carbono acrescidos na atmosfera, a temperatura aumente aproximadamente 1 °C.

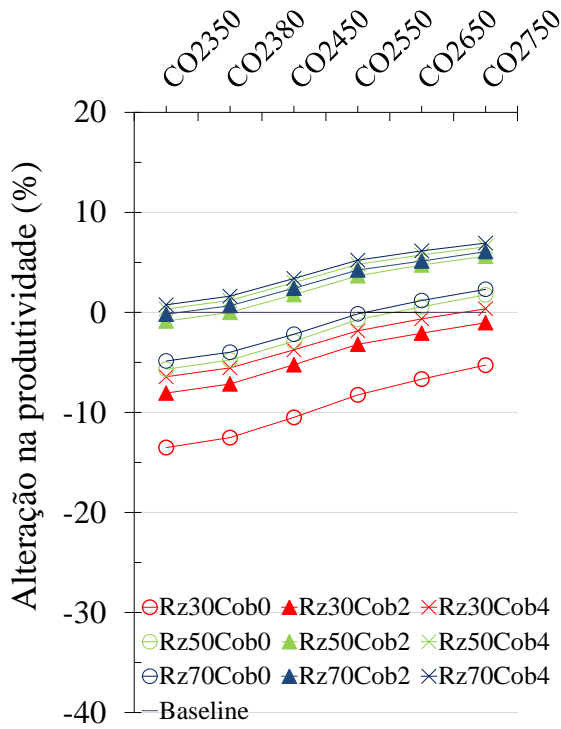
No entanto, o sistema DSSAT possui a ferramenta de alterar variáveis climáticas de modo linear e, assim sendo, não é abordada nesse item a influência do CO₂ sobre a temperatura, e sim, somente o efeito do CO₂ sobre a produtividade.

Foi observado que, com o aumento da concentração de CO₂, houve um aumento no rendimento médio de grãos em todas as localidades (Figura 5). Considerando uma cultivar com sistema radicular de 0,5 m e 2 t ha⁻¹ de palhada na superfície do solo, o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera proporcionou um aumento máximo de 13,51% em Janaúba e de 10,70% em Araçuaí. Araçuaí, Janaúba e Viçosa estão dentre os municípios que apresentaram os maiores ganhos em produtividade. Por se tratar de localidades com temperaturas elevadas e menor pluviosidade, estas localidades podem ser mais sensíveis às alterações na concentração de dióxido de carbono. Esses municípios apresentaram respostas ao CO₂ mais expressivas. Pequenas respostas da cultura do milho às alterações na concentração de CO₂ em Sete Lagoas também foram observadas por Amaral et al., (2014). Os incrementos modestos na produtividade com o aumento considerável na concentração de CO₂ pode ser explicado pelo fato de que plantas C₄, já são eficientes na utilização do carbono disponível e apresentam maior eficiência fotossintética. O ponto de compensação de CO₂ para plantas C₄, que é o caso do milho é em torno de 5 ppm. A partir desse valor a fotossíntese líquida é positiva e a planta começa a produzir fotoassimilados (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

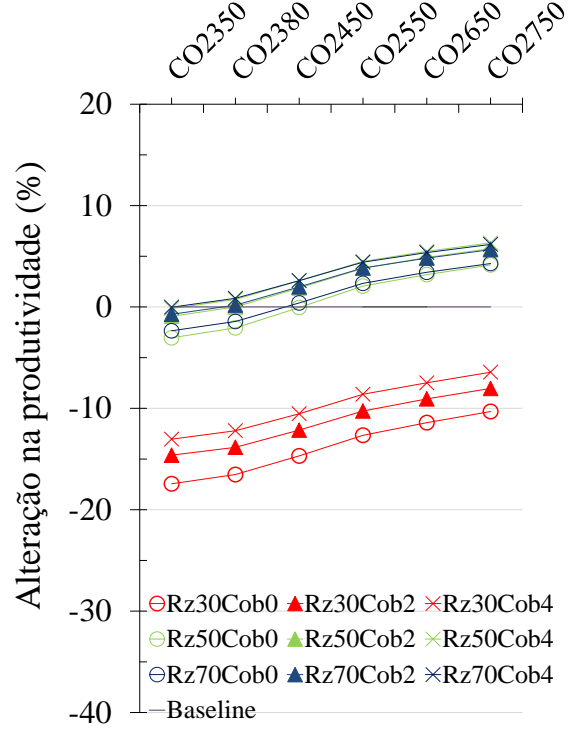
As análises estatísticas indicaram que não houve interação significativa, a 5% de probabilidade, entre profundidade de sistema radicular, concentração de CO₂ e quantidade de palhada, para nenhum município estudado (Apêndice 1- Tabela 3). O mesmo ocorreu para profundidade do sistema radicular e concentração de CO₂ e para cobertura e concentração de CO₂. Ou seja, estatisticamente não há interação entre as alterações na concentração de dióxido de carbono e as estratégias de manejo avaliadas. Portanto, não se verificou quaisquer efeitos das diferentes profundidades de sistema radicular e das quantidades de palhada deixadas no solo na produtividade do milho, dentro de cada concentração de CO₂ avaliada.



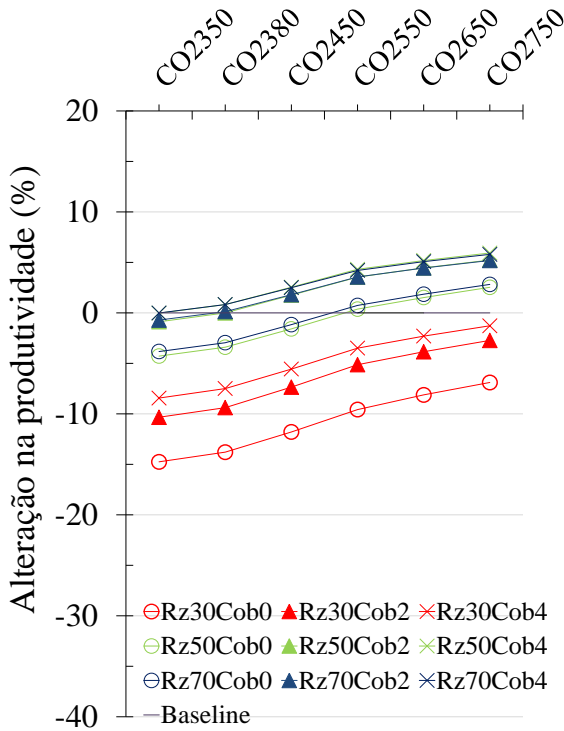
(E) MACHADO



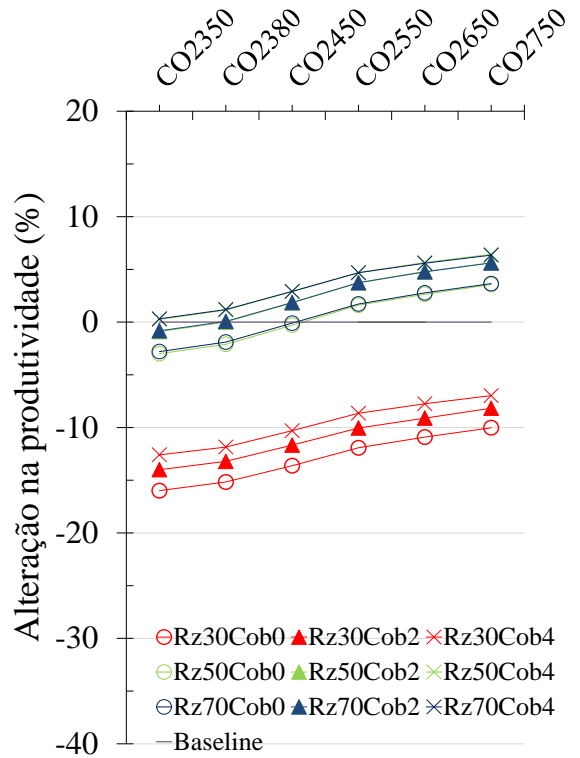
(F) PARACATU



(G) POMPÉU



(H) SETE LAGOAS



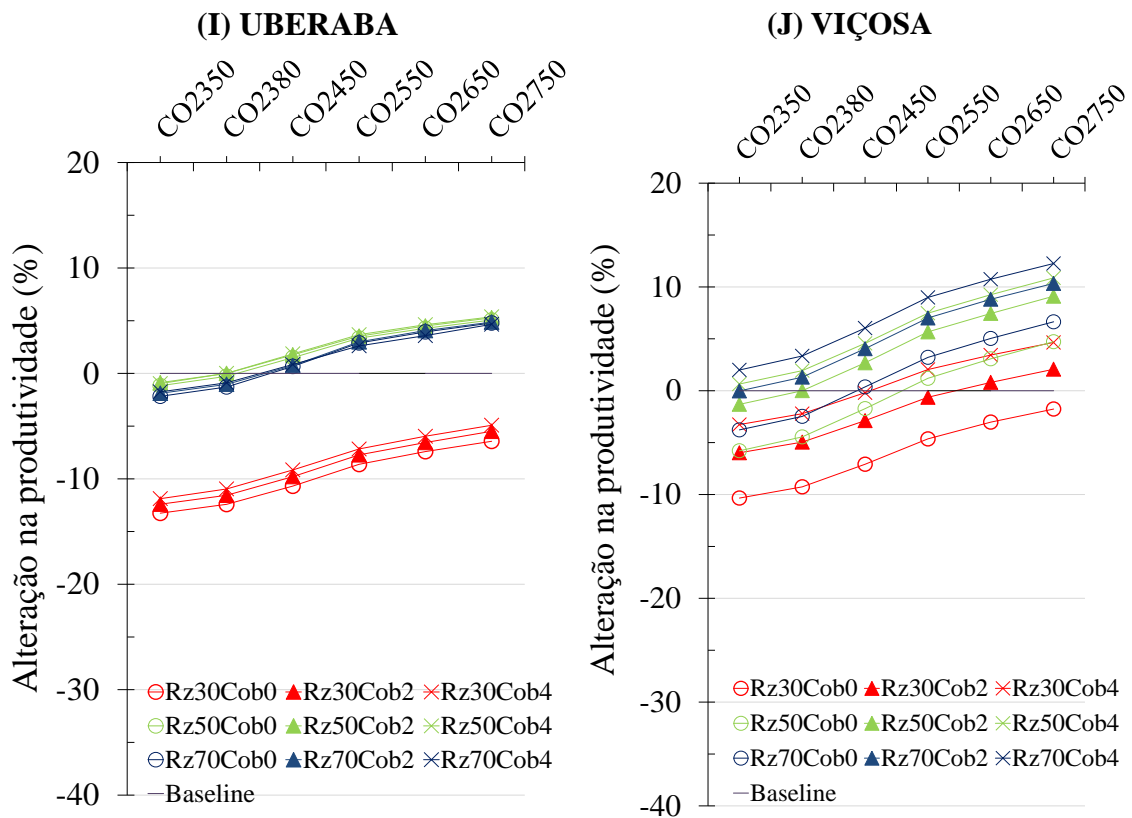


Figura 5 - Alteração percentual na produtividade da cultura do milho para diferentes cenários de alteração na concentração de CO₂ e de estratégias de manejo da cultura.

4.5 Efeito das Alterações na Radiação Solar

Os efeitos das alterações na radiação solar sobre o rendimento médio de grãos de milho foram diferentes de acordo com cada localidade (Figura 6). Entretanto, de um modo geral, houve uma tendência de a produtividade cair com a redução percentual da radiação solar e um incremento na produtividade com o aumento da radiação.

Em comparação com o cenário padrão (Rz50Cob2), a redução na taxa de radiação solar em 25% (Rad-25) provocou redução de 15,63% na produtividade em Viçosa; 21,29% em Uberaba, 19,79% em Paracatu e de apenas 8% em Araçuaí, sendo este último município o que apresentou a menor redução da produtividade (Figura 6J, 6I, 6F e 6B). Esses percentuais apresentados referem-se ao cenário com sistema radicular profundo (Rz70Cob4).

Já para solos corrigidos inadequadamente ou com alguma resistência ao crescimento radicular (Rz30) as reduções na produtividade foram maiores, destacando-se, ainda, Araçuaí, que apresentou uma queda na produtividade de 23%, para o cenário de manejo sem cobertura de palhada (Cob0) e sistema radicular raso (Rz30) (Figura 6B). Para o cenário de um sistema

de produção que deixa 4 t ha⁻¹ de palhada no solo (Cob4), a queda na produtividade foi de 16,92% para este município. Sendo assim, infere-se que, tanto sistemas radiculares mais profundos, quanto uma boa cobertura de palhada deixada no solo, devido ao aumento do albedo, apresentam potencial como medidas mitigadoras de efeitos de mudanças na taxa de radiação solar incidente. Para todas as localidades, a melhor estratégia de manejo para atenuar os efeitos de redução da radiação solar, é a que adota uma boa correção do solo, sem impedimento ao crescimento radicular (Rz50 e Rz70) e um sistema de plantio direto bem consolidado (Cob4) (Figura 6).

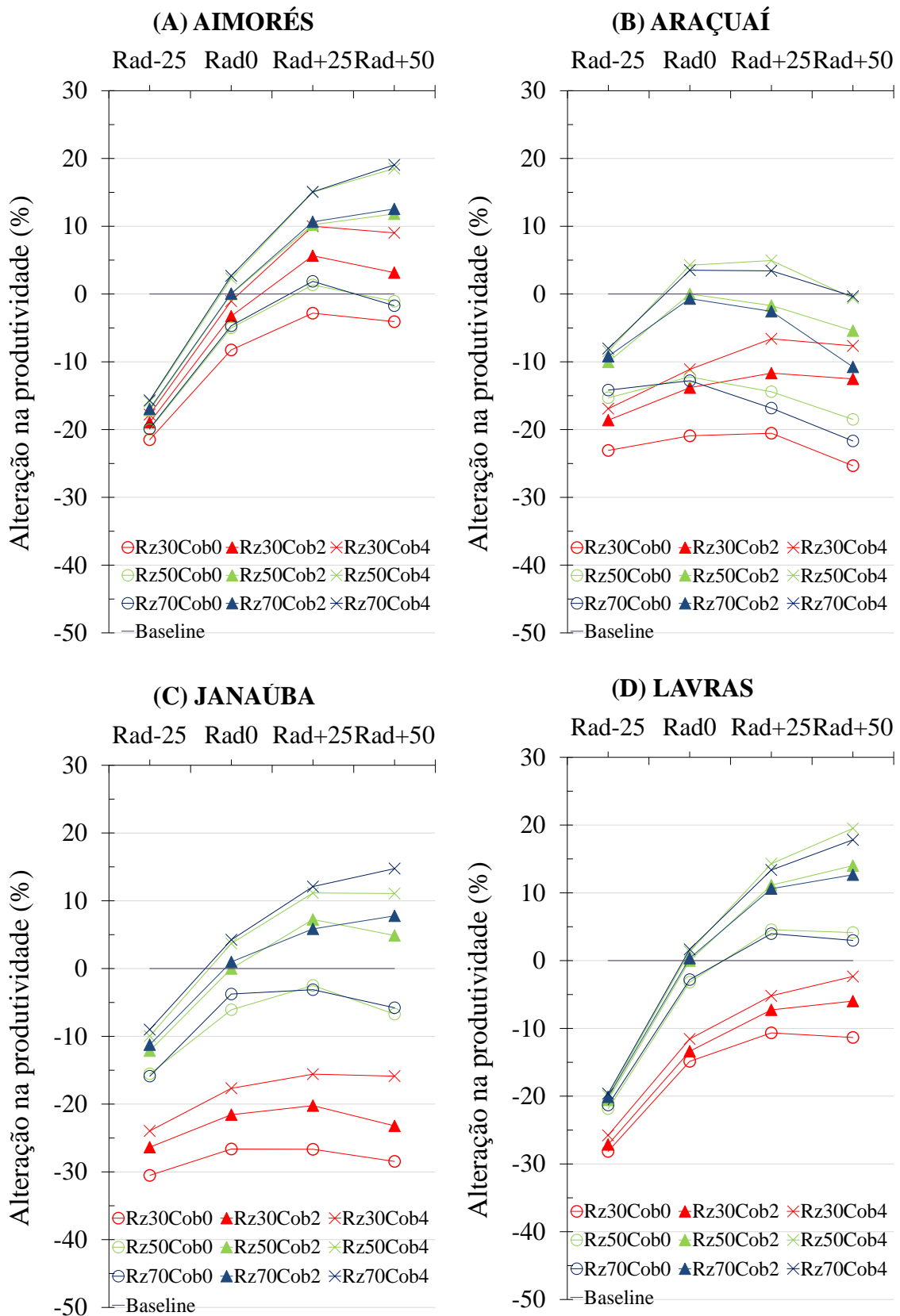
Ainda em comparação ao *baseline* (Rz50Cob2), ao se aumentar a radiação solar em 25 e 50% (Tabela 16) observou-se um aumento no rendimento médio de grãos de milho para a maioria dos municípios estudados. Os incrementos em produtividade chegaram a mais de 20% para Viçosa, Pompéu, Sete Lagoas, Paracatu e Machado, quando se testou o cenário com sistema radicular mais profundo e a maior quantidade de palhada deixada no solo (Rz70Cob4) (Figura 6J, 6G, 6H, 6F e 6E). Araçuaí, no entanto, apresentou uma queda na produtividade ao se aumentar em 50% a radiação solar (Figura 6B). Isso pode ser explicado pelo fato da localidade apresentar baixa precipitação média anual, ou baixa porosidade total (maior densidade entre os municípios) com conseqüente menor retenção de água no solo. O excesso de luz para a planta quando se encontra em estresse hídrico, pode acarretar em uma redução expressiva na eficiência da fotossíntese e, conseqüente redução na produtividade (ARAÚJO e DEMINICIS, 2009). O aumento da radiação também pode aumentar a evapotranspiração que (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014), com um mesmo volume de precipitação e uma mesma retenção de água no solo, acarretará também em queda no rendimento de grãos.

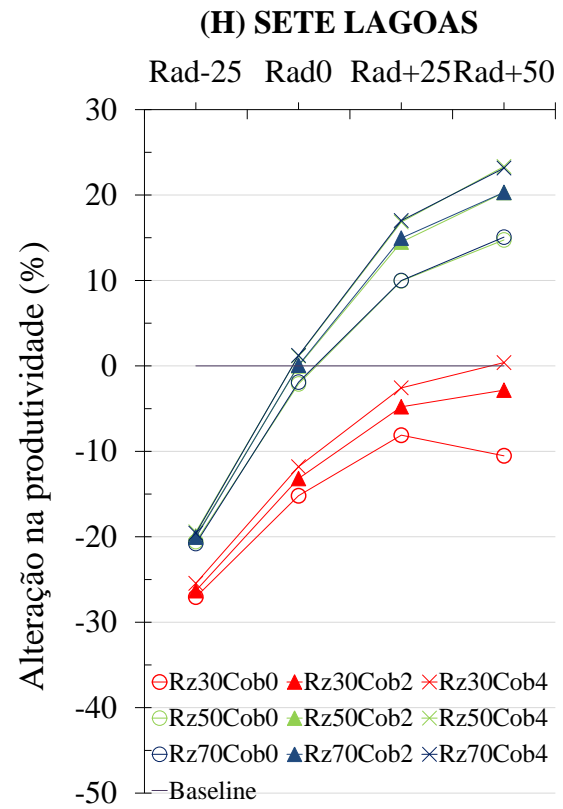
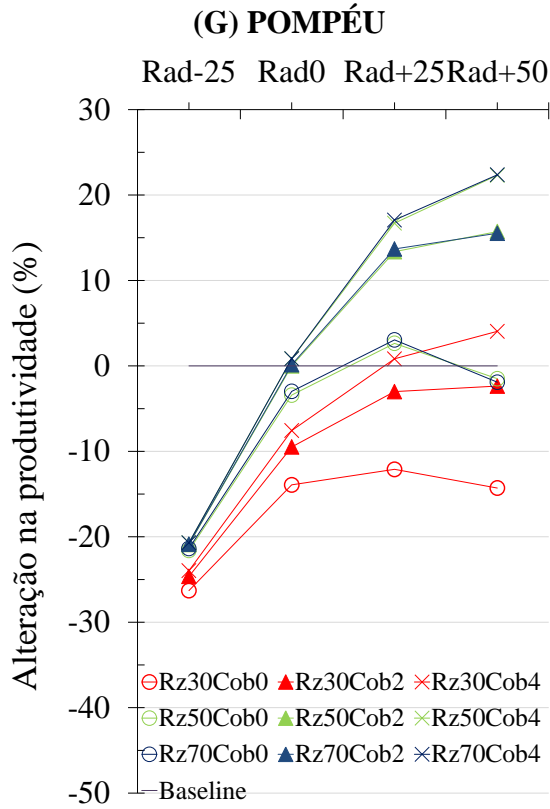
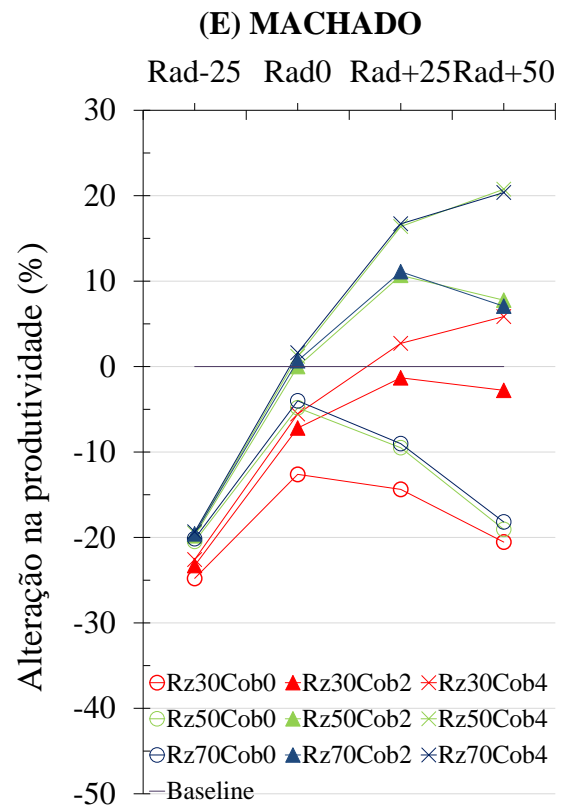
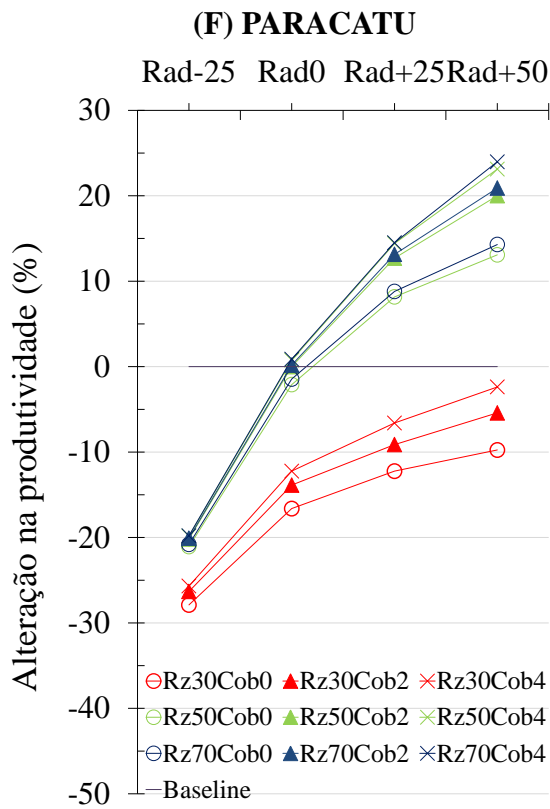
Machado e Pompéu apresentaram uma queda mais acentuada na produtividade com o aumento do percentual de radiação solar nos cenários com ausência de palhada (Cob0) em relação a Araçuaí, ressaltando a relevância de um sistema de plantio bem consolidado nesses locais e como o plantio direto beneficia a uma maior eficiência de uso da radiação solar.

As análises estatísticas indicaram que não houve interação significativa, a 5% de probabilidade, entre profundidade de sistema radicular, radiação solar e quantidade de palhada, em nenhum município estudado (Apêndice 1- Tabela 4). O mesmo ocorreu para profundidade do sistema radicular e cobertura.

As interações que se mostraram significativas na análise de variância (prof. raiz x radiação solar e cobertura x radiação solar) foram desdobradas a fim de se avaliarem os efeitos de suas interações sobre a produtividade do milho (Tabelas 17 e 18). Sendo assim,

foram realizados testes de Tukey, a 5% de probabilidade, para palhada, radiação solar e profundidade de raiz.





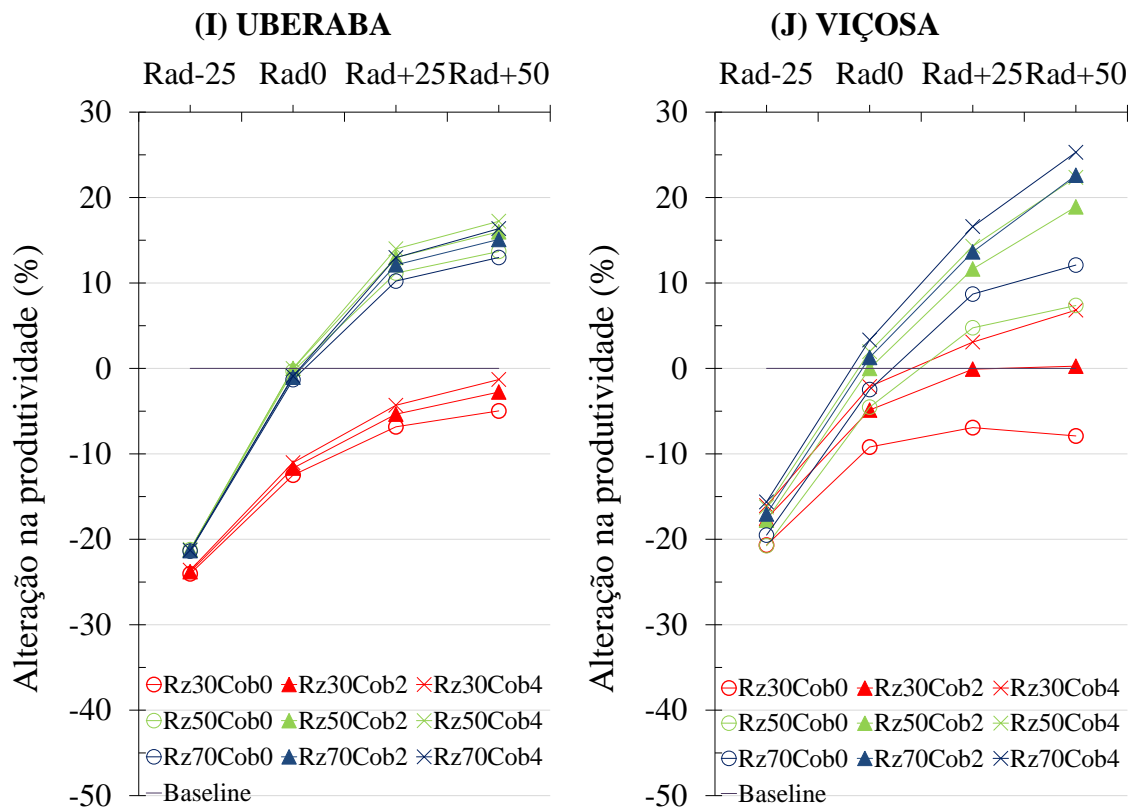


Figura 6 - Alteração percentual na produtividade da cultura do milho para diferentes cenários de alteração na radiação solar e de estratégias de manejo da cultura.

Ao se analisar o efeito das alterações na radiação solar, dentro das diferentes quantidades de palhada, observou-se comportamentos distintos (Tabela 17). Para todas as localidades, cuja interação foi significativa, houve diferença estatística entre a produtividade obtida com a redução da radiação solar e as demais alterações na radiação solar. Isso ocorreu para os três níveis de cobertura avaliados (Cob0, Cob2 e Cob4). A exceção foi Araçuaí que, para a Cob0, não apresentou diferença estatística significativa entre as produtividades obtidas para quaisquer alterações na radiação solar.

Avaliando-se o efeito da quantidade de palhada deixada no solo sobre a produtividade, dentro de cada alteração na radiação solar, observou-se que, para Aimorés, Araçuaí, Lavras, Paracatu, Pompéu, Sete Lagoas e Viçosa, o comportamento foi o mesmo quando se aumentou em 25% a radiação solar. Houve diferença estatística significativa entre as produtividades obtidas para o cenário sem palhada (Cob0). Sendo assim, nesse cenário de aumento de radiação solar, a adoção de um sistema de plantio direto que deixa palhada no solo tem potencial para mitigar os efeitos dessa alteração no clima devido ao albedo. Silva et al.,

(2006), avaliaram o efeito de três sistemas de manejo na temperatura do solo durante todo o ciclo do feijoeiro. Eles concluíram que o sistema de plantio direto proporcionou menores temperaturas máximas e menor amplitude térmica no solo devido ao aumento do albedo, da refletividade dos raios solares.

Para Machado, aumentando em 25% a radiação solar, o resultado foi diferente. A diferença estatística foi detectada em cada cenário de cobertura com palhada avaliado (Cob0, Cob2 e Cob4) (Tabela 17). Infere-se, então, que, quanto maior a quantidade de palhada deixada no solo, maior é o potencial da cobertura como medida mitigadora.

O uso da palhada influencia na interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e por isso as menores quedas na produtividade estão associadas a maior quantidade de palhada deixada no solo. Kunz et al., (2007) realizaram um estudo com o intuito de avaliar a eficiência de interceptação e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do milho em diferentes sistemas de manejo. O trabalho foi conduzido em estação experimental em Eldorado do Sul, RS e os autores concluíram que o milho que foi cultivado em sistema de plantio direto apresentou uma eficiência maior de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa em relação ao preparo convencional. Os autores inferem que isso pode estar relacionado ao maior turgor das folhas devido à maior disponibilidade hídrica para plantas cultivadas em sistema de plantio direto.

Tabela 16 - Desdobramento da análise de variância para interação entre cobertura e a alteração na radiação solar.

Município	Radiação solar média diária (MJ m ⁻² dia ⁻¹)			
	Cenários			
	Rad-25	Rad0	Rad+25	Rad+50
Aimorés	13,7	18,2	22,8	27,3
Araçuaí	13,2	17,6	22,0	26,4
Janaúba	15,0	20,0	25,0	30,0
Lavras	13,2	17,6	22,0	26,4
Machado	12,1	16,2	20,2	24,2
Paracatu	13,9	18,6	23,2	27,9
Pompéu	13,6	18,2	22,7	27,3
Sete Lagoas	14,3	19,1	23,9	28,7
Uberaba	14,2	18,9	23,6	28,3
Viçosa	12,5	16,6	20,8	24,9

Tabela 17 - Desdobramento da análise de variância para interação entre cobertura e a alteração na radiação solar.

Municípios	Alteração climática	Cobertura de palhada (t ha ⁻¹)		
		0	2	4
Aimorés	Rad- 25	4182Aa	4328Aa	4392Aa
	Rad0	4942Ab	5200Bb	5325Bb
	Rad+25	5263Ac	5721Bc	5959Bc
	Rad+50	5136Abc	5739Bc	6073Cc
Araçuaí	Rad- 25	4251Aa	4505ABa	4580Ba
	Rad0	4365Aa	4905Bb	5097Bb
	Rad+25	4264Aa	4880Bb	5185Bb
	Rad+50	4029Aa	4661Bab	5007Cb
Lavras	Rad- 25	7154Aa	7264Aa	7341Aa
	Rad0	8732Ab	8977Ab	9116Ab
	Rad+25	9318Ac	9838Bc	10088Bc
	Rad+50	9252Ac	10032Bc	10479Cc
Machado	Rad- 25	6635Aa	6712Aa	6747Aa
	Rad0	7878Ab	8301Bb	8408Bb
	Rad+25	7555Ab	9063Bc	9498Cc
	Rad+50	6851Aa	8826Bc	9813Cc
Paracatu	Rad- 25	5951Aa	6033Aa	6066Aa
	Rad0	7233Ab	7401Ab	7480Ab
	Rad+25	7877Ac	8186Bc	8331Bc
	Rad+50	8210Ad	8672Bd	8910Bd
Pompéu	Rad- 25	6388Aa	6468Aa	6496Aa
	Rad0	7744Ab	8047ABb	8143Bb
	Rad+25	8129Ac	8972Bc	9265Bc
	Rad+50	7816Abc	9106Bc	9655Cd
Sete Lagoas	Rad- 25	6628Aa	6690Aa	6741Aa
	Rad0	8037Ab	8211Ab	8317Ab
	Rad+25	8925Ac	9292Bc	9482Bc
	Rad+50	9139Ac	9667Bd	9928Bd
Viçosa	Rad- 25	5421Aa	5615ABa	5717Ba
	Rad0	6436Ab	6722Bb	6875Bb
	Rad+25	6951Ac	7375Bc	7574Bc
	Rad+50	7066Ac	7751Bd	8039Cd

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As interações existentes entre as alterações na radiação solar e a profundidade do sistema radicular foram significativas para Janaúba, Lavras, Paracatu, Pompéu, Sete Lagoas, Uberaba e Viçosa (Tabela 18). Ao se avaliar o efeito da profundidade do sistema radicular, dentro das alterações na radiação solar, dois resultados distintos foram observados ao se reduzir em 25% a radiação solar (Rad-25). Pompéu, Uberaba e Viçosa não apresentaram diferenças estatísticas na produtividade, para os três níveis de raiz avaliados. Ou seja, o efeito do sistema radicular não foi significativo nesses locais ao se reduzir a radiação solar. Janaúba, Lavras, Paracatu e Sete Lagoas, por sua vez, apresentaram diferença significativa para o sistema radicular raso (Rz30). Nesses locais, a redução da radiação solar, sistemas radiculares mais profundos, ou solo melhor corrigido minimizam os efeitos da redução na radiação solar. O mesmo ocorreu ao se aumentar a radiação solar em 25% para todas as localidades. Solos mal corrigidos ou com resistência ao crescimento radicular apresentaram menores produtividades, sendo mais sensíveis ao aumento da radiação solar. O aprofundamento do sistema radicular tende a ser viável para mitigar efeitos das alterações na radiação solar sobre a cultura do milho.

Tabela 18 - Desdobramento da análise de variância para interação entre profundidade do sistema radicular e a alteração na radiação solar.

Municípios	Alteração climática	Profundidade do sistema radicular (m)		
		0,3	0,5	0,7
Janaúba	Rad- 25	3936Aa	4712Ba	4739Ba
	Rad0	4205Aab	5344Bb	5414Bb
	Rad+25	4266Ab	5673Bc	5654Bb
	Rad+50	4175Aab	5553Bbc	5688Bb
Lavras	Rad- 25	6849Aa	7434Ba	7475Ba
	Rad0	8140Ab	9327Bb	9360Bb
	Rad+25	8662Ac	10322Bc	10259Bc
	Rad+50	8770Ac	10562Bc	10431Bc
Paracatu	Rad- 25	5689Aa	6175Ba	6186Ba
	Rad0	6650Ab	7719Bb	7744Bb
	Rad+25	7032Ac	8666Bc	8697Bc
	Rad+50	7301Ac	9207Bd	9284Bd
Pompéu	Rad- 25	6533Aa	6556Aa	6564Aa
	Rad0	7448Ab	8235Bb	8251Bb
	Rad+25	7911Ac	9212Bc	9242Bc
	Rad+50	7957Ac	9318Bc	9303Bc

Sete Lagoas	Rad- 25	6330Aa	6872Ba	6857Ba
	Rad0	7436Ab	8559Bb	8569Bb
	Rad+25	8144Ac	9768Bc	9787Bc
	Rad+50	8215Ac	10257Bd	10262Bd
Uberaba	Rad- 25	7283Aa	7533Aa	7520Aa
	Rad0	8439Ab	9549Bb	9456Bb
	Rad+25	9034Ac	10775Bc	10685Bc
	Rad+50	9271Ac	11054Bc	10976Bc
Viçosa	Rad- 25	5572Aa	5562Aa	5620Aa
	Rad0	6436Ab	6745Bb	6851Bb
	Rad+25	6714Ac	7500Bc	7686Bc
	Rad+50	6785Ac	7906Bd	8164Bd

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5 CONCLUSÕES

As maiores reduções no rendimento da cultura do milho foram decorrentes de reduções nas precipitações especialmente em locais com temperatura do ar mais elevada. A presença da palhada na superfície do solo apresentou mais interações significativas com as alterações da precipitação e, por isso, na maioria dos municípios, o uso de cobertura se mostrou mais efetivo do que o uso de cultivar com sistema radicular profundo para mitigar tais efeitos. A combinação entre sistema radicular concentrado nos 0,7 m do solo e 4 t ha⁻¹ de palhada, foi a que apresentou as menores quebras de produtividade ao se reduzir a precipitação para a maioria dos municípios.

Incrementos na temperatura reduziram o rendimento de grãos de milho em até 99%. O aprofundamento do sistema radicular e o uso de palhada na superfície do solo atenuaram parcialmente tal efeito. Entretanto, por apresentar um maior número de interações significativas, sistemas radiculares mais profundos se mostraram mais efetivos que a palhada na mitigação dos efeitos da temperatura. Araçuaí foi o único município cuja presença da palhada na superfície do solo atenuou os efeitos do aumento de 3°C na temperatura do ar.

O aumento da concentração de CO₂ do ar proporcionou um incremento na produtividade, pouco mais de 10% na localidade com o maior ganho em rendimento. O milho é uma espécie C4, que já apresenta maior eficiência fotossintética. Não se verificou quaisquer efeitos das estratégias de manejo avaliadas no rendimento de grãos, para os diferentes cenários de concentrações de CO₂.

O aumento da radiação solar tendeu a favorecer a produtividade, exceto para Araçuaí. A redução, no entanto, afetou negativamente o rendimento de grãos de milho. Tanto a profundidade de sistema radicular, quanto a quantidade de palhada avaliadas apresentaram interação significativa com alterações na radiação solar o que indica potencial para atenuar os efeitos dessas modificações.

O presente estudo levou em consideração apenas alterações lineares e individualizadas das variáveis meteorológicas. Novos estudos são recomendados utilizando-se modelos de circulação global capazes de gerarem dados futuros com alterações simultâneas dos elementos do clima.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M. Cultivo do Milho: Irrigação - Manejo de Irrigação. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 8p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 47).
- ALVARENGA, R. C. Manejo de solos em agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; COUTO, L. **Cultura do milho irrigado**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. p. 69-102., 2002.
- ALVES, M. E. B.; ANDRADE, C. L. T.; CÁRDENAS, R. R.; AMARAL, T. A.; 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-RBAI**, Fortaleza, v. 5, n. 3, p. 188-201, 2011.
- AMARAL, T. A., ANDRADE, C., OLIVEIRA, A. C., SILVA, D. D. F., DE SANTANA, C. B., MOURA, B. F., CASTRO, L. A. **Metodologia para o estabelecimento do período de semeadura de Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 15p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 88).
- AMARAL, T. A.; ANDRADE C. L. T; LIMA, A. C. R.; SOUZA, I. R. P.; SOUZA, A. A. C.; TEIXEIRA, T. C.; PAIXAO, J. S. Análise da sensibilidade da cultura do milho às mudanças climáticas empregando modelos de simulação: Resposta às alterações na taxa de radiação solar. In: XXX Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2014, Salvador, BA. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014a.
- AMARAL, T. A.; ANDRADE, C. L. T.; SOUZA, I. R. P.; LIMA, A. C. R.; SOUZA, A. A. C.; TEIXEIRA, T. C. Simulação dos impactos da concentração de dióxido de carbono, morfologia radicular e palhada na produtividade do milho. In: XXX Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2014, Salvador, BA. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014b.
- AMORIM, M. C. **Impacto e projeção de séries meteorológicas na safra de milho em Minas Gerais**. 2008. 219p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F; HEINEMANN, A. B.; GARCIA Y GARCIA, A.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. de F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C. B. de; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Modelagem do Crescimento de Culturas: Aplicações à Cultura do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 15p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 91).
- ANDRADE, C. L. T.; SILVA, P. P. G.; MAGALHÃES, B. G.; PAIXÃO, J. S.; MELO, B. F.; TIGGES, C. H. P. Parametrização do modelo CSM-CERES-Maize para uma cultivar de alta produtividade. In: XXXI Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Bento Gonçalves, RS, 2016. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.
- ARAÚJO, S. A. C.; DEMINICIS, B. B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 463-472, 2009.

ARAÚJO, P. H. C.; FIGUEIREDO SILVA, F.; GOMES, M. F. M.; FÉRES, J. G.; BRAGA, M. J. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região Nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 45, n. 3, p. 46-57, 2014.

BABEL, M. S.; TURYATUNGA, E. Evaluation of climate change impacts and adaptation measures for maize cultivation in the western Uganda agro-ecological zone. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 119, n. 1-2, p. 239-254, 2015.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F., BERGONCI, J. I.; MULLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2 (fev. 2006), p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 85p.

BOUMAN, B. A. M.; KROPFF, M. J.; TUONG, T. P.; WOPEREIS, M. C. S.; TEN BERGE, H. F. M.; VAN LAAR, H. H. **ORYZA 2000: Modeling lowland rice**. Metro Manila: International Rice Research Institute and Wageningen University and Research Center, 2001. 245p.

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@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 10, n. 1, p. 77-82, 2016.

CAIRNS, J. E.; HELLIN, J.; SONDER, K.; ARAUS, J. L.; MACROBERT, J. F.; THIERFELDER, C.; PRASANNA, B. M. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. **Food Security**, v. 5, n. 3, p. 345-360, 2013.

CASTILLO, A. C. **Efeito das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento de grãos da cultura da soja na bacia do rio Potiribu**. 2016. 79 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHALLINOR, A. J.; WATSON, J.; LOBELL, D. B.; HOWDEN, S. M.; SMITH, D. R.; CHHETRI, N. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 4, p. 287-291, 2014.

COELHO, H. A. **Diferentes condições de estresse hídrico no desenvolvimento de milhos transgênico e convencional**. 2013. 103p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F. B.; OLIVEIRA, L. J. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F.; Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 4, n. 1, p. 01-10, 2009.

CRUZ, J. C.; MAGALHAES, P.; PEREIRA FILHO, I. A.; MOREIRA, J. **Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 333p.

CUNHA, D. A.; COELHO, A. B.; FÉRES, J. G. 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, 2014.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRUGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. Vol. 13, supl., (out. 2009), p. 855-864, 2009.

DEKALB. Informações sobre o híbrido DKB 390. Disponível em: <http://www.dekalb.com.br/produto/detalhe?id=DKB390>. Acesso em: 04 de maio de 2016.

EMBRAPA. **Manual de segurança e qualidade para a cultura do milho**: 2004. Brasília, 2004. 80 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18222/1/MANUALSEGURANCAQUALIDADEparaaculturadomilho.pdf>> . Acesso em: 21 jun. 2017.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FOLBERTH, C.; YANG, H.; GAISER, T.; LIU, J.; WANG, X.; WILLIAMS, J.; SCHULIN, R. Effects of ecological and conventional agricultural intensification practices on maize yields in sub-Saharan Africa under potential climate change. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 4, p. 01-12, 2014.

GALON, L.; TIRONI, S. P.; ROCHA, A. A.; SOARES, E. R.; COCENÇO, G.; ALBERTO, A. M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 4, N. 3, p. 18, 2010.

GROSSI, M. C.; JUSTINO, F.; RODRIGUES, R. D. A.; ANDRADE, C. L. T. Sensitivity of the sorghum yield to individual changes in climate parameters: modelling based approach. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p.341-349, 2015.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTE, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. L.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; ROYCE, F. S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A. J.; TSUJI, G. Y. Decision Support System for Agrotechnology Transfer: version 4.6. DSSAT Foundation, Prosser, Washington, 2014.

IBGE. 2017. Sistema IBGE de Recuperação Automática–SIDRA: tabela 839 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida e rendimento médio de milho, 1ª e 2ª safras. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/839#resultado>>. Acesso em: 03 jul. 2017.

IPCC, **Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**: 2014. Geneva, Switzerland, 2014. 104 p. Disponível em:<<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; DYKE, P. T. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. College Station Texas A&M University Press, 1986. 194p.

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**, Montpellier, v. 18, n. 3, p. 235-265, 2003.

JONES, J. W., J. M. ANTLE, B. O. BASSO, K. J. BOOTE, R. T. CONANT, I. FOSTER, H. C. J. GODFRAY, M. HERRERO, R. E. HOWITT, S. JANSSEN, B. A. KEATING, R. MUNOZ-CARPENA, C. H. PORTER, C. ROSENZWEIG, AND T. R. WHEELER. Towards a New Generation of Agricultural System Models, Data, and Knowledge Products: State of Agricultural Systems Science. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 269-288, 2015.

JÚNIOR, A. S. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais**. 2009. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

KASSIE, B. T.; ASSENG, S.; ROTTER, R. P.; HENGSDIJK, H.; RUANE, A. C.; VAN ITTERSUM, M. K. Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models. **Climatic Change**, v. 129, n. 1-2, p. 145-158, 2015.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K. L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 18 p. 267-288, 2003.

KIM, S. H., GITZ, D. C., SICHER, R. C., BAKER, J. T., TIMLIN, D. J., REDDY, V. R. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, n. 3, p. 224-236, 2007.

KINIRY, J. R. Maize physics development. In: HANKS, J.; RITCHIE, J. T. Modeling plant and soil systems. **ASA-CSSASSSA Agronomy Monographs**, Madison, 31, p. 55-71, 1991.

KUNZ, J. H., BERGONCI, J. I., BERGAMASCHI, H., DALMAGO, G. A., HECKLER, B. M. M., & COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v 42, n. 11 (nov. 2007), p. 1511-1520, 2007.

MA, L.; AHUJA, L. R.; ISLAM, A.; TROUT, T. J.; SASEENDRAN, S. A.; MALONE, R. W. Modeling yield and biomass responses of maize cultivars to climate change under full and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 88-98, 2017.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, P. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 23p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 22).

- MALDANER, L. J.; HORING, K.; SCHNEIDER, J. F.; FRIGO, J. P.; AZEVEDO, K. D.; GRZESIUCK, A. E. Exigência Agroclimática da Cultura do Milho (*Zea Mays*). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, v. 3, p. 13-23, 2014.
- MELO, B. F.; DE ANDRADE, C. D. L. T.; SILVA, P. P. G.; MAGALHÃES, B. G.; TIGGES, C. H. P. Simulação da janela de semeadura para o milho irrigado no Estado de Minas Gerais. In: XXXI Congresso Nacional de Milho e Sorgo. Bento Gonçalves, 2016. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.
- MENEGATI, G. B. **Estratégias de manejo para minimizar estresse por deficiência hídrica e para potencializar rendimento de grãos em milho irrigado**. 2013. 152p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 8, p. 734-740, 2015.
- MORAES, W. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 5, n. 2, p. 3-14, 2011.
- MORAES, M. T. **Modelagem do crescimento radicular de milho e soja sujeito a estresses hídrico e mecânico em latossolo**. 2017. 122p. Tese (Doutorado em Ciência do solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Eficiência de uso de água pela cultura do milho (*Zea mays*) em função da cobertura do solo pela palhada no sistema plantio direto. In: VII Congresso Brasileiro de Agroecologia, Cruz Alta, 2011. **Resumos**. Cruz Alta: Cadernos de Agroecologia, 2011. p. 1-6.
- NOAA, National Oceanic & Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. Recent Monthly Average Mauna Loa CO₂. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly.html>. Acesso em: 18 de ago de 2017.
- PAIXÃO, J. S.; ANDRADE, C. L. T.; GARCIA Y GARCIA, A.; AMARAL, T. A.; STEIDLE NETO, A. J.; MARIN, F. R. An alternative approach to the actual Brazilian maize crop zoning. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.13, n.3, p. 347-363, 2014.
- PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. Mudanças climáticas globais e a agricultura no Brasil. **Revista Multiciência**, Campinas, n. 8, p. 139-162, 2007.
- PICKERING, N. B.; HANSEN, J. W.; JONES, H.; GODWIN, D. Weatherman: a utility for managing and generating daily weather data. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, n.2, p. 332-337, 1994.
- RURINDA, J.; WIJK, M. T.; MAPFUMO, P.; DESCHEEMAEKER, K.; SUPIT, I.; GILLER, K. E. Climate change and maize yield in southern Africa: what can farm management do?. **Global change biology**, v. 21, n. 12, p. 4588-4601, 2015.
- SALTON, J. C., HERNANI, L. C., FONTES, C. Z. **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1998. 254p.

SALVADOR, R. J. Use of Computerized Simulation to Advance Agricultural Research in Developing Countries. In: Eighth International Congress on Research in Electrical Sciences, 1993, Torreón. **Anais**. Torreón: Instituto Tecnológico de la Laguna, 1993.

SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; GUIMARÃES, D. P.; AVELLAR, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de milho na Região Centro Oeste do Brasil e para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 9, n. 3, p. 527-535, 2001.

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

SANS, L. M. A. Influência dos atributos climáticos na implantação do milho e sorgo em safrinha. In: X Seminário Nacional Milho Safrinha. 2009. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2009. p. 67-74.

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**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 313-321, 2011.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, 2006.

SILVA, P. P. G.; ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; CASTRO, A. A.; TEIXEIRA, T. C.; PAIXÃO, J. S. Análise da Sensibilidade da Cultura do Milho às Mudanças Climáticas Empregando Modelos de Simulação: 1 – Resposta às Alterações na Temperatura do Ar. In: XXX Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2014, Salvador, BA. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014.

SILVA, P. P. G., ANDRADE, C. D. L. T., CARLOS, J., JUNIOR, F. B., MAGALHAES, B. G., DE MELO, B. F., & Y GARCIA, A. G. Response of Tropical Maize to Supplemental Irrigation Strategies. In: ASABE Annual International Meeting, 2016, Flórida. **Anais**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016.

SOUZA, A. A. C.; ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; SILVA, P. P. G.; TEIXEIRA, T. C.; PAIXÃO, J. S. Análise da Sensibilidade da Cultura do Milho às Mudanças Climáticas Empregando Modelos de Simulação: 2 – Resposta às Alterações na precipitação. In: XXX Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2014, Salvador, BA. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014.

STÖCKLE, C. O., DONATELLI M., NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 289-307, 2003.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.734-744, 2005.

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

STRECK, N. A.; SILVA, S. D. D.; LANGNER, J. A. Assessing the response of maize phenology under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 27, n. 1, p. 1-12, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3º ed. São Paulo: Artmed, 1991. 722p.

TIGGES, C. H. P., DE ANDRADE, C. D. L. T., DA SILVA, P. P. G., MAGALHÃES, B. G., MELO, B. F., & DO AMARAL, W. L. Períodos de semeadura de milho, sob regime de sequeiro na safra, em Minas Gerais. In: XXXI Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2016, Bento Gonçalves. **Anais**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.

TOUCH, V.; MARTIN, R.; LIU, D. L.; COWIE, A.; SCOTT, F.; WRIGHT, G.; CHAUHAN, Y. Simulation modelling of alternative strategies for climate change adaptation in rainfed cropping systems in North-Western Cambodia In: 17th Australian Society of Agronomy conference, 2015, Hobart. **Anais**. Hobart: Australian Society of Agronomy, 2015.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128-137, 2015.

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**, Brasília, v. 49, n. 12, p. 915-924, 2014.

APÊNDICE

Apêndice I – Resumo Análises de variância

Tabela 1 - Resumo análise de variância para alterações na precipitação e estratégias de manejo.

FV	Pr > Fc									
	Municípios									
	Aimorés	Araçuaí	Janaúba	Lavras	Machado	Paracatu	Pompéu	Sete Lagoas	Uberaba	Viçosa
Profundidade de raiz	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cobertura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2094	0,0000
Alteração climática	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Prof. de raiz X Cobertura	0,9841	0,4559	0,8123	0,9161	0,8167	0,9960	0,9847	0,9995	0,9895	0,9989
Prof. de raiz X Alt. Climática	1,0000	0,0156*	0,0000*	0,0000*	0,9309	0,9925	0,1790	0,1580	0,9801	0,5013
Cobertura X Alt. Climática	0,0000*	0,5183	0,2317	0,0002*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,1187	0,9989	0,0002*
Cobertura X Alt. Climática X Prof. de raiz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9310	0,9985	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
CV	12,94	18,11	17,36	13,98	10,64	9,85	11,92	12,91	11,3	13,13

*Valor de Pr > Fc igual ou menor que 0,05 indica diferença significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 2 - Resumo análise de variância para alterações na temperatura e estratégias de manejo.

FV	Pr > Fc									
	Municípios									
	Aimorés	Araçuaí	Janaúba	Lavras	Machado	Paracatu	Pompéu	Sete Lagoas	Uberaba	Viçosa
Profundidade de raiz	0,0472	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cobertura	0.0005	0.0000	0.0002	0.0020	0.0000	0.0056	0.0000	0.0094	0.2484	0.0000
Alteração climática	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Prof. de raiz X Cobertura	1,0000	0.8629	0.9980	0.9501	0.9804	0.9992	0.9996	0.9981	0.9185	0.9986
Prof. de raiz X Alt. Climática	0.7026	0.0066*	0.0000*	0.0000*	0.0005*	0.0000*	0.0004*	0.0000*	0.0000*	0.0095*
Cobertura X Alt. Climática	0.2126	0.0001*	0.3555	0.9541	0.8744	0.9857	0.8612	0.9777	0.8041	0.8677
Cobertura X Alt. Climática X Prof. de raiz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
CV	35,68	39,79	37,2	21,26	16,86	20,04	19,9	21,61	16,04	23,61

*Valor de Pr> Fc igual ou menor que 0,05 indica diferença significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 3 - Resumo análise de variância para alterações na concentração de CO₂ e estratégias de manejo.

FV	Pr > Fc									
	Municípios									
	Aimorés	Araçuaí	Janaúba	Lavras	Machado	Paracatu	Pompéu	Sete Lagoas	Uberaba	Viçosa
Profundidade de raiz	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cobertura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2537	0,0000
Alteração climática	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Prof. de raiz X Cobertura	0.9959	0.0003*	0.6708	0.0486*	0.6248	0.0484*	0.0342 *	0.9934	0.6029	0.6111
Prof. de raiz X Alt. Climática	1,0000	1,0000	0.9996	0.9334	0.9999	1,0000	0.9885	1,0000	1,0000	0.5398
Cobertura X Alt. Climática	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9934	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Cobertura X Alt. Climática X Prof. de raiz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
CV	4,71	11,88	8,5	5,24	5,48	4,93	6,1	6,78	6,58	5,24

*Valor de Pr> Fc igual ou menor que 0,05 indica diferença significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 4 - Resumo análise de variância para alterações na radiação solar e estratégias de manejo.

FV	Pr > Fc									
	Municípios									
	Aimorés	Araçuaí	Janaúba	Lavras	Machado	Paracatu	Pompéu	Sete Lagoas	Uberaba	Viçosa
Profundidade de raiz	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Cobertura	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,1635	0.0000
Alteração climática	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Prof. de raiz X Cobertura	0.9038	0.7677	0.8259	0.6866	0.2178	0.9954	0.9793	0.9993	0.9999	0.914
Prof. de raiz X Alt. Climática	0.5733	0.5402	0.0007*	0.0000*	0.1876	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.000*
Cobertura X Alt. Climática	0.0001*	0.0356*	0.0528	0.0017*	0.0000*	0.0247*	0.0000*	0.0172*	0.9044	0.000*
Cobertura X Alt. Climática X Prof. de raiz	0.9989	0.9996	0.9987	0.9997	0.6429	0.9999	0.9909	1,0000	1,0000	1,0000
CV	14,72	21,11	17,82	13,7	14,38	11,01	12,52	11,24	13,71	11,11

*Valor de Pr> Fc igual ou menor que 0,05 indica diferença significativa a 5% de probabilidade.