

MARINE CIRINO GROSSI

**CALIBRAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-SORGHUM PARA  
AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

G878c  
2012

Grossi, Marine Cirino, 1985-  
Calibração do modelo CSM-CERES-Sorghum para  
avaliação dos impactos das mudanças climáticas / Marine  
Cirino Grossi. – Viçosa, MG, 2012.  
xiii, 83f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 75-83

1. Mudanças climáticas. 2. Calibração. 3. Sorgo.  
4. Climatologia agrícola. I. Universidade Federal de Viçosa.  
II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

MARINE CIRINO GROSSI

**CALIBRAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-SORGHUM PARA AVALIAÇÃO  
DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de fevereiro de 2012.

  
Paulo César Sentelhas

  
José Marcelo Soriano Viana

  
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade  
(Coorientador)

  
Flávio Barbosa Justino  
(Orientador)

Aos meus pais, Alberto e Geralda,  
e aos meus irmãos, Clayton e  
Fernanda, que são minha vida  
e fortaleza.

DEDICO

Ao Gustavo, pelo apoio e  
incentivo que me ajudaram a  
concluir esta etapa.

OFEREÇO

*“A sabedoria é mais bela que o sol e supera todas as constelações de astros. Comparada à luz do dia, ela sai ganhando, pois a luz cede lugar à noite, mas contra a sabedoria o mal não prevalece.”*  
(Sb 7, 29-30)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por conceder-me os dons da fé, sabedoria e fortaleza essenciais nos meus momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Alberto e Geralda, que sempre foram exemplos de luta, amor e perseverança e que nunca mediram esforços para que os meus sonhos pudessem ser concretizados. Obrigada por compreenderem minha ausência nos últimos tempos e por cuidarem tão bem de mim em todos os dias da minha vida. A vocês devo tudo o que tenho e o que sou.

Ao Clayton e à Fernanda, por me incentivarem, darem carinho e atenção sempre que eu precisei. Obrigada por além de irmãos, serem meus grandes amigos. A distância nunca foi e jamais será suficiente para enfraquecer os laços da nossa união, que são feitos de amor e de muito companheirismo.

Ao Gustavo, meu grande amor e pessoa muito especial que quero ter para sempre em minha vida. Agradeço por ter contribuído diretamente na realização deste trabalho, me dando sugestões pertinentes, e indiretamente através do incentivo e compreensão nas horas em que estive preocupada ou aflita. Obrigada também por me tornar uma pessoa mais otimista me fazendo acreditar que tudo dará certo.

Ao professor Flávio Justino, pela confiança depositada e pela atenção dedicada a cada um de nós seus alunos. Por estar sempre disposto a nos ouvir, aconselhar e por ser um entusiasta da pesquisa contagiando os que estão a sua volta. Obrigada pela possibilidade de realizar este estudo e pelas outras oportunidades oferecidas.

Ao Dr. Camilo Andrade, que foi quem plantou a semente deste trabalho. Obrigada pela dedicação e esforços incondicionais, pela paciência, pelas palavras de incentivo, pelos ensinamentos e por acreditar que era possível. Foi um privilégio poder conviver com excelente profissional de quem levarei os exemplos de ética e amor à ciência.

Ao Dr. Marcelo Amorim, que me incentivou a seguir na pesquisa acadêmica e que muito me ensinou durante os anos de estágio e iniciação científica.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola pelo ensino de qualidade oferecido.

À Embrapa Milho e Sorgo por fornecer os dados dos experimentos de campo de Sete Lagoas e Janaúba e por ser um laboratório de aprendizagem durante os dias em que lá estive.

A todos meus amigos da Meteorologia Agrícola que foram verdadeiros companheiros durante as disciplinas e na pesquisa. De maneira muito especial à Rômula por ter se tornado quase uma irmã durante estes dois últimos anos. Obrigada por me ouvir, aconselhar e por ser uma pessoa com quem pude compartilhar todas minhas dúvidas e inquietações.

A todos do grupo NSAM que me acolheram de maneira tão calorosa e carinhosa em todas as vezes que estive na Embrapa. Em especial aos estagiários Lília, Bruno e Fabiano pela coleta dos dados e pelas informações passadas. À Maria Emília e à Denise, que não só ajudaram no trabalho, mas que abriram as portas de suas casas e me receberam com tamanha generosidade. À Priscila por me tratar sempre tão bem e organizar as festinhas comemorativas de maneira singular.

Aos professores da Meteorologia Agrícola e a todos os funcionários do DEA.

À Graça pela competência no desenvolvimento de suas atividades na secretaria da Meteorologia Agrícola que facilita as nossas vidas e por estar sempre disposta a nos atender e resolver nossos problemas.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) que é responsável pelo gerenciamento da estação climatológica de Janaúba e que nos repassou os dados deste município.

À Universidade de Rio Verde (FESURV), na pessoa do professor Ricardo Francischini, responsável pela estação do INMET em Rio Verde e que prontamente forneceu os dados climatológicos deste local.

A todo o grupo de pesquisa de orientados do professor Flávio por proporcionarem um ambiente amigável e de partilha do conhecimento. De forma especial ao Rafael Ávila pela experiência e conhecimento repassados.

À Cooperativa Mista dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano Ltda. (COMIGO) que disponibilizaram os dados dos plantios do município de Rio Verde. Agradecimento em especial ao engenheiro agrônomo Wander Cruvinel

que foi quem enviou os dados e deu todo auxílio, respondendo aos e-mails sempre que surgiu alguma dúvida.

Ao pesquisador da Embrapa Solos, Vinicius Benites, que repassou informações dos perfis de solo de Rio Verde, de grande importância para o desenvolvimento do trabalho.

Aos pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo, José Avelino Santos Rodrigues pela grande ajuda na coleta dos dados dos experimentos de campo e Flávio Dessaune Tardin pela generosidade em repassar informações e esclarecer dúvidas.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

A todos meus familiares, tios, primos, à família do Gustavo, aos meus amigos de Silveirânia e aos de Viçosa que de alguma maneira me ajudaram a superar os obstáculos e que estão sempre na torcida pela concretização dos meus sonhos.

## **BIOGRAFIA**

MARINE CIRINO GROSSI, filha de Alberto Magno Grossi e Geralda de Paula Cirino Grossi, natural de Silveirânia/MG, nasceu no dia 19 de outubro de 1985.

Em março de 2005, ingressou no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Em 2007, começou a estagiar como aluna voluntária em Meteorologia Agrícola, vindo em março de 2008 a participar de projeto na mesma área como estudante de iniciação científica.

Em janeiro de 2010, graduou-se como Engenheira Agrícola e Ambiental. Em março do mesmo ano ingressou no Programa de Pós-graduação, nível de Mestrado em Meteorologia Agrícola, na linha de concentração Sistemas e Modelos em Agrometeorologia.

Em fevereiro de 2012 submeteu-se à defesa de tese no programa de Mestrado em Meteorologia Agrícola.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xii
1. Introdução Geral .....	1
2. Revisão de Literatura.....	2
2.1. Características da cultura do sorgo .....	2
2.2. Dados gerais e aspectos econômicos do sorgo granífero no Brasil .....	4
2.3. Modelos de simulação de culturas.....	7
Capítulo 1. Calibração e avaliação do modelo CSM- CERES- Sorghum para a cultivar BRS 310 .....	10
1. Introdução.....	10
2. Metodologia .....	12
2.1. Descrição do DSSAT .....	12
2.2. Descrição do modelo CSM-CERES-Sorghum.....	15
2.3. Áreas de estudo e base de dados meteorológicos .....	20
2.3.1. Caracterização climática dos três locais .....	22
2.4. Caracterização dos experimentos de campo.....	25
2.5. Características do perfil e dados de umidade do solo .....	29
2.6. Calibração e avaliação do modelo.....	31
3. Resultados e discussão.....	33
3.1. Calibração do modelo.....	33
3.2. Avaliação do modelo .....	40
3.3. Balanço hídrico no solo .....	43
4. Conclusões.....	47
Capítulo 2. Aplicação do modelo CSM-CERES-Sorghum na avaliação dos impactos das mudanças climáticas .....	48
1. Introdução.....	48
2. Metodologia .....	51
2.1. Áreas de estudo.....	51
2.2. Séries climáticas.....	51
2.3. Simulações da produtividade e estabelecimento do período de semeadura .....	54
3. Resultados e discussão.....	56
3.1. Simulações a partir dos dados do INMET .....	56
3.1.1. Produtividades .....	56
3.1.2. Estabelecimento do período de semeadura.....	61
3.2. Avaliação da série climática do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	66
3.3. Simulações a partir dos dados climáticos do ECHAM5/MPI-OM.....	69

3.3.1. Produtividades da cultura.....	69
3.3.2. Estabelecimento do período de semeadura.....	75
4. Conclusões.....	76
Referências.....	75

## RESUMO

GROSSI, Marine Cirino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Calibração do modelo CSM-CERES-Sorghum para avaliação dos impactos das mudanças climáticas.** Orientador: Flávio Barbosa Justino. Coorientador: Camilo de Lelis Teixeira de Andrade.

O presente trabalho teve como objetivos calibrar e avaliar o modelo CSM-CERES-Sorghum e aplicá-lo para simular produtividades e cenários de épocas de semeadura considerando duas séries de clima atual com base em observações (INMET) e utilizando um modelo climático (ECHAM-atual). Com o objetivo de estudar o efeito da variação climática na produtividade do sorgo, fez-se uso de uma série climática que leva em consideração as futuras emissões de gases de efeito estufa a partir do cenário econômico A1B (ECHAM-futuro). Três regiões que compreendem os municípios de Sete Lagoas (MG), Janaúba (MG) e Rio Verde (GO) foram avaliadas. Os resultados mostraram que o modelo CSM-CERES-Sorghum foi capaz de simular corretamente o ciclo fenológico da cultivar BRS 310, com datas de emergência, iniciação da panícula, floração e maturidade fisiológica semelhantes às datas observadas em plantios irrigados realizados nos três municípios. Também simulou adequadamente as variáveis de crescimento (índice de área foliar e número de folhas por colmo) e produtividade de grãos. Ao se comparar os resultados das produtividade médias simuladas a partir da série histórica do INMET e considerando-se regime de sequeiro, notou-se que o município de Sete Lagoas foi o que apresentou os maiores rendimentos de grãos. Rio Verde apresentou valores intermediários e Janaúba foi o local que apresentou os menores valores médios de produtividade. As diferenças nos resultados foram atribuídas aos padrões climáticos distintos entre os três municípios, principalmente em termos de temperatura do ar e disponibilidade hídrica para a cultura. Ao simular uma condição de produtividade potencial, em que os efeitos de estresses hídricos e nutricionais foram desconsiderados, houve uma inversão entre as posições ocupadas por Rio Verde e Janaúba, enquanto Sete Lagoas manteve-se em primeiro lugar. A produtividade potencial em Janaúba superior à obtida em Rio Verde foi explicada pela diferença entre a radiação solar entre esses dois municípios. No que tange às variações climáticas futuras, considerando-se um nível de significância de 5%, para Janaúba e Sete Lagoas as médias de produtividade simuladas a partir da série ECHAM-atual e

da série ECHAM-futuro não foram estatisticamente diferentes. Já para o município de Rio Verde ocorreu uma redução significativa nas produtividades médias simuladas a partir da série climática ECHAM-futuro em relação às simuladas considerando a série ECHAM-atual. No cenário futuro, a cultura do sorgo ficou condicionada ao efeito negativo do encurtamento do ciclo devido ao aumento de temperatura do ar e ao efeito positivo da fertilização do CO<sub>2</sub> reduzindo o estresse hídrico nas fases mais críticas da cultura. Esses efeitos distintos fizeram com que as diferenças entre as médias das produtividades obtidas a partir das séries atual e futura não fossem significativas em dois dos três municípios analisados. Outro fato interessante foi a distribuição da precipitação na série futura, na qual a estação seca se tornou mais seca e a estação chuvosa ainda mais chuvosa. Estas variações nas distribuições da chuva entre as séries ECHAM-atual e ECHAM-futuro indicam que no futuro possivelmente a semeadura do sorgo será realizada mais tardiamente nos três sítios avaliados.

## ABSTRACT

GROSSI, Marine Cirino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Calibration of CSM-CERES-Sorghum model for assessment of impacts of climate changes.** Adviser: Flávio Barbosa Justino. Co-adviser: Camilo de Lelis Teixeira de Andrade.

This study aimed to calibrate and evaluate the CSM-CERES-Sorghum model and apply it to simulate yield scenarios and sowing dates considering two current weather series based on observations (INMET) and using a climate model (ECHAM-current). In order to study the effect of climatic variation in the sorghum yield, a climatic series that takes into account the future emissions of greenhouse gases based in the economic scenario A1B (ECHAM-future) was used. Three regions which include the municipalities of Sete Lagoas (MG), Janaúba (MG) and Rio Verde (GO) were evaluated. The results showed that the CSM-CERES-Sorghum model was able to simulate the phenological cycle of cultivar BRS 310 correctly, with emergence dates, panicle initiation, anthesis and physiological maturity with similar dates of those observed in the irrigated plantings performed in the three municipalities. It also properly simulated the growth variables (leaf area index and number of leaves per stem) and grain yield. When simulated results of average yields were compared using INMET historical series, under rainfed conditions, the municipality of Sete Lagoas was the one with the highest grain yield. Rio Verde location showed intermediate values and Janaúba was the site with the lowest average for grain yield. Such differences in the results were attributed to distinct weather patterns between the three municipalities, mainly in terms of air temperature and water availability to crop. When simulating a condition of potential yield, in which water and nutrients stress were disconsidered, there was a switch in the positions occupied by Rio Verde and Janaúba, while Sete Lagoas remained in first place. The higher potential yield of Janaúba when compared to Rio Verde was explained by the difference in solar radiation between these locations. With respect to future climate changes, and considering 5% of significance level, the average yields for Sete Lagoas and Janaúba, simulated by ECHAM-current and ECHAM-future series, were not statistically different. On the other hand, it was observed a significant reduction in average yields simulated by ECHAM-future when compared with those simulated by ECHAM-current for Rio Verde location. For the future scenario, sorghum crop was submitted to the negative effect of a

shortest cycle due to the increase in air temperature and, the positive effect of CO<sub>2</sub> fertilization reducing water stress in the most critical phases of the crop. Such distinct effects led to nonsignificant differences between the average yields obtained from current and future series in two out of the three locations analyzed. Other interesting fact was the rain distribution in future series, in which the dry season became drier and the rainy season wetter. These variations in the rainfall distributions between ECHAM-current and ECHAM-future series indicates that in the future the sow of sorghum will be possibly performed later in the three studied sites.

## 1. Introdução Geral

O aumento da população mundial leva a uma necessidade cada vez maior de se produzir alimentos, principalmente grãos. Entre os mais cultivados, encontra-se o sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), que ocupa a quinta posição no ranking dos cereais mais produzidos no mundo atrás do milho, arroz, trigo e cevada (FAO, 2012).

A cultura do sorgo se destaca por tolerar diferentes condições hídricas e por possuir variedades adaptadas a diferentes zonas climáticas, além de apresentar altas taxas fotossintéticas (LANDAU e SANS, 2010; MAGALHÃES *et al*, 2003). Tais características permitem que essa gramínea seja plantada em diferentes épocas do ano, em diversas regiões, e garanta o fornecimento de matéria-prima em ambientes adversos.

O plantio do sorgo tem aumentado no Brasil, mas ainda sofre resistência por parte de muitos produtores familiarizados ao cultivo do milho que atualmente é o grande responsável pelo abastecimento de grãos no país. Contudo, com a demanda de grãos em expansão, a produção de milho tende a se tornar insuficiente para suprir as necessidades do mercado interno. Além disso, a rusticidade do sorgo o torna mais adequado em algumas condições, como na segunda safra, quando o índice de pluviosidade é menor.

Com base no que foi exposto, é importante que se façam análises da resposta da cultura aos diversos ambientes, sob as várias formas de manejo e tecnologias. Os modelos de simulação de crescimento de planta têm sido largamente empregados com essa finalidade, sobretudo, como ferramenta para determinação da melhor época de semeadura, zoneamento agrícola e previsão de safras. Esses permitem aperfeiçoar a eficiência da pesquisa por meio da análise do desempenho de cultivares em diferentes solos, condições climáticas, datas de semeadura, populações de plantas, manejos da irrigação, doses e épocas de aplicação de nitrogênio (HEINEMANN *et al.*, 2010). A aplicação dos modelos agrometeorológicos representa uma busca por maior conhecimento da potencialidade do setor agrícola, seja na avaliação do desempenho de produtores ou de regiões geográficas (SOUZA e WILHELM, 2009). Os modelos são aptos, inclusive, para serem usados para investigar as respostas das plantas aos cenários de mudanças climáticas, tema atualmente

muito abordado pela sociedade científica preocupada com as condições meteorológicas futuras e seus possíveis impactos sobre a economia e a sociedade (IPCC, 2007).

Os modelos da família CERES (*Crop Estimation Through Resource and Environment Synthesis*) são empregados para estimar a produtividade dos cereais milho, arroz, trigo, cevada, milheto e sorgo. O CERES-Sorghum é um modelo que descreve a produção e partição da biomassa da planta e a sua fenologia a partir de taxas de desenvolvimento que se acumulam até atingir valores limites que levam à mudança de fase. Possui ainda as rotinas de balanço de água e de nitrogênio no solo e está inserido no programa *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT), versão 4.5 (HOOGENBOOM *et al.*, 2010a e JONES *et al.*, 2003).

Apesar do avanço no desenvolvimento dos modelos agrometeorológicos, estes requerem a calibração dos coeficientes genéticos da cultura para que descrevam corretamente os processos relacionados ao crescimento, desenvolvimento e produção de grãos. De acordo com Donatelli *et al.* (2004), a calibração consiste no processo de ajuste dos parâmetros de uma equação e tem como objetivo minimizar a diferença entre os valores observados e estimados.

Considerando a necessidade de informações que visem gerar recomendações práticas para o cultivo do sorgo no Brasil, aliado ao fato de que existem poucos estudos de modelagem para esta cultura no país, entende-se que é relevante a realização de trabalhos que avaliem a aplicabilidade de modelos agrometeorológicos para as nossas condições, além de nortear outros esforços de pesquisa sobre o efeito das mudanças climáticas na agricultura.

## **2. Revisão de Literatura**

### **2.1. Características da cultura do sorgo**

O sorgo é uma planta C<sub>4</sub>, que floresce em dias curtos e se desenvolve sob condições de altas temperaturas, sendo que a maioria dos materiais

genéticos requerem valores acima de 21<sup>o</sup>C para crescerem e se

desenvolverem bem (MAGALHÃES *et al.*, 2003). Ainda segundo estes autores, o sorgo é mais tolerante às condições de déficit hídrico e ao excesso de umidade do que a maioria dos outros cereais. Se comparado ao milho, por exemplo, o sorgo produz mais sobre estresse hídrico (a raiz explora melhor o perfil do solo), murcha menos e é capaz de se recuperar de murchas prolongadas (MAGALHÃES *et al.*, 2010). De acordo com Borrel *et al.* (2006), a resistência do sorgo ao déficit hídrico é uma consequência da sua evolução em zonas áridas, como nas savanas africanas. Segundo estes autores, o sorgo desenvolveu características bioquímicas, fisiológicas e morfológicas como o mecanismo C<sub>4</sub> de fotossíntese, raízes profundas e folhas grossas, cobertas por cera, que permitem seu desenvolvimento em ambientes quentes e secos. No trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2011), ao se avaliar o efeito da disponibilidade hídrica no desenvolvimento inicial de plantas de sorgo, milho e milheto, conclui-se que o sorgo apresenta resistência ao alagamento e ao déficit hídrico, ao contrário do milho que é sensível a estas duas condições e ao milheto que apresentou tolerância apenas ao déficit hídrico. Estudando diferentes linhagens de sorgo, Amaral *et al.* (2003) observaram que a cultura apresenta alta capacidade de resistência ao estresse hídrico na fase inicial do crescimento.

Agronomicamente, existem quatro tipos de sorgo: granífero; forrageiro para silagem e/ou sacarino; forrageiro para pastejo/corte verde/fenação/cobertura morta; e vassoura (RIBAS, 2003), podendo ocorrer ainda algumas variações entre eles. O sorgo sacarino se caracteriza por ser uma planta de porte alto, colmo doce e succulento, semelhante ao da cana-de-açúcar. Tem sido estudado como matéria-prima para a produção de bioenergia, sobretudo etanol. Já o granífero é uma planta de menor porte, altura de até 1,70 m, que produz na extremidade superior um cacho denominado panícula onde se encontram os grãos, sendo muito utilizado na fabricação de rações para animais (ALAGOAS, 2010).

O ciclo de crescimento do sorgo é dividido em três estádios: (1) EC1, que vai do plantio até a iniciação da panícula; (2) EC2, da iniciação da panícula à floração e (3) EC3, que compreende a floração até a maturidade fisiológica. O primeiro estágio é caracterizado pelo crescimento vegetativo da planta e o final desta fase é determinado pela formação do primórdio floral. De acordo com Magalhães *et al.* (2010) a diferenciação da gema floral bloqueia a atividade meristemática ou a divisão celular e, a partir da ocorrência desse evento, todo crescimento é devido ao alongamento das células já existentes. Em termos de condições ambientais, de acordo com Gerik *et al.* (2003), no estágio EC1 a cultura pode tolerar bem adversidades climáticas, tais como seca e baixas temperaturas. No entanto, pragas e insetos podem prejudicar irremediavelmente o rendimento da planta se não controlados nesse período. No estágio EC2 ocorrem vários processos de crescimento, como o aumento da área foliar e do sistema radicular, acumulação de matéria seca e estabelecimento do número potencial de grãos que, se negativamente afetados, poderão comprometer a produtividade da cultura. Dentre esses, o estabelecimento do número potencial de grãos é o mais crítico, visto que é o principal fator relacionado ao rendimento final do sorgo (MAGALHÃES *et al.*, 2003 e GERIK *et al.*, 2003). O final do EC2 é caracterizado pelo florescimento da planta. Weismann (2007) ressalta que no período da floração toda agressão, aplicação indevida de agroquímicos ou condições climáticas adversas, como estresse hídrico, podem afetar a emergência da panícula e comprometer a produtividade final. No último estágio, EC3, começa a ocorrer a transferência dos nutrientes acumulados nas folhas e no colmo para a panícula. Os fatores considerados mais importantes nessa fase são aqueles relacionados ao enchimento de grãos, sendo o rendimento final relacionado tanto com a duração desse período, quanto com a taxa de acumulação diária de matéria seca (MAGALHÃES *et al.*, 2010).

## **2.2. Dados gerais e aspectos econômicos do sorgo granífero no Brasil**

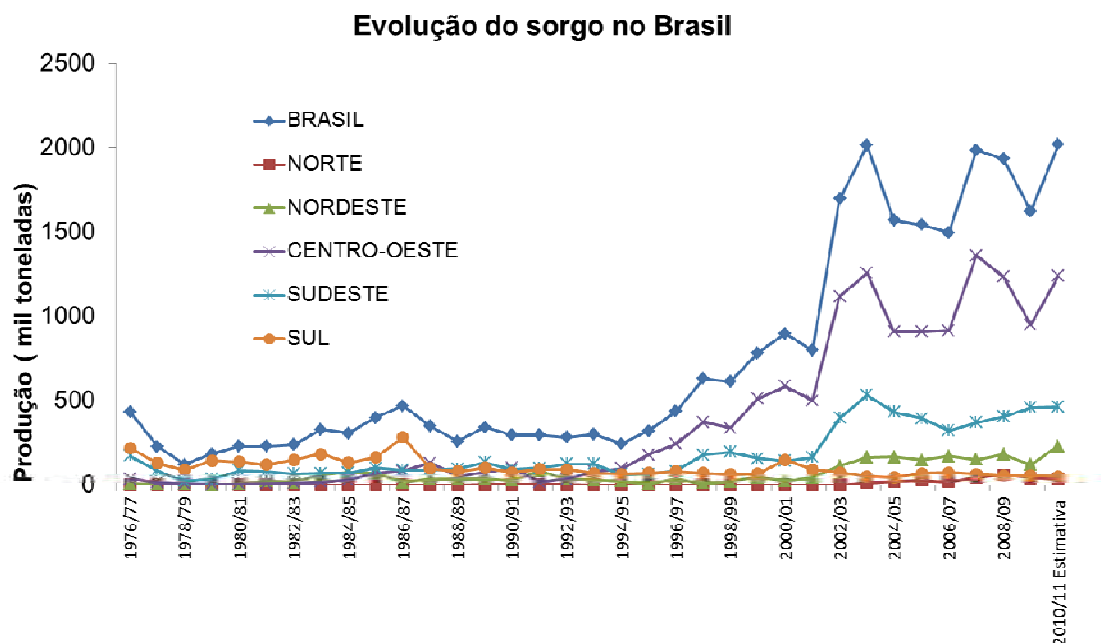
Dentre os diferentes tipos de sorgo, o granífero é o de maior importância econômica, sendo cultivado em várias partes do mundo. É muito empregado na fabricação de rações para aves e suínos, sendo também utilizado na alimentação humana em países africanos e asiáticos. Atualmente, os Estados

Unidos é o maior produtor sendo responsável por 15,8% da produção mundial, seguido da Índia, México e Nigéria que juntos respondem por 33,6%. Em termos de área plantada, a Ásia e a África são as principais regiões representando 83,7% da área total, sendo 61,1% na África. O Brasil ocupa a décima primeira posição no ranking dos maiores produtores, com uma participação de 2,7% do total produzido (FAO, 2012).

A introdução do sorgo no território brasileiro se deu no início do século XIX, provavelmente na região nordeste através dos afrodescendentes. De acordo com Ribas (2003), a partir da segunda década desse século até os anos 60, a cultura foi reintroduzida no país por meio de institutos de pesquisa públicos e universidades, mas somente no início da década de 70 é que, de fato, ocorreu o desenvolvimento do sistema de produção e de distribuição de sementes melhoradas. Isto se deve em grande parte à introdução do setor privado no agronegócio de sorgo. A produção da cultura em grande escala ocorreu inicialmente na região Sul do país, notoriamente no estado do Rio Grande do Sul. Até o início dos anos 90, a região se firmou como a maior produtora de sorgo do Brasil. A partir dessa época, a mesma passou a apresentar queda na produção ao passo que, desde meados da década 90, a região Centro-Oeste iniciou uma tendência de crescimento e transformou-se na principal área de sorgo do país.

A produção nacional de sorgo vem mostrando um crescimento expressivo, semelhante ao da região Centro-Oeste, como pode ser verificado na Figura 1. De acordo com Duarte (2003), pelo menos três fatores explicam este aumento na produção: (1) criação do grupo Pró-Sorgo no início da década de noventa, com o objetivo de divulgar a potencialidade da cultura e suas tecnologias no país; (2) implantação do sistema de plantio direto nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, aumentando o uso do sorgo na rotação com a cultura da soja por ser bom produtor de palhada; (3) aumento da importância da segunda safra na região central brasileira, empregando-se o sorgo ao invés do milho devido a sua maior resistência ao estresse hídrico. Coelho *et al.* (2002) ressalta também os seguintes aspectos: aumento da demanda, devido ao maior consumo *per capita* de proteína animal, principalmente da carne de frango, e o conseqüente incremento na fabricação de rações, além da expansão da produção leiteira e confinamento de bovinos. Adiciona-se a estes

fatores o desenvolvimento tecnológico proporcionando o surgimento de híbridos adaptados e maior oferta de sementes.



**Figura 1.** Evolução da produção de sorgo nas regiões brasileiras. Fonte: CONAB (2010).

Embora seja notável esse aumento na produção, a participação do sorgo na economia nacional ainda é pequena. A demanda de grãos no Brasil é suprida expressivamente pelo milho. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010a), a produção de milho alcançou 56 milhões de toneladas em 2010, o que correspondeu a uma participação de 37,5% da produção total de cereais, leguminosas e oleaginosas no país. Para o sorgo granífero, estes valores foram iguais a 1,5 milhões de toneladas, representando apenas 1%. Estes números se relacionam às dificuldades que a comercialização do sorgo vem enfrentando no país, tais como o fato do sorgo ter seu preço atrelado ao milho, sendo vendido por um valor em torno de 80% do mesmo. Outro fator desfavorável é o temor do produtor em produzir excedentes deste cereal, fazendo que o mesmo só produza sorgo quando o destino da sua colheita já esteja definido (DUARTE, 2003).

Em termos de produtividade, é importante ressaltar que no Brasil, a maioria dos plantios de sorgo é realizada em sucessão às culturas de verão, principalmente na safrinha tardia, quando as condições climáticas são impróprias ao desenvolvimento do milho. Este fator, aliado à baixa tecnologia

empregada, faz com que os níveis de produtividade alcançados sejam pequenos com uma média nacional em torno de 1850 kg ha<sup>-1</sup>. Este valor é 20% inferior à produtividade do milho que é em torno de 2350 kg ha<sup>-1</sup> (médias referentes às safras 1976/77 a 2009/2010, dados CONAB, 2010).

Contudo, o plantio do sorgo na segunda safra tem contribuído para diminuir os custos de produção do agricultor, devido à redução do uso de insumos e do número de operações de preparo do solo para os plantios realizados na safra principal (COELHO *et al.*, 2002). Quando comparado ao milho, o custo de produção é em média 20% inferior, e o valor biológico, que se refere à quantidade da fonte nutricional aproveitada pelo organismo, é semelhante alcançando pelo menos 95% desse cereal (FIALHO, 2002). Segundo Assuena *et al.* (2008) o sorgo pode substituir o milho totalmente em rações para poedeiras comerciais, sem prejudicar o desempenho ou a qualidade dos ovos sendo, porém, necessária a adição de pigmentantes naturais para não comprometer a coloração da gema do ovo. De acordo com resultados obtidos por Fialho *et al.* (2002), o sorgo pode substituir o milho em até 100% nas rações para suínos em crescimento, sem prejudicar a digestibilidade dos nutrientes e o desempenho dos animais. Além do mais, é uma fonte alternativa de biomassa para ser empregada na pecuária em regiões como o Centro-Oeste, onde a distribuição irregular de chuvas e a limitação na disponibilidade de água em determinadas épocas do ano prejudicam o cultivo de outras gramíneas (SILVA *et al.*, 2007). Na região Nordeste a produção de sorgo também é importante, especialmente no estado de Pernambuco onde a oferta de grãos não é suficiente para atender a demanda do setor avícola (MARIANO e SOUZA, 2007).

Por tudo o que foi exposto, entende-se que a cultura do sorgo tem potencial de crescimento no Brasil sendo de grande importância a realização de trabalhos que gerem respostas sobre os diversos fatores que influenciam a sua produtividade, sobretudo, a respeito dos fatores climáticos que exercem efeito direto sobre o crescimento e rendimento da cultura.

### **2.3. Modelos de simulação de culturas**

Modelos são aproximações realizadas para melhor entender um determinado fenômeno, mesmo que tais aproximações não condigam

totalmente com a realidade (PAVAN *et al.*, 2009). Os modelos podem ser não-matemáticos como por exemplo, memoriais descritivos e fluxogramas, ou matemáticos. Estes, por sua vez, podem ser de solução analítica, que são compostos de equações matemáticas destinadas a uma classe específica de problemas como, por exemplo, um modelo de regressão linear, ou de solução numérica que resultam no emprego de um conjunto de equações para descrever um determinado processo (SILVA, 2006). Os modelos matemáticos de solução numérica podem originar um modelo matemático de simulação e ser implementados nos computadores.

Os sistemas agrícolas envolvem um conjunto de processos que podem ser simplificados por meio de modelos. De acordo com Andrade *et al.* (2009), os modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas, ou simplesmente modelos de culturas, representam o funcionamento dinâmico do sistema solo-planta e sua interação com o clima e com as práticas culturais. Eles simulam não apenas o estado final da biomassa e do rendimento da cultura, mas também geram informação a respeito dos principais processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da planta (JAME e CURTFORTH, 1996).

As principais aplicações dos modelos de cultura são como ferramenta para (1) pesquisas, (2) tomada de decisão e (3) ensino, treinamento e transferência de tecnologia (MATHEWS *et al.*, 2000). Na pesquisa, a modelagem tem sido usada como ferramenta no melhoramento genético, análise da interação genótipo versus ambiente, no manejo cultural, em sistemas de produção, no planejamento agrícola em nível regional ou nacional e na área ambiental (ANDRADE *et al.*, 2009). Quando aplicado para auxiliar na tomada de decisão, o objetivo principal é prever a produtividade, podendo essa informação ser utilizada tanto em nível de fazenda pelos agricultores e técnicos responsáveis, ou em nível de governo para resolução de questões políticas e de segurança alimentar (HOOGENBOOM, 2000). No ensino, o principal papel dos modelos de simulação de culturas é substituir algumas experiências reais, tradicionalmente realizadas no campo. O aprendiz pode simular diferentes tratamentos, como “plantar” a cultura em variados tipos de solo, e então investigar o impacto de cada tratamento sobre o crescimento e desenvolvimento da planta (MATHEWS *et al.*, 2000).

Atualmente, existem vários modelos de simulação de culturas. Entre eles, quatro podem ser destacados (PAVAN, 2007): APSIM (*Agricultural Production Systems sIMulator*), desenvolvido da Austrália, tem como objetivo auxiliar na recomendação de diferentes cultivos, e possui um grande número de módulos agrossilvopastoris, processos do solo e de gerenciamento; Daisy, desenvolvido na Dinamarca, tal modelo permite a construção de cenários para simular diferentes estratégias de gerenciamento e rotação de culturas; Century, inicialmente desenvolvido para as pastagens naturais americanas, é aplicado com sucesso a diversos ecossistemas e tipos de solo, especialmente sob condições de clima temperado; e o DSSAT, desenvolvido em um projeto americano na Universidade do Havaí, este modelo está entre os mais difundidos na área de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas. O DSSAT, no qual está incorporado o modelo CSM-CERES-Sorghum, foi adotado como ferramenta para a realização do presente trabalho e será posteriormente detalhado.

## **Capítulo 1. Calibração e avaliação do modelo CSM- CERES- Sorghum para a cultivar BRS 310**

### **1. Introdução**

O Brasil é um grande produtor de proteína animal, principalmente carne de frango, bovina e suína. Este fato estimula o mercado de rações, aumentando a demanda por grãos e seus derivados. O milho é um dos alimentos que se destaca pela sua qualidade como fonte de nutrientes e é amplamente utilizado para fabricação de rações no Brasil. Todavia, três limitantes estão inseridos quanto se discute a produção de milho: (1) elevado preço no mercado internacional; (2) a concorrência com a fabricação de produtos para a dieta humana; (3) limitação de sua produção associada aos estresses abióticos. Isto tem levado os produtores a buscarem outros alimentos para formular dietas para os animais (ASSUENA *et al.*, 2008). Entre as opções, encontra-se a da cultura do sorgo. De acordo com Duarte (2010), nos últimos anos, em torno de 38% do total de sorgo (em grãos) produzido no país foi destinado à avicultura, 37% ao setor da suinocultura, 20% usado na dieta de bovinos e os 5% restantes foram consumidos pelo setor de “pets” e outros.

As interações entre as culturas agrícolas e o ambiente é um tema muito complexo e envolve processos físicos, químicos e biológicos. Existem diversas maneiras para se avaliar o comportamento das plantas em resposta aos fatores ambientais como, por exemplo, por meio de experimentos realizados no campo, em casas de vegetação e também a partir de modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas. Segundo MARIN *et al.* (2006), a modelagem minimiza os custos e o tempo de experimentação, permite simular o desenvolvimento da cultura ao longo do tempo e gera resultados consistentes em curto prazo. Além disso, permite a descrição dos processos envolvidos no sistema e a simulação de situações que auxiliam na tomada de decisões antes do plantio (RODRIGUES, 2011).

No Brasil, vários trabalhos já foram desenvolvidos usando modelos de simulação para diversas culturas. Dallacort *et al.* (2005) calibraram o modelo Cropgro-Drybean do DSSAT para a cultura do feijão a partir de experimento de campo realizado na cidade de Maringá, no estado do Paraná e, em seguida o empregaram para encontrar o melhor período de semeadura entre nove datas avaliadas. Já Faria *et al.* (1997) e Heinemann *et al.* (2002) utilizaram os modelos Benagro e Cropgro-Drybean, respectivamente, para estudar o comportamento da cultura do feijão sob diferentes manejos de irrigação no mesmo estado. Para a cultura do arroz, Lorençoni *et al.* (2010) calibraram o modelo ORYZA-APSIM e avaliaram o seu desempenho na simulação do desenvolvimento, crescimento e produtividade da variedade de arroz de terras altas cultivada em diferentes regiões do Brasil. Como resultado, encontraram que o modelo apresentou desempenho satisfatório, existindo correlação entre os valores de produtividade simulados e os valores observados. Já Walter (2010) adaptou o modelo InfoCrop para as cultivares locais de arroz irrigado na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Em seguida, aplicou o modelo para investigar os impactos das mudanças climáticas sobre a cultura e concluiu que houve efeito positivo sobre o rendimento da mesma. Para a cultura do milho, Freitas *et al.* (2004) compararam os dados simulados pelo modelo CERES-Maize com os dados do ensaio de campo realizado em área experimental da Universidade Federal de Viçosa (MG), onde foi avaliada a influência da uniformidade de aplicação de água. A partir dos resultados, observaram que o modelo CERES-Maize simulou consistentemente a produtividade, o índice de área foliar (IAF) e a matéria seca para a maioria dos tratamentos, apesar de ocorrer subestimativas do rendimento em condições de déficit hídrico acentuado. Também para o milho, Heinemann *et al.* (2009) parametrizaram um modelo de simulação de culturas e o empregaram para determinar os padrões de deficiência hídrica no estado de Goiás, considerando 12 locais e 6 diferentes datas de semeadura para a cultura do milho semeada na safra normal e na safrinha. Concluíram que a perda na produtividade da cultura, proveniente de estresse por deficiência hídrica, é inferior a 50% nos plantios de safra normal e superior a 50% nos plantios de safrinha. Já Freitas *et al.* (2001) utilizaram o modelo CERES-Maize para investigar a influência da radiação solar sobre a produtividade do milho no município de Janaúba (MG), e

concluíram que essa variável meteorológica influenciou no rendimento da cultura.

Para a cultura do sorgo, MARIN *et al.* (2006) realizaram um estudo para quatro municípios no estado de São Paulo, empregando-se um método de estimativa de produtividade baseado nas chances de atendimento das exigências hídricas da planta. Estes autores avaliaram a perda da produtividade da cultura em 36 épocas de semeadura e a partir dos resultados identificaram os períodos com menores riscos para o cultivo do sorgo e as chances de perda para cada época do ano. Como resultado, encontraram que os riscos de quebra de produtividade foram menores nas semeaduras entre 15/10 e 15/11, com quebras inferiores a 5% para os quatro locais.

Contudo, percebe-se ainda uma escassez de trabalhos para diferentes regiões climáticas e principalmente para a cultura do sorgo, que visem a gerar informações úteis para os diversos setores envolvidos nas atividades agropecuárias. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo calibrar e avaliar o modelo CSM-CERES-Sorghum para a estimativa do crescimento, desenvolvimento e da produtividade do sorgo granífero, cultivar BRS 310, para os municípios de Sete Lagoas e Janaúba, em Minas Gerais, e Rio Verde, em Goiás.

## **2. Metodologia**

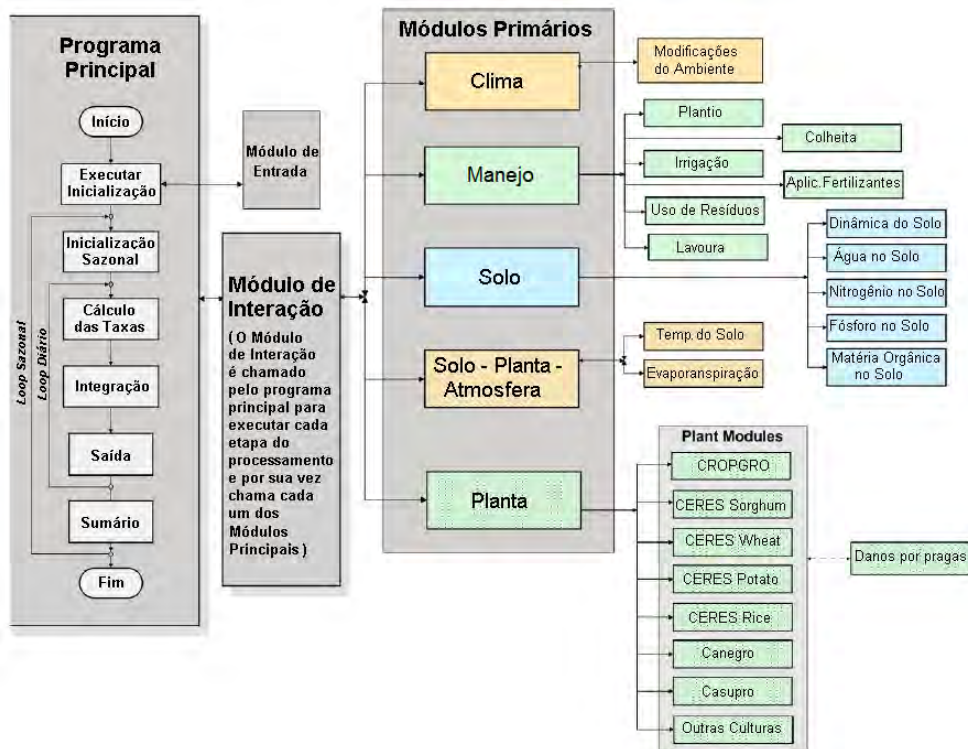
### **2.1. Descrição do DSSAT**

O DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é um sistema composto por modelos de simulação de 27 culturas diferentes e permite realizar simulações que integram os efeitos do solo, da produção e partição da biomassa na planta, da fenologia da cultura, do clima e das condições de manejo. É um dos principais produtos do projeto IBSNAT (*International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*), elaborado pelo consórcio de pesquisa ICASA, *International Consortium for Agricultural Systems Applications*, coordenado pela Universidade do Havaí e com colaboradores de vários países (ICASA, 2011).

Antes da iniciativa do IBSNAT, muitos modelos de culturas já eram disponíveis, mas utilizavam estruturas de dados e arquivos diferentes e possuíam diferentes modos operacionais. A necessidade de tornar esses modelos compatíveis foi que estimulou e levou à concepção do DSSAT (JONES *et al.*, 2003). A mais recente versão do software, versão 4.5, utilizada no presente trabalho foi lançada em 2010. Nela, todos os modelos foram combinados num sistema modular denominado *Crop System Model* (CSM). O CSM usa o mesmo conjunto de códigos para simular a água e a dinâmica de carbono e nitrogênio no solo, enquanto o crescimento e o desenvolvimento da cultura são simulados a partir dos módulos CROPGRO, CERES, CROPSIM e SUBSTOR (HOOGENBOOM *et al.*, 2010b).

De acordo com Jones *et al.* (2003), o DSSAT é um agrupamento de programas que operam juntos, estando os modelos de crescimento das culturas no centro desse conjunto. O diagrama a seguir (Figura 1.1), adaptado do trabalho de Hoogenboom *et al.* (2010c), auxilia na compreensão da estrutura modular do software. Cada módulo tem seis passos operacionais (executar a inicialização, inicialização sazonal, cálculo das taxas, integração, saída diária e sumário) e operam de maneira independente dos demais sendo interligados apenas por algumas interfaces.

Diferentes aplicações podem ser realizadas no DSSAT-CSM por intermédio dos modos operacionais. O modo básico prevê análises de sensibilidade e comparação entre os dados simulados e observados; o modo sazonal simula o crescimento da cultura em vários anos considerando as mesmas condições iniciais do solo; o modo de análise sequencial simula um sistema de rotação de culturas ao longo dos anos, sendo as condições do solo inicializadas somente no começo da simulação; e o modo espacial simula o crescimento de uma ou mais culturas no espaço (JONES *et al.*, 2003, HOOGENBOOM *et al.*, 2010<sup>c</sup>).



**Figura 1.1.** Visão geral dos componentes e estrutura modular de DSSAT-CSM. Fonte: Adaptado de HOOGEMBOM *et al.* (2010c).

Dentro do módulo primário solo, há o submódulo de água que calcula o balanço hídrico no perfil. A água proveniente da chuva ou da irrigação é infiltrada no topo da camada após a subtração do escoamento. Por sua vez, o escoamento é estimado a partir do método do número da curva que leva em conta a textura, declive e cobertura do terreno. A drenagem vertical ocorre somente quando a umidade do solo está acima do limite superior de água disponível ou capacidade de campo e é estimada por meio de uma aproximação do efeito cascata, em que o excesso de água, acima da capacidade de campo, flui para a camada seguinte (FARIA e BOWEN, 2003). Para o cálculo do conteúdo diário de água no solo são ainda considerados os processos de fluxo insaturado, evaporação e absorção de água pelas raízes (RODRIGUES, 2011).

O módulo solo-planta-atmosfera é responsável pelo cálculo dos valores diários de evaporação do solo e transpiração da planta. O DSSAT possui duas opções para a estimativa da evapotranspiração potencial. A primeira é o método de Priestley e Taylor (1972), que necessita apenas dos dados diários de radiação solar, precipitação e temperatura máxima e mínima do ar. A segunda opção é o método Penman–Monteith que, além das variáveis mencionadas,

necessita dos dados de umidade relativa do ar e da velocidade do vento, sendo considerado o método padrão sugerido pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) (ALLEN *et al.*, 1998).

## **2.2. Descrição do modelo CSM-CERES-Sorghum**

O CSM-CERES-Sorghum é parte integrante do módulo CERES do DSSAT, composto pelos cereais milho, arroz, trigo, cevada e milheto. É baseado no modelo CERES-Sorghum descrito por Alagarswamy *et al.* (1988), que leva em conta os seguintes processos: desenvolvimento fenológico; crescimento das folhas, colmo e raízes; acumulação e partição da biomassa.

A fenologia do sorgo é estimada a partir da integração de taxas de desenvolvimento que se acumulam até atingir valores limites requeridos por cada fase; tais taxas são dependentes das condições de temperatura do ar e, em função da fase da cultura, depende também do fotoperíodo (WHITE *et al.*, 2007). A duração das fases fenológicas é representada pelos coeficientes genéticos P1, P5, P3, P4, P2 e PANTH, que são específicos de cada cultivar (Quadro 1). Tais coeficientes são expressos em tempo térmico cuja unidade é

$^{\circ}\text{C dia}$ . Segundo Alagarswamy e Ritchie (1989a), o tempo térmico acumulado,

que é a soma do tempo térmico diário, é empregado para determinar a duração das várias fases fenológicas da cultura e direcionar o modelo através do tempo.

**Quadro 1.** Descrição e unidades dos coeficientes genéticos do modelo CSM-CERES-Sorghum.

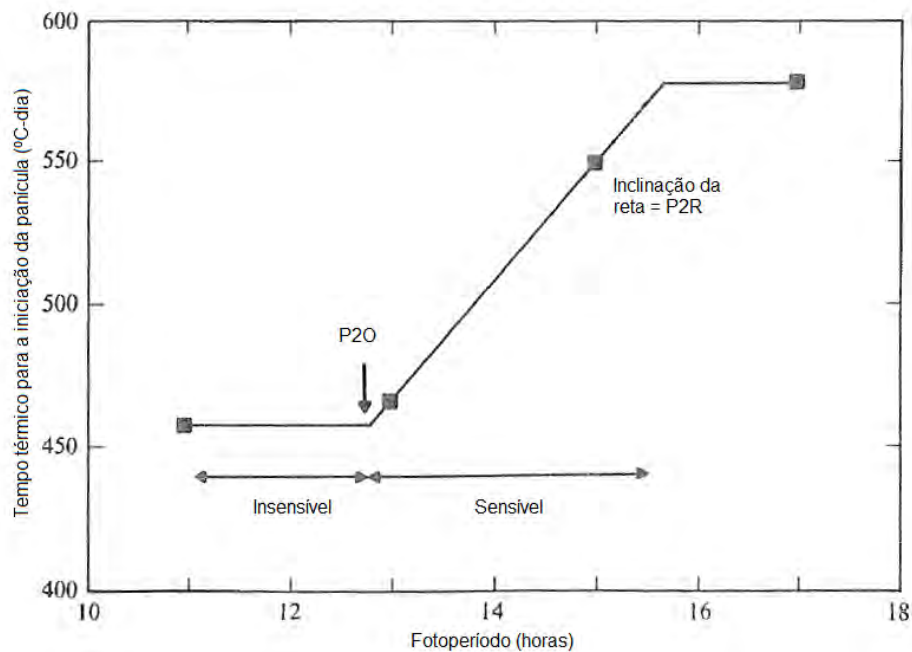
<b>Coeficiente Genético</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
P1	Tempo térmico durante o qual as plantas não respondem a mudanças no fotoperíodo. A duração deste período é da emergência da plântula até o final da fase juvenil.	$^{\circ}\text{C dia}$
P2	Tempo térmico do final da fase juvenil até a iniciação da panícula, sob condições de dias curtos.	$^{\circ}\text{C dia}$
P2O	Fotoperíodo limite acima do qual o tempo térmico para a iniciação da panícula será influenciado pelo fotoperíodo.	Horas
P2R	Taxa na qual o tempo térmico para a iniciação da panícula aumenta para cada hora acrescida no fotoperíodo acima de P2O.	$^{\circ}\text{C dia hora}^{-1}$
PANTH	Tempo térmico do final da iniciação da panícula até a floração.	$^{\circ}\text{C dia}$
P3	Tempo térmico do final da expansão da folha bandeira até a floração.	$^{\circ}\text{C dia}$
P4	Tempo térmico da floração até o início do enchimento dos grãos.	$^{\circ}\text{C dia}$

P5	Tempo térmico do início do enchimento dos grãos até a maturidade fisiológica.	$^{\circ}\text{C dia}$
PHINT	Intervalo do filocrono. Intervalo, em tempo térmico, entre sucessivas aparições das folhas da ponta.	$^{\circ}\text{C dia folha}^{-1}$
G1	Coefficiente que expressa o tamanho relativo da folha.	Adimensional
G2	Fração dos fotoassimilados direcionados para a panícula.	Adimensional

Até a fase juvenil, período após a semeadura durante o qual ocorre crescimento vegetativo, as plantas são totalmente insensíveis às condições que mais tarde irão induzir a iniciação floral (BERNIER *et al.*, 1981). A partir dessa fase, o desenvolvimento do sorgo é atrasado sob condições de dias longos. No modelo, caso a planta esteja crescendo em dias com fotoperíodo maiores que o valor limite P2O (horas), o tempo térmico necessário para iniciação da panícula é aumentado linearmente pelo coeficiente angular P2R

( $^{\circ}\text{C dia por hora}$ ). A Figura 1.2 mostra este efeito do fotoperíodo sobre um

híbrido de sorgo em um experimento realizado na Carolina do Norte, Estados Unidos (ALAGARSWAMY e RITCHIE ,1989a).



**Figura 1.2.** Resposta ao fotoperíodo do híbrido de sorgo Wheatland x AT x 430. Fonte: adaptado de Alagarswamy e Ritchie (1989a).

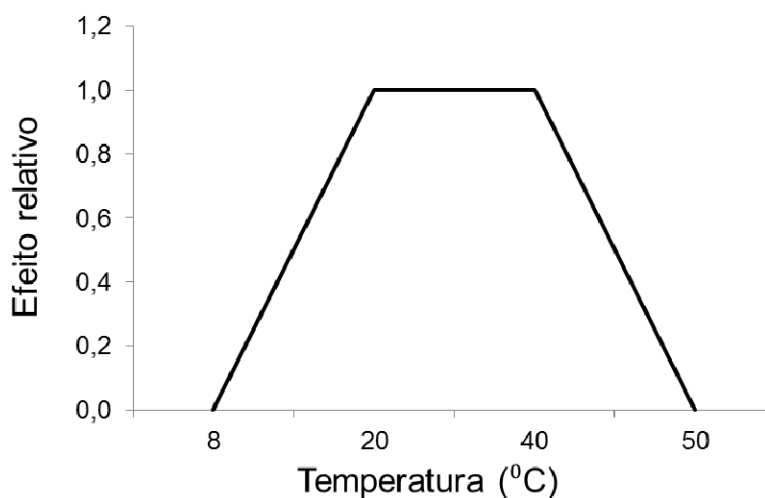
Os demais coeficientes genéticos, apresentados no Quadro 1, são G1, G2 e PHINT. O primeiro expressa o tamanho relativo da folha e o segundo representa a fração dos fotoassimilados que é direcionada para a panícula quando da partição da biomassa no modelo. Por fim, o coeficiente PHINT corresponde ao intervalo, em tempo térmico, entre as sucessivas aparições

das folhas na planta sendo expresso em  $^{\circ}\text{C}$  dia por folha.

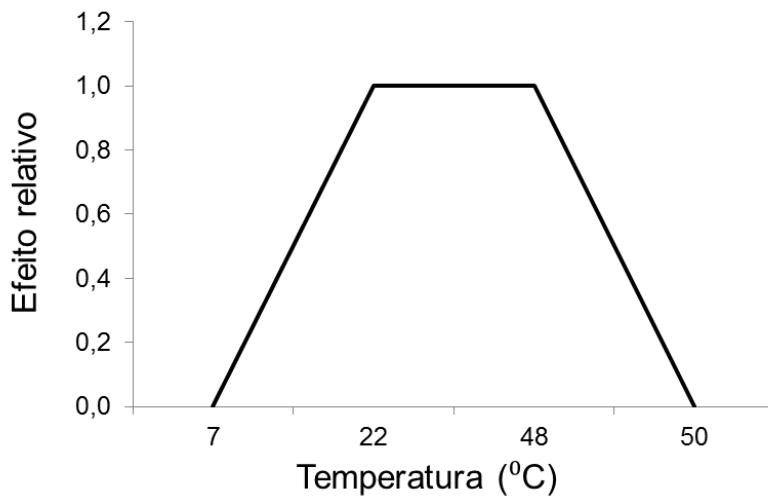
No modelo, a radiação solar é convertida em radiação fotossinteticamente ativa (RFA) usando-se um fator multiplicativo igual a 0,50. Por sua vez, a interceptação da radiação solar pelo dossel da cultura varia em função do índice de área foliar, do espaçamento entre linhas e da população de plantas (HOOGENBOOM *et al.*, 2010c). O crescimento diário da planta é então calculado a partir da conversão da RFA em matéria seca da planta por meio do parâmetro eficiência de uso da radiação. No caso do modelo CSM-CERES-Sorghum, este parâmetro é igual a 3,2 gramas de matéria seca total para cada megajoule de RFA interceptada.

O efeito da temperatura (T) na taxa de crescimento da planta é descrito por uma função trapezoidal com  $T_{\text{basal}}$  de 8°C,  $T_{\text{ótima}}$  de 20°C,  $T_{\text{ótima2}}$  de 40°C e  $T_{\text{máx}}$  de 50°C; na fase de enchimento dos grãos estes valores passam a ser iguais a 7°C, 22°C, 48°C e 50°C, respectivamente. A Figura 1.3 e a Figura 1.4,

adaptadas de Hoogenboom *et al.* (2010c), ilustram esse efeito. Nota-se que, quando as temperaturas diárias encontram-se na faixa ótima da cultura, o crescimento da planta é máximo, ao passo que valores acima ou abaixo dos valores ótimos reduzem linearmente o crescimento diário da mesma. Além disso, quando as temperaturas são menores que a temperatura basal ou maiores que a temperatura máxima, a planta cessa o seu crescimento. De acordo com o Alagarswamy e Ritchie (1989b) o crescimento da cultura pode ser ainda limitado por condições de estresse de nitrogênio e estresse hídrico.



**Figura 1.3.** Efeito da temperatura na taxa diária de crescimento.



**Figura 1.4.** Efeito da temperatura na taxa de enchimento dos grãos.

### **2.3. Áreas de estudo e base de dados meteorológicos**

O estudo foi feito a partir de experimentos de campo conduzidos em três municípios: Janaúba (Lat.15,80°S, Long. 43,30°O, Elev. 516m), Sete Lagoas

(Lat. 19,47°S, Long. 44,25°O, Elev. 732m) e em Rio Verde (Lat. 17,80°S, Long.

50,92°O, Elev. 774m). Os municípios de Janaúba e Sete Lagoas situam-se no

estado de Minas Gerais, porém em diferentes mesorregiões definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo o primeiro localizado na mesorregião Norte de Minas e o segundo na Metropolitana de Belo Horizonte. Já o município de Rio Verde pertence ao estado de Goiás, estando localizado na mesorregião Sul Goiano. Na Figura 1.5 a seguir, é

mostrado o mapa do Brasil com destaque para a localização desses três municípios brasileiros.



**Figura 1.5.** Mapa do Brasil com destaque para os três municípios onde foram realizados os plantios: Janaúba (MG), Rio Verde (GO) e Sete Lagoas (MG). Fonte: Google Maps (2011).

Optou-se no trabalho em utilizar o método Penman-Monteith (FAO-56) para o cálculo da evapotranspiração potencial. Dessa maneira, as variáveis meteorológicas usadas como dados de entrada no modelo foram precipitação ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), radiação solar global ( $\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$ ), temperatura máxima e mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%) e velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) obtidas das

estações de superfície convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presentes nos três locais. Os valores de radiação solar global foram estimados a partir do número de horas de brilho solar e da radiação solar no topo da atmosfera empregando-se os coeficientes  $a = 0,25$  e  $b = 0,50$  recomendados por Allen *et al.* (1998) na equação de Angstrom

$$R_s = \left( a + b \frac{n}{N} \right) \times R_0 \text{ (Equação 1. 1)}$$

em que,

$R_s$  - radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );

$R_0$  – radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );

$n$  - insolação ou brilho solar diário observado (horas);

$N$  - duração astronômica do período diurno, ou máxima duração do brilho solar possível (horas);

$a$  – constante da regressão; expressa a fração da radiação extraterrestre que atinge a superfície sob condições de dias totalmente nublados;

$a + b$  – coeficientes da regressão que expressam a fração da radiação extraterrestre que chega a superfície sob condições de dias totalmente claros, ou seja  $n = N$ .

### 2.3.1. Caracterização climática dos três locais

As três áreas de estudo apresentam características climáticas distintas, principalmente em termos de precipitação, temperatura e radiação solar. De acordo com a climatologia dos três locais (Sete Lagoas: 1982-2009, Janaúba: 1982-2009 e, Rio Verde: 1998-2009), Figura 1.6, percebe-se que Sete Lagoas possui estação chuvosa bem definida, de novembro a março, e período seco de abril a outubro. Já em Rio Verde a estação chuvosa começa em outubro e termina também em março. Nesses dois locais o verão é considerado úmido e o inverno seco (GOMIDE *et al.*, 2006; UFG, 2009). Em Janaúba, os índices de precipitação mensais são bem menores que os de Sete Lagoas e Rio Verde e, segundo Albuquerque *et al.* (2006), o clima do município tem características de sub-úmido e semi-árido com chuvas irregulares e longos períodos de seca. Para as séries do INMET apresentadas, a precipitação pluvial total média anual em Janaúba, Rio Verde e Sete Lagoas são iguais a 774 mm, 1483 mm e 1352 mm, respectivamente.

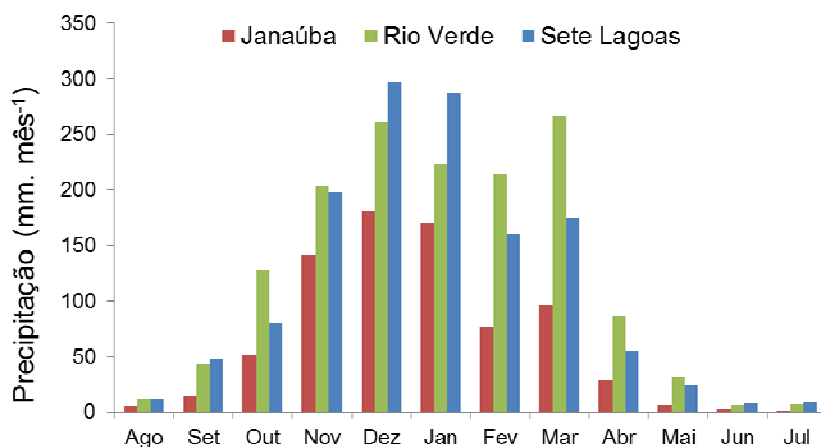
Observando-se os registros das médias mensais de temperaturas do ar, Figura 1.7, percebe-se que Janaúba é, entre os três municípios, o que

apresenta o clima mais quente e Sete Lagoas o mais ameno. Em Janaúba as temperaturas máximas são bem elevadas durante todo o ano, variando entre 29°C no mês de julho e 33°C no mês de outubro. Em Rio Verde, o mês mais quente também é outubro, quando a média da temperatura máxima é de 32°C.

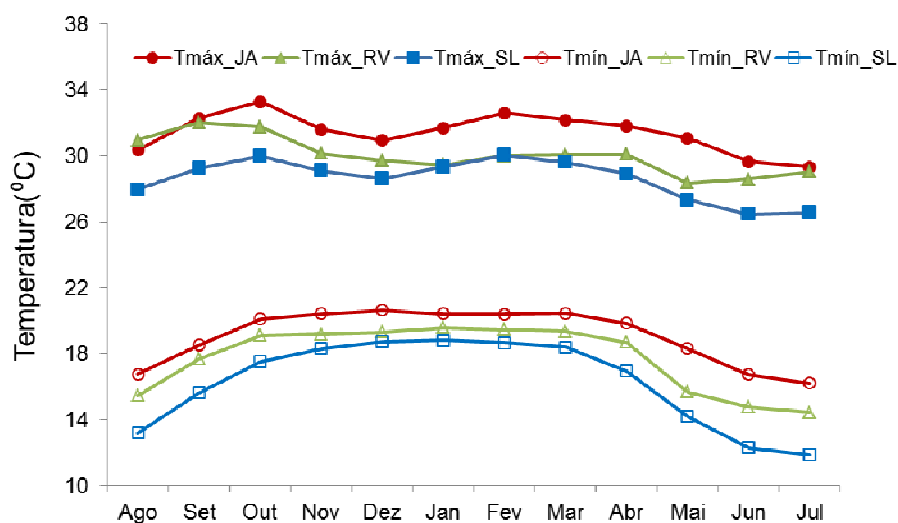
Em Sete Lagoas o mês de fevereiro é o que apresenta a maior média de temperatura máxima, igual a 30°C. Em relação às médias de temperaturas mínimas, em todos os locais o mês de julho se caracteriza por ser o mais frio apresentando valores iguais a 16°C, 14°C e 12°C em Janaúba, Rio Verde e Sete Lagoas, respectivamente.

Em termos de radiação solar global estimada, Janaúba possui as maiores médias mensais ao longo do ano todo e Rio Verde, as menores (Figura 1.8). Em todos os três locais, o maior valor médio mensal de radiação ocorre em fevereiro. Em Sete Lagoas e Janaúba, o mês de junho apresenta a menor média de radiação solar diária, igual a 16,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e 17,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Já em Rio Verde, o mês de junho apresenta o segundo menor valor. Nesse município, no mês de dezembro observa-se uma queda brusca no valor de radiação solar, sendo a média igual de 13,5 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. A radiação é diretamente relacionada ao número de horas de luz solar ao longo do dia. No verão, quando os dias são maiores, espera-se ocorrer os maiores

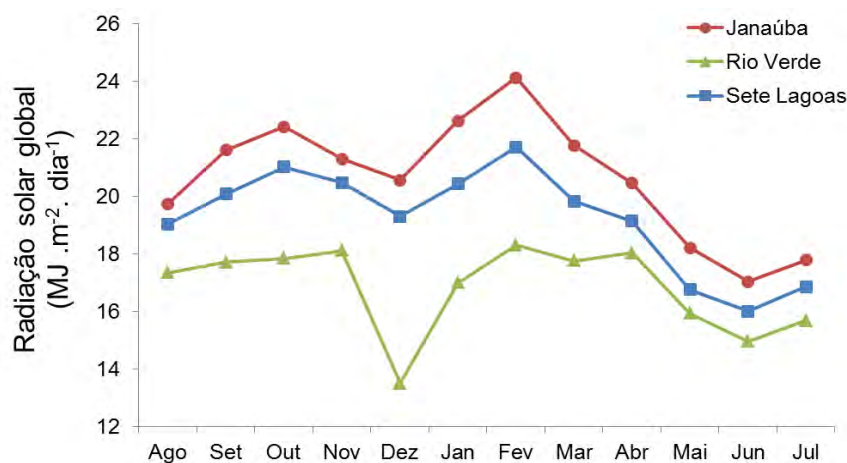
valores de radiação, como pôde ser observado para o mês de fevereiro. No entanto, outro fator, além da estação do ano, que afeta a insolação solar é a nebulosidade. O fato do mês de dezembro ser muito chuvoso e por isso, muito nublado, leva à queda da incidência de radiação solar nessa época do ano.



**Figura 1.6.** Média da precipitação acumulada mensal para os municípios de Janaúba (1982-2009), Rio Verde (1998-2009) e Sete Lagoas (1982-2009). Dados do INMET.



**Figura 1.7.** Média das temperaturas máxima e mínima observadas em Janaúba (1982-2009), Rio Verde (1998-2009) e Sete Lagoas (1982-2009). Dados do INMET.



**Figura 1.8.** Média dos valores estimados de radiação solar global para Janaúba (1982-2009), Rio Verde (1998-2009) e Sete Lagoas (1982-2009). Dados do INMET.

#### 2.4. Caracterização dos experimentos de campo

Todos os plantios foram feitos utilizando-se a cultivar de sorgo granífero BRS 310, recomendada para as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste. A BRS 310 é um híbrido simples, de ciclo médio, com alto potencial de rendimento de grãos, elevado teor de proteína e boa resistência às principais doenças. Por esta razão este híbrido é um bom competidor em relação aos demais lançados comercialmente (SANTOS *et al.*, 2004).

Em Sete Lagoas, foram realizados três ensaios de campo conduzidos no sítio experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Milho e Sorgo nos anos de 2009 e 2010. Em Janaúba, foram conduzidos dois ensaios nos anos de 2006 e 2007 também em um sítio experimental da EMBRAPA, localizado dentro do perímetro irrigado do rio Gortuba.

Nos ensaios de Sete Lagoas, fez-se o preparo inicial do solo utilizando-se escarificador para o revolvimento a 45 cm de profundidade. Foi realizada adubação de plantio empregando-se a formulação N-P-K 8-28-16 + Zn, aplicada no sulco na proporção de 400 kg ha<sup>-1</sup> e mais 200 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de magnésio. Nas adubações de cobertura aplicou-se 300 kg ha<sup>-1</sup> do adubo 20-00-20 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de uréia, 30 e 45 dias após plantio, respectivamente. Realizaram-se os tratos culturais recomendados para a cultura, como tratamento das sementes, combate às formigas, controle de plantas daninhas com herbicida e capina manual complementar, controle de doenças com

fungicida e de pragas com inseticida, além da irrigação por aspersão convencional.

Em Janaúba, no ensaio conduzido no ano de 2006, foi utilizada a fórmula 8-28-16 + Zn aplicada no sulco no dia do plantio, na proporção de 250 kg ha<sup>-1</sup> e adubação de cobertura com 100 kg ha<sup>-1</sup> de uréia, 30 dias após a semeadura. No plantio de 2007, foi feita a gradagem do solo antes da semeadura e adubação de plantio empregando-se 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 8-28-16 + Zn. Nas adubações de cobertura, realizadas a 35 e 42 dias após a semeadura, foram empregados 40 kg de nitrogênio por hectare na forma de uréia e 55 kg de N ha<sup>-1</sup> na forma de sulfato de amônia, respectivamente. Nos dois experimentos fez-se o controle dos insetos e de plantas daninhas com a aplicação de inseticidas e herbicidas, bem como foram realizadas irrigações por aspersão convencional fazendo-se o manejo de acordo com as exigências hídricas da cultura.

Foram feitas amostragens em 4 parcelas (4 repetições) nos plantios de Sete Lagoas e de Janaúba (2007), e em 3 parcelas (3 repetições) no ensaio de Janaúba do ano 2006. Coletaram-se e monitoraram-se os dados relacionados ao ciclo fenológico, crescimento e rendimento de grãos da cultura. Tais avaliações foram realizadas de acordo com os seguintes critérios:

- Emergência: foi marcado um metro de linha em cada parcela e contado o número de plântulas com 1 centímetro fora do solo. Isso foi feito todos os dias, desde a data do plantio, até o número de plântulas ficar constante. Determinado o número final de plantas emergidas, a data foi considerada igual àquela em que pelo menos 50% do total de plantas nas parcelas havia emergido.

- Número de folhas por colmo: foram marcadas 10 plantas em duas fileiras de cada parcela. Duas vezes por semana, eram anotados os números de folhas totais e com bainha. Quando se aproximava a época da emissão da folha bandeira, aumentava-se a frequência de anotações para três vezes por semana. O número de folhas por colmo em cada parcela foi obtido a partir da média aritmética dos valores observados nas 10 plantas.

- Iniciação da panícula: as amostragens iniciaram-se quando as plantas estavam com 3 a 4 folhas. Eram coletadas 3 plantas por parcela, 3 vezes por semana. Para visualizar o aparecimento do primórdio da panícula, as plantas eram cortadas rente ao solo, retiradas todas as folhas até ficar somente o

colmo. A data em que ocorreu a iniciação floral foi considerada quando em 2 das 3 plantas não havia mais folha interna para ser emitida e era possível observar uma ponta no formato de um torpedão (primórdio da panícula).

- Floração: nas mesmas 10 plantas marcadas para contar as folhas, foram feitas avaliações 3 vezes por semana do número de plantas liberando pólen na metade superior da panícula. A data da floração foi considerada aquela em que 50% das plantas amostradas estavam liberando pólen.

- Maturidade fisiológica: a partir do momento em que se tornou possível separar os grãos das braquetes, iniciaram-se as avaliações. Duas vezes por semana passou-se a coletar 3 plantas representativas de cada parcela, separando-se 20 grãos de cada panícula para a determinação do peso seco em estufa. Quando os grãos iniciaram o processo natural de mudança de cor e, ou endurecimento, passou-se a observar a coloração do halo de 2 em 2 dias. As amostragens prosseguiram até que 100% dos 60 grãos analisados estavam com o halo preto. A data da maturidade fisiológica foi considerada aquela em que 75% dos grãos amostrados estavam com coloração preta do halo.

- Fitomassa e área foliar: foram feitas amostragens quinzenais de 5 plantas consecutivas representativas de cada parcela e anotada a área da superfície do solo ocupada pelas 5 plantas. As plantas eram cortadas rente ao solo e apanhadas todas as folhas caídas junto de cada planta. Depois eram separadas as folhas, colmo e panícula para determinação do peso fresco e medida a área foliar das folhas verdes utilizando-se o aparelho LI-3100 C. O índice de área foliar, IAF, foi determinado pela razão entre a área foliar das folhas verdes e a área da superfície do solo ocupada pelas plantas. Posteriormente, as amostras eram levadas à estufa para a determinação do peso seco (0% de umidade) de cada componente. Com essas informações foi calculado o peso seco por hectare. Na colheita final, fez-se a separação dos grãos da panícula para a contagem e pesagem dos mesmos.

Para o município de Rio Verde utilizaram-se dados referentes a dois plantios realizados nos anos de 2009 e 2010 em unidades de observação da Cooperativa Mista dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano Ltda. (COMIGO). Em ambos, foi realizada adubação de plantio com 200 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K 08-20-18 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de uréia 30 dias após a semeadura, bem como aplicada irrigação de salvação da plantação durante os períodos de veranico ao longo do ciclo da cultura.

Na Tabela 1.1 a seguir, são mostradas as datas das sementeiras, população final de plantas, espaçamento entre linhas e os códigos criados para facilitar a identificação dos ensaios. As letras são a abreviação do nome do município onde o experimento foi conduzido, os dois primeiros números referem-se ao ano no qual realizou-se a sementeira e os dois últimos especificam a ordem do plantio.

**Tabela 1.1.** Características e códigos de identificação dos plantios.

Local	Data de sementeira	Código dos experimentos	População final de plantas (plantas m <sup>-2</sup> )	Espaçamento entre linhas (cm)
Janaúba	17/07/2006	JA0601	24,00	50
Janaúba	14/05/2007	JA0701	23,00	70
Rio Verde	25/02/2009	RV0901	15,33	50
Rio Verde	29/02/2009	RV1001	12,88	50
Sete Lagoas	28/10/2009	SL0901	13,28	70
Sete Lagoas	20/11/2009	SL0902	14,79	70
Sete Lagoas	28/01/2010	SL1001	13,48	70

Na Tabela 1.2 são especificados os registros dos dados em cada plantio. Nota-se que alguns experimentos foram mais simplificados, não sendo realizadas as medições de todas as variáveis. Do experimento SL1001 de Sete Lagoas, não foi possível utilizar os dados relacionados à produção de grãos, visto que ocorreram perdas muito significativas no campo ocasionadas pelo atraso na colheita, o que prejudicou demasiadamente os resultados finais. Contudo, os dados relacionados à fenologia da planta não foram afetados e por isso, foram considerados no trabalho.

**Tabela 1.2.** Dados fenológicos, de crescimento e rendimento do sorgo coletados em cada plantio.

Dados da cultura	JA0601	JA0701	RV0901	RV1001	SL0901	SL0902	SL1001
Data da emergência	x	x			x	x	x
Data da iniciação da panícula	x	x				x	x
Data da floração	x	x		x	x	x	x

Data da maturidade fisiológica	x	x	x	x	x	x	x
IAF		x			x	x	
Fitomassa seca aérea (kg ha <sup>-1</sup> )	x	x			x	x	
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	x	x	x	x	x	x	
N <sup>o</sup> de folhas colmo <sup>-1</sup>		x			x	x	x

---

## 2.5. Características do perfil e dados de umidade do solo

Nos modelos DSSAT o solo é representado por um perfil unidimensional, que é homogêneo na horizontal e possui diversas camadas na vertical (JONES *et al.*, 2003). No trabalho, considerou-se um perfil de solo com profundidade de 1,90 m, com a maior parte das raízes concentradas até a profundidade de 1,60 m, conforme observações feitas no campo. No modelo, essa representação foi feita utilizando-se o parâmetro denominado fator de crescimento de raiz, que foi igual a 0,01 na camada de 1,60 m a 1,90 m, a 0,9 na primeira camada do perfil (0 a 5 cm) e igual a 1,0 nas demais.

Os solos dos três locais são classificados como Latossolo, apresentando diferenciações em relação à cor e à textura: Latossolo Vermelho muito argiloso em Sete Lagoas, Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média em Janaúba e Latossolo Vermelho argiloso em Rio Verde. Os dados das características físico-químicas do solo dos sítios experimentais de Sete Lagoas e Janaúba foram determinados por meio de amostras compostas coletadas no campo e analisadas nos laboratórios da Embrapa Milho e Sorgo. Para Sete Lagoas, foram criados três perfis de solo, pois os plantios foram realizados em diferentes locais dentro da área experimental, observando-se algumas pequenas variações, sobretudo nas características químicas. Já para Janaúba considerou-se o mesmo perfil, visto que os dois ensaios foram feitos em locais próximos. Para os plantios de Rio Verde, o perfil de solo foi criado a partir de

amostras coletadas no campus da Universidade de Rio Verde, FESURV, e análises realizadas nos laboratórios da Embrapa Milho e Sorgo. Os dados foram completados com algumas informações obtidas junto à COMIGO e à Embrapa Solos. Considerou-se o mesmo perfil para ambos os plantios. Na Tabela 1.3 encontram-se os valores médios de algumas características físicas e químicas do perfil do solo, bem como a classe textural dos mesmos.

Para averiguar se o DSSAT estava simulando corretamente o balanço hídrico do solo, foram feitas algumas medições da umidade ao longo do ciclo da cultura nos experimentos de Sete Lagoas e Janaúba. Utilizou-se o método gravimétrico para o cálculo da umidade, por meio do qual obtém-se o teor de água presente no solo em relação à massa seca do mesmo após a

permanência das amostras em estufa à 105<sup>o</sup>C até peso constante (EMBRAPA,

2009). Dados de umidade em peso foram convertidos para umidade em volume utilizando-se os valores de densidade. As medições foram feitas por camadas (da superfície até 1,10 m de profundidade) e os valores usados para calcular o conteúdo total de água armazenada no perfil. Os valores de umidade que foram medidos próximos à data da semeadura foram utilizados como dado de entrada no modelo, como forma de representar a condição hídrica inicial do solo. Para os plantios em que não havia essa informação, iniciou-se a simulação 90 dias antes da semeadura, de forma a ajustar o componente balanço hídrico.

**Tabela 1.3.** Principais características químicas, físicas e classe textural dos solos onde os ensaios foram conduzidos: Janaúba (MG), Rio Verde (GO) e Sete Lagoas (MG). Valores médios dos perfis de solo.

Características físicas		Janaúba	Rio Verde	SL0901	SL0902	SL0903
Areia	(%)	42,43	51,30	14,86	14,86	13,00
Silte	(%)	22,71	5,80	16,43	16,43	13,67
Argila	(%)	34,86	42,90	68,71	68,71	73,33

Densidade aparente	(kg 10 <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1,54	0,99	0,97	0,97	0,93
Limite superior de água no solo	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,25	0,30	0,36	0,36	0,34
Limite inferior de água no solo	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,12	0,22	0,27	0,27	0,24
Porosidade Total	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,37	0,38	0,60	0,60	0,59
<b>Características químicas</b>		<b>Janaúba</b>	<b>Rio Verde</b>	<b>SL0901</b>	<b>SL0902</b>	<b>SL0903</b>
pH em água	-	7,06	4,48	5,52	5,55	5,65
Matéria Orgânica	(dag Kg <sup>-1</sup> )	0,65	1,29	3,31	2,75	2,63
Nitrato	(mg Kg <sup>-1</sup> )	-	-	13,17	13,87	-
Amônio	(mg Kg <sup>-1</sup> )	-	-	22,56	12,73	-
Nitrogênio Total	(%)	0,07	-	0,08	0,08	0,11
<b>Classe Textural</b>		Média	Argiloso	Muito argiloso	Muito argiloso	Muito Argiloso

## 2.6. Calibração e avaliação do modelo

No processo de calibração utilizaram-se os dados dos experimentos SL0902 e SL1001, realizados em Sete Lagoas. O primeiro foi escolhido por possuir maior número de variáveis medidas, ou seja, por se tratar de um experimento mais completo. O segundo foi empregado para auxiliar na calibração das datas da fenologia da cultura.

A princípio tentou-se calibrar o modelo utilizando-se a metodologia *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* – GLUE conforme He *et. al.*, 2009. Neste método, primeiramente define-se a provável distribuição dos parâmetros das equações (distribuição normal ou homogênea, por exemplo). Depois, calcula-se uma nova distribuição de probabilidade utilizando-se a primeira distribuição definida e os dados observados. Esta nova distribuição é então utilizada para estimar o conjunto de parâmetros mais provável e suas incertezas (HE *et. al.*, 2009). A metodologia GLUE está inserida dentro do DSSAT 4.5 e foi empregada para fazer uma calibração inicial dos parâmetros. No entanto, ao se compararem os valores estimados pelo modelo com os valores observados, percebeu-se a necessidade de se fazer ajustes dos coeficientes. Isto foi feito aumentando ou diminuindo o valor de determinado coeficiente por processo de tentativa até que os valores simulados se aproximassem dos valores medidos, procurando sempre minimizar os erros e

melhorar os índices estatísticos que eram calculados pelo DSSAT. Procurou-se ajustar, primeiramente, os dados referentes ao desenvolvimento fenológico do sorgo, começando com a data da iniciação da panícula, floração e, por último, maturidade fisiológica. Depois foram ajustados os coeficientes relativos ao tamanho da folha e fração de fotoassimilados direcionados para a panícula.

A avaliação do modelo foi feita com base nos dados dos plantios JA0601, JA0701, RV0901, RV1001 e SL0901. Foram usados os coeficientes genéticos obtidos na calibração para a cultivar BRS 310, porém, considerando-se as condições climáticas e de solo específicas de cada plantio. No processo de calibração e avaliação, foram calculadas as porcentagens de desvios (PD) dos valores simulados em relação à média dos dados observados, além dos índices estatísticos eficiência de modelagem (EFM), raiz do erro quadrático médio (REQM), índice de concordância  $d$  de Wilmott (1985) e viés médio (VM), cujas equações são:

$$PD = \left( \frac{y - x}{x} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1.2})$$

$$EFM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Equação 1.3})$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{y})^2}{n - 2}} \quad (\text{Equação 1.4})$$

$$VM = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - y_i}{n} \right) \quad (\text{Equação 1.5})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (\text{Equação 1.6})$$

em que,  $\bar{x}$  é a média dos valores medidos/observados no campo;  $y$  é o valor simulado pelo modelo CSM-CERES-Sorghum;  $\hat{y}$  é o valor predito pelo modelo de regressão estatístico;  $\bar{x}$  é a média de  $x$ ; e  $n$  é o número total de dados.

De acordo com Tedeschi (2006), o coeficiente EFM é um bom indicador do ajuste dos dados, podendo assumir valores que variam de um (1) a menos infinito (limite inferior teórico). Quando o ajuste dos dados é perfeito, o índice

EFM resultante é igual a 1. Por sua vez, a raiz do erro quadrático médio (REQM) possui a mesma unidade da variável analisada e deve apresentar o menor valor possível, pois informa se os resíduos provenientes dos erros entre os dados medidos e estimados são muito elevados. Já o índice de concordância de Wilmott é empregado para avaliar a exatidão do modelo, podendo variar entre 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita). Por fim, o VM é usado para indicar se o modelo tem tendência de super ou sub estimativa da variável em relação aos dados observados e, segundo Tedeschi (2006), um baixo valor de VM sugere que os pontos estão uniformemente distribuídos em torno da linha 1:1. Assim como a REQM, os valores de VM são dados na mesma unidade da variável avaliada. Além desses índices estatísticos, para os experimentos de Sete Lagoas e Janaúba foram calculados os desvios padrões (DP) das repetições em relação à média, que indica a dispersão dos dados dentro da amostra.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Calibração do modelo**

A calibração foi realizada a partir dos dados médios da cultura coletados em dois experimentos de campo conduzidos em Sete Lagoas (MG) conforme descrito no item 2.6. Primeiramente ajustaram-se P1, P2, P2O, P2R, PANTH, P3, P4 e P5, que são os coeficientes relacionados ao desenvolvimento da cultura. Em seguida ajustaram-se os parâmetros PHINT e G2 relacionados ao crescimento de folhas e, por fim, o coeficiente G1 relativo ao rendimento da cultura. A calibração seguiu esta ordem pelo fato da partição da matéria seca da planta entre as estruturas vegetativas ou reprodutivas ser dependente da fase do desenvolvimento (HOOGENBOOM *et al.*, 1992). Ou seja, existe uma dependência entre os parâmetros de crescimento em relação aos de desenvolvimento (RODRIGUES, 2011). A Tabela 1.4 mostra os coeficientes genéticos da cultivar CSH-1 presente na base de dados de sorgo granífero do DSSAT, que foram usados como valores iniciais no processo de calibração dos coeficientes, e os obtidos para a cultivar BRS 310. Nota-se que alguns coeficientes não foram alterados em relação ao valor inicial, como é o caso dos

coeficientes P2, P3, P4 e PHINT, enquanto que ocorreram variações expressivas para os demais.

**Tabela 1.4.** Valores dos coeficientes genéticos do modelo CSM-CERES-Sorghum, referentes à cultivar CSH-1 e os obtidos para a cultivar BRS 310.

Coeficiente genético	Valor inicial	Valor calibrado	Unidade
	410,0		
P1		360,8	°C dia
	102,0		
P2		102,0	°C dia
P2O	13,60	12,18	Horas
	40,00		
P2R		33,81	°C dia hora <sup>-1</sup>
	617,5		
PANTH		510,5	°C dia
	152,5		
P3		152,5	°C dia
	81,50		
P4		81,50	°C dia

	640,0		
P5		590,7	°C dia
	49,00		
PHINT		49,00	°C dia folha <sup>-1</sup>
G1	3,00	14,84	Adimensional
G2	6,50	4,70	Adimensional

Na Tabela 1.5 são apresentadas as médias das repetições dos experimentos de campo usadas para nortear o processo de calibração dos coeficientes, bem como o desvio padrão das repetições. Os valores das variáveis relacionadas à fenologia da cultura são apresentados em dias após a semeadura (DAS), enquanto que as variáveis de crescimento e rendimento referem-se ao peso seco (0% de umidade) na colheita final.

Ainda na Tabela 1.5, encontram-se os valores de porcentagem de desvio (PD), bem como os coeficientes de concordância de Wilmott (d) e EFM. Valores positivos de PD indicam superestimativa enquanto valores negativos indicam subestimativa do modelo em relação aos dados observados. É possível notar que houve um bom ajuste dos dados. O modelo foi capaz de simular o crescimento e o desenvolvimento da cultivar BRS 310 de maneira exata e precisa. Isso pode ser comprovado por meio dos altos valores dos coeficientes d e EFM, iguais a 0,99, em ambos os plantios.

Em relação às fases do ciclo fenológico da cultura, é interessante notar que o modelo calibrado foi capaz de estimar as datas de emergência, iniciação da panícula, floração e maturidade fisiológica, como pode ser observado pelos baixos valores de PD. Ao se compararem as datas de iniciação da panícula observada nos dois plantios, percebe-se que no experimento SL1001 o início do primórdio floral ocorreu mais cedo, em 32 DAS, ao passo que no experimento SL0902 isso ocorreu em 36 DAS. Essa variação está relacionada às condições de temperatura e ao fotoperíodo. Observando-se as variações das temperaturas médias do ar ao longo dos dois plantios (Figura 1.9), verifica-se que para o experimento SL1001, no início do ciclo os valores observados

eram expressivamente maiores que aqueles verificados no experimento SL0902. Para o plantio SL1001, até o dia 36 DAS as temperaturas médias ficaram na maioria das vezes acima dos 25°C, diferentemente do que ocorreu para o SL0902. As temperaturas mais altas fizeram com que a soma térmica acumulada necessária para iniciação da panícula fosse atingida mais rapidamente. Além disso, no experimento SL0902 a maior duração do dia, em comparação com o valor limite calibrado (12,18 horas) durante a fase inicial do ciclo, também contribuiu para que a iniciação da panícula ocorresse um pouco mais tarde em relação ao SL1001. Para o SL0902, da emergência até a iniciação da panícula foi necessária uma soma térmica igual a 518,9 °C dia, o

que corresponde a 56,1 °C dia a mais que o valor requerido em condições de

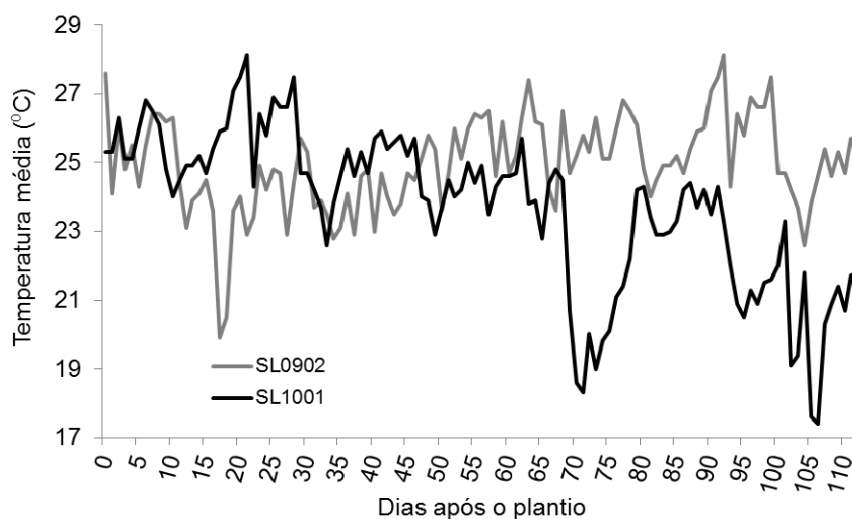
fotoperíodo abaixo de 12,18 horas, que é de 462,8 °C dia (P1+P2).

Observando-se as variáveis medidas na colheita final, percebe-se que o modelo simulou corretamente a produtividade final de grãos, sendo a diferença de apenas 8,1Kg ha<sup>-1</sup> entre o valor simulado e observado. Isto representa um PD de apenas 0,1%. A soma dos pesos secos das folhas, panículas e colmo, aqui descrita como fitomassa aérea, também foi simulada corretamente com PD igual a -5,6%.

**Tabela 1.5.** Dados observados e valores simulados pelo modelo CSM-CERES-Sorghum para a cultivar BRS 310 .

Experimento	Variável	Observado		Simulado	PD (%)	d	EFM
		D. P	Média				
SL0902	Emergência (DAS)	0,0	7	6	-14,3	0,99	0,99

	Iniciação da panícula (DAS)	0,0	36	37	2,8		
	Floração (DAS)	1,2	71	70	-1,4		
	Maturidade fisiológica (DAS)	1,9	105	109	3,8		
	Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	406,1	6085	6093	0,1		
	Fitomassa aérea na maturidade (kg ha <sup>-1</sup> )	2309,8	16886	15947	-5,6		
<b>SL1001</b>	Emergência (DAS)	0,0	4	6	50,0		
	Iniciação da panícula (DAS)	0,0	32	32	0,0	0,99	0,99
	Floração (DAS)	1,0	67	64	-4,5		
	Maturidade fisiológica (DAS)	1,5	113	112	-0,9		

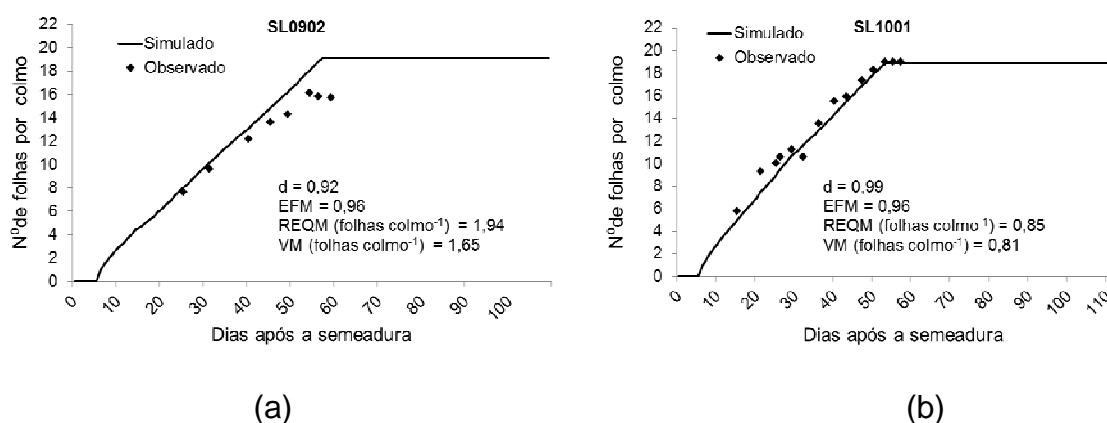


**Figura 1.9.** Variação das temperaturas médias ao longo do ciclo da cultura nos experimentos SL0902 e SL1001.

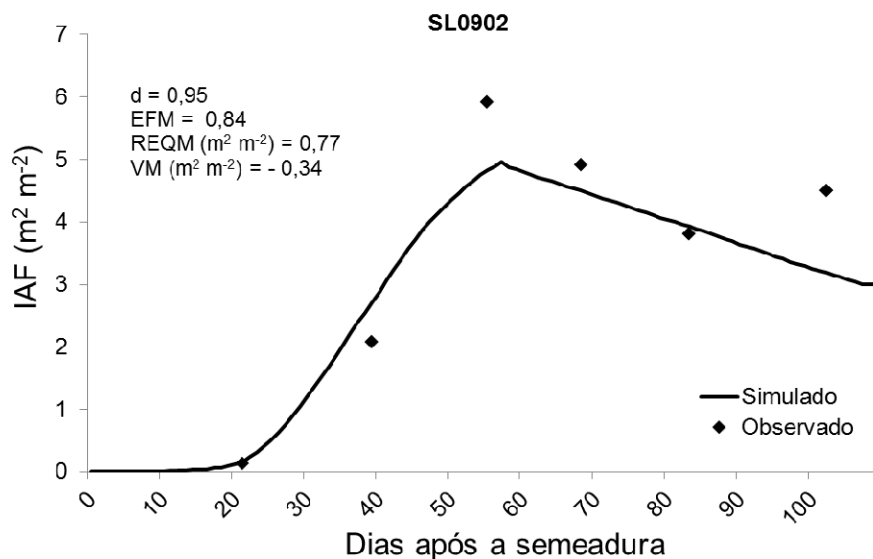
Para analisar a eficiência do modelo em simular o crescimento foliar foram utilizadas as variáveis número de folhas por colmo e índice de área foliar (IAF). Na Figura 1.10 pode-se observar que, para o experimento SL0902, o modelo superestimou o número de folhas, principalmente o valor final cuja média dos dados observados foi de 16 folhas colmo<sup>-1</sup>, ao passo que o valor simulado foi 19 folhas colmo<sup>-1</sup>. Este erro é indicado pelo valor de REQM, igual a 1,94 folhas colmo<sup>-1</sup>, e a superestimativa pode ser comprovada pelo valor

positivo do viés médio (VM), igual a 1,65 folhas colmo<sup>-1</sup>. É interessante notar que, apesar da diferença entre os valores, a data em que a planta cessa a emissão de folhas foi corretamente estimada. Isso significa que o modelo foi capaz de representar o momento em que ocorreu a expansão da folha bandeira, a partir do qual a área foliar da planta não aumenta mais. Além disso, ao se observar a Figura 1.11, nota-se que o modelo simulou de maneira satisfatória a evolução do IAF ao longo do ciclo, apresentando pequenos erros e altos coeficientes EFM (0,84) e d (0,95). Uma possível explicação para a diferença entre o valor final do número de folhas por colmo observado e simulado pelo modelo é a ocorrência de erro na contagem realizada no campo. Na prática, a última folha com bainha aparecendo era marcada com barbante para que a contagem seguinte iniciasse a partir desta marcação. Assim, se esse procedimento não foi corretamente executado em determinada contagem, pode ter comprometido o resultado final. Para o experimento SL1001, o modelo simulou corretamente o número de folhas por colmo, ocorrendo um ajuste quase perfeito entre os dados simulados e observados, como mostra os índices estatísticos d e EFM iguais a 0,99 e 0,96, respectivamente. Dessa maneira, optou-se por manter a calibração da taxa de aparecimento foliar do modelo igual a 49 °C dia folha<sup>-1</sup> sendo este valor citado por Alargaswamy e

Ritchie (1989<sup>a</sup>) e usado também nas calibrações de outras cultivares de sorgo presentes no banco de dados do DSSAT.



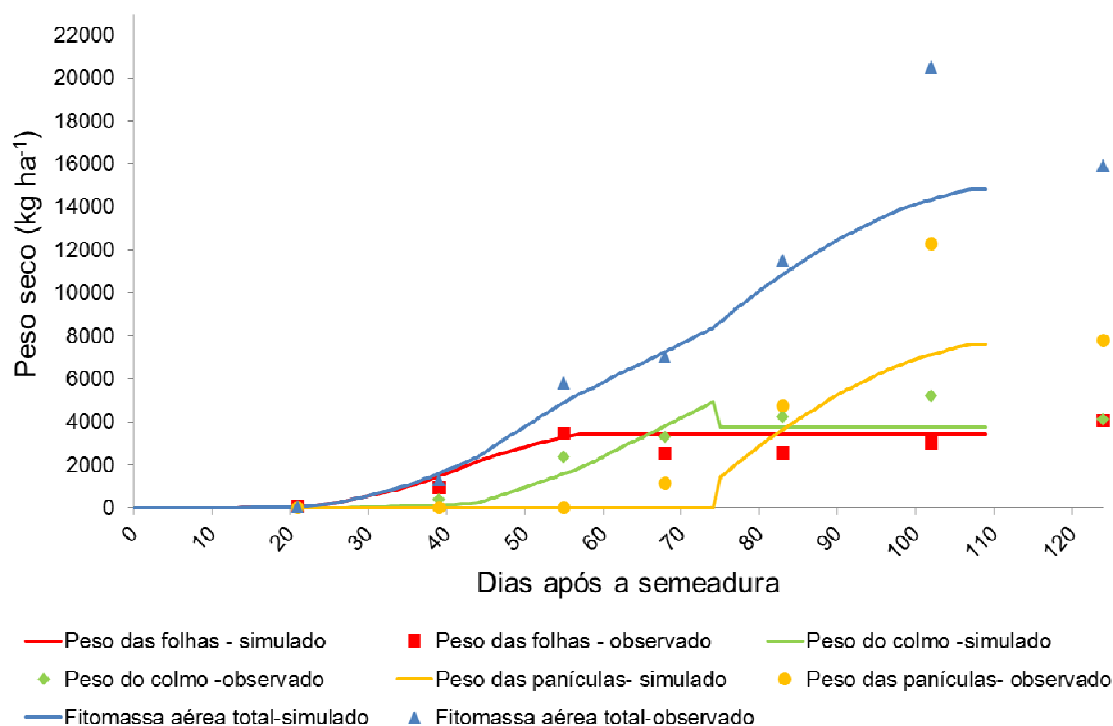
**Figura 1.10.** Número de folhas por colmo observado e simulado pelo modelo CSM-CERES-Sorghum nos experimentos SL0902(a) e SL1001(b).



**Figura 1.11.** Índice de área foliar observado no experimento SL0902 e simulado pelo modelo CSM-CERES-Sorghum.

Durante o experimento SL0902 foram coletados e pesados separadamente os componentes da parte aérea da planta. Na Figura 1.12 são apresentados os valores médios observados bem como o resultado da simulação do modelo CSM-CERES-Sorghum. Os valores finais medidos aparecem após a maturidade fisiológica porque as pesagens foram realizadas posteriormente a essa data. Nota-se que, na maioria das vezes, os valores de peso da panícula, peso de folhas e peso do colmo estimados pelo modelo ficaram bem próximos dos dados de campo. Percebe-se, todavia, que ocorreu um atraso na simulação do crescimento da parte reprodutiva. De acordo com o modelo, o crescimento da panícula começou aos dia 73 após a semeadura. Isto pode ser observado pela queda brusca no peso do colmo devido à realocação de biomassa para a parte reprodutiva da planta. No entanto, no campo em 68 DAS já foi observada a presença de panícula, ou seja, 5 dias mais cedo que o valor simulado. Essa limitação do modelo na partição da biomassa também foi observada por White *et al.* (2007). Ao se compararem os dados simulados pelo CSM-CERES-Sorghum com os dados medidos em um experimento conduzido na região de Maricopa, no estado americano do Arizona, estes autores observaram um atraso em torno de uma semana na relocação da massa do colmo para a panícula. Dessa forma, percebe-se a

necessidade de um ajuste do modelo para melhor representar os processos de crescimento da parte aérea da planta ao longo do tempo.



**Figura 1.12.** Partição da fitomassa seca aérea em folhas, colmo e panícula ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Valores observados no experimento SL0902 e simulados pelo modelo CSM-CERES-Sorghum.

### 3.2. Avaliação do modelo

Para avaliar o modelo, foram utilizados dados de desenvolvimento e crescimento da cultivar BRS 310, referentes ao experimento SL0901 de Sete Lagoas e aos plantios de Janaúba e Rio Verde, conforme item 2.6. Na Tabela 1.6 são apresentadas as porcentagens de desvio das estimativas da emergência, iniciação da panícula, floração e maturidade fisiológica em relação aos valores observados no campo. As datas de emergência foram estimadas de forma eficaz, ocorrendo um erro de apenas 1 dia para o experimento JA0701. Em relação às datas de iniciação da panícula e floração da planta, as estimativas também foram satisfatórias, com valores de PD sempre abaixo de 10%. A fase final do ciclo da cultura determinada pela maturidade fisiológica, foi a variável que apresentou o maior valor de PD, igual a -16,2% no experimento RV1002. Como os dados para Rio Verde se tratavam de dados secundários, não foi possível ter acesso a todas as informações do ciclo da cultura. Dessa maneira, para o experimento RV1002 a diferença entre o valor

simulado e observado pode ser explicada pelo fato de ter sido considerada a data da colheita como sendo a data da maturidade fisiológica. Na ausência da determinação em campo dessa fase fenológica da cultura, optou-se por utilizar essa informação como um indicador de finalização do ciclo da planta.

**Tabela 1.6.** Dados do ciclo fenológico da cultivar BRS 310 observados em campo e simulados pelo modelo CSM-CERES-Sorghum, em dias após a semeadura.

Variável	Experimento	Observado		Simulado	PD(%)
		D. P	Média		
Emergência (DAS)	JA0601	0,0	7	7	0,0
	JA0701	0,7	7	6	-14,3
	RV0901	-	-	6	-
	RV1001	-	-	6	-
	SL0901	0,5	6	6	0,0
Iniciação da panícula (DAS)	JA0601	0,0	37	35	-5,4
	JA0701	1,9	36	34	-5,6
	RV0901	-	-	33	-
	RV1001	-	-	32	-
	SL0901	-	-	36	-
Floração (DAS)	JA0601	0,6	63	66	4,8
	JA0701	2,4	71	67	-5,6
	RV0901	-	-	67	-
	RV1001	-	62	65	4,8
	SL0901	0,6	72	72	0,0
Maturidade Fisiológica (DAS)	JA0601	3,5	97	105	8,2
	JA0701	0	114	112	-1,8
	RV0901	-	124	117	-5,6
	RV1001	-	136	114	-16,2
	SL0901	1,7	107	111	3,7

Na Tabela 1.7 são apresentados os dados referentes ao crescimento e rendimento final de grãos. Nota-se que o modelo apresenta baixas porcentagens de desvio para a maioria das variáveis analisadas. Em termos de estimativas de produtividade de grãos, percebe-se que o modelo superestimou os valores observados, com PD variando entre 4,5% e 18,9%. Esse tipo de resultado é esperado visto que nos experimentos de campo podem ocorrer pequenas perdas ocasionadas, por exemplo, pelo ataque de pássaros, ou

durante o próprio processo de colheita e transporte dos grãos do campo para o local de pesagem. Além disto, nos experimentos de campo, há certa variabilidade entre as medidas das repetições, como indicado pelos valores de desvio padrão, enquanto o modelo é uma representação das condições médias, não capturando o efeito de grandes desvios nos dados observados. É interessante notar que ao se comparar os valores de produtividade observados e estimados pelo modelo não ocorreram grandes diferenças entre os plantios. Para os dados observados, o maior valor de produtividade ocorreu no experimento SL0901 e o menor, no plantio RV1001, sendo a diferença igual a 821 kg ha<sup>-1</sup>. Para os dados simulados, a maior produtividade também ocorreu no plantio SL0901, enquanto que o menor valor simulado foi para o ensaio JA0601, e a diferença foi de 1450 kg ha<sup>-1</sup>.

É possível notar que de maneira geral, o modelo CSM-CERES-Sorghum foi eficiente na simulação do ciclo fenológico, do crescimento e rendimento da cultivar BRS 310 sob condições de solo e clima diferentes das usadas na calibração. Estes resultados condizem com os encontrados por outros autores. No estudo desenvolvido por Soler *et al.* (2007), em que foi realizada a calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-Maize, que é semelhante ao CSM-CERES-Sorghum, verificou-se a sua acurácia em simular a fenologia e o rendimento de grãos observados em três experimentos de campo conduzidos no município de Piracicaba, São Paulo. Tais autores ressaltam a importância da realização deste tipo de estudo em outras regiões do país, visto que os modelos são importante ferramenta para auxiliar na tomada de decisões práticas no campo.

**Tabela 1.7.** Valores médios das variáveis de rendimento e crescimento observados e simulados pelo modelo CSM-CERES-Sorghum para a cultivar BRS 310.

Variável	Experimento	Observado		Simulado	PD(%)
		D.P	Média		
Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> )	JA0601	1213	4369	4570	4,6
	JA0701	1449	4870	5339	9,6
	RV0901	-	5051	5363	6,2
	RV1001	-	4244	5034	18,6
	SL0901	391	5065	6020	18,9
Fitomassa aérea na maturidade (kg ha <sup>-1</sup> )	JA0601	1632	15552	14466	-7,0
	JA0701	3434	12504	13095	4,7
	RV0901	-	-	12993	-
	RV1001	-	-	11660	-
	SL0901	996	13399	14188	5,9
IAF máximo	JA0601	-	-	5,6	-
	JA0701	1,4	4,7	3,7	-21,3
	RV0901	-	-	4,3	-
	RV1001	-	-	3,8	-
	SL0901	0,4	4,8	4,7	-2,5
Nº folhas colmo <sup>-1</sup> máximo	JA0601	-	-	18,5	-
	JA0701	0,5	18,6	18,2	-2,2
	RV0901	-	-	18,5	-
	RV1001	-	-	18,6	-
	SL0901	0,9	20,5	19,6	-4,4

### 3.3. Balanço hídrico no solo

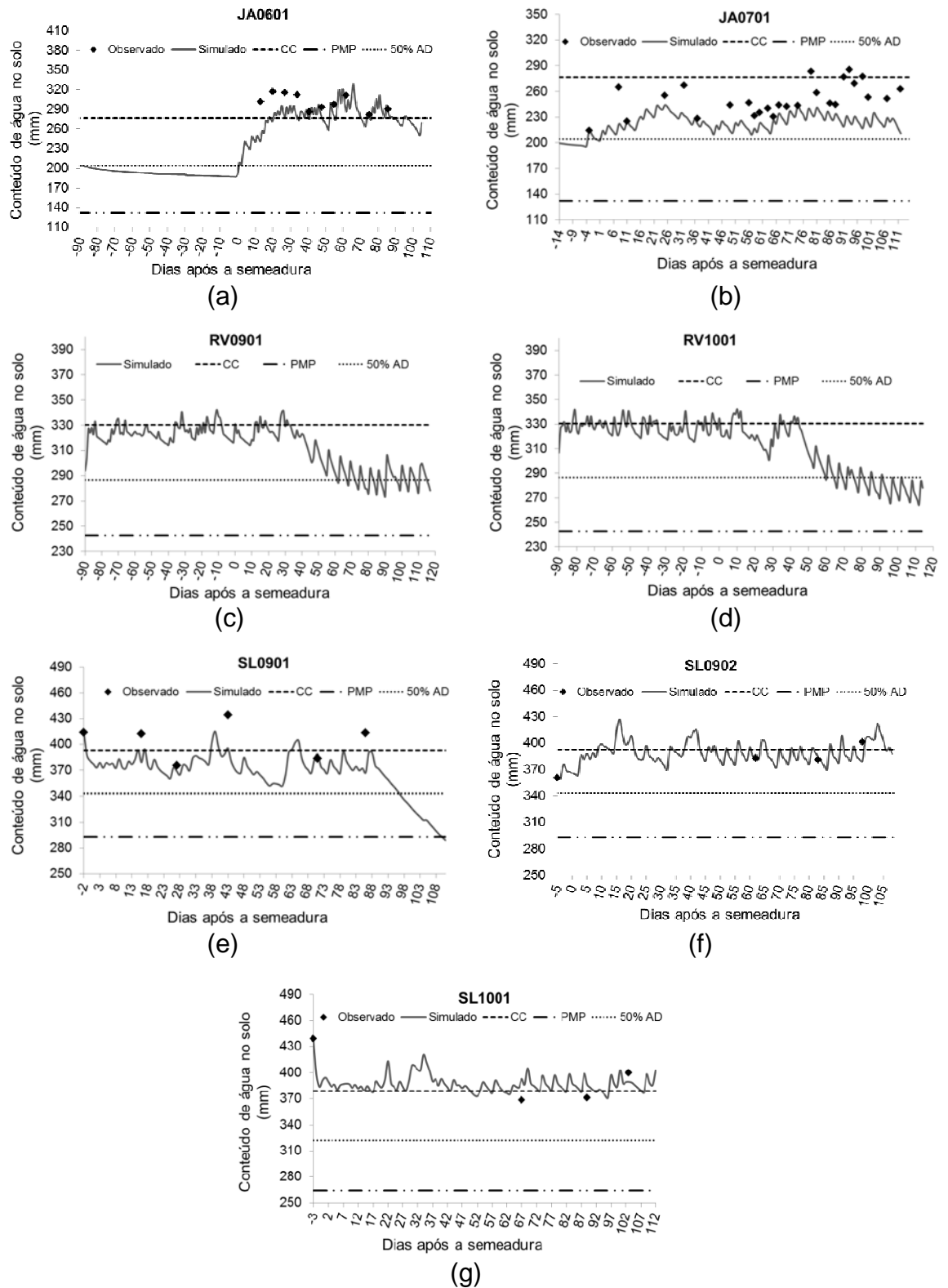
Conforme descrito no item 2.5, para os experimentos de Sete Lagoas e Janaúba foram feitas algumas coletas do solo para a determinação da umidade. Na Figura 1.13 são apresentados os valores do conteúdo total de água observado no campo e simulado pelo modelo CSM-CERES-Sorghum, bem como o limite superior de água disponível do solo (capacidade de campo – CC), limite inferior de água disponível do solo (ponto de murcha permanente – PMP) e 50% da água disponível do solo (50% AD), considerando-se a profundidade de 1,10 m. Para os plantios de Rio Verde, como não foram realizadas medições da umidade no campo, são mostrados apenas os dados simulados pelo modelo.

Quando se dispunha dos valores de umidade medidos próximos à sementeira, esta informação foi usada no modelo como condição hídrica inicial do experimento, tais como em SL0901, SL0902, SL1001 e JA0701. Para os demais experimentos (JA0601, RV0901 e RV1001), iniciou-se a simulação dos processos 90 dias antes da sementeira, de forma que o balanço hídrico do solo fosse ajustado e se conseguisse representar de maneira mais correta a condição hídrica real. Nota-se que o modelo conseguiu representar as variações no conteúdo de água nos solos de Sete Lagoas e Janaúba. No experimento JA0601, por exemplo, é possível observar que até os 90 dias antes da sementeira, quando foram considerados apenas os valores de chuva como dado de entrada no balanço hídrico, o modelo gerou valores de conteúdo de água abaixo de 204 mm (50% de AD). A partir da data da sementeira, quando começaram a ocorrer as irrigações, é observado então um aumento no conteúdo de água no solo, conforme se vê na Figura 1.13 (a). No experimento JA0701 a partir do dia 92 após a sementeira foram observadas maiores diferenças entre os dados observados e simulados. Este tipo de erro pode estar relacionado, por exemplo, à alguma falha no registro dos dados de irrigação. Uma maior lâmina de irrigação efetivamente aplicada no experimento de campo, pode ter elevado o conteúdo de água a partir dessa data, implicando em maiores diferenças entre os dados observados e estimados a partir de então. Já para Sete Lagoas, nota-se que os valores observados em campo e simulados pelo modelo se aproximaram muito nos três experimentos.

Considerando-se apenas os valores referentes ao ciclo da cultura, os maiores conteúdos de água no solo, simulados pelo modelo, ocorreram nos experimentos de Sete Lagoas, cujas médias foram iguais a 367,4 mm, 388,6 mm e 387,4 mm para os experimentos SL0901, SL0902 e SL100, respectivamente. Para Rio Verde, a média dos valores simulados foi de 304,0 mm e 301,2 mm correspondentes ao conteúdo de água no solo dos experimentos RV0901 e RV1001, respectivamente. Para Janaúba, ocorreram os menores valores de conteúdo de água no perfil, sendo de 275,9 mm o valor médio simulado para o plantio JA0601 e de 222,1 mm para o plantio JA0701. Essas variações no conteúdo de água podem ser explicadas pelas diferentes capacidades de retenção de água dos solos dos três municípios. Em Sete Lagoas, o limite superior de água disponível do solo é 379 mm (SL1001) e 393

mm (SL0901 e SL0902), em Rio Verde é 330 mm, enquanto que em Janaúba é igual a 277 mm (Figura 1.13).

É interessante observar que na maioria dos ensaios conduzidos em Janaúba e Sete Lagoas, sob irrigação, o conteúdo de água no solo, durante o ciclo da cultura, permaneceu acima de 50% da água disponível, indicando que o sorgo não foi submetido à estresse hídrico acentuado (Figura 1.13). No experimento SL0901 a cultura foi submetida à um estresse hídrico mais rigoroso na fase terminal do ciclo. Em Rio Verde, embora os ensaios tenham recebido irrigação suplementar, nota-se que a cultura foi submetida a um estresse hídrico mais longo a partir do florescimento, o que pode ocorrer na semeadura de safrinha.



**Figura 1.13.** Conteúdo de água no perfil do solo observado no campo e simulado pelo modelo DSSAT, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e 50% da água disponível (50% AD) para os experimentos de Janaúba (a) e (b), Rio Verde (apenas dados simulados) (c) e (d) e Sete Lagoas (e), (f) e (g).

#### 4. Conclusões

Após o processo de calibração dos coeficientes genéticos o modelo CSM-CERES-Sorghum foi capaz de simular o desenvolvimento, crescimento e rendimento da cultivar BRS 310 cultivada no município de Sete Lagoas (MG). Isso pôde ser comprovado pelos baixos desvios entre os valores simulados e os dados obtidos em dois ensaios de campo, bem como pelos elevados índices de concordância (d) e eficiência de modelagem (EFM). Em termos de crescimento foliar, o modelo superestimou o número de folhas por colmo para um dos ensaios, mas simulou de maneira muito eficiente para o outro experimento. O índice de área foliar foi corretamente simulado, apresentando baixos valores de REQM e VM.

Foi observada uma certa limitação do modelo em representar o processo de transferência da biomassa do colmo para a panícula, ocorrendo um atraso de 5 dias no aparecimento da parte reprodutiva no modelo em relação ao valor observado no campo. Esta limitação não afetou a estimativa do rendimento final de grãos, cujo valor ficou muito próximo do coletado no experimento em campo.

O modelo também foi capaz de representar corretamente o desenvolvimento e crescimento do sorgo considerando condições de solo e clima diferentes das usadas no processo de calibração. Isso foi comprovado ao se fazer a avaliação do mesmo usando dados de plantios de um outro ensaio realizado em Sete Lagoas, de dois experimentos conduzidos em Janaúba (MG) e de dois plantios realizados em Rio Verde (GO). Os valores de rendimento dos grãos foram semelhantes, mas sempre ligeiramente maiores para os dados simulados em relação aos dados observados.

O componente balanço hídrico do programa DSSAT simulou corretamente as variações no conteúdo de água no solo nos experimentos de Sete Lagoas e Janaúba, conforme foi observado nos 5 experimentos em que foram feitas medições da umidade do solo no campo.

## Capítulo 2. Aplicação do modelo CSM-CERES-Sorghum na avaliação dos impactos das mudanças climáticas

### 1. Introdução

Segundo dados da Organização das Nações Unidas, ONU, (UNITED NATIONS, 2011), em 2010 a população mundial atingiu o valor de 6,9 bilhões de pessoas, um aumento de aproximadamente 13% nos últimos 10 anos. Ainda de acordo com a ONU, em 2050 esse número pode alcançar 9,7 bilhões de pessoas, o que representará um aumento em torno de 59% em 50 anos. Esse fato faz com que a demanda por alimentos se torne cada vez maior e, conseqüentemente, a necessidade da produção agrícola também aumente. No entanto, muitas são as incertezas e grande é a preocupação em relação às respostas da produtividade agrícola às mudanças climáticas visto que estas podem variar dependendo da espécie, dos efeitos nas plantas do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nas plantas, da temperatura do ar, do estresse hídrico, entre outros fatores (BEYRUTH, 2008).

Biomassas e fauna são bastante sensíveis à mudança na temperatura do ar porém, o sistema climático é afetado como um todo, fazendo com que a precipitação, umidade e circulação atmosférica também sejam alteradas (TRENBERTH *et al.*, 2007). Ainda, a forçante radiativa altera o aquecimento da superfície terrestre e influencia diretamente na evaporação; além disto, o incremento de temperatura aumenta a capacidade de retenção de água pela atmosfera a uma taxa de 7% para cada grau (°C). Juntos, estes dois fatores afetam o ciclo hidrológico, principalmente as características da precipitação, que tendem a se tornarem mais intensas, entretanto com menor duração e/ou frequência. No trabalho de Vera *et al.* (2006), em que foram usados diversos modelos do IPCC-AR4 para se avaliarem as mudanças na climatologia da América do Sul (2070-2099), foi demonstrado um consenso entre todos os modelos de que os verões tenderão a se tornarem mais chuvosos no norte dos Andes e na região sudeste e os invernos mais secos em quase todo o continente.

De acordo com o quarto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), o aumento de temperatura é inequívoco, tendo como base observações do aumento da média de temperatura do ar global, aumento

da temperatura dos oceanos, derretimento generalizado das geleiras e o aumento do nível dos mares. Em termos da temperatura do ar global, ao se analisar o período de 50 anos compreendidos entre 1956 e 2005, observa-se um incremento de  $0,13^{\circ}\text{C} \pm 0,03^{\circ}\text{C}$  por década, taxa que representa quase o dobro do valor observado na série de 100 anos relativa ao período de 1906 a 2005 (TRENBERTH *et al.* 2007). É importante ressaltar que as variações de temperatura do planeta podem ser provocadas tanto por causas naturais, como emissão de aerossóis pelos vulcões e alterações da radiação emitida pelo sol, quanto por ações antropogênicas, entre as quais a emissão dos gases de efeito estufa e de sulfatos troposféricos (BERTRAND *et al.*, 2002).

No entanto, de acordo com os estudos apresentados pelo próprio IPCC, a maior parte do aquecimento nas últimas décadas está muito provavelmente relacionada ao incremento substancial dos gases de efeito estufa na atmosfera, conforme demonstrado por Hergel *et al.* (2007). Ao se avaliar o desempenho de vários modelos climáticos foi possível concluir que estes só foram capazes de reproduzir a tendência de aquecimento observada durante a metade do século 20 quando foram consideradas as forçantes antropogênicas.

A produtividade da cultura do sorgo, assim como de outras culturas agrícolas, está condicionada a um conjunto de fatores, dentre os quais se destaca as características edafoclimáticas. Isto inclui, por exemplo, a disponibilidade de água no solo e a radiação solar (LANDAU e MAGALHÃES, 2010). A escolha adequada da época de semeadura é de suma importância para o manejo agrícola, pois pode levar a maiores produtividades sem implicar no aumento dos custos para o produtor. Para se tomar uma decisão correta em termos da data da semeadura deve-se embasar nos fatores de riscos que tendem a ser minimizados quanto mais eficiente for o planejamento das atividades relacionadas à produção (AGUIAR *et al.*, 2006).

A definição das melhores épocas de semeadura pode ser feita por meio de experimentação convencional, fazendo-se o plantio em diferentes datas e avaliando-se as características biométricas e produtividade alcançadas. No entanto, apresenta como desvantagens o custo elevado e o fato de necessitar de longo prazo para a obtenção dos resultados (MARIN *et al.*, 2006). No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) fornece recomendações de épocas de plantio para o sorgo granífero por meio do zoneamento do risco climático. Na metodologia aplicada pelo MAPA, o risco de

insucesso da cultura está associado à probabilidade de insatisfação da necessidade térmica da cultura e à ocorrência de déficit hídrico nas fases de florescimento e enchimento de grãos. Isto é feito com base em cálculos do balanço hídrico decendial (LANDAU e MAGALHÃES, 2010). Uma alternativa à experimentação convencional e ao zoneamento climático proposto pelo MAPA é a determinação da época de semeadura, a partir da simulação do crescimento de plantas por meio de modelos previamente calibrados e validados (AMARAL *et al*, 2009).

Esses modelos são capazes de simular a produtividade da cultura em datas de plantio variadas e num curto intervalo de tempo. Soma-se a isto a capacidade que estes possuem de considerar o efeito das variações climáticas do local ao longo de todo o ciclo da planta. Outra aplicação recente dos modelos de culturas é em estudos que investigam os impactos das alterações no clima sobre as culturas agrícolas.

Para a cultura do sorgo, estudos envolvendo modelagem e mudanças climáticas já foram desenvolvidos em vários países. Para a região sudeste dos Estados Unidos, Carbone *et al.* (2003) utilizaram o modelo CERES-Sorghum para estudar o rendimento do sorgo considerando duas escalas espaciais de cenários de mudanças. Os resultados mostraram uma queda de produtividade igual a 51% para a simulação com a escala mais refinada, sem considerar o efeito de fertilização do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e estratégias de adaptação como mudança de cultivar e na data de plantio. Quando esses efeitos foram considerados, as quedas de produtividade foram de 42% e 15%, respectivamente. Para o cenário com distribuição espacial maior, apesar de menos expressivas, também foram observadas reduções do rendimento nos três casos analisados. Em Botswana, Chipanshi *et al.* (2003) examinaram a sensibilidade do sorgo ao aquecimento global e encontraram quedas do rendimento de grãos iguais a 31% e 10% em duas regiões analisadas. Já Srivastava *et al.* (2010) desenvolveram um trabalho para analisar o efeito das mudanças climáticas sob a produtividade da cultura em três regiões da Índia nos períodos de monções e de inverno. As projeções indicaram quedas mais acentuadas no rendimento do sorgo durante o inverno em duas das três regiões de estudo. A perda do rendimento pode ser muito grande em locais onde as temperaturas atuais já são altas e a chuva escassa. Contudo, os autores ressaltam que a adoção de algumas estratégias como mudanças na

data de semeadura e geração de novas cultivares podem auxiliar no ganho de produtividade e amenizar os impactos negativos.

Diante disto, o efeito das mudanças climáticas sobre a cultura do sorgo têm sido investigado em várias partes do mundo, mas continua como um desafio para a comunidade científica. No Brasil, no entanto, há uma escassez de literatura abordando este tema. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivos utilizar o modelo CSM-CERES-Sorghum para estimar a produtividade e as janelas de semeadura para o sorgo granífero e avaliar os possíveis impactos causados pelas mudanças climáticas sobre a cultura, em três municípios brasileiros.

## **2. Metodologia**

### **2.1. Áreas de estudo**

Realizaram-se simulações de produtividade do sorgo granífero para os municípios de Rio Verde, em Goiás, Janaúba e Sete Lagoas, em Minas Gerais. O município de Rio Verde está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, atualmente a principal produtora de sorgo do país e, por isso, área de grande interesse para esse tipo de estudo. De acordo com o IBGE (2011), em 2010 o total de sorgo colhido em Rio Verde foi de 72.000 toneladas, o que correspondeu a 11,8% do total produzido no estado de Goiás. Nos municípios de Sete Lagoas e Janaúba, a produção de sorgo é bem menos expressiva, alcançando os valores de 48 toneladas e 100 toneladas, respectivamente, no ano de 2009 (IBGE, 2010b). Contudo, é interessante avaliar a viabilidade da cultura em regiões que possuem diferentes características climáticas e de solo, conforme foi detalhado no Capítulo 1, o que motivou a inclusão de Janaúba e Sete Lagoas nas análises deste capítulo.

### **2.2. Séries climáticas**

Avaliou-se o efeito do clima sobre o rendimento do sorgo considerando-se três séries climáticas, sendo uma obtida a partir de dados observados nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presentes nos municípios de Janaúba, Rio Verde e Sete Lagoas e as outras duas obtidas a

partir dos dados do projeto ESSENCE - *Ensemble SimulationS of Extreme weather events under Nonlinear Climate changE*- (<http://www.knmi.nl/~sterl/Essence/>), que se baseia no modelo acoplado ECHAM5/MPI-OM. O período base de simulação desse modelo climático é de 1950-2100. Durante o período histórico (1950-2000) as concentrações dos gases do efeito estufa e aerossóis antropogênicos são referentes às observações, enquanto que para o período “futuro” (2001-2100) tais concentrações são baseadas no cenário A1B do SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) do IPCC (NAKICENOVIC *et al.*, 2000). Os dois componentes do modelo, ECHAM5 para a atmosfera e MPI-OM para o oceano, são detalhadamente descritos por Jungclaus *et al.* (2006). Os cenários da família A1 do IPCC descrevem um futuro com rápido crescimento econômico, baixo crescimento populacional e introdução rápida de novas e mais eficientes tecnologias. A família de cenários A1 se divide em quatro grupos (A1C, A1G, A1B e A1T) que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. O cenário A1B é caracterizado pelo uso balanceado de energia proveniente de fontes fósseis e não fósseis e para esse cenário a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico é próxima a 700 ppmv (partes por milhão em volume) no final do século 21 (NAKICENOVIC *et al.*, 2000). A configuração do modelo ECHAM5/MPI-OM, usada no presente estudo, tem uma resolução espacial em torno de 1,9° de latitude e de longitude, o que representa aproximadamente 180 x 180 km, na faixa equatorial, com 31 níveis de pressão verticais.

As seguintes variáveis meteorológicas foram utilizadas como condições iniciais do modelo: precipitação (mm dia<sup>-1</sup>), radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>),

temperatura máxima e mínima do ar (°C), umidade relativa (%) e velocidade do

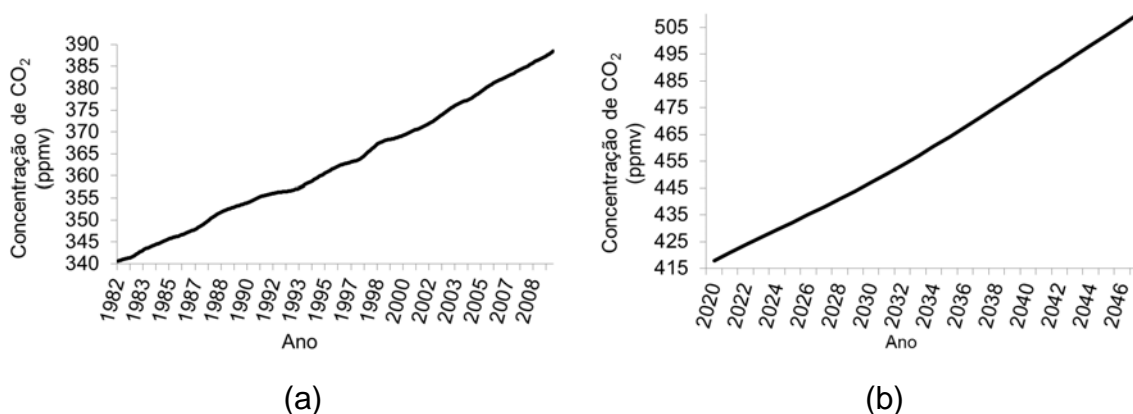
vento (m s<sup>-1</sup>). O modelo ECHAM5/MPI-OM não fornece diretamente os dados de umidade relativa do ar, por isso empregaram-se os dados de temperatura do ponto de orvalho para a obtenção da pressão de saturação e, por fim, esta foi usada para a estimativa da umidade relativa.

Na Tabela 2.1 são apresentados os períodos relativos às três séries climáticas nomeadas de acordo com a origem dos dados e, no caso das provenientes do modelo ECHAM5/MPI-OM, ao período a que se referem. O período “atual” foi limitado pelo ano de 2009, tendo início em 1982 para Janaúba e Sete Lagoas, totalizando 28 anos de dados meteorológicos. Para Rio Verde, os dados do INMET anteriores ao ano de 1998 possuíam muitas falhas. Assim, só foi possível utilizar uma série de 12 anos para esse município. Para o “futuro”, utilizou-se uma série cuja concentração de CO<sub>2</sub> se diferenciava de forma expressiva dos níveis observados no presente, mas que ao mesmo tempo não se referisse a um futuro muito distante. Dessa maneira, escolheu-se o período de 2020 a 2047 para Janaúba e Sete Lagoas e de 2020 a 2031 para Rio Verde.

**Tabela 2.1.** Caracterização das séries climáticas.

<b>Cidade</b>	<b>INMET</b>	<b>ECHAM-atual</b>	<b>ECHAM-futuro</b>	<b>Número de anos</b>
<b>Janaúba</b>	1982-2009	1982-2009	2020-2047	28
<b>Rio Verde</b>	1998-2009	1998-2009	2020-2031	12
<b>Sete Lagoas</b>	1982-2009	1982-2009	2020-2047	28

Na Figura 2.1 são apresentadas as variações das concentrações de gás carbônico, ao longo das séries climáticas do INMET e ECHAM-atual, tomadas a partir de medidas em Mauna Loa (Havaí/EUA) e da série ECHAM-futuro, obtidas por meio de projeções do IPCC-AR4 (cenário A1B). Tais valores foram usados como entrada no modelo CSM-CERES-Sorghum de forma que a cultura do sorgo fosse submetida às variações desse elemento na atmosfera.



**Figura 2.1.** Variação das concentrações de gás carbônico (em partes por milhão em volume) para as séries atuais (a) e futura (b). Valores de (a) referem-se às medições feitas no observatório de Mauna Loa (Havaí-EUA), enquanto que os valores de (b) são projeções do cenário A1B do IPCC.

### **2.3. Simulações da produtividade e estabelecimento do período de semeadura**

Para alcançar os objetivos do presente trabalho, realizaram-se simulações da produtividade da cultura do sorgo utilizando-se o modo sazonal do modelo CSM-CERES-Sorghum, presente versão 4.5 do programa *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* – DSSAT (HOOGENBOOM *et al.*, 2010a e JONES *et al.*, 2003). Neste modo do programa, as condições iniciais do solo e de manejo são repetidas a cada começo de simulação. Considerou-se um sistema de produção de sorgo granífero com espaçamento 0,70 m entre linhas e 18 plantas m<sup>-2</sup>. A adubação nitrogenada consistiu de uma aplicação de 32 kg de nitrogênio (N) por hectare no plantio e duas coberturas com 60 kg de N ha<sup>-1</sup> e 45 de N kg ha<sup>-1</sup>, na forma de uréia, aplicadas aos 30 e 45 dias após a semeadura.

Empregaram-se os coeficientes genéticos da cultivar BRS 310 para a qual o modelo foi calibrado e avaliado a partir de dados de experimentos de campo conduzidos nos três locais de estudo, conforme descrito no capítulo anterior. Na seção 2.5 do Capítulo 1, são apresentados os dados dos perfis de solo dos municípios de Janaúba e Rio Verde que foram mantidos nas simulações que serão aqui apresentadas. Para Sete Lagoas, criou-se um novo perfil a partir das médias das características dos três solos, também apresentados no Capítulo 1. Os dados meteorológicos utilizados referem-se às séries climáticas atuais (INMET e ECHAM-atual) e futura (ECHAM-futuro), para cada um dos locais de estudo, tal qual detalhado no item anterior. O modelo foi programado para simular, em regime de sequeiro, a produtividade de grãos de sorgo para semeaduras semanais a partir de 01 de agosto até 24 de julho, perfazendo um total de 52 épocas de plantio. Regime de sequeiro se refere ao fato da cultura se desenvolver sob condições hídricas naturais, ou seja, a entrada de água no sistema é proveniente apenas da precipitação local. Para ajustar o balanço hídrico do modelo, programou-se para que as simulações começassem 90 dias antes da data de semeadura. Para as séries do INMET,

além do regime de sequeiro, fez-se o mesmo procedimento considerando produção potencial, ou seja, avaliou-se também a resposta da cultura às condições hídricas e nutricionais ideais. É importante destacar ainda, que nas simulações de produtividade para o período atual e futuro, assumiu-se que a tecnologia, as práticas de manejo e a tolerância da cultura a estresses permaneceram iguais ao observado no presente.

Para o estabelecimento do período de semeadura optou-se por adotar a metodologia denominada “redução da produtividade por época de semeadura” descrita no trabalho de Amaral *et al.* (2009) para a cultura do milho. Para isto, inicialmente foram calculadas as produtividades médias, simuladas para as 52 épocas de semeadura e 28 anos (Janaúba e Sete Lagoas) e 12 anos (Rio Verde). Posteriormente, calculou-se a porcentagem de redução da produtividade em relação à época de maior produtividade, de acordo com a seguinte fórmula:

$$P_s = \left( 1 - \frac{Y_s}{Y_{\max}} \right) \times 100 \text{ (Equação 2. 1)}$$

Em que,

$P_s$  é a porcentagem de redução da produtividade para época “s”;

$Y_s$  é a produtividade da época “s” e,

$Y_{\max}$  é a produtividade máxima entre todas as épocas de semeadura.

A série do INMET foi utilizada como referência para o período atual e, a partir destes dados climáticos, estabeleceram-se períodos de semeadura para o presente. Em relação aos dados do ECHAM5/MPI-OM, primeiramente avaliou-se a aplicabilidade dos mesmos nos locais de estudo. Para isto, foram comparadas as produtividades médias obtidas a partir da série do INMET com os valores médios obtidos a partir da série ECHAM-atual, referentes a períodos em comum. Para verificar o comportamento de uma série em relação à outra, gerou-se um modelo de regressão linear e calculou-se o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para avaliar o ajuste ao modelo proposto. Também foi calculado o índice de concordância de Wilmott (d) como forma de avaliar a exatidão dos dados provenientes do ECHAM em relação aos do INMET. Além destes, determinou-se o viés médio (VM), o qual indica se há alguma tendência de superestimava ou de subestimativa dos dados simulados em relação aos

dados observados. Para verificar se houve diferença significativa entre as produtividades médias obtidas a partir das duas séries climáticas, empregou-se o teste t de Student, para dados normais, e o teste de Wilcoxon, para dados não normais, ambos a 5% de significância. A normalidade dos dados foi testada a 5% de significância por meio do teste de Shapiro-Wilk. Nos casos de normalidade, ainda foi aplicado o teste F para testar a homogeneidade das variâncias, a 5% de significância. O mesmo procedimento foi adotado para testar as diferenças entre os dados médios de precipitação da série do INMET e ECHAM-atual.

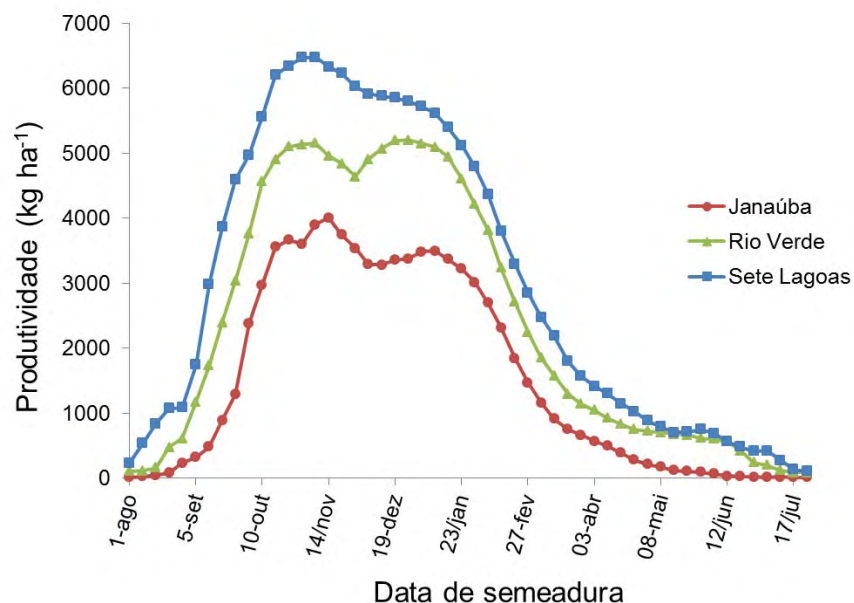
Após a avaliação, os resultados das simulações provenientes da série ECHAM-atual serviram como referência para se compararem com as simulações resultantes da série ECHAM-futuro. A estatística usada com os dados observados também foi conduzida para os dados modelados.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Simulações a partir dos dados do INMET**

##### **3.1.1. Produtividades**

Observaram-se grandes diferenças entre as produtividades médias do sorgo simuladas para os três locais em regime de sequeiro (Figura 2.2). Para todas as épocas de semeadura analisadas, Sete Lagoas (MG) apresentou os maiores rendimentos da cultura enquanto que em Janaúba (MG) foram observados os menores valores. O município de Rio Verde (GO) aparece com produtividades intermediárias. As produtividades médias máximas foram iguais a 4003 kg ha<sup>-1</sup>, 5203 kg ha<sup>-1</sup> e 6476 kg ha<sup>-1</sup> e as mínimas iguais a 12 kg ha<sup>-1</sup>, 85 kg ha<sup>-1</sup> e 104 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente para Janaúba, Rio Verde e Sete Lagoas. As médias gerais, referentes a todas as épocas de semeadura, foram de 1521 kg ha<sup>-1</sup>, 2392 kg ha<sup>-1</sup> e 2996 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 2.2.** Produtividades médias de sorgo granífero simuladas a partir das séries climáticas do INMET, em condições de sequeiro. Valores referentes aos períodos de 1982 a 2009 para Janaúba (MG) e Sete Lagoas (MG) e de 1998 a 2009 para Rio Verde (GO).

Nas simulações, foram consideradas as mesmas condições de espaçamento entre linhas, população de plantas e adubação nitrogenada para os três locais. Desta maneira, as diferenças entre os resultados são explicadas pelos padrões climáticos distintos entre os três municípios.

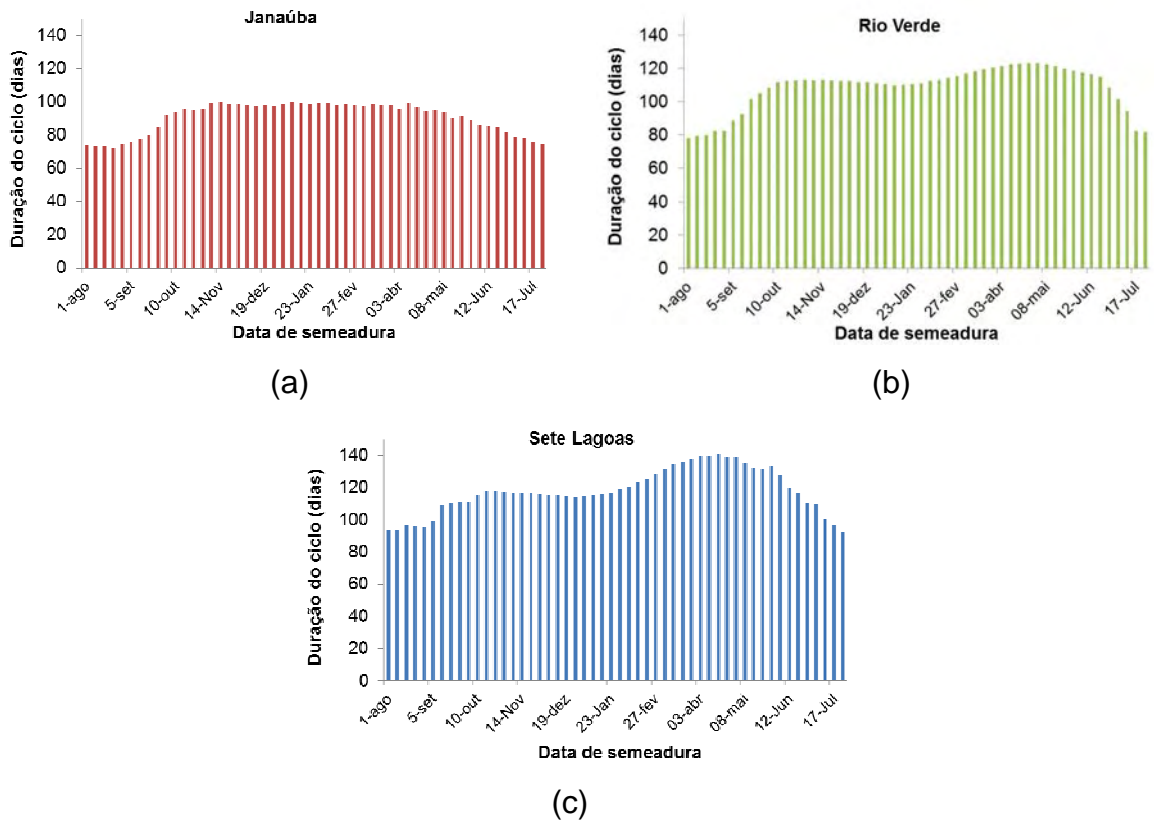
Um fator que afeta o rendimento das culturas agrícolas é a disponibilidade de água no solo. Embora o sorgo seja mais resistente ao estresse hídrico que outros cereais, ele também sofre o efeito da falta de água chegando a reduzir consideravelmente a produtividade (AGUIAR *et al.*, 2006). No trabalho de Marin *et al.* (2006), ao se compararem os valores de produtividade de sorgo simulada para quatro locais do Estado de São Paulo, pôde-se verificar que as curvas de rendimento obedeceram em grande parte à curva de armazenamento hídrico no solo.

Os modelos CERES do DSSAT simulam o efeito do estresse hídrico sobre a cultura calculando-se a relação entre a evapotranspiração real e a potencial. Se essa taxa for menor que 1,0, isto indica que a condutância estomática deve ser diminuída algumas vezes no dia para evitar a dessecação da planta. Essa taxa é então usada para reduzir a fotossíntese de forma proporcional à transpiração (HOOGENBOOM *et al.*, 2010c). Por sua vez, a

evapotranspiração real é limitada, entre outros fatores, pelo conteúdo de água no solo.

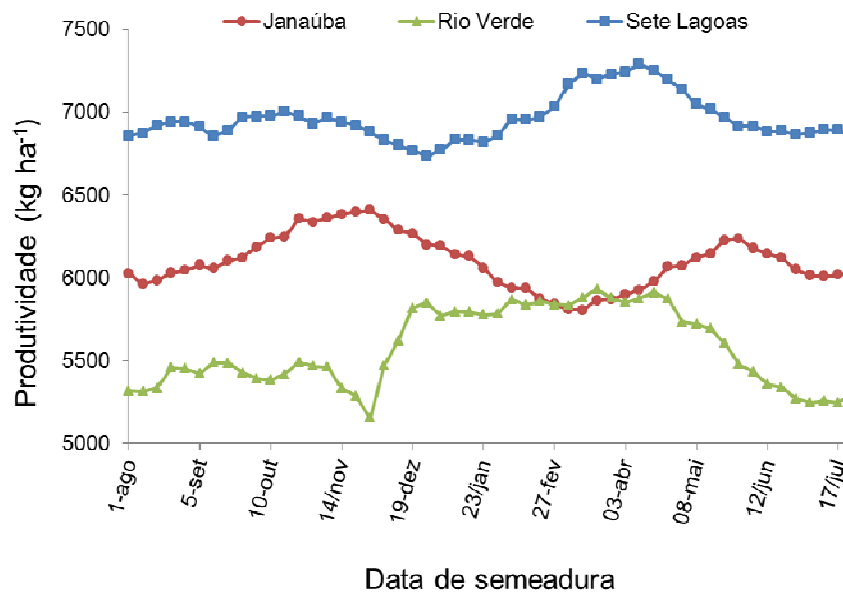
Em Janaúba, além dos índices de precipitação serem menores que os índices de Rio Verde e Sete Lagoas, soma-se o fato das temperaturas elevadas aumentarem a demanda evaporativa do local (SOUZA e WILHELM, 2009). Assim, já era previsível encontrar maior penalização da produtividade do sorgo conduzido em regime de sequeiro neste município em relação aos demais.

A posição ocupada por Rio Verde, com menores produtividades em relação ao município de Sete Lagoas, pode ser atribuída à questão dos menores índices de radiação solar incidente naquele local, conforme apresentado no item 2.3.1 do Capítulo 1. Além disto, as temperaturas mais amenas em Sete Lagoas fizeram com que a duração do ciclo da cultura fosse maior em relação aos outros locais (Figura 2.3). Isto ocorreu pelo fato da soma térmica necessária para completar as fases do ciclo do sorgo levar mais tempo para ser atingida. Em Sete Lagoas, os ciclos foram superiores a 130 dias no período de semeadura entre 6 de março e 29 de maio e, mesmo nas demais datas, os ciclos foram sempre maiores que 90 dias. Em Janaúba, os ciclos oscilaram entre 73 e 100 dias e em Rio Verde essa variação foi entre 78 e 123 dias. De acordo com Magalhães *et al.* (2010), o rendimento da cultura está relacionado à duração do período do enchimento dos grãos. Assim, quanto mais longo for esse intervalo maior é o tempo que a planta tem para translocar os fotoassimilados para os grãos.



**Figura 2.3.** Duração média do ciclo da cultivar BRS 310 empregando as séries climáticas do INMET, em condições de sequeiro. Valores referentes aos períodos de 1982 a 2009 para Janaúba (MG) e Sete Lagoas (MG) e de 1998 a 2009 para Rio Verde (GO).

Ao se avaliarem os resultados obtidos pela simulação considerando produtividade potencial, ou seja, sob condições hídricas e de fertilidade ideais, nota-se uma inversão entre as posições ocupadas por Janaúba e Rio Verde, ao passo que Sete Lagoas manteve-se em primeiro lugar, apresentando os maiores valores médios de produtividade (Figura 2.4). Essa inversão ocorreu pelo fato de Janaúba apresentar maiores índices de radiação solar incidentes, o que superou, inclusive, o efeito da menor duração do ciclo da cultura nesse local em relação a Rio Verde. Freitas *et al.* (2001) utilizaram o modelo CERES do DSSAT para a cultura do milho e compararam os resultados de produtividade obtidos para diferentes anos no mesmo local. A partir dos resultados foi possível concluir que os valores da radiação solar influenciaram no rendimento simulado, sendo a diferença de radiação solar ocorrida no período de florescimento até a maturidade fisiológica determinante para que se verificassem as diferenças de produtividade.



**Figur**

**a 2.4.** Produtividades potenciais médias de sorgo granífero simuladas a partir das séries climáticas do INMET. Valores referentes aos períodos de 1982 a 2009 para Janaúba (MG) e Sete Lagoas (MG) e de 1998 a 2009 para Rio Verde (GO).

Para a cultura do sorgo, MAGALHÃES *et al.* (2010) afirmam que a medida que a copa da planta se fecha, a fotossíntese passa a depender menos do incremento do índice de área foliar, passando a se relacionar com a estrutura da copa vegetal e com a radiação solar incidente. Segundo esses mesmos autores a fotossíntese fornece cerca de 90% a 95% da matéria seca ao vegetal, assim como a energia metabólica requerida para o desenvolvimento da planta. Assim, é possível entender a importância da radiação no crescimento e rendimento da cultura.

Na Figura 2.4 nota-se, também, que os valores de produtividade potencial foram superiores a 5000 kg ha<sup>-1</sup> em todos os três locais. Além disto, a variabilidade entre as épocas de semeadura foi bem menor em relação aos resultados de simulações em regime de sequeiro. As produtividades potenciais oscilaram entre 7291 kg ha<sup>-1</sup> e 6733 kg ha<sup>-1</sup>; 6407 kg ha<sup>-1</sup> e 5806 kg ha<sup>-1</sup>, e 5933 kg ha<sup>-1</sup> e 5152 kg ha<sup>-1</sup> em Sete Lagoas, Janaúba e Rio Verde, respectivamente. As médias gerais passaram a ser iguais a 6958 kg ha<sup>-1</sup>, 6098 kg ha<sup>-1</sup> e 5575 kg ha<sup>-1</sup>. Para Sete Lagoas e Rio Verde estes valores equivalem a 2,3 vezes os resultados encontrados nas simulações em regime de sequeiro. Para Janaúba esta diferença é ainda maior, sendo a média geral da produtividade na simulação potencial equivalente a 4 vezes o valor encontrado no regime de sequeiro.

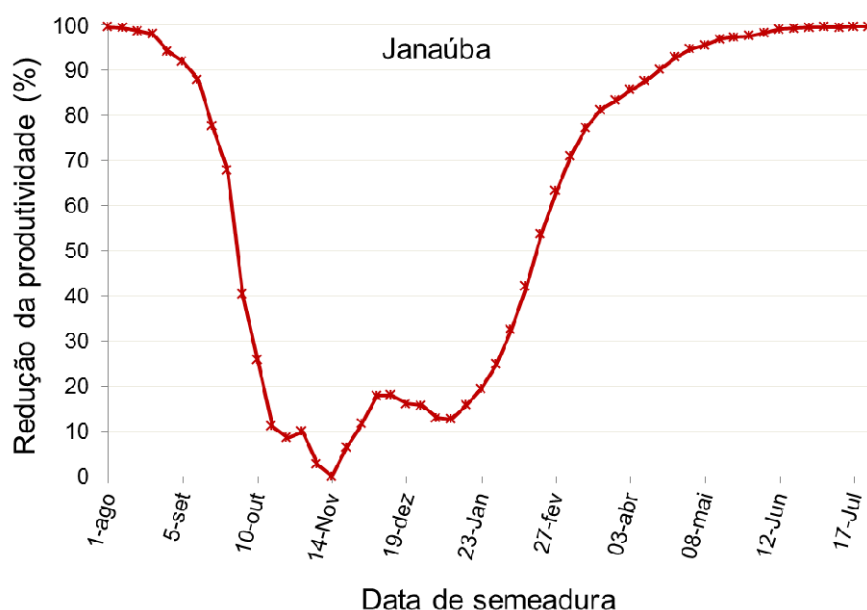
Pelo exposto, percebe-se que a produtividade potencial do sorgo nos três municípios é elevada. Anulando-se o efeito da limitação hídrica em algumas épocas, as características climáticas são favoráveis à cultura durante o ano inteiro. Desta maneira, seria interessante estudar a viabilidade econômica da utilização de irrigação para a cultura nestas regiões visto que no Brasil existe uma demanda latente por cereais para alimentação animal (DUARTE, 2003).

Para a cidade de Sete Lagoas, notou-se que as condições climáticas são adequadas para o cultivo do sorgo em muitas épocas do ano, mesmo sob regime de sequeiro. Assim, seria importante que o plantio da cultura fosse incentivado naquela região, possivelmente, por meio de políticas públicas, como financiamento da safra, da infraestrutura de produção, tais como a construção de locais para armazenamento dos grãos, de equipamentos para a lavoura, de assistência técnica aos agricultores, entre outros.

### **3.1.2. Estabelecimento do período de semeadura**

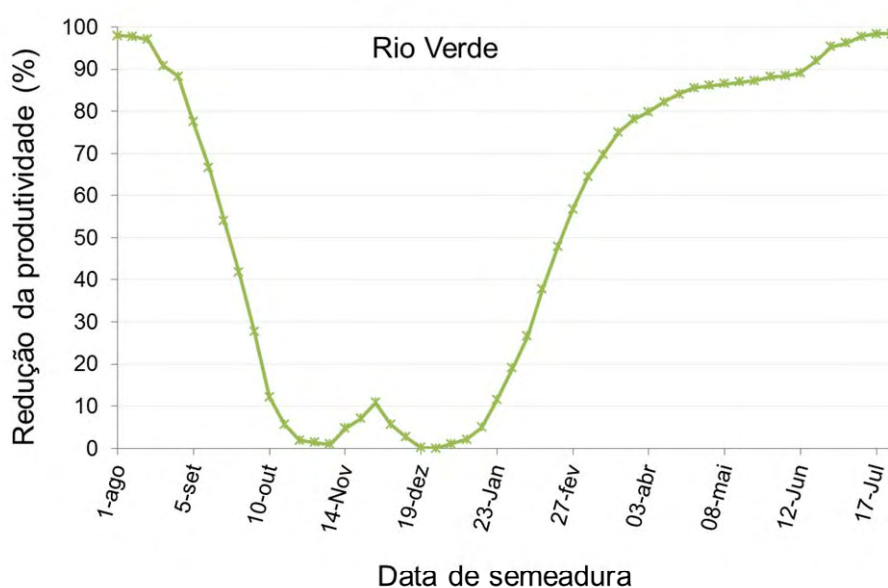
A Figura 2.5 mostra as reduções da produtividade da cultura do sorgo para Janaúba, obtidas a partir das simulações considerando-se regime de sequeiro. Para esse município, entre as 52 datas simuladas, observou-se que a maior média de produtividade ocorreu para a semeadura realizada em 14 de novembro e foi igual a  $4003 \text{ kg ha}^{-1}$ . Este valor foi então utilizado como referência para calcular as porcentagens de redução, conforme proposto por Amaral *et al.* (2009). Na maioria das vezes, quanto mais afastadas dessa data considerada ótima, maiores foram as reduções na produtividade.

Utilizando-se essa metodologia é possível estipular janelas de plantio de acordo com o nível de redução considerado tolerável pelo tomador de decisão. Aceitando-se uma redução na produtividade de até 10%, por exemplo, em Janaúba a janela de plantio seria de 24 de outubro a 21 de novembro.



**Figura 2.5.** Redução média da produtividade de sorgo granífero em função da data da semeadura em Janaúba (MG), em condições de sequeiro.

As reduções de produtividade para Rio Verde são apresentadas na Figura 2.6. Para esse local, a data de referência em que ocorreu a maior produtividade média foi 26 de dezembro. Entre 17 de outubro e 16 de janeiro observa-se que as médias de rendimento foram muito semelhantes, apresentando reduções de produtividade inferiores a 10%, com exceção de 28 de novembro, em que esse valor foi ligeiramente superior. É possível notar, inclusive, que em várias datas desse intervalo a redução da produtividade fica muito próxima a 0%.



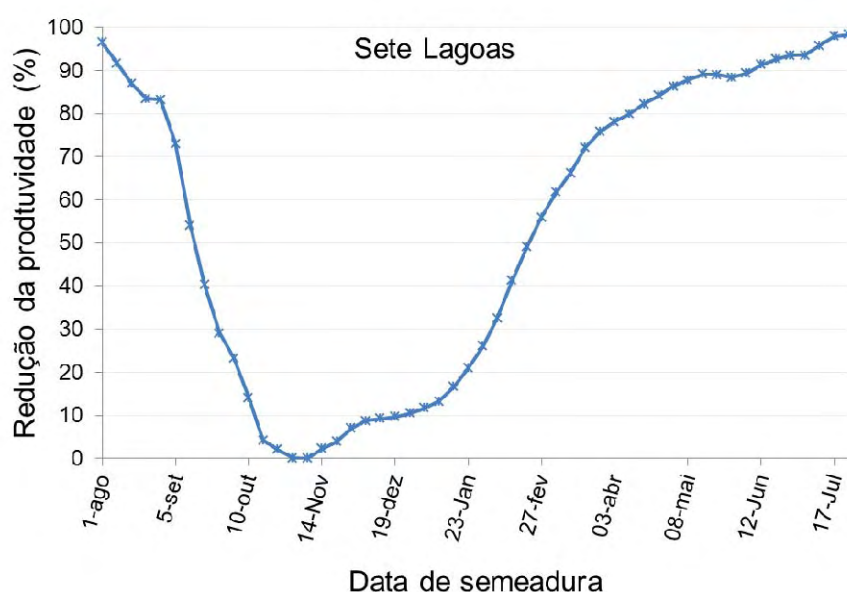
**Figura 2.6.** Redução média da produtividade de sorgo granífero em função da data da semeadura em Rio Verde (GO), em condições de sequeiro.

Um ponto interessante de se observar nas figuras 2.5 e 2.6 é a ocorrência de um pico na curva de redução da produtividade entre os dias 14 de novembro e 2 de janeiro, em Janaúba e, 7 de novembro e 19 de dezembro, em Rio Verde. Esse aumento da redução da produtividade nestes períodos pode estar associado à ocorrência de veranicos, que se caracterizam por períodos de interrupção da precipitação durante o período chuvoso. No trabalho de Assad *et al.* (1993), que compreendeu entre outras regiões de cerrado, o norte de Minas Gerais e o estado de Goiás, verificou-se a ocorrência de veranicos nos meses de março a outubro, mas sobretudo no mês de janeiro. De acordo com Minuzzi *et al.* (2006), a ocorrência de veranicos pode afetar a produtividade das culturas agrícolas, especialmente quando coincide com as fases em que a planta é mais sensível ao déficit hídrico.

Outro fator associado ao pico na curva de redução da produtividade para o município de Rio Verde é a queda da radiação solar incidente, que ocorre principalmente no mês de dezembro nesse município. Para chegar a essa conclusão, compararam-se alguns valores de produtividades ocorridos em 28 de novembro, quando nesse intervalo a queda do rendimento é máxima, com produtividades altas ocorridas em 26 de dezembro. Para o ano de 1998, por exemplo, as produtividades nessas datas foram, respectivamente, iguais a 3810 kg ha<sup>-1</sup> e 5249 kg ha<sup>-1</sup>. Analisando-se as possíveis causas que levaram a essa diferença, constatou-se uma variação expressiva entre a radiação solar incidente no início do ciclo da cultura. Enquanto que, nos primeiros 40 dias do ciclo da cultura semeada em 26/12 a média da radiação solar incidente foi de 17,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, o valor desta variável foi de apenas 12,6 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para a semeadura realizada em 28/11, o que correspondeu a uma diferença de 26%. Esta variação afetou sobretudo o índice de área foliar (IAF) do sorgo. Na simulação referente a 26/12, no dia 40 após a semeadura o IAF já alcançava o valor de 2,9 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, enquanto que, nessa mesma época, na semeadura de 28/11 o IAF era de apenas 0,9 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. Para este último, o máximo que a cultura atingiu foi um IAF de 2,0 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, já na outra data de semeadura o valor foi 4,4 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. De acordo com Wandelli e Marques Filho (1999), a dinâmica do índice de área foliar de uma cobertura vegetal é resultante das respostas ecofisiológicas das plantas às condições microclimáticas, como por exemplo, da incidência de radiação. Por sua vez, o sorgo tem as folhas como o principal órgão fotossintético, em que a taxa de crescimento da planta depende tanto da

taxa de fotossíntese por unidade de área foliar, quanto da taxa de expansão da área foliar (MAGALHÃES *et al.*, 2010).

Na Figura 2.7 é apresentada a curva de redução da produtividade para o município de Sete Lagoas. Neste local, a data considerada ótima para se realizar a semeadura foi o dia 7 de novembro, quando ocorreu a máxima produtividade média, igual a 6476 kg ha<sup>-1</sup>. Na semeadura simulada na semana anterior ou seja, no dia 31 de outubro, a redução da produtividade foi muito pequena, igual a 0,07%. Nota-se que, para os plantios realizados antes de 7 de novembro, as quedas de produtividade são mais elevadas que para os plantios realizados depois dessa data. A partir disto pode-se concluir que o risco é maior quando se antecipa a data da semeadura. Amaral *et al.* (2009) encontraram resultados semelhantes para a cultura do milho. Entre as 31 datas de semeadura avaliadas, considerando-se o intervalo de 01 de agosto a 27 de fevereiro, o maior valor médio de produtividade ocorreu no dia 17 de outubro e foi igual a 6653 kg ha<sup>-1</sup>. Contudo, ao se avaliarem as demais datas fora do período ótimo, observam-se diferenças expressivas entre as reduções de produtividade do sorgo quando comparado ao milho. De forma geral, em Sete Lagoas o sorgo se mostrou menos susceptível às condições climáticas adversas, alcançando maiores produtividades quando comparadas ao milho (AMARAL *et al.* 2009) nos plantios realizados após o período ótimo. A janela de plantio para o sorgo, obtida ao se permitirem reduções de até 10% da produtividade, fica situada entre os dias 17 de outubro e 19 de dezembro.



**Figura 2.7.** Redução média da produtividade de sorgo granífero em função da data da semeadura em Sete Lagoas (MG), em condições de sequeiro.

Analisando-se os resultados obtidos nos três municípios, é possível perceber que o regime de chuvas explica em grande parte a variação nos períodos de plantio. Nota-se que, para as três localidades, nas semeaduras realizadas antes de meados de setembro e depois do final de fevereiro são observadas quedas superiores a 50%. Isso é atribuído à maior deficiência hídrica a que a cultura fica sujeita quando semeada nesses períodos, conforme sugerido pelos índices de precipitação dos três municípios mostrados na Figura 1.6 do Capítulo 1.

Por fim, ao se comparar os períodos de semeadura obtidos a partir do modelo CSM-CERES-Sorghum com os estabelecidos pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Tabela 2.2), nota-se que ocorrem variações, principalmente para os municípios de Rio Verde e Sete Lagoas. Isto pode ser atribuído às diferenças entre as metodologias empregadas para estimar a ocorrência do déficit hídrico. Na metodologia do MAPA, nas simulações do balanço hídrico são utilizados os valores médios do Índice de Satisfação de Necessidade de Água – ISNA (expresso pela relação entre evapotranspiração real e evapotranspiração máxima -  $ET_r/ET_m$ ), por período de semeadura, na fase de florescimento e enchimento de grãos. No presente estudo, o balanço hídrico é realizado de maneira dinâmica durante toda a simulação do ciclo da cultura. É importante destacar também que, a metodologia “redução da produtividade por época de semeadura” (AMARAL *et al.*, 2009) tem como vantagem o fato das janelas de plantio poderem ser estipuladas de acordo com o nível de redução considerado tolerável pelo tomador de decisão.

**Tabela 2.2.** Períodos de semeadura recomendados pelo zoneamento de risco climático do MAPA e obtidos a partir do modelo CSM-CERES-Sorghum.

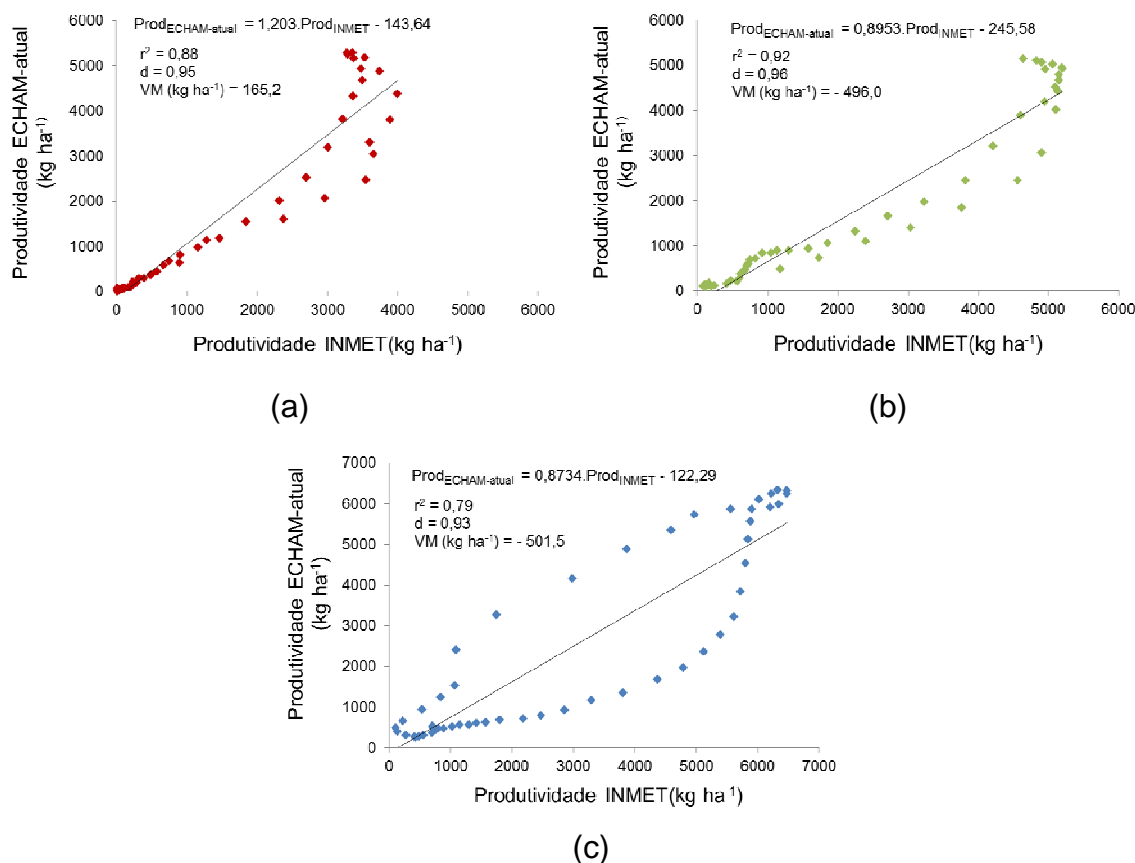
Metodologia	Janaúba (MG)	Rio Verde (GO)	Sete Lagoas (MG)
MAPA <sup>1</sup>	01 de outubro a	01 de janeiro a	01 de outubro a
	20 de novembro	28 de fevereiro	20 de março
CSM-CERES-Sorghum <sup>2</sup>	24 de outubro a	17 de outubro a	17 de outubro a
	21 de novembro	16 de janeiro	19 de dezembro

<sup>1</sup>Resultados obtidos para os tipos de solo considerados nas áreas do presente estudo e especificamente para as cultivares pertencentes ao grupo II, no qual se enquadra a BRS 310.

<sup>2</sup>Resultados obtidos empregando-se a metodologia de Amaral *et al.* (2009), considerando-se o nível de redução da produtividade de até 10%.

### 3.2. Avaliação da série climática do modelo ECHAM5/MPI-OM

Os valores médios de produtividade das 52 datas de semeadura obtidos a partir das séries do INMET e ECHAM-atual foram relacionados nos gráficos de dispersão apresentados na Figura 2.8. Nota-se que os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) foram sempre superiores a 0,75 para os três municípios, o que demonstra um bom ajuste ao modelo de regressão linear. Os coeficientes de concordância (d) foram elevados, sendo todos maiores que 0,90, o que indica exatidão do modelo ECHAM5/MPI-OM ao simular os dados climáticos do INMET. Percebe-se que para Rio Verde e Sete Lagoas o viés médio (VM) foi negativo, enquanto que para Janaúba esse valor foi positivo e menor do que os outros dois. Assim, entende-se que para Rio Verde e Sete Lagoas, os dados de produtividade do sorgo foram levemente subestimados quando utilizaram-se os dados climáticos ECHAM-atual como entrada no modelo CSM-CERES-Sorghum. Já em Janaúba notou-se uma leve superestimativa dos valores. Outra característica importante é que para baixos valores de produtividade ocorreu uma maior correspondência entre os dados. Isto mostra que o ECHAM apresenta mais representatividade nos períodos secos que nos chuvosos quando comparados aos dados do INMET.



**Figura 2.8.** Relação entre as médias de produtividade de sorgo simuladas a partir da série climática do INMET (eixo x) e da série ECHAM-actual (eixo y), para os municípios de Janaúba (a), Rio Verde (b) e Sete Lagoas (c).

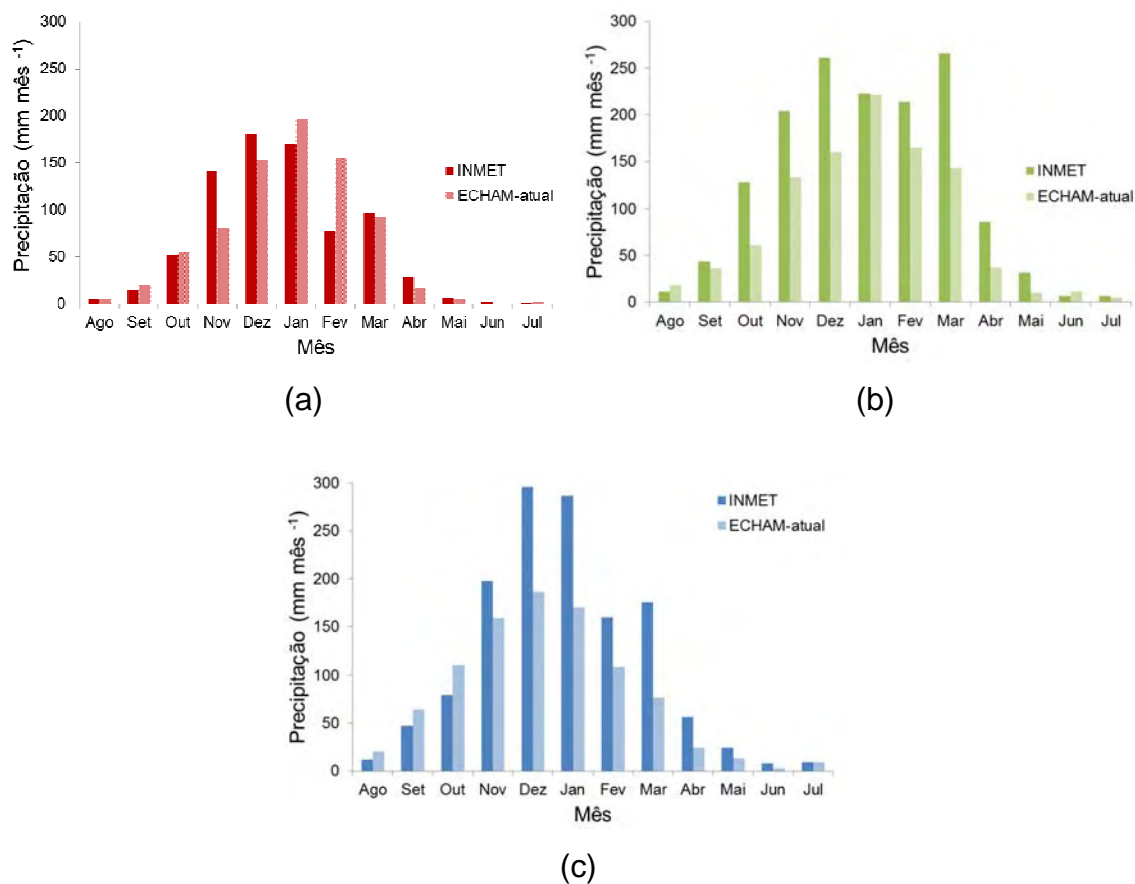
Pelo teste de Shapiro-Wilk verificou-se que as médias das produtividades das duas séries não seguem uma distribuição normal ( $p < 0,05$ ) nos três locais. Desta forma, o teste t de Student não pôde ser aplicado visto que este pressupõe a normalidade das variáveis. Aplicou-se, então, o teste não paramétrico de Wilcoxon para dados pareados.

Para Janaúba, o resultado do teste de Wilcoxon mostrou que as médias de produtividade simuladas a partir dos dados do ECHAM5/MPI-OM e a partir das séries do INMET foram estatisticamente iguais ( $p = 0,40 > 0,05$ ). De maneira contrária ocorreu para os municípios de Rio Verde e Sete Lagoas, para os quais o valor de p foi inferior a 0,05. Apesar de possuir médias diferentes, o comportamento de crescimento e diminuição dos valores entre as séries foi semelhante mesmo para esses dois municípios, como pôde ser visto nos gráficos de regressão (Figura 2.8).

Deve-se observar que o modelo climático ECHAM5/MPI-OM foi capaz de simular corretamente o regime de chuvas observado nos locais, porém apresentou erro na quantidade de precipitação. Como pode ser observado na

Figura 2.9, para os municípios de Rio Verde e Sete Lagoas a maior parte dos índices de precipitação da série ECHAM-atual foi inferior à série do INMET. A comprovação estatística dessa diferença pôde ser confirmada ( $p < 0,05$ ) através do teste t de Student. Vale ressaltar que a condição de normalidade nos índices de precipitação, exigida pelo teste t, foi confirmada ( $p > 0,05$ ) pelo teste de Shapiro-Wilk e também a homogeneidade das variâncias foi confirmada ( $p > 0,05$ ) pelo teste F. Assim, entende-se que os menores valores da precipitação nas séries ECHAM-atual foi detectada pelo modelo CSM-CERES-Sorghum, resultando em produtividades mais baixas para estes municípios. Já para Janaúba, de acordo com o teste Shapiro-Wilk, os dados de precipitação não seguem uma distribuição normal ( $p < 0,05$ ). Assim, pelo teste de Wilcoxon, verificou-se que não houve diferença significativa entre as médias mensais de precipitação ( $p > 0,05$ ), concordando com a produtividade que, para Janaúba, também foi estatisticamente igual para as duas séries.

Desta maneira, apesar das diferenças significativas entre as médias em dois dos três municípios analisados, pôde-se concluir que o modelo ECHAM5/MPI-OM foi capaz de representar o comportamento climático das três áreas de estudo. Estas diferenças entre dados observados e simulados não são características de um modelo climático em especial. Na maior parte dos casos existem anomalias no campo de precipitação para todos os modelos de clima, sejam eles globais ou regionais. Deve-se notar que o importante é perceber a capacidades que os modelos possuem de simular a variabilidade e o ciclo sazonal dos dados. Isto interfere diretamente na relevância dos mesmos para estudos da relação entre o clima e a produtividade das culturas, sendo o valor quantitativo da produtividade de menor relevância, diante da grande variabilidade espaço-temporal observada.



**Figura 2.9.** Média da precipitação acumulada mensal para os municípios de Janaúba (a), Rio Verde (b) e Sete Lagoas (c). Dados do INMET e da série ECHAM-actual referentes aos mesmos períodos.

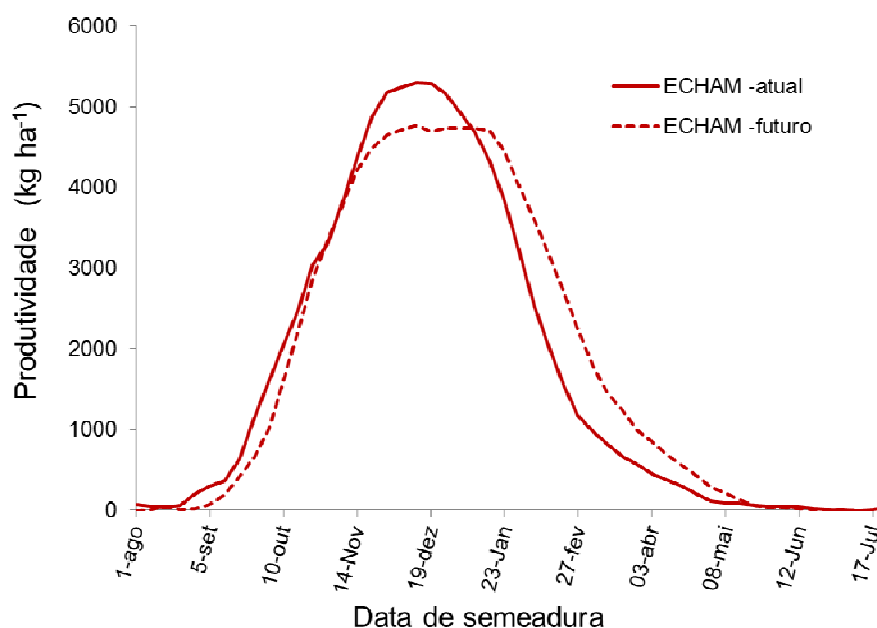
### 3.3. Simulações a partir dos dados climáticos do ECHAM5/MPI-OM

#### 3.3.1. Produtividades da cultura

Ao aplicar o teste Shapiro-Wilk às médias de produtividade, obtidas pelas duas séries climáticas do modelo ECHAM5/MPI-OM, verificou-se que estes não seguem uma distribuição normal a 5% de significância ( $p < 0,05$ ) nos três locais. Desta forma, novamente adotou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon para dados pareados, considerando-se nível de significância de 5%.

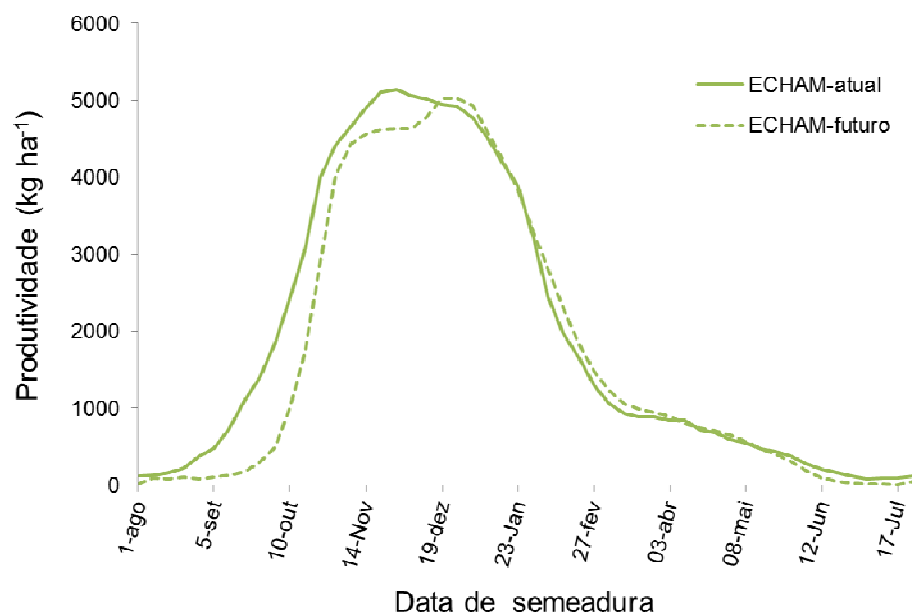
Para o município de Janaúba, Figura 2.10, pode-se observar que de agosto até início de janeiro, dia 09/01, as produtividade médias simuladas para o presente foram maiores que as simuladas para o futuro, enquanto que a partir desta data de semeadura, ocorre uma inversão e os dados da série ECHAM-futuro se tornam superiores. O resultado do teste estatístico demonstrou que as médias de produtividades obtidas a partir da série

ECHAM–atual e da série ECHAM–futuro não se diferem significativamente ( $p = 0,80 > 0,05$ ).



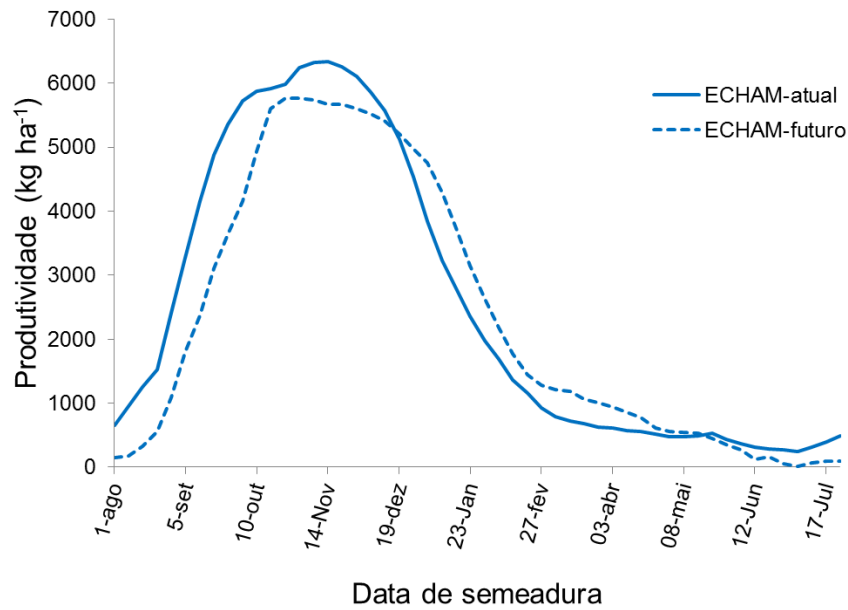
**Figura 2.10.** Produtividades médias de sorgo granífero simuladas para o município de Janaúba (MG) sob condições de sequeiro. Valores referentes aos períodos de 1982 a 2009 (ECHAM-atual) e 2020-2047 (ECHAM-futuro).

Para o município de Rio Verde, Figura 2.11, de agosto até a data de semeadura 19 de dezembro, as produtividades médias obtidas a partir da série climática atual (1998-2009) foram superiores às originadas pela série futura (2020-2031) e a partir de então os valores médios de rendimento ficam muito semelhantes. Para este local, o teste de Wilcoxon demonstrou que as médias de produtividade simuladas a partir da série ECHAM-atual e ECHAM-futuro foram significativamente diferentes ( $p = 0,007 < 0,05$ ). Assim, concluiu-se que a série atual apresentou produtividades significativamente superiores, com uma maior produtividade média igual a  $1896 \text{ kg ha}^{-1}$  contra  $1701 \text{ kg ha}^{-1}$  da série futura.



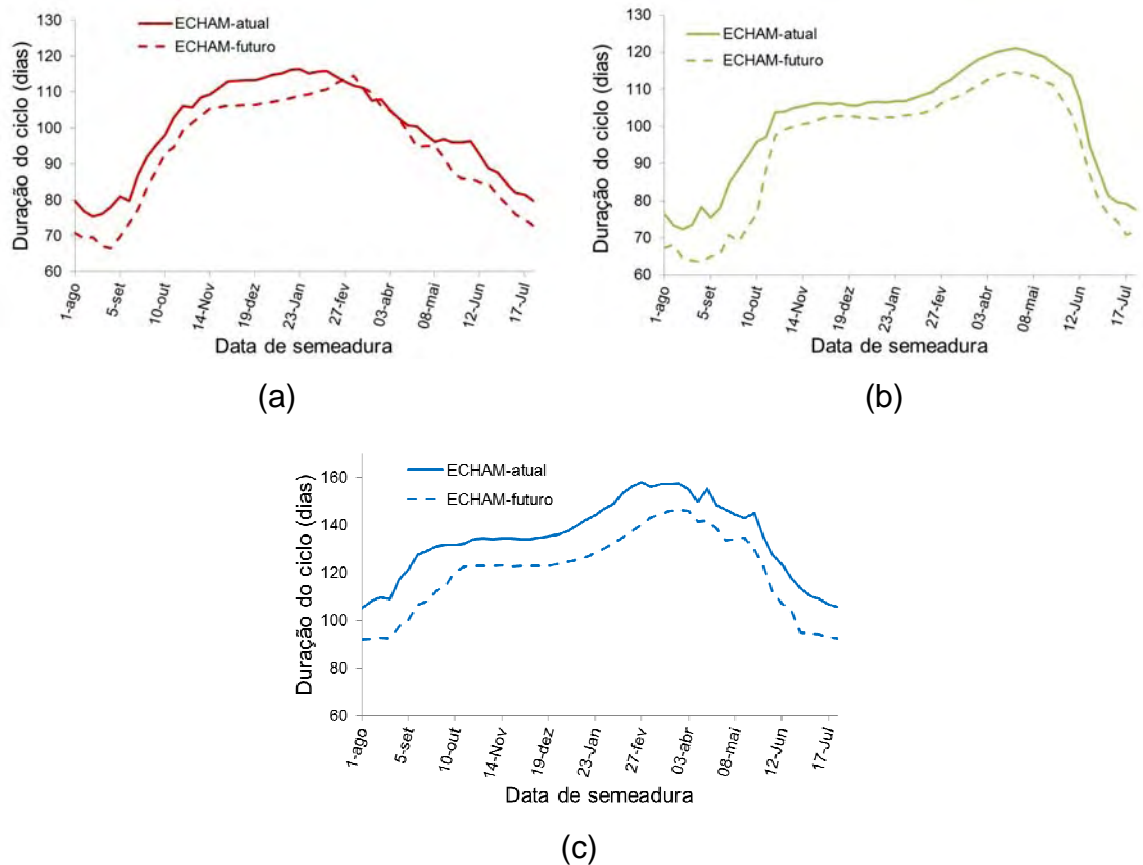
**Figura 2.11.** Produtividades médias de sorgo granífero simuladas para o município de Rio Verde (GO) sob condições de sequeiro. Valores referentes aos períodos de 1998 a 2009 (ECHAM-actual) e 2020-2031 (ECHAM-futuro).

Para Sete Lagoas (Figura 2.12), semelhante ao que ocorreu para Janaúba, para as semeaduras realizadas a partir de junho até 26 de dezembro, os valores médios de produtividade foram maiores para a série ECHAM-actual, e, após esta data, os valores da série ECHAM-futuro, em geral, tornam-se superiores. Da mesma forma, pelo teste de Wilcoxon verificou-se que não houve diferença significativa entre as médias das duas séries de produtividade ( $p$  valor = 0,11 > 0,05).



**Figura 2.12.** Produtividades médias de sorgo granífero simuladas para o município de Sete Lagoas (MG) sob condições de sequeiro. Valores referentes aos períodos de 1982 a 2009 (ECHAM-atual) e 2020-2047 (ECHAM-futuro).

A princípio, poderia-se esperar que as produtividades para a série futura fossem sempre superiores às da série do clima presente, visto que os níveis de  $\text{CO}_2$  mais altos poderiam elevar a intensidade da fotossíntese na planta. No entanto, o sorgo é uma planta que apresenta via  $\text{C}_4$  de fotossíntese, a qual já é efetivamente saturada pelas concentrações de  $\text{CO}_2$  do ar (CAEMMERER e FURBANK *et al*, 2003). Além disto, o aumento do  $\text{CO}_2$  atmosférico considerado no cenário de mudança climática A1B do IPCC acarreta a elevação da temperatura do ar devido à intensificação do efeito estufa. Nos três locais analisados, a temperatura média do ar da série ECHAM-futuro foi, em geral  $1^\circ\text{C}$  mais elevada em relação à série ECHAM-atual. As temperaturas mais elevadas nas séries climáticas futuras levaram à redução do ciclo da planta nos três municípios analisados (Figura 2.13). Em média, o ciclo da cultura se tornou 5,6%, 7,2% e 10,5% menor em Janaúba, Rio Verde e Sete Lagoas, respectivamente. Estas diferenças correspondem em média 6, 7 e 14 dias a menos no ciclo do sorgo. No trabalho de Chipanshi *et al.* (2003) reduções na produtividade do sorgo em cenários de mudanças climáticas também foram relacionadas ao encurtamento do período de crescimento em torno de 8 e 4 dias, nas duas regiões analisadas. No trabalho de Carbone *et al.* (2003) o incremento de temperatura observado nos cenários de mudanças climáticas encurtou o ciclo do sorgo em torno de 22 dias.



**Figura 2.13.** Duração média do ciclo da cultura simulada a partir das séries ECHAM-atual e ECHAM-futuro para os municípios de Janaúba (a), Rio Verde (b) e Sete Lagoas (c).

Por outro lado, têm-se discutido que a cultura do sorgo, sob condições de enriquecimento de  $\text{CO}_2$  atmosférico, pode apresentar incrementos na produtividade principalmente quando submetida à condição de déficit hídrico. No estudo de Conley *et al.* (2001), em experimento do tipo FACE (*Free-air  $\text{CO}_2$  Enrichment*) aumentou-se o  $\text{CO}_2$  ambiente em 200 ppmv e compararam-se os resultados com o experimento controle ( $\text{CO}_2$  ambiente). Nas parcelas com déficit hídrico, tendo como base o rendimento dos grãos, foi observado um incremento na eficiência do uso da água igual a 19%. Nas parcelas úmidas este incremento foi menor, igual a 9%. Atribuiu-se estes resultados ao fato de que, sob condições de seca, as plantas no ambiente enriquecido com  $\text{CO}_2$  apresentaram redução da condutância estomática, o que conservou a água e permitiu crescer mais durante o ciclo com déficit hídrico. Carbone *et al.* (2003) primeiramente simularam o efeito isolado das mudanças nos elementos básicos do clima sobre o sorgo e depois incrementaram a concentração de

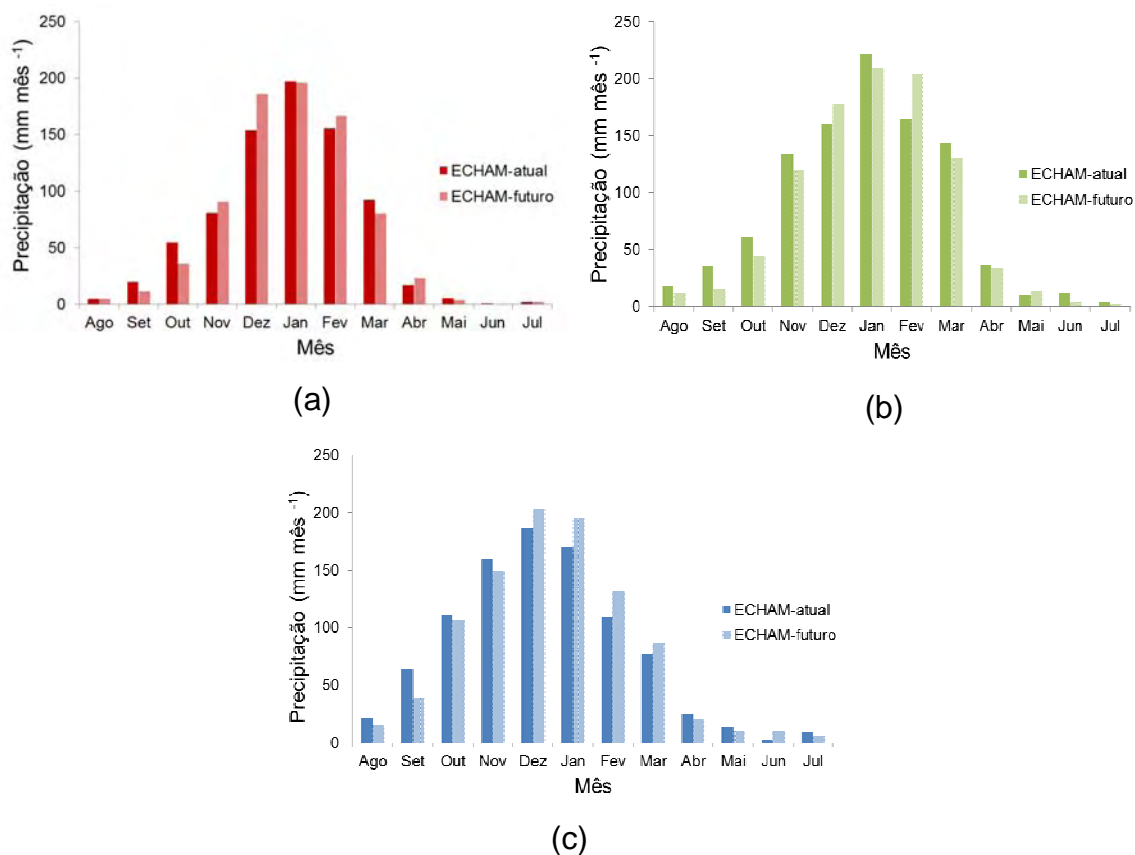
CO<sub>2</sub> em 210 ppmv. Ao comparar os resultados das duas simulações, pôde-se concluir que a fertilização pelo gás carbônico mitigou a queda do rendimento em 9% em relação a simulação em que se considerou apenas a mudança dos elementos básicos do clima. A mitigação também foi associada à redução da perda de água pela cultura, via ajuste da resistência estomatal em resposta ao CO<sub>2</sub> do ambiente.

Esse efeito do gás carbônico sobre as plantas C<sub>4</sub> ajuda a entender os maiores valores de produtividade do sorgo da série ECHAM-futuro, em relação aos valores da série ECHAM-atual, nas semeaduras realizadas a partir do final de dezembro e início de janeiro para os municípios de Sete Lagoas e Janaúba (Figura 2.10 e Figura 2.12). O aumento da concentração do gás carbônico contribuiu para diminuir o efeito do estresse hídrico sobretudo durante as fases de florescimento e enchimento dos grãos que são consideradas as fases mais críticas do desenvolvimento da cultura (LANDAU e GUIMARÃES, 2010).

Outro fato que ajuda a entender os deslocamentos das curvas de produtividade para a direita nos gráficos (Figura 2.10 e Figura 2.12) são os índices mensais de precipitação. Apesar do resultado do teste t ter demonstrado que não houve diferença significativa entre as médias mensais das séries ECHAM-atual e ECHAM-futuro para todos os três locais ( $p$  valor > 0,05), é notável observar que houve uma pequena diferença na distribuição da chuva ao longo dos meses. Na maioria vezes, na série ECHAM-futuro, os meses mais secos do ano se tornaram ainda mais secos, enquanto que os meses de chuva tornaram-se mais chuvosos. Este comportamento é claramente visível no gráfico de precipitação do município de Sete Lagoas mostrado na Figura 2.14, juntamente com os índices de chuva dos municípios de Janaúba e Rio Verde. Invernos mais secos e verões mais chuvosos no futuro é uma tendência que vem sendo encontrada em trabalhos que avaliam os efeitos das mudanças climáticas, tal como foi reportado por Vera *et al.* (2005).

Pelo exposto, entende-se que, se por um lado o incremento da temperatura do ar pode causar efeito negativo sobre a produtividade do sorgo devido ao encurtamento do ciclo da cultura, por outro, o aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico pode contribuir para reduzir o estresse hídrico ocorrido nas fases mais críticas da cultura. Estes efeitos distintos sobre a cultura fizeram com que

as diferenças entre as médias das produtividades entre as séries atual e futura não fossem significativas em dois dos três municípios analisados.



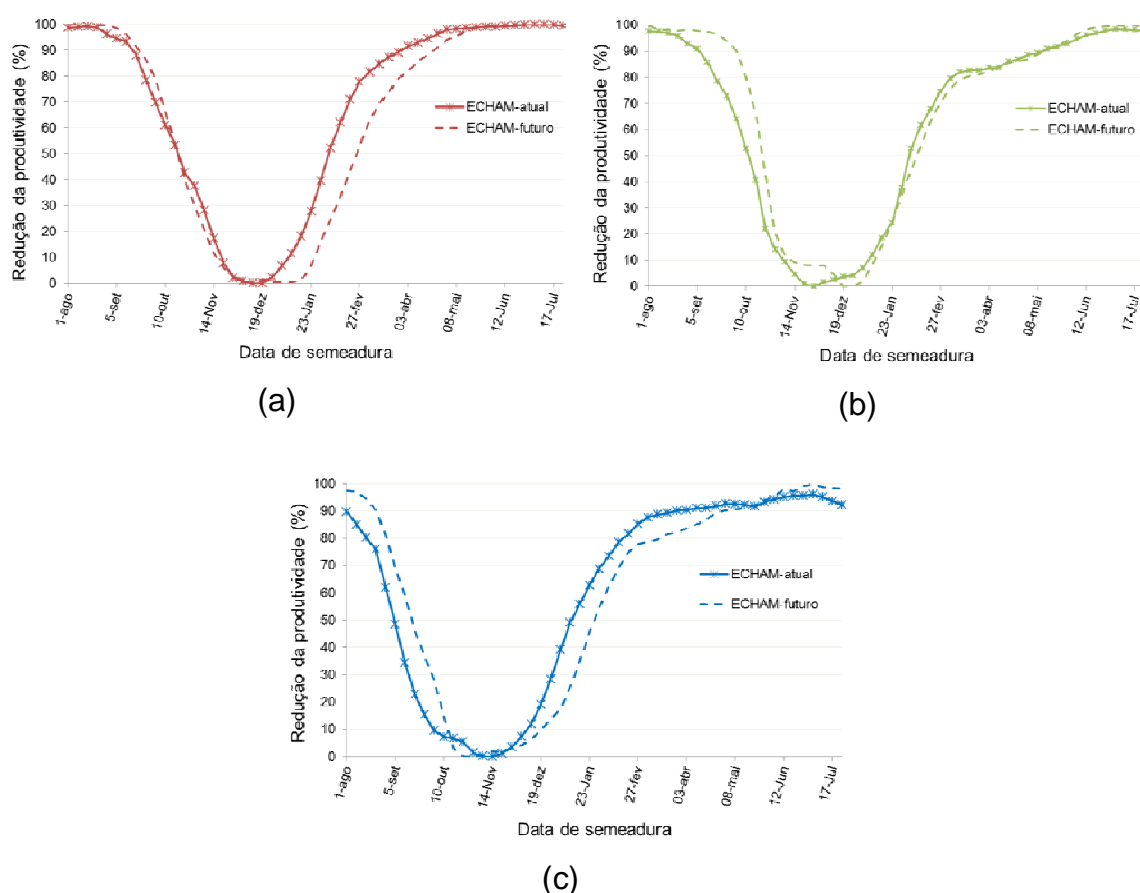
**Figura 2.14.** Média da precipitação acumulada mensal para os municípios de Janaúba (a), Rio Verde (b) e Sete Lagoas (c). Dados da série ECHAM-atual e ECHAM-futuro.

### 3.3.2. Estabelecimento do período de semeadura

Na Figura 2.15 são apresentados os gráficos com as reduções de produtividade para os três municípios e para as duas séries climáticas do modelo ECHAM5/MPI-OM. Em termos das janelas de plantio, considerando-se uma redução de produtividade de até 10%, observaram-se comportamentos semelhantes para os municípios de Rio Verde e Sete Lagoas. Nestes dois locais, apesar de não ter ocorrido diferença no tamanho da janela de plantio, percebeu-se que a curva de redução de produtividade da série ECHAM-futuro foi deslocada para a direita, indicando um atraso na época da semeadura do sorgo. Para Rio Verde, a janela de semeadura passou de 07/11 a 02/01 para 14/11 a 09/01. Para Sete Lagoas, a alteração foi de 03/10 a 5/12 para 17/10 a 19/12. Para o município de Janaúba, ocorreu um aumento de 21 dias na janela

de plantio da série ECHAM-futuro em relação à série ECHAM-atual, alterando-se a janela de 21/11 a 02/01 para 21/11 a 23/01. Essas variações estão associadas ao regime da precipitação (Figura 2.15), que mostra índices pluviométricos geralmente maiores na série futura de dezembro até março e também pelo efeito do aumento do CO<sub>2</sub>, que reduz o estresse hídrico nas semeaduras realizadas entre final de dezembro e início de janeiro até agosto, conforme discutido anteriormente.

A partir desses resultados, entende-se que no futuro, possivelmente, a semeadura do sorgo será realizada mais tardiamente nos três sítios avaliados.



**Figura 2.15.** Redução média da produtividade de sorgo granífero em função da data da semeadura para as séries ECHAM-atual e ECHAM-futuro. Municípios de Janaúba (a), Rio Verde (b) e Sete Lagoas (c).

#### 4. Conclusões

Os resultados obtidos a partir de simulações com as séries climáticas do INMET mostraram diferenças entre as produtividades médias do sorgo

estimadas para os municípios de Janaúba (MG), Rio Verde (GO) e Sete Lagoas (MG). Para o regime de sequeiro, ordenando-se os municípios por ordem decrescente de produtividade média alcançada, a sequência obtida foi Sete Lagoas, Rio Verde e Janaúba. Ao se analisar a produtividade potencial, em que os efeitos de estresses hídricos e nutricionais foram desconsiderados, observou-se uma inversão das posições ocupadas pelos municípios de Janaúba e Rio Verde. Para os municípios de Sete Lagoas e Rio Verde, encontrou-se que a janela de plantio inicia-se em meados de outubro e termina em meados de dezembro e janeiro, respectivamente. Já para Janaúba, a janela de plantio fica situada entre final de outubro e final de novembro.

Em termos de efeito de mudanças climáticas sobre a cultura, considerando-se um nível de significância de 5%, encontrou-se que para Janaúba e Sete Lagoas as médias de produtividade obtidas a partir das séries ECHAM-atual e ECHAM-futuro não foram estatisticamente diferentes. Já para Rio Verde, observou-se uma redução significativa nas produtividades médias simuladas a partir da série climática ECHAM-futuro em relação às simuladas considerando-se a série ECHAM-atual. Percebeu-se que a cultura do sorgo, no cenário futuro, ficou condicionada ao efeito negativo do encurtamento do ciclo devido ao aumento de temperatura do ar e ao efeito positivo da fertilização do CO<sub>2</sub>, reduzindo o estresse hídrico nas fases mais críticas da cultura.

Na série futura, a distribuição da precipitação mostrou que a estação seca se tornou mais seca e a estação chuvosa ainda mais chuvosa. Os índices de precipitação contribuíram para o atraso nas janelas de plantio em Rio Verde e Sete Lagoas, enquanto que para Janaúba a janela de plantio aumentou em 21 dias. Tais resultados indicam que no futuro, possivelmente, a semeadura do sorgo será realizada mais tardiamente nos três sítios avaliados.

Pelo o que foi discutido, percebe-se que os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura é uma questão complexa, podendo surtir efeitos distintos sobre as culturas. No caso específico do sorgo, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que as mudanças climáticas podem gerar efeito negativo sobre o rendimento da cultura em algumas regiões brasileiras enquanto que, em outras, podem não ser observados efeitos significativos. Isto ressalta a importância da realização de estudos específicos para as diferentes regiões do Brasil.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, L.M.S.; MORAIS, A.V. de C.; GUIMARÃES, D.P. Embrapa Milho e Sorgo. **Sistema de Produção**, v.2, ISSN 1679-012X, Versão Eletrônica - 2ª edição, 2006. Disponível em: <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo\\_2ed/clima.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo_2ed/clima.htm)>. Acesso em: 21 de nov. 2011.

ALAGARSWAMY, G.; RITCHIE, J.T.; GODWIN, D.C. e SINGH, U. **A user's guide to CERES Sorghum**. Michigan State University, ICRISAT, IFDC e IBSNAT, v. 2.1., 91 p., 1988.

ALAGARSWAMY, G.; RITCHIE, J.T. Physiology of sorghum and Pearl Millet Phenology. In: VIRMANI, S.M. *et al.* (Editores). **Modeling the growth and development of sorghum and pearl millet**. Research Bulletin nº. 12, ICRISAT, India, p. 24-26, 1989a.

ALAGARSWAMY, G.; RITCHIE, J.T. Simulation of growth and development in CERES models. In: VIRMANI, S.M. *et al.* (Editores). **Modeling the growth and development of sorghum and pearl millet**. Research Bulletin, n. 12, ICRISAT, India, p. 34-38, 1989b.

ALAGOAS (Governo do Estado). Secretaria de Estado da Agricultura e do Desenvolvimento Agrário. Superintendência de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento Rural. **Aspectos gerais do cultivo do sorgo para o semiárido alagoano**. Boletim Informativo, 5 p., 2010.

ALBUQUERQUE, P.E.P. de; GOMIDE, R.; ANDRADE, C.de L.T. de A.; VIANA, J. H.M.; DURÃES, F.O.M. **Caracterização climática do sítio-específico de Janaúba para a fenotipagem de cereais visando estudos de tolerância à seca**. In: Anais do XXVI Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/490094>>. Acesso: em 03 de jan. 2012.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. ROME, FAO – Irrigation and Drainage Paper, n. 56, 300 p., 1998.

AMARAL, S.R.; LIRA, M.A.; TABOSA, J.N; SANTOS, M.V.F.; MELLO, A.C.L.; SANTOS, V.F. Comportamento de linhagens de sorgo forrageiro submetidas a déficit hídrico sob condição controlada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 973-979, 2003.

AMARAL, T. A.; ANDRADE, C. de L. T. de; OLIVEIRA, A. C. de; SILVA, D. de F.; SANTANA, C. B. de; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. de. **Metodologia para o estabelecimento do período de semeadura de milho**. Embrapa Milho e Sorgo, Documentos 88, Sete Lagoas, 13 p., 2009.

ANDRADE, C. de L.T. de; AMARAL, T.A.; BORGES JÚNIOR, J.C.F.; HEINEMANN, A.B.; GARCIA, A.G.; SOLER, C.M.T.; SILVA, D. de F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C.B. de; MOURA, B.F.; CASTRO, L.A. de. **Modelagem do Crescimento de Culturas: Aplicações à Cultura do Milho**. Embrapa Milho e Sorgo, Documentos 91, Sete Lagoas, 65 p., 2009.

ASSAD, E.D.; SANO, E. E.; MASUMOTO, R.; CASTRO, L.H.R.; SILVA, F.A.M. Veranicos na região dos cerrados brasileiros: frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 28, n. 9, p. 993 – 1003, set, 1993.

ASSUENA, V., FILARDI, R.S.; JUNQUEIRA, O.M.; CASARTELLI, E. M.; LAURENTIZ, A.C.; DUARTE, K.F. Substituição do milho pelo sorgo em rações para poedeiras comerciais formuladas com diferentes critérios de atendimento das exigências em aminoácidos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 9, n. 1, p. 93-99, 2008.

BERNIER, G.; KINET, J-M.; SACHS, R. M. The age and flower initiation. In: BERNIER *et al.* **The physiology of flowering, Volume I**. Boca Raton, 1981. Chapter 7, p. 105-115.

BERTRAND, C.; YPERSELE, J.P.V.; BERGER, A. Are natural climate forcings able to counteract the projected anthropogenic global warming? **Climatic Change**, n. 55, p. 413-427, 2002.

BEYRUTH, Z. Água, agricultura e as alterações climáticas globais. **Tecnologia e Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 1, Água na Agropecuária - Série Técnica Apta, p. 73-88, 2008.

BORREL, A.; JORDAN, D.; MULLET, J.; HENZELL, B.; HAMMER, G. Drought Adaptation in Sorghum. In: RIBAUT, J-M (Editor). **Drought Adaptation in Cereals**. Editora: CRC Press, 2006, p.335-340.

CARBONE, G. J.; KIECHLE, W.; LOCKE, C.; MEARNES, L. O.; McDANIEL, L.; DOWNTON, M.W. Response of soybean and sorghum to varying spatial scales of climate change scenarios in the southeastern United States. **Climatic Change**, n. 60, p. 73–98, 2003.

CAEMMERER, S.V.; FURBANK, R.T. The C<sub>4</sub> pathway: an efficient CO<sub>2</sub> pump. **Photosynthesis Research**, v. 77, p. 191-207, 2003.

CHIPANSHI, A. C.; CHANDA, R.; TOTOLO, O. Vulnerability assessment of the maize and sorghum crops to climate change in Botswana. **Climatic Change**, n. 61, p. 339-360, 2003.

COELHO, A.M.; WAQUIL, J.M.; KARAM, D.; CASELA, C.R.; RIBAS, P.M. **Seja o doutor do seu sorgo**. Arquivo do Agrônomo, n. 14. Encarte do Informações Agronômicas, n. 100, Sete Lagoas, 24 p., 2002.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries históricas. 2010**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2>>. Acesso em: 06 de dez. de 2011.

CONLEY, M.M.; KIMBALL, B.A.; BROOKS, T.J.; PINTER JR., P.J.; HUNSAKER, D.J.; WALL, G. W.; ADAM, N.R.; LaMorte, R.L.; MATTHIAS, A. D.; THOMPSON, T.L.; LEAVITT, S.W.; OTTMAN, M.J.; COUSINS, A.B.; TRIGGS, J. M. CO<sub>2</sub> enrichment increases water-use efficiency in sorghum. **New Phytologist**, n. 151, p. 407-412, 2001.

DALLACORT, R.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; FARIA, R.T.; AZEVEDO, T.L.F.; TOLENTINO JÚNIOR, J.B. Utilização do modelo Cropgro-drybean na determinação das melhores épocas de semeadura da cultura do feijão para a região de Maringá, Estado do Paraná, Brasil. **Revista Maringá**, v. 27, n. 2, p. 349-355, 2005.

DUARTE, J.O. **Sorgo - Aspectos econômicos**. Embrapa, Documento 27, Sete Lagoas, p. 65-91, 2003.

DUARTE, J.O. Embrapa Milho e Sorgo. **Sistema de Produção**, v. 2, ISSN 1679-012X, Versão Eletrônica - 6ª edição, 2010. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo\\_6\\_ed/mercado.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_6_ed/mercado.htm)> Acesso em: 24 de nov. 2011.

DONATELLI, M.; ACUTIS, M.; BELLOCCHI, G. e FILA, G. New Indices to Quantify Patterns of Residuals Produced by Model Estimates. **Agronomy Journal**, 96, p.631–645, 2004.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 412 p., 2009.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO Statistics Division 2012**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor> Acesso em: 11 de jan. 2012.

FARIA, R.T.; FOLEGATTI, M.V.; FRIZZONE, J.A.; SAAD, A.M. Determination of a long-term optimal irrigation strategy for dry beans in Parana state, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54 (número especial), p. 155-164, 1997.

FARIA, R.T.D.; BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, p. 489-498, 2003.

FIALHO, E. T.; LIMA, J.A.F.; OLIVEIRA, V.; SILVA, H.O. Substituição do milho pelo sorgo sem tanino em Rações de leitões: digestibilidade dos Nutrientes e desempenho animal. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.1, n.1, p.105-111, 2002.

FREITAS, P.L; MANTOVANI, E. C; REZENDE, R; GONÇALVES, A. A e BERTONHA, A. Influência da radiação solar sobre os valores de produtividade da cultura do milho, *Zea mays L.*, simulados pelo modelo CERES-Maize. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1221-1227, 2001.

FREITAS, P.L.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; COSTA, L.C. Simulação da produtividade do milho pelo modelo CERES-Maize em função da lâmina e da uniformidade de aplicação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB , v.8, n.2/3, p. 225-232, 2004.

GERIK, T.; BEAN, B.; VANDERLIP, R. **Sorghum Growth and Development**. Produced by Agricultural Communications, The Texas A&M University System. B-6137, 8 p., 2003.

GOMIDE, R.L.; ALBUQUERQUE, P.E.P. de; ANDRADE, C.de L.T. de A.; DURÃES, F.O.M; VIANA, J. H.M. **Caracterização climática e determinação da necessidade hídrica de culturas do sítio- específico de precisão de Sete Lagoas para a fenotipagem de genótipos de cereais tolerantes à seca**. In: Anais do XXVI Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/490096>>. Acesso em: 18 de out. 2011.

GOOGLE MAPS. **Dados cartográficos** © 2011. Europa Technologies, Inav/ Geosistemas SRL. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/>>

HE, J.; DUKES, M.D.; JONES, J.W.; GRAHAM, W.D. e JUDGE, J. Applying

glue for estimating Ceres-Maize genetic and soil parameters for sweet corn

production. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Vol. 52(6), p. 1907-192, 2009.

HEGERL, G.C.; ZWIERS, F.W.; BRACONNOT, P.; GILLETT, N.P.; LUO, Y.; MARENGO ORSINI, J.A.; NICHOLLS, N.; PENNER, J.E.; STOTT, P.A. Understanding and Attributing Climate Change. In: SOLOMON, S. *et al.* (Editores). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

HEINEMANN, A.B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R.T. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS: a example for the state of Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, v.52, p. 177-196, 2002.

HEINEMANN, A.B.; ANDRADE, C. de L.T. de; GOMIDE, R.L.; AMORIM, A.O; PAZ, R.L. Padrões de deficiência hídrica para a cultura de milho (safra normal e safrinha) no estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1026-1033, 2009.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; SILVA, S.C. **Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agrônoma**. Embrapa, Documentos 264, Santo Antônio de Goiás, 28 p., 2010.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. Modeling growth, development and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. **Transactions of the ASAE**, v. 35(6), p. 2043-2056, 1992.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, 103, p. 137-157, 2000.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTER, 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. E TSUJI, G.Y. **Decision Support**

**System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM].**

University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. 2010a.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; PORTER, C. Introduction to DSSAT v 4.5. In: HOOGENBOOM, G. *et al.* (Editores). **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.5**. Volume 1: Overview. Chapter 1: Introduction to DSSAT v 4.5. University of Hawaii, Honolulu, p. 1-5, 2010b.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, B.; HUNT, B.T.; GIJSMAN, A.; WILKENS, P.; SINGH, U.; BOWEN, W. Overview of DSSAT v 4.5 Cropping System Model (CSM). In: HOOGENBOOM, G. *et al.* (Editores). **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.5**. Volume 1: Overview. Chapter 3: Overview of DSSAT v 4.5 Cropping System Model (CSM). University of Hawaii, Honolulu, p. 1-37, 2010c.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores IBGE. Estatística da produção agrícola**. Dezembro de 2010a. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr\\_201012.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201012.pdf)>. Acesso em: 20 de dez. 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2009**. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 10 de jan. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2010**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 10 de jan. 2012.

ICASA - International Consortium for Agricultural Systems Applications. **DSSAT Software**. Disponível em: <<http://www.icasa.net/dssat/index.html>>. Acesso em: 25 de nov. 2011.

IPCC, Climate Change 2007: Synthesis Report. In: PACHAURI, R.K; REISINGER, A. (Editores). **Contribution of Working Groups I, II and III to the**

**Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p., 2007.

JAME, Y.W.; CURTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 76, p. 9-19, 1996.

JUNGCLAUS, J.H.; KEENLYSIDE, N.; BOTZET, M.; HAAK, H.; LUO, J.-J.; LATIF, M.; MAROTZKE, J.; MIKOLAJEWICZ, U.; ROECKNER, E. Ocean Circulation and Tropical Variability in the Coupled Model ECHAM5/MPI-OM. **Journal of Climate**, v. 19, p. 3952-3972, 2006.

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**, Oxford, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

LANDAU, E.C.; MAGALHÃES, D.P. Embrapa Milho e Sorgo. **Sistema de Produção**, v. 2, ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 6ª edição, 2010. Disp. em: [http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo\\_6\\_ed/zoneamento.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_6_ed/zoneamento.htm). Acesso em: 03 de jan. 2012.

LANDAU, E.C.; SANS, L.M.A. Embrapa Milho e Sorgo. **Sistema de Produção**, v. 2, ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 6ª edição, 2010. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo\\_6\\_ed/clima.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_6_ed/clima.htm)>. Acesso em: 03 de jan. 2012.

LORENÇONI, R.; NETO, D.D.; HEINEMANN, A.B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza – CE; v. 41, n. 4, p. 605-613, 2010.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; RODRIGUES, J.A.S. **Fisiologia da Planta de Sorgo**. Comunicado Técnico 86, Embrapa, Sete Lagoas, 4 p., 2003.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; RODRIGUES, J.A.S. Embrapa Milho e Sorgo. **Sistema de Produção**, v. 2, ISSN 1679-012X, Versão Eletrônica - 6ª edição, 2010. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo\\_6\\_ed/ecofisiologia.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_6_ed/ecofisiologia.htm)>. Acesso em: 19 de dez. 2011.

MARIANO, A. B.; SOUSA, E.P. **Análise econômica da produção de sorgo no município de Cedro – PE**. In: Anais do XLV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Londrina, 20 p., 2007. Disponível em: <[http://www.sober.org.br/conteudo.php?item\\_menu\\_id=6&mostra\\_congresso\\_realizado=1&id\\_realizado=6](http://www.sober.org.br/conteudo.php?item_menu_id=6&mostra_congresso_realizado=1&id_realizado=6)>. Acesso em: 02 de jan. 2012.

MARIN, F.R.; PANDORFI, H.; SENTELHAS, P.C.; CAMARGO, M.B.P.; HERNANDEZ, F.B.T. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no estado de São Paulo. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 65, n.1, p.157-162, 2006.

MATTHEWS, R., STEPHENS, W.; HESS, T.; MASON, T.; GRAVES, A. **Applications of crop/soil simulation models in developing countries.** Institute of Water and Environment, Cranfield University, United Kingdom, 181 p., 2000.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G.C.; BARBOSA, E.M.; MELO JÚNIOR, J.C.F.; CATALUNHA, M.J. Estudo climático do comportamento do período chuvoso no estado de Minas Gerais. **Revista Ceres**, 53 (306), p. 266 – 275, 2006.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRUBLER, A.; JUNG, T.Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E.L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE L.; RIAHI K.; ROEHRL, A.; ROGNER, H-H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. **Special Report on Emissions Scenarios Cambridge.** Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

PAVAN, W. **Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas.** 2007. 182 p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Rio Grande do Sul.

PAVAN, W.; FERNANDES, J.M.C.; HÖLBIG, C.A.; FRAISSE, C.W. Padrões de projeto aplicados a modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, Passo Fundo, v. 1, n. 1, p. 15-29, 2009.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, n. 100, p. 81-92, 1972.

RIBAS, P.M. **Sorgo: Introdução e Importância Econômica.** Documentos 26, Embrapa, Sete Lagoas, p. 1-14, 2003.

RODRIGUES, R.A. **Modelagem dos efeitos da ferrugem asiática no rendimento da cultura da soja em cenário de mudanças climáticas globais no estado de Minas Gerais.** 2011. 98 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

SANTOS, F.G.; RODRIGUES, J.A.S.; SCHAFFERT, R.E.; CASELA, C.R.; FERREIRA, A. da S. e PITA, G. V. E. **Híbrido de sorgo granífero BRS 310.** Comunicado Técnico 101, Embrapa, Sete Lagoas, 4 p., 2004.

SILVA, L.C. da. **Modelos de Simulação.** Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Rural, Boletim Técnico, 8 p., 2006.

SILVA, A.G.; BARROS, A.S.; TEIXEIRA, I.R. Avaliação agrônômica de cultivares de sorgo forrageiro no sudoeste do estado de Goiás em 2005. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.6, n. 1, p.116-127, 2007.

SILVA, E.M.B.; SILVA, T. J.A.; CABRAL, C.E.A.; KROTH, B.E.; REZENDE, D. Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 180-186, 2011.

SOLER, C.M.T.; SENTELHAS, P.C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European journal of Agronomy**, v. 27, p. 165-177, 2007.

SOUZA, P. C. T.; WILHELM, V.E. Uma revisão bibliográfica dos modelos agrometeorológicos. **Tuiuti: Ciência e Cultura**, Curitiba, n. 42, p. 141-150, 2009.

SRIVASTAVA, A.; KUMAR, S.N.; AGGARWAL, P.K. Assessment on vulnerability of sorghum to climate change in India. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 138, p.160–169, 2010.

TEDESCHI, L.O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, n. 89, p. 225 – 247, 2006.

TRENBERTH, K.E.; JONES, P.D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; TANK, A.K.; PARKER, D.; RAHIMZADEH, F.; RENWICK, J.A.; RUSTICUCCI, M.; SODEN, B.; ZHAI, P. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: SOLOMON, S. *et al.* (Editores.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

UFG - Universidade Federal de Goiás. Instituto de Estudos Sócio-Ambientais. Laboratório de Geologia e Geografia Física. **Avaliação de Impactos Ambientais – Município De Rio Verde (GO)**. Relatório Técnico Parcial I: Mapas Temáticos de Serviço e Memoriais Explicativos. Goiânia, 91 p., 2009.

UNITED NATIONS. **Population Divison**. World Population Prospects: The 2010 Revision. Department of Economic and Social Affairs. CD-ROM Edition. 2011.

VERA, C., SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B.; GONZÁLEZ, P. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L13707, 4 p., 2006.

WALTER, L.C. **Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática**. 2010. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

WANDELLI, E.V.; MARQUES FILHO, A. de O. Medidas de radiação solar e índice de área foliar em coberturas vegetais. **Acta Amazônica**, v. 29(1), p. 57-58, Manaus – AM, 1999.

WEISMANN, M. **Sorgo *Sorghum bicolor* L Moench**. Tecnologia e Produção-Culturas: Safrinha e Inverno. Embrapa, Campo Grande, p. 54-56, 2007.

WHITE,J.; HOOGENBOOM, G.; HUDA, S.; KIMBALL,B.; OTTMAN,M.; PRASAD, P.V.; ROSENTHAL,W.; SANON,M.; STAGGENBORG, S.; TRAORE,S.; VAKSMANN, M.; VANDERLIP, R. **Recent advances in the CSM-CERES-Sorghum model**. Poster material presented at ASA-CSSA-SSSA annual meeting, New Orleans, 2007.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M. e KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8895-9005, 1985.