

VINICIUS MENDES RODRIGUES DE OLIVEIRA

**PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA
GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS SOB DIFERENTES DISPONIBILIDADES
HÍDRICAS**

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

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani

Coorientadores: Fernando França da Cunha
Luís César Dias Drumond

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

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

T

O48p
2019

Oliveira, Vinicius Mendes Rodrigues de, 1991-
Parametrização e validação do modelo AquaCrop para
gramíneas forrageiras sob diferentes disponibilidades hídricas /
Vinicius Mendes Rodrigues de Oliveira. – Viçosa, MG, 2019.
91 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 75-91.

1. Gramínea - Rendimento - Métodos de simulação.
2. AquaCrop (Modelo agroclimático). 3. Gramínea - Irrigação -
Métodos de simulação. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.208

VINICIUS MENDES RODRIGUES DE OLIVEIRA

**PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA
GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS SOB DIFERENTES DISPONIBILIDADES
HÍDRICAS**

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

APROVADA: 05 de dezembro de 2019.

Assentimento:



Vinicius Mendes Rodrigues de Oliveira
Autor



Everardo Chartuni Mantovani
Orientador

Aos meus pais e meu irmão, Osvaldo, Cleonice e Lucas.

À minha esposa Tayssa.

Aos meus filhos Duda, Kaio e Miguel.

À minha vó Mariana (in Memoriam).

Aos meus amigos e companheiros desta jornada.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Everardo Chartuni Mantovani, pela orientação, paciência e incentivo. Aos professores, Fernando França da Cunha e Carlos Augusto Brasileiro de Alencar que gentilmente cederam os dados para as simulações desta tese. A estes os meus sinceros agradecimentos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

À minha amada esposa, Tayssa Ferreira Nogueira, companheira de todas as horas, que me apoiou em todas as horas, até quando pensei em desistir.

Aos meus pais, Osvaldo Rodrigues de Oliveira e Cleonice Mendes Ferreira pelo grande apoio, por nunca terem medido esforços para me dar a melhor educação, pelos incentivos profissionais, força e amizade.

Ao professor Luis César Dias Drumond, pela orientação, amizade, apoio profissional e pessoal.

Ao funcionário do Departamento de Engenharia Agrícola José Antônio Marcelino Ferreira pelo carinho e por nunca terem hesitado em me ajudar.

Aos meus amigos e estagiários durante a tese, Amanda, Geilson, Thalles, Lucas (Baiano), Gabriel, Flávio Campos, Jefferson Mesquita, Lucas Borges e a todos os outros pelo apoio.

Aos meus amigos Matheus e Juno, pela amizade e apoio sempre que precisei.

A todos os demais professores, colegas e funcionários que participaram da realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

Em especial à Caroline Pessoa da PPG da UFV, pela compreensão paciência e ajuda na fase final da minha tese, sem ela não teria conseguido entregar a versão final da minha tese.

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

RESUMO

OLIVEIRA, Vinicius Mendes Rodrigues de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2019. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para forrageiras destinadas à pastejo**. Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Coorientadores: Luis César Dias Drumond e Fernando França da Cunha.

A produtividade das culturas é afetada pela variação das condições climáticas, sendo assim necessário conhecê-las para o adequado planejamento do cultivo. A modelagem de sistemas produtivos através principalmente de equações procura identificar as variáveis que influenciam, simulando por exemplo a produtividade em função da disponibilidade hídrica.. Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar a parametrização e validação do modelo AquaCrop para forrageiras, de modo a torná-lo aplicável na avaliação da produtividade, em função da necessidade de água, fornecendo ferramenta importante no estudo do impacto do déficit hídrico. A parametrização do modelo foi realizada com auxílio de dois experimentos realizados com o capim Xaraés durante o período de maio de 2003 a abril de 2005, em condições de corte e pastejo. As condições climáticas no local, onde foram realizados os experimentos, proporcionaram grande variação de temperatura (7 a 37°C) e fotoperíodo, além de possuir variação de lâminas de irrigação (0, 18, 45, 77, 100 e 120% da evapotranspiração de referência). Com isto a parametrização e validação do modelo AquaCrop para pastagem foi realizada, apresentando exatidão adequada, porém moderada precisão. Posteriormente à parametrização e validação, o modelo foi testado para as condições de Viçosa MG realizando experimento de campo com variação de lâminas de irrigação (0, 50, 75, 100 e 125% da evapotranspiração de referência) na região de Viçosa, a qual possui clima diferente do local onde foi parametrizado o modelo, e novamente o modelo simulou as produtividades com alta exatidão, porém com alta precisão. Conclui-se que o modelo AquaCrop proposto para pastagem permite adequada a simulação da produtividade de biomassa seca em diversas condições de temperatura, fotoperíodo, evapotranspiração e disponibilidade de água.

Palavras-chave: Pastagem. Modelagem. Modelos de simulação.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Vinicius Mendes Rodrigues de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2019.. **Parameterization and validation of the AquaCrop model for grazing forage.** Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Co-advisers: Luis César Dias Drumond and Fernando França da Cunha.

Crop productivity is affected by varying climatic conditions, making it necessary to know them for proper crop planning. The modeling of productive systems mainly through equations seeks to identify the variables that influence, simulating, for example, productivity according to water availability. Therefore, the objective of this work was to perform the parameterization and validation of the AquaCrop model for forages, in order to make it applicable in the evaluation of productivity, depending on the need for water, providing an important tool in the study of the impact of the water deficit. The parameterization of the model was carried out with the aid of two experiments carried out with Xaraés grass during the period from May 2003 to April 2005, under conditions of cutting and grazing. The climatic conditions in the place, where the experiments were carried out, provided great variation of temperature (7 to 37°C) and photoperiod, besides having variation of irrigation levels (0, 18, 45, 77, 100 and 120% of the reference evapotranspiration). With this, parameterization and validation of the AquaCrop model for pasture was performed, presenting adequate accuracy, but moderate precision. Subsequent to parameterization and validation, the model was tested for the conditions of Viçosa MG by conducting a field experiment with variation of irrigation depths (0, 50, 75, 100 and 125% of the reference evapotranspiration) in the Viçosa region, which has different climate from the place where the model was parameterized, and again the model simulated the productivity with high accuracy, but with high precision. It is concluded that the proposed AquaCrop model for pasture allows adequate simulation of dry biomass productivity under different conditions of temperature, photoperiod, evapotranspiration and water availability.

Keywords: Pasture. Modeling. Simulation models.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Situação das pastagens brasileiras.....	10
2.2 Avaliação da produtividade das pastagens e variação de lâmina de irrigação.....	15
2.3 Modelos de simulação	16
2.3 Modelo AquaCrop.....	23
3. OBJETIVOS	35
3.1 Geral.....	35
3.2. Específicos.....	36
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1 Parametrização, validação e teste do Modelo AquaCrop.....	36
4.1.1 Dados utilizados para a parametrização.....	36
4.1.2 Descrição das localidades	37
4.1.2.1 Experimento 1.....	37
4.1.2.2 Experimento 2.....	39
4.1.3 Parametrização do Modelo AquaCrop.....	40
4.1.4 Validação do Modelo AquaCrop	42
4.2 Experimento de Campo	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Parametrização do modelo AquaCrop.....	48
5.1.1 Dados Climáticos.....	48
5.1.2 Parametrização do modelo AquaCrop.....	50
5.3 Produtividade de Biomassa Seca	55
5.3.1 Parametrização do modelo.....	55
5.3.2 Validação do modelo	60
5.4 Experimento de Campo	62
5.5 Utilização do Modelo AquaCrop em capim Marandu.....	72
6. CONCLUSÕES.....	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial e a demanda crescente por alimentos exigem o desenvolvimento da agricultura irrigada, visto que intensifica a produção e aumenta a produtividade, pois complementa a precipitação pluvial que é muito variável afetando a produtividade das culturas em condições de sequeiro. Perspectivas de crescimento da população mundial indicam valores superiores a 9 bilhões de habitantes em 2050 que exigirá crescimento da ordem de 70% na produção de alimentos (OCDE-FAO, 2015).

O manejo das culturas desde seu estabelecimento até a colheita deve ser feito visando proporcionar o máximo de rentabilidade, com produtividades que otimizem os insumos mais escassos. Alexandratos & Bruinsma (2012) relatam várias formas de atender a demanda de alimentos, sendo o aumento dos cultivos irrigados uma das principais tecnologias a ser empregada. A precipitação no Brasil na maioria das regiões, ocorre de forma irregular ao longo do ano, se concentrando nas estações de primavera e verão, com isto os cultivos de sequeiro ficam restritos a esta época do ano. Apenas com auxílio da irrigação a agricultura é possível produzir, a maioria das culturas, ao longo de todo o ano.

O cenário atual do Brasil requer atenção sobre a escassez de água pois, devido aos longos períodos de estiagem, torna-se necessário o uso racional dos recursos hídricos disponíveis. Segundo a FAO (OCDE-FAO, 2015), a agricultura é o setor que mais utiliza água em seu sistema de produção, por isto técnicas de manejo racional da utilização deste recurso devem ser adotadas para que seja sustentável.

O manejo de irrigação tem a função de suprir a demanda de água das culturas e assim garantir sua produtividade e qualidade (BHALAGE et al., 2015), e minimizar as perdas deste recurso durante o processo produtivo. Na maioria das propriedades que utilizam este recurso, o manejo não é empregado e quando adotado, não é realizado com rigor necessário.

Diversas formas de manejo de irrigação são descritas em livros, artigos científicos e boletins técnicos, mas modelos de simulação da respostas

das culturas às diferentes adversidades climáticas, dentre elas à disponibilidade de água, vem sendo amplamente usada, ao longo dos anos, para complementar e direcionar as pesquisas convencionais (BOOTE et al., 1996; COSTA & BARROS, 2001; ANJOS, 2011).

Prever a produtividade das culturas tem se tornado muito importante para o planejamento de transporte e armazenamento da produção, estimativa de lucro, perspectiva de preço de mercado, identificação de falhas de produção e a unidade animal por área (pastagem), dentre outros. Os modelos de cultura auxiliam no processo de simulação, segundo Monteith (1996) modelo de cultura é um sistema de previsão de crescimento, desenvolvimento e produtividade, considerando fatores genéticos e ambientais. Modelos agrometeorológicos são importantes visto que este é um fator limitante para a agricultura. Com os modelos de simulação é possível a racionalização do uso dos recursos naturais e favorecendo o crescimento sustentável da produtividade das culturas.

O software AquaCrop é uma ferramenta desenvolvida pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) para a formulações de estratégias para aumentar a produtividade agrícola dos sistemas de sequeiro e irrigado. O software prediz a produtividade das culturas, necessidade de água e eficiência do uso da água, sob condições limitantes de déficit hídrico (RAES et al., 2009).

O modelo AquaCrop requer poucos parâmetros de entrada quando comparados a outros modelos, sendo a maioria destes parâmetros obtidos facilmente, pois este modelo foi desenvolvido para ser mundialmente utilizado (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2012).

As gramíneas forrageiras possuem poucos modelos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade em relação às grandes culturas. É de conhecimento de todos a importância da produção de carne bovina e leite no Brasil, pois possui 8,5 milhões de km² de extensão territorial e cerca de 20% desta área (174 milhões de hectares) ocupada por pastagens (ABIEC, 2012). A utilização de irrigação em pastagens vem ganhando mercado nos últimos anos e por isso necessita de pesquisas para determinar o seu correto manejo. Com isto modelos de simulação da produtividade de

biomassa tornam-se alternativas para o planejamento do correto uso dos recursos hídricos e da sua necessidade.

Objetivando assim com este trabalho, realizar a parametrização e validação do modelo AquaCrop para gramíneas forrageiras, determinando parâmetros de ajustes em função do clima e disponibilidade hídrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Situação das pastagens brasileiras

O Brasil é o segundo no ranking mundial de quantidade de rebanho bovino, com 218 milhões de cabeças de gado de corte (IBGE, 2017), e em 2017 foi registrado o aumento do consumo interno de carne chegando à aproximadamente 33kg/habitante/ano (CONAB, 2017). Além do mercado de carne o Brasil também se destaca na produção de leite, com 35 bilhões de litros/ano (VILELA et al., 2017).

Em 2016, o Brasil exportou 1,07 milhões de toneladas de carne bovina, correspondente a mais de US\$ 4,34 bilhões, representando uma redução de 6,8% no faturamento das exportações em relação a 2015. Em 2017 houve crescimento de 34% no faturamento nas exportações totais de carne bovina em relação ao mesmo período de 2015 (ano que antecedeu o auge da crise econômica no país) (ABIEC, 2016).

Praticamente toda esta produção, aproximadamente 97%, é sustentada por extensas áreas de pastagem, que são a base alimentar dos ruminantes, e a maior parte destas áreas não são manejadas adequadamente, e proporcionam as baixas produtividades (VILELA et al., 2017).

No último Censo Agropecuário (IBGE, 2017) as áreas de pastagens são formados, em sua grande maioria, por pouca diversidade de espécies forrageiras como, por exemplo, as abrangentes áreas do monocultivos do capim Marandu [*Brachiaria brizantha* (Hochst ex. A. Rich) Stapf. sin. *Urochloa brizantha* (Hochst ex. A. Rich) Stapf.]. Esse capim foi lançado em 1984, e até hoje tem grande importância para a pecuária do país, ocupando cerca de 45% das 10 áreas de pastagens cultivadas (JANK et al. 2014).

A pecuária de corte praticada no Brasil com essencialmente extensiva, fator que proporcionou o título de “Boi Verde” aos animais brasileiros no mercado externo, e firmou a marca “Brazilian beef”, a exemplo do ocorrido com o “Café do Brasil” (IBGE, 2017).

A pecuária extensiva compreende na criação de bovinos a pasto em grandes áreas, em sua maioria sem investimento e com baixa tecnologia. Neste tipo de sistema de criação se utiliza suplementação mineral, energética, proteica e de volumosos, o que gera um gasto excessivo inviabilizando este tipo de pecuária na maior parte do território brasileiro, a média nacional de ocupação por área é de 0,4 unidade animal por hectare (IBGE, 2017). Assim, enquanto em países onde o sistema de confinamento é a base da produção de carne (como os EUA e diversos países europeus), o processo de oferta do alimento para o gado requer o uso intensivo de mão de obra, máquinas, equipamentos e combustível fóssil, no Brasil, essa colheita é feita predominantemente pelo próprio animal, por meio do pastejo (DIAS FILHO, 2014).

Degradação de pastagens é um termo usado para designar um processo evolutivo de perda de vigor, de produtividade e da capacidade de recuperação natural de uma dada pastagem, tornando-a incapaz de sustentar os níveis de produção e qualidade exigidos pelos animais, bem como o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras” (KICHEL, 1995), e com isto chegamos ao termo que é mais utilizado entre os proprietários e pesquisadores. Segundo Dias Filho (2015), cerca de 80% das pastagens no Brasil encontram-se em estágio de degradação, sendo 30% destas em estágio moderado de degradação, 20% em estágio leve de degradação e 50% estariam em forte degradação a ponto de não serem indicadas para o pastejo. Toda esta área degradada afeta diretamente a produção e torna a atividade insustentável.

As alternativas para reverter o processo de degradação, seria a adoção do pastejo rotacionado, adubação de pastagens e por fim o uso da irrigação.

De acordo com Aguiar & Silva (2002), a taxa de lotação quase sempre esta acima ou abaixo da capacidade de suporte, e as produtividades são baixas, da ordem de 60 a 180 kg de peso vivo/ha/ano, com ganho animal

variando de 100 a 150 kg de peso vivo/ano. Utilizando técnicas adequadas de manejo pode-se ter um ganho animal de 150 a 210 kg de peso vivo/ano e produtividades de 150 a 360 kg de peso vivo/ha/ano.

Para uma estratégia de manejo correta é necessário conhecer o verdadeiro potencial de produção da planta forrageira, pois só existe alta produção animal se a pastagem for mantida estável e produtiva (SOUZA et al., 2005). Para isso é muito importante conhecer a produção de massa de forragem para um manejo correto, evitando tanto o super-pastejo, quanto o sub-pastejo.

Na maioria das vezes quando a adubação das pastagens é feita, não é equilibrada. Com isso a falta de um nutriente influencia negativamente a absorção de outro nutriente essencial. As doses recomendadas ainda são muito baixas comparadas com a capacidade de produção das forragens, determinadas por sua genética. Aguiar et al. (2008) mostrou através de pesquisas que há resposta linear com adubações de 400 a 600 kg/ha/ano de nitrogênio em regiões tropicais, sendo que as doses recomendadas na literatura estão muito abaixo desses valores.

A adubação nitrogenada ainda possui relação positiva com a qualidade da forragem. Segundo Rocha et al. (2002), avaliando gramíneas do gênero *Cynodon*, houve um incremento significativo na produção de matéria seca e proteína bruta, e redução no teor de fibras em detergente neutro.

Manejar uma pastagem de forma adequada significa explorar o potencial de produção da forrageira e alcançar valores nutritivos acima das médias de produção. A produção de forragem afeta à capacidade de suporte da pastagem (quanto maior produção, maior taxa de lotação) e está positivamente correlacionada com a fertilidade do solo, manejo e condições climáticas (DRUMOND, 2008).

O pastejo rotacionado é uma técnica na qual se subdivide a área pastejada em espaços menores, limitando a alimentação do rebanho e permitindo também períodos regulares de descanso do pasto, permitindo a rebrota e crescimento (DIAS FILHO, 2017). Neste tipo de manejo deve-se monitorar a altura de entrada e saída dos animais, esta altura varia com a espécie ou cultivar que está sendo pastejada, sendo definida pela máxima interceptação luminosa da pastagem (95% de interceptação luminosa). Para

o gênero *Brachiaria* ssp. a altura de entrada varia de 25 a 40 cm e a altura de saída varia de 15 a 20 cm, já para *Panicum* ssp. a altura de entrada varia de 60 a 90 cm e a altura de saída varia de 30 a 40 cm (DIAS FILHO, 2017).

Euclides et al. (2014) realizaram pesquisas com pasto de capim Mombaça manejado em pastejo rotacionado, definindo o momento de entrada e saída dos animais através da interceptação luminosa, entrando com os animais com 95% de interceptação luminosa da pastagem e retirando os animais com resíduos pós pastejo de 25 a 50 cm. Os autores revelaram maior ganho de peso por animal e menor taxa de lotação para o resíduo maior (50 cm). Porém o acréscimo de animais para rebaixar o pasto a 25 cm no mesmo período de tempo resultou em menor ganho de peso vivo neste período e os autores atribuíram isto à queda na oferta de pastagem e em sua qualidade, concluindo assim que para o capim Mombaça a altura de saída deve ser de 50 cm, porém o experimento foi realizado em uma única estação, sendo necessário a repetição do experimento.

Os fatores climáticos impedem o máximo aproveitamento do potencial produtivo das pastagens, mesmo em um sistema com solo em condições ótimas de fertilidade e manejado com alturas de entrada e saída corretas. A temperatura ótima para o desenvolvimento das gramíneas tropicais está entre 30 e 35°C (GOMIDE, 1993), sendo que em temperaturas abaixo de 15°C a maioria das pastagens cultivadas cessam seu crescimento, causando queda na produção de massa de forragem. No Brasil diversas regiões produtoras apresentam temperaturas abaixo de 15°C em alguns meses do ano e associado a isso tem-se a baixa intensidade luminosa, insolação e precipitação.

A irrigação de pastagem surgiu por volta de 1900 na Austrália, chegando ao Brasil na década de 60 e 70. No Brasil, a irrigação de pastagens não tem sido feita de maneira adequada, o que resulta em prejuízos ao ambiente, consumo desnecessário de energia elétrica e de água, lixiviação de nutrientes e maior compactação do solo, repercutindo na diminuição da produção e vida útil da pastagem (ALENCAR et al., 2009). Além disso, é crescente a utilização de irrigação nas pastagens brasileiras, especialmente nas regiões mais quentes, que apresentam maior resposta ao seu uso (DRUMOND & AGUIAR, 2005).

Eliminar a estacionalidade de produção é um desafio, pois a mesma é determinada por variáveis que são praticamente incontroláveis (fotoperíodo e temperatura do ar). A utilização da irrigação estaria fundamentada na possibilidade de eliminar uma das variáveis causadoras da estacionalidade no período seco e maximizar o aproveitamento das condições ótimas do período quente e chuvoso, evitando os veranicos e prolongando a estação de crescimento, dando condições para que as rebrotações iniciem mais cedo na primavera e/ou encerrem mais tarde no outono tornando as variações estacionais mais regulares e menos problemáticas ao longo dos anos.

Dessa forma, a irrigação tem sido apontada como uma das estratégias reguladoras da produção e como técnica de manejo para reduzir o efeito da estacionalidade de produção das pastagens. Respostas produtivas das pastagens por meio da irrigação parecem estar mais ligadas às condições climáticas, tanto na ocasião quanto na frequência de irrigação, que às características fisiológicas das espécies de gramíneas (VITOR et al., 2009).

A irrigação pode diminuir o efeito da estacionalidade das pastagens, mas não a elimina, verificando produções menores no inverno. Matsumoto et al. (2001), trabalhando com 5 cultivares de *Panicum maximum*, encontrou resposta positiva à irrigação na produção de matéria seca (40% no ano), porém as respostas aconteciam no período de outubro a junho, pois nos meses de julho, agosto e setembro a produção foi a mesma das parcelas não irrigadas. Outros autores, trabalhando com diversas espécies forrageiras, também encontraram resposta à irrigação, sem redução na estacionalidade de produção (ALVIM et al., 1986; BOTREL et al., 1999; ALVIM et al., 2003). Todos estes autores destacaram que outros fatores estão envolvidos na redução de produção de forrageiras tropicais, sendo os principais a luminosidade e a temperatura.

A irrigação de pastagem podem ser feitas com os sistemas de irrigação por aspersão, pivô central e gotejamento. Segundo Drumond & Aguiar (2005), no sistema de aspersão em malha, todas as tubulações podem ficar fixas e enterradas, com mudança apenas dos aspersores.

2.2 Avaliação da produtividade das pastagens e variação de lâmina de irrigação

Segundo Carvalho et al. (2005) a alimentação compõe de 50 a 80% dos custos dentro de um sistema de produção animal, e associado a isto, tem-se grande descaso quando o assunto é a falta de planejamento de aproveitamento das forragens. Os ruminantes possuem como base da sua alimentação os volumosos e, sem dúvidas, o uso de gramíneas sob pastejo é a forma mais econômica de alimentação. Se a pastagem é manejada de forma correta, esta pode fornecer uma dieta balanceada para a produção do rebanho, e quando necessário uma pequena quantidade de concentrados na alimentação. O principal ponto a ser analisado são as atitudes dos pecuaristas com as gramíneas destinadas ao pastejo, em sua grande maioria possuem pastagens degradadas devida a exploração sucessiva sem o manejo adequado da fertilidade do solo. É conhecimento de todos que as gramíneas possuem estacionalidade durante o período de baixas temperaturas, mas esta queda não é tão acentuada se a forrageira se encontrar bem nutrida e manejada, respeitando alturas de entrada e saída dos animais.

Contudo, a avaliação das pastagens é a ferramenta útil para o correto manejo. Com a avaliação é possível determinar a altura de entrada dos animais ou ponto de pastejo, a altura de saída dos animais, a quantidade de forragem produzida no ciclo, capacidade de suporte da pastagem considerando a sua produção no ciclo, a qualidade nutricional da pastagem sendo caracterizada pelos teores de proteína bruta e digestibilidade da forragem, além dos teores de fibra em detergente neutro. Portanto a avaliação das pastagens é a primeira ferramenta que deve ser utilizada para o planejamento do aproveitamento das pastagens, visando a tecnificar o sistema de produção e repensar nas técnicas de alimentação dos animais (OLIVEIRA et al., 2018).

Andrade et al. (2012b) cita que avaliações da produção de forragens são realizadas com medidas simples da altura e massa, avaliando com isso outros fatores importantes. A avaliação quantitativa mais utilizada é a determinação da massa de forragem (MF), que pode ser feita por meio dos métodos diretos e indiretos. O método direto é feito através do corte de uma cossão determinada de acordo com a forragem utilizada e posteriormente feita

a desidratação de uma subamostra homogênea retirada dessa amostra. O método indireto é feito através de cálculos e fórmulas, calibradas com auxílio de métodos diretos, utilizando a altura da forragem

Aguiar et al. (2006) propõe a avaliação das forrageiras utilizando índices comuns, como matéria seca (MS), acúmulo de forragem, taxa de acúmulo de forragem (TAF), altura do relvado, densidade da massa de forragem (DMF) e eficiência de pastejo. Podem ser utilizados, ainda, outros métodos para a avaliação das forragens, como a taxa de alongamento de perfilhos e taxa de emissão de perfilho.

2.3 Modelos de simulação

Modelo de simulação é um padrão, um plano, uma representação ou descrição feita para demonstrar o funcionamento de um objeto, um sistema ou conceito. Sendo assim um modelo pode ser definido pela caracterização de um sistema real por meio de um complexo conjunto de equações obtendo assim uma descrição numérica do sistema. Os autores Sinclair & Seligman (1996) descrevem o modelo comparando o modelo à um simulador dinâmico do crescimento de um cultivo por meio da integração numérica de seus processos biofísicos constituintes, sendo assim uma “cópia” da cultura. Outra definição, proposta por Monteith (1996), relata que um modelo de cultura pode ser descrito como um sistema quantitativo para prever o crescimento, o desenvolvimento e a produção de certa cultura, dado o conjunto de características genéticas e variáveis ambientais.

Modelo seria então uma representação por meio de equações, desenho do sistema analisado ou até uma descrição escrita, de um sistema real procurando identificar os processos que influenciam este sistema.

Os modelos são classificados didaticamente em modelos empíricos e modelos mecanísticos (THORNLEY & JOHNSON, 2000). Os modelos empíricos são relações matemáticas descritas a partir da observação, normalmente compostos de uma ou mais equações e normalmente associados à características locais e com dificuldade de extrapolação. Já os modelos mecanísticos são mais complexos e normalmente aplicados a uma maior gama de fenômenos, baseados em processos fisiológicos e físicos,

comumente aplicados no crescimento de cultura por oferecerem respostas mais consistentes.

A modelagem seria então o processo de criação de um modelo que irá explicar uma característica ou comportamento. Segundo Blum (2009) e Geerts & Raes (2009) a modelagem de simulação de cultura é uma ferramenta útil para estudar e desenvolver estratégias promissoras quanto ao déficit de irrigação, estimando a necessidade hídrica da cultura ao longo do seu ciclo. Quanto maior foi o grau de complexidade do modelo criado, maior será seu nível de detalhamento e sua capacidade de simulação do que acontece com a cultura em campo. A quantidade de variáveis utilizadas na modelagem indicará o grau de detalhamento do modelo, mas quanto mais variáveis, mais difícil se torna a sua parametrização. O modelo AquaCrop simula a produtividade da cultura, ou sua produção de biomassa com base na transpiração da planta. Para isto, no processo de modelagem é separada a evapotranspiração da cultura em transpiração da cultura e evaporação da água do solo; com isto, consegue-se isolar o efeito do uso improdutivo do consumo de água pela evaporação, sendo a evaporação um fator principal na fase inicial, diminuindo seu efeito durante o ciclo da cultura.

A simulação de um modelo se trata de uma ferramenta que permite a geração de cenários, a partir dos quais pode-se orientar um processo de tomada de decisão (LAW & KELTON, 1991), proceder análises, avaliação de um sistema, propor medidas para melhoria dos resultados e observar quais fatores são mais determinantes no resultado final. Para os modelos de cultura a simulação irá servir para identificar os fatores que determinarão a produtividade, como o aumento da temperatura do ar, quantidade de chuva, radiação, umidade do solo, fertilidade do solo, etc. e qual destes fatores será mais determinante na produtividade ou crescimento da cultura. Com a simulação pode-se identificar os pontos de correção do manejo da cultura ou fatores que quando corrigidos podem possibilitar um maior rendimento da cultura. O AquaCrop é um modelo de simulação desenvolvido pela Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) visando de atender a necessidade de simular respostas de produção em relação às condições hídricas das culturas e, com isto, otimizar o uso da água na agricultura.

Para que um modelo possa ser utilizado e considerado correto, necessita de alguns processos após a modelagem, o teste, a avaliação e a validação. Testar significa submeter a um teste ou experiência, isto consiste em verificar o desempenho de alguém ou algo (material, objeto, planta, variável climática, modelo, etc) por intermédio de situações previamente organizadas, que seriam os testes. Avaliar é julgar ou fazer a apreciação de alguém ou algo (material, objeto, planta, variável climática, modelo, etc), possuindo como base uma escala de valores, parâmetros ou padrões pré-determinados. Portanto, o teste e a avaliação são complementares, o teste irá verificar o desempenho do modelo, mas somente após a avaliação será possível identificar se o modelo encontra-se dentro dos padrões estabelecidos. Ambos processos podem ser definidos em conjunto como a verificação, sendo a verificação do modelo definido por Law & Kelton (1991) como um conjunto de ações com a finalidade de certificar se o modelo transcreve corretamente a simulação proposta. O teste e a avaliação do modelo são feitos comparando seu desempenho de estimativa ao dado coletado em campo (real).

No processo de modelagem, busca-se a parametrização das variáveis do modelo, sendo um processo de tentativa e erro, requerendo sua calibração até que os resultados sejam estatisticamente iguais. A calibração de um modelo se refere ao processo de ajuste dos parâmetros do modelo para que este seja capaz de representar a realidade observada, sendo necessário um conjunto de dados medidos. Após ajustar os parâmetros do modelo com os dados medidos, o modelo é calibrado por testes e avaliação. Parizi et al. (2016) testando e calibrando um modelo mecanístico para a produção da cultura do milho irrigado, procederam a calibração com a lâmina de 0% da evapotranspiração e depois simularam diferentes valores de lâmina de irrigação, concluindo que a calibração do modelo com esta lâmina apresentou desempenho satisfatório.

Após a calibração deve ser realizada a validação do modelo, usando-se um conjunto de ações utilizadas para analisar se um dado modelo representa com fidedignidade o sistema em estudo, podendo este procedimento ser conduzido em conjunto com a calibração do modelo, fato que imprimirá maior confiabilidade ao modelo. A validação pode ser

categorizada em estatística e subjetiva. A estatística consiste no emprego de ferramentas como: análise de variância, determinação de intervalo de confiança, testes de hipótese, ajustamento de curvas, análises de regressão e análises de séries temporais. Já a subjetiva, é recomendada quando não há possibilidade de proceder incursões exploratórias aprofundadas sobre o sistema em estudo. Portanto, serão realizadas comparações entre o comportamento do modelo com o do sistema real.

Os índices estatísticos mais utilizados são: raiz do erro quadrático médio (REQM), o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d) (Willmott, 1982), o índice de eficiência (E), coeficiente de correlação de Pearson (R^2) e o índice de desempenho (c), estes testes possuem parâmetros de julgamento quantitativo e qualitativo. O coeficiente de determinação (r^2) descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Os valores de R^2 variam de zero a um, sendo que quanto mais próximo do valor 1 (um), melhor é o ajuste. Porém, esta estatística não é muito adequada para medir desempenho de modelos, pois ela é altamente sensível a valores espúrios (outliers).

O índice de concordância (d) tem um intervalo variando entre 0 e 1 sendo que, valores próximos a 1, mostram uma concordância perfeita. O índice de eficiência expressa o quanto do desvio global entre os valores observados e simulados afasta do desvio global entre os valores observados do seu valor médio. A REQM é uma medida de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos pelo modelo (P) e os valores observados (O).

O coeficiente de Pearson (r) mede o grau de correlação entre duas variáveis de escala métrica e pode ser classificado conforme a classificação proposta por Hopkins (2014) presente na Tabela 1. O índice c de Camargo & Sentelhas (1997) indica o desempenho dos métodos utilizando o coeficiente de Pearson e o d em seu cálculo, e pode ser classificado conforme a Tabela 2. Após a comparação do modelo usando índices estatísticos pode-se inferir se o modelo foi validado com êxito, se isto não acontecer será necessário nova calibração, teste e avaliação do modelo. Os coeficientes de correlação (r) medem o grau pelo qual duas variáveis tendem a mudar juntas, descrevendo a força e a direção da relação. O coeficiente de correlação pode

variar de $-1,00$ a $+1,00$, com um coeficiente de $+1$, indicando uma correlação linear positiva perfeita, as duas variáveis serão exatamente iguais em termos de escores padronizados, isto é, um elemento apresentando uma amplitude padronizada de $1,5$ em uma das variáveis vai apresentar a mesma amplitude padronizada na outra variável. Um coeficiente de correlação de -1 , indica correlação linear perfeita negativa, com os valores padronizados exatamente iguais em valores absolutos, diferindo apenas no sinal. O mais comum é que o coeficiente fique situado no intervalo entre estes dois valores. Um coeficiente de correlação “0”, significa que não existe um relacionamento linear entre as duas variáveis. Existem três coeficientes de correlação mais usados, o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de correlação de Spearman e o coeficiente de correlação de Kendall’s tau (VIALI, 2017).

Tabela 1. Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação (r).

Coeficiente de correlação (r)	Classificação
0,0 – 0,1	Muito Baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito Alta
0,9 – 1,0	Quase Perfeita

Hopkins (2014).

Tabela 2. Critérios para interpretação do desempenho dos métodos de estimativa de ET_0 , por meio do índice “c”.

Valor de “c”	Desempenho
$>0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Os coeficientes de correlação (r) medem o grau pelo qual duas variáveis tendem a mudar juntas, descrevendo a força e a direção da relação. O coeficiente de correlação pode variar de $-1,00$ a $+1,00$, com um coeficiente de $+1$, indicando uma correlação linear positiva perfeita, as duas variáveis serão exatamente iguais em termos de escores padronizados, isto é, um elemento apresentando uma amplitude padronizada de $1,5$ em uma das variáveis vai apresentar a mesma amplitude padronizada na outra variável. Um coeficiente de correlação de -1 , indica correlação linear perfeita negativa, com os valores padronizados exatamente iguais em valores absolutos, diferindo apenas no sinal. O mais comum é que o coeficiente fique situado no intervalo entre estes dois valores. Um coeficiente de correlação “0”, significa que não existe um relacionamento linear entre as duas variáveis. Existem três coeficientes de correlação mais usados, o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de correlação de Spearman e o coeficiente de correlação de Kendall's tau (VIALI, 2017).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento mede o grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas, é um coeficiente adimensional e varia de $+1$ a -1 . O coeficiente de correlação de Spearman é uma medida de correlação não paramétrica e ao contrário do coeficiente de Pearson não requer que a relação entre as variáveis seja linear e que as variáveis sejam quantitativas. O coeficiente de Kendall's tau é uma medida de associação para variáveis ordinais.

Assim se uma comparação entre modelos apresentar o valor de “ r ” igual a zero significa que seu comportamento não é linear e assim procede-se a outro teste, para os modelos apresentarem os mesmos valores. O valor de r deve ser $+1$, portanto se for diferente deste valor deve-se ajustar o modelo e fazer novos cálculos do coeficiente até obter o mais próximo possível de $+1$. Este coeficiente, no entanto, não fornece tal valor para sua correção, possuindo assim a necessidade de outros coeficientes ou índices estatísticos para a correção do modelo. Outro problema do r é a sua alta sensibilidade a outliers, se possuir valores extremos no conjunto de dados, estes irão afetar significativamente o coeficiente de Pearson.

Pode ser analisado também a inclinação da reta, que é definida pelo coeficiente de regressão ou coeficiente angular. Em uma equação linear tem-se que $Y = aX + b$, sendo “b” o intercepto ou coeficiente linear e representa o ponto em que a reta corta o eixo Y, e “a” o coeficiente angular da reta representando a relação entre a variação dos valores de X e Y, sendo que o valor de X aumentará “a” vezes em relação ao valor de Y. Portanto para uma comparação entre dois modelos perfeita e os valores de b sendo 0, a inclinação da reta terá que ser igual a 1, obtendo assim a equação $Y = 1 X + 0$ e portanto $Y = X$. Para aplicar este conceito, inverte-se a equação da reta substituindo-se os valores dos dados simulados na equação, após este procedimento os dados simulados se aproximaram ao dado observado.

Já o procedimento de calibração é mais complexo pois, o objetivo é comparar os valores de X e Y e se estes valores são iguais, sendo assim, ao proceder à análise de regressão simples, os coeficientes a e b da equação deverão ser iguais a 1 e 0, respectivamente e significativos à probabilidade estabelecida.

Precisão e Exatidão são termos muito utilizados em modelagem, pois indicam o comportamento do modelo em relação ao real. Precisão indica o quanto as medidas repetidas estão próximas umas das outras, exatidão indica quanto próximo do valor real está o valor medido. A REQM é uma medida de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos pelo modelo (P) e os valores observados (O).

A eficiência “E” proposta por Nash & Sutcliffe (1970) é definida como um menos a soma das diferenças quadráticas absolutas entre os valores preditos e observados normalizados pela variância dos valores observados, utilizando valores absolutos nas comparações, não considerando se são negativos ou positivos em relação às diferenças.

O índice de concordância d foi proposto por Willmont (1982) para superar a insensibilidade de E e r^2 entre as diferenças nas médias e variâncias observadas e previstas (LEGATES & MCCABE, 1999). O índice de concordância representa a razão entre o erro quadrático médio e o erro potencial (WILLMONT, 1982).

A grande dificuldade na utilização dos modelos é a subjetividade na classificação dos mesmos. Não são encontrados na literatura valores de

referência mostrando erros aceitáveis para situações específicas. A classificação destes índices é generalizada para todos os casos assim, a utilização de vários índices é necessária para se obter no final do estudo maior confiabilidade nos resultados. Além disto, grande parte dos trabalhos encontrados na literatura utilizam estes índices (COELHO, et al., 2020; FAVA, et al.; 2019), portanto procura-se utilizar uma grande quantidade de índices estatísticos e assim validar o modelo que será desenvolvido.

2.3 Modelo AquaCrop

O AquaCrop é considerado um modelo mecanístico denominado “water-driven model”, modelo que considera o efeito da água no rendimento das culturas, ou seja, a água tem é a variável principal no modelo. Para seu desenvolvimento foi utilizando o modelo de Doorebons & Kassam (1979), que calcula a biomassa a partir da quantidade de água evapotranspirada, considerando a relação entre o consumo de água e a produtividade da cultura.

O AquaCrop foi inicialmente, calibrado e validado para a cultura do milho, em três localidades distintas na Espanha. Posteriormente, vem sendo amplamente utilizado em várias pesquisas (RAZZAGHI et al., 2017; RAN et al., 2018; PIRMORADIAN & DAVATGAR, 2019; TSAKMAKIS et al., 2019; XU et al., 2019), incluindo novas pesquisas com milho no mundo (NYAKUDYA & STROOSNIJDER, 2014; AKUMAGA et al., 2017), no Brasil (MARTINI, 2018) e Nordeste brasileiro (ANJOS, 2011, 2016).

As principais características que diferenciam o modelo AquaCrop de outros modelos (DSSAT, APSIM, CROPWAT) são o uso da escala de tempo como medidas diárias, para maior aproximação da resposta da cultura ao déficit hídrico; não separação da biomassa dentre os órgãos da planta; uso da cobertura do dossel para expressar o desolvimento foliar da cultura; padronização da produção de biomassa pelo uso da água, considerando a concentração de CO₂ e a transpiração da planta através das condições atmosféricas (STEDUTO et al., 2009). O modelo AquaCrop foi estruturado para simular a produção potencial e sua produtividade final basicamente em quatro etapas: desenvolvimento do dossel, transpiração da cultura, acúmulo de biomassa e produtividade final.

A simulação do modelo AquaCrop utiliza o efeito da transpiração da cultura (Tr) para calcular a produtividade da cultura, não considerando então os efeitos da evaporação de água no solo, a qual não possui efeito direto na produtividade da cultura. Como o dado de entrada é a evapotranspiração da cultura (ETc), o modelo separa os componentes desta e considera apenas a Tr . Com isto exclui-se o efeito negativo da evaporação no início do ciclo, sendo esta dominante no início do desenvolvimento da cultura, pois a cultura não possui área foliar considerado. Utilizando a produtividade de água como parâmetro, o modelo determina a biomassa a partir da transpiração da cultura através das equações 1 e 2 (Eq.1 e Eq.2, respectivamente), sendo estas as principais equações do modelo de crescimento AquaCrop:

$$B = WP \times \sum Tr \quad \text{Eq.1}$$

$$Y = B \times HI \quad \text{Eq.2}$$

em que:

WP - Produtividade da água ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$);

Tr – Transpiração da cultura (mm);

B – Biomassa seca da parte aérea (kg);

Y - Produção final (kg); e

HI – Índice de colheita (percentagem).

Com utilização destas duas equações o cálculo da produtividade não possui comportamento conservativo do parâmetro WP e assim considera as diferentes condições climáticas (STEDUTO et al., 2007).

Conforme a equação 2 a produtividade da cultura é determinada pela biomassa (B) e do índice de colheita (HI), sendo o HI incluído na equação para considerar os efeitos de estresse ambiental sobre a B. O modelo permite a simulação da produtividade com ou sem irrigação, selecionando no manejo de água da cultura, podendo também variar o método de irrigação (aspersão, localizada ou superfície) e a frequência de irrigação. A irrigação pode ser simulada considerando um intervalo de tempo fixo ou variável, com lamina fixa ou através da umidade do solo mínima fixada pelo usuário, sendo a quantidade de água, neste manejo, suficiente para que o solo esteja na capacidade de campo ao final da irrigação.

A escala de tempo da equação original (Eq. 1) é sazonal, ou para diferentes estágios de crescimento que podem ter duração de semanas ou meses, enquanto que a escala de tempo utilizada no AquaCrop é diária. Assim, o modelo pode representar melhor a dinâmica da água no solo, da evaporação, da transpiração da cultura e da temperatura do ar.

Com refinamentos importantes a simulação se torna mais precisa, simulando o crescimento do dossel, separando os efeitos do estresse hídrico sobre: o crescimento do dossel, condutância estomática, senescência das folhas, polinização e outros aspectos sobre índice de colheita. Similarmente a outros modelos, o AquaCrop tem uma estrutura que vai além do contínuo solo-planta-atmosfera, consistindo em quatro componentes: atmosfera, cultura, solo e manejo (ALENCAR, 2014).

No balanço de água no solo o modelo considera o crescimento da planta, seu desenvolvimento e processos de produção, na atmosfera, os fatores que afetam o crescimento são o regime térmico, chuvas, evapotranspiração e concentração de CO₂. No item manejo, o modelo enfatiza a irrigação, mas também considera a fertilidade do solo, principalmente nitrogênio e os aspectos relacionados à água, tais como disponibilidade da mesma e presença de cobertura, além de como estes fatores afetam o balanço hídrico do solo, desenvolvimento da cultura e do crescimento. As relações funcionais entre os diferentes componentes do modelo são mostradas no fluxograma da Figura. 1.

Segundo Hsiao et al. (2009), este modelo é possível de simular o crescimento e desenvolvimento das diferentes cultivares de uma mesma cultura, pois considera os parâmetros conservativos, sendo eles aplicados à uma ampla gama de condições.

O modelo AquaCrop necessita de 33 parâmetros relacionados a cultura, porém alguns desses parâmetros são de simples obtenção, sendo que alguns desses estão relacionados ao manejo da cultura. Esses 33 parâmetros estão disponíveis na parametrização do modelo, porém, após feita a validação do modelo, o programa trabalha com um conjunto limitado de dados, uma vez que os mesmos já foram definidos e validados. Assim, o usuário final deverá ajustar apenas os dados referentes ao estande planta, aos dias para emergência, dias para atingir a máxima cobertura do solo,

percentagem máxima de cobertura do solo pelo dossel, dia para o início da senescência, a profundidade máxima das raízes entre outros, totalizando assim apenas quatro parâmetros.

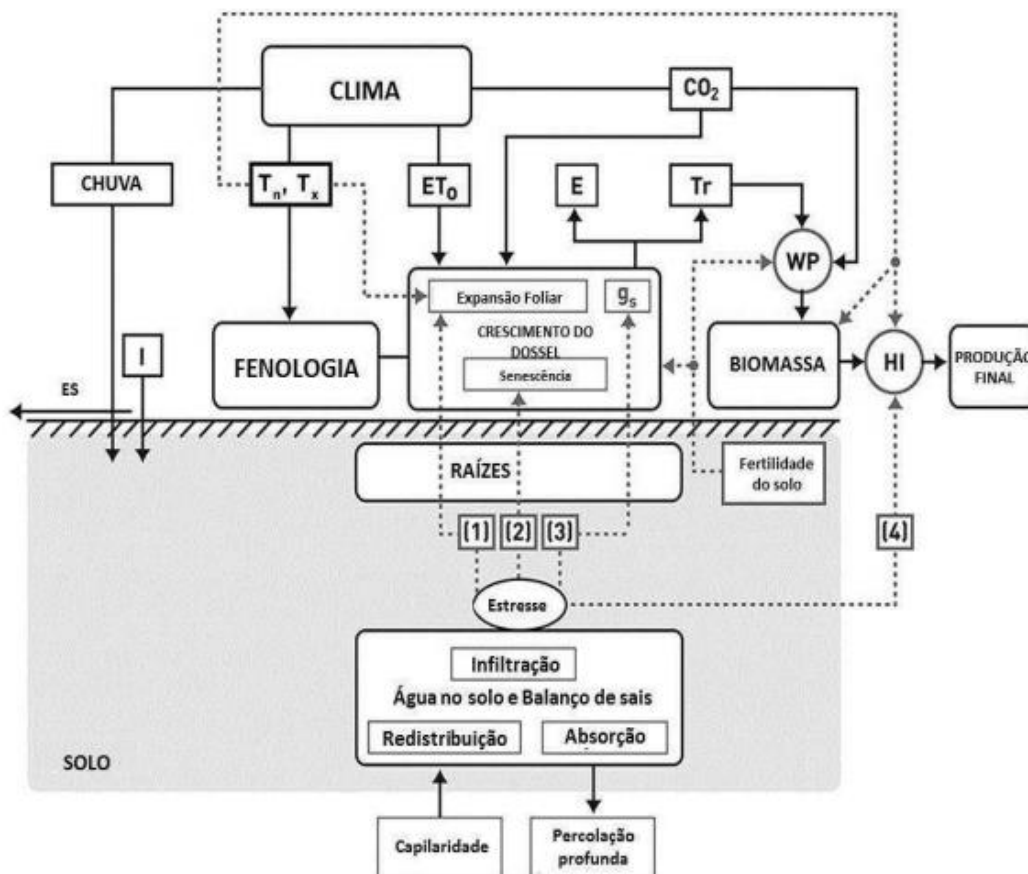


Figura 1. Fluxograma do modelo AquaCrop. (I - irrigação; T_n – temperatura mín do ar; T_x – temperatura máx do ar; ET_0 - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr – transpiração da cultura; g_s - condutância estomática; WP- produtividade da água; HI - índice de colheita; CO_2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES – escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) – diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação. Fonte: Steduto et al. (2009).

Segundo Hsiao et al. (2009), este modelo é possível de simular o crescimento e desenvolvimento das diferentes cultivares de uma mesma cultura, pois considera os parâmetros conservativos, sendo eles aplicados à uma ampla gama de condições.

O modelo AquaCrop necessita de 33 parâmetros relacionados a cultura, porém alguns desses parâmetros são de simples obtenção, sendo que alguns desses estão relacionados ao manejo da cultura. Esses 33 parâmetros estão disponíveis na parametrização do modelo, porém, após feita a validação do modelo, o programa trabalha com um conjunto limitado de dados, uma vez que os mesmos já foram definidos e validados. Assim, o usuário final deverá ajustar apenas os dados referentes ao estande planta, aos dias para emergência, dias para atingir a máxima cobertura do solo, percentagem máxima de cobertura do solo pelo dossel, dia para o início da senescência, a profundidade máxima das raízes entre outros, totalizando assim apenas quatro parâmetros.

O modelo AquaCrop foi considerado padrão pela Food and Agriculture Organization (FAO), que é um órgão internacional, propondo um modelo padrão que fosse simples sua aplicação após a parametrização, e que considera várias interações entre clima-solo-planta, permitindo sua aplicação mundial. Uma visão mais aprofundada dos componentes do modelo e do software são encontradas em Steduto et al. (2009) e Raes et al. (2009).

O efeito atmosférico que interfere na cultura é descrito no componente clima do modelo AquaCrop (Figura 1), sendo 5 os componentes meteorológicos necessários: médias diárias de temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação pluviométrica diária, demanda diária evaporativa da atmosfera, expressa em ETo e a concentração de CO₂.

Enquanto os quatro primeiros são obtidos ou derivados a partir de dados de estações agrometeorológicas, a concentração de CO₂ é obtida a partir de registros da concentração média de CO₂ na atmosfera junto ao observatório de Mauna Loa no Havaí ou para diferentes cenários de mudanças climáticas. A evapotranspiração de referência (ETo), deve ser calculada pela equação padrão descrita no boletim 56, que considera radiação solar diária, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998).

O modelo pode transformar dados meteorológicos com período fixo (normalmente dez ou trinta dias) em valores diários, porém pode ocorrer erros, principalmente na quantidade de água no solo. O modelo tem uma sub-rotina para estimar precipitação efetiva a partir de dados de 10 dias ou mensais,

através de duas opções; o método USDA Soil Conservation Service (SCS, 1993), ou como determinada porcentagem do total de precipitação.

Como ilustrado na Figura 1, a temperatura do ar influencia no desenvolvimento das culturas (fenologia, produção de biomassa e polinização); a chuva e a ET, são entradas para o balanço hídrico na zona radicular do solo, e a concentração de CO₂ da atmosfera influencia na taxa de crescimento do dossel da cultura e na produtividade da água (WP).

O AquaCrop usa o tempo térmico (graus-dias) como padrão, e oferece um calendário como alternativa quando os dados não estão disponíveis para derivar os graus-dias necessários pela planta. O número de graus-dias é calculado seguindo o procedimento de McMaster & Wilhelm (1997), com a incorporação adicional de um limite superior de temperatura, acima do qual o desenvolvimento das culturas não aumenta com o aumento da temperatura do ar.

Para a parametrização da cultura o módulo referente à cultura possui os componentes fenologia, cobertura do solo pelo dossel (CC), profundidade de enraizamento, produção de biomassa e produção alcançável como principais fatores de parametrização. A cultura cresce e se desenvolve através dos estádios do seu ciclo de expansão, manutenção e senescência do dossel, aprofundando seu sistema radicular, crescendo e acumulando biomassa. O estresse hídrico pode ter grande impacto na produtividade, dependendo do tempo, gravidade e duração. Desta maneira, o modelo distingue quatro efeitos do estresse hídrico: sobre o crescimento foliar, na condutância estomática, na senescência do dossel e no índice de colheita (HI).

Em essência, K_s é o parâmetro modificador do alvo do modelo. Acima do limite superior do conteúdo de água no solo, o estresse hídrico não é considerado, então, K_s é "1". Abaixo do limite inferior, o efeito do estresse é pleno e o valor de K_s é "0". Os limites superior e inferior são expressos como a fração (p) da quantidade total de água no solo disponível (TAW) entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (STEDUTO et al., 2009). A relação de K_s, exemplificado na Figura 2, versus "p" geralmente não é linear devido a aclimatação das plantas e a adaptação ao estresse, e devido a não-linearidade do potencial matricial versus a relação do conteúdo de água

no solo. A forma e o grau de curvatura das curvas de K_s em relação a depleção da água na zona radicular são descritos pela equação 3 (Eq.3).

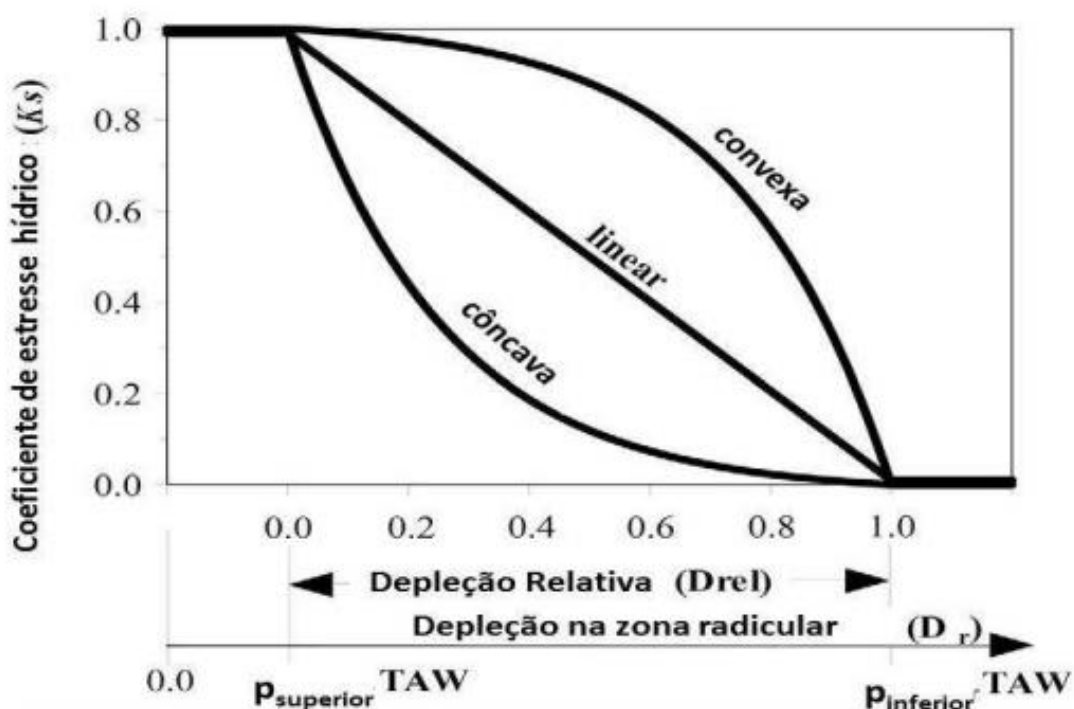


Figura 2. Redução relativa do conteúdo de água no solo em relação aos coeficientes de estresse (K_s). Fonte: Steduto et al. (2009)

$$0 \leq K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} \times f_{shape} - 1}}{e^{f_{shape} - 1}} \leq 1 \quad \text{Eq.3}$$

em que:

D_{rel} – é a depleção relativa da água no solo;

f_{shape} - fator forma da curva.

A forma da curva pode ser linear ($f_{shape} = 1$) ou convexa ($f_{shape} > 1$) e, raramente côncava ($f_{shape} < 1$). De maneira razoável, os limites e as formas destas curvas podem ser considerados conservativos para determinadas culturas (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009). Uma das principais características do AquaCrop que o distingue dos demais modelos existentes é a expressão de superfície de cultivo para transpiração (portanto, para a produção de biomassa) que utiliza a fração da cobertura do solo pelo

dossel verde (Canopy Cover (CC) – termo em inglês) e não o índice de área foliar (IAF).

Quando a cobertura do dossel (CC) é escassa, o crescimento do dossel é dependente do tamanho do dossel existente para a fotossíntese, e segue uma curva cinética de primeira ordem. A cobertura inicial do solo (CC_0) é importante na simulação porque este valor é necessário para o início do processo de crescimento do dossel. Este parâmetro é obtido pela densidade de plantas multiplicada pela área foliar de uma plântula, quando ocorre a emergência de 90% das plântulas (Hsiao, 1982). A expansão do dossel, da emergência até o desenvolvimento integral da cultura, segue uma curva do tipo sigmóide construída com função exponencial até metade da cobertura do solo (CC) e como função de decaimento exponencial para a outra metade da curva (Figura 3).

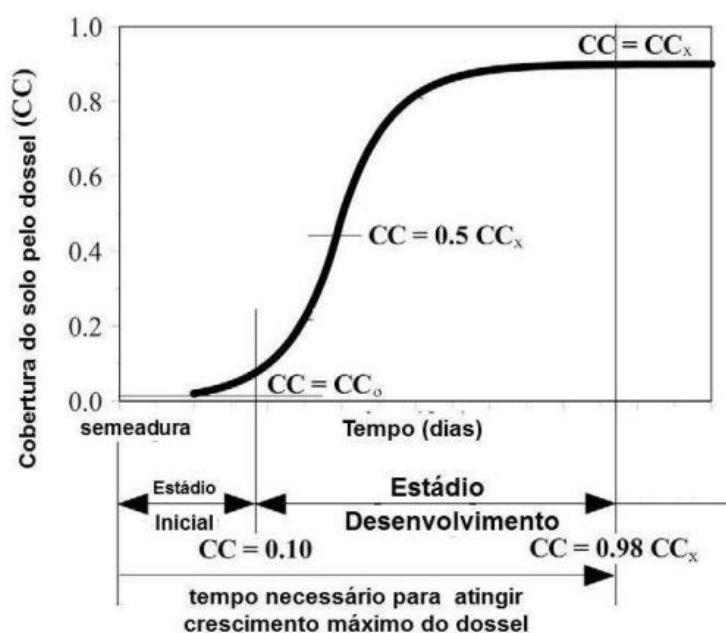


Figura 3. Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de decaimento exponencial. CC_0 e CC_x são a cobertura do dossel inicial e máxima, respectivamente. Fonte: Steduto et al. (2009)

O crescimento exponencial do dossel é esperado depois que as plântulas da cultura se tornam autotróficas e não antes, sendo que a taxa de crescimento do dossel é proporcional ao tamanho do dossel existente. Para a segunda metade da curva de crescimento, as plantas começam a sombrear

mais o solo, assim o crescimento do dossel já não é proporcional ao tamanho do dossel existente equação 4 (Eq.4).

$$CC = CCx - (CCx - CCo)x e^{-CGC t} \quad \text{Eq.4}$$

em que:

CC – cobertura do solo pelo dossel no tempo t (fração cobertura do solo);

CCo – cobertura inicial do solo no tempo t = 0 (fração cobertura do solo);

CGC - coeficiente de crescimento do dossel (aumento da fração da cobertura do solo por dia ou graus-dias);

t - tempo (dias ou graus-dias);

CCx - cobertura máxima do solo, no tempo t = ∞ (fração cobertura do solo).

A cobertura máxima ocorre em t = ∞. Durante a fase de desenvolvimento, o crescimento do dossel pode facilmente ser modulado pelo estresse hídrico, já que o crescimento foliar é muito sensível ao estresse hídrico e pode ser retardado quando apenas pequena fração da água disponível está esgotada no solo, isto é, o limite superior para o coeficiente de estresse hídrico para o crescimento expansivo () está abaixo de um valor “p”. Este efeito é calculado pela equação 5 (Eq.5).

$$CGC_{ajus} = K_{s_{exp}} \times CGC \quad \text{Eq.5}$$

Após o seu pleno desenvolvimento, o dossel pode ter uma duração variável antes de entrar na fase de senescência (Figura 4). Uma vez que a senescência começa no final do estágio de maturação, a cobertura do solo pela planta (CC) entra em fase de declínio, dada pela equação 6 (Eq.6).

$$CC = CCx \left[1 - 0,05 \left(e^{\frac{CDC}{CCx} t} - 1 \right) \right] \quad \text{Eq.6}$$

em que:

CC - cobertura do solo pelo dossel no tempo t (fração da cobertura do solo);

CCx- cobertura máxima do solo pelo dossel no início da senescência (t = 0) (fração da cobertura do solo);

CDC - coeficiente de declínio do dossel (% dia-1 ou graus-dias-1); e

t - tempo (dias ou graus-dias).

O estresse hídrico pode acelerar a senescência do dossel a qualquer momento durante o ciclo da cultura, desde que o estresse seja intenso o suficiente. Este processo é simulado através do ajuste do coeficiente de declínio do dossel (CDC) e do coeficiente de estresse hídrico para senescência, com a equação 7 (Eq.7).

$$CDC_{ajus} = (1 - K_{sen}^g) \times CDC \quad \text{Eq.7}$$

em que:

CDC_{ajus} - coeficiente de declínio do dossel ajustado em decorrência do estresse hídrico (%.dia-1 ou graus-dias-1); e

K_{sen} - coeficiente de estresse hídrico relacionado a senescência do dossel.

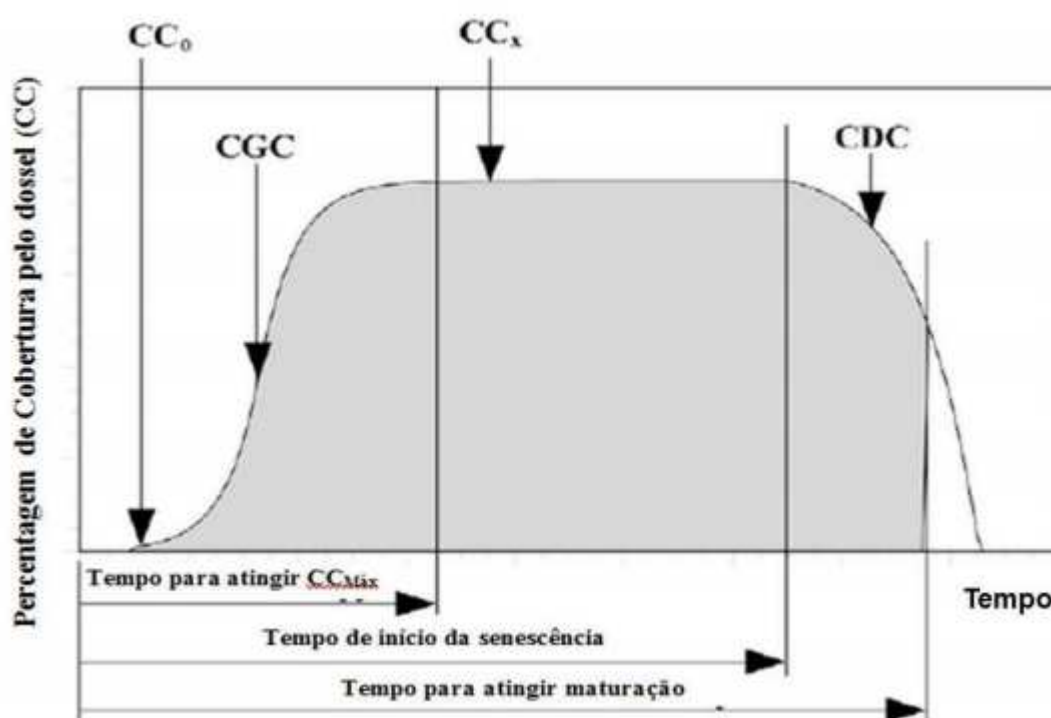


Figura 4. Exemplo da variação da cobertura do dossel ao longo do ciclo da cultura sob condições sem estresse. CC_0 e CC_x são a cobertura inicial e máxima, respectivamente. Fonte: Steduto et al. (2009)

Com o crescimento do dossel ocorre inversão na amplitude dos componentes da evapotranspiração, a transpiração (Tr) é simulada separada da evaporação do solo (E), porque a transpiração é a base para a produção de biomassa (Equação 2). Assim, a transpiração (Tr) é basicamente proporcional à porcentagem de cobertura do solo (CC) quando não há o fechamento dos estômatos induzido por algum estresse. Um ajuste é

necessário para considerar os efeitos da microadvecção nas entrelinhas e devido à cobertura parcial do solo pela cultura. O ajuste na percentagem de cobertura do solo pelo dossel (CC^*) é usado para calcular a transpiração, conforme a equação 8 e 9 (Eq.8 e 9). Na ausência de estresse hídrico, a transpiração no AquaCrop é proporcional à CC^* , dado pela equação 10 (Eq.11).

$$CC = 1,72 \times CC - CC^2 + 0,3CC^3 \quad \text{Eq.8}$$

$$Tr = (CC \times K_{C_{Trx}}) \times ET_0 \quad \text{Eq.9}$$

em que:

$K_{C_{Trx}}$ - é o coeficiente de transpiração máxima da cultura.

Após o tempo necessário para atingir a cobertura máxima do dossel e antes do início da senescência, o dossel envelhece lenta e progressivamente e sofre pequena redução na transpiração e na capacidade fotossintética. Este processo é simulado por meio da aplicação de um fator de ajuste (fage) que diminui o coeficiente de transpiração máxima da cultura ($K_{C_{Trx}}$), por uma fração constante (por exemplo, 0,3% dia⁻¹), resultando, assim uma redução no valor do coeficiente de cultura ajustado ($K_{C_{Trx}}$) (Alencar, 2009). A dinâmica do sistema radicular no AquaCrop é simulada através da profundidade máxima de enraizamento e seu padrão de extração de água do solo. A profundidade máxima de enraizamento é definida como a profundidade onde a absorção de água pelas raízes está ocorrendo, apesar de que, algumas culturas podem ter algumas raízes além dessa profundidade.

Um fator importante a ser parametrizado no modelo é a extração de água pelas raízes, seguindo o padrão de 40%, 30%, 20%, e 10% para cada 25% da profundidade máxima das raízes, começando com o quarto superior, e pode ser estabelecido pelo usuário nos casos em que diferentes padrões são inferidos, a partir de limitações físicas ou químicas do solo. O modelo realiza o balanço de água no solo, que inclui os processos de infiltração, escoamento superficial, drenagem dentro da zona radicular, percolação profunda, absorção pelas plantas, capilaridade, evaporação e transpiração.

O balanço hídrico diário mantém o controle dos fluxos de entrada e saída de água nos limites da zona radicular e da água retida dentro dela. A

dinâmica da profundidade efetiva de enraizamento do início do plantio até alcançar a profundidade máxima (Figura 5), é descrita pela equação empírica (Eq.10).

$$Z = Z_{ini} + (Z_x + Z_{ini}) x^n \sqrt{\frac{(t - \frac{t_0}{2})}{(t_x - \frac{t_0}{2})}} \quad \text{Eq.10}$$

em que:

Z – é a profundidade efetiva das raízes após o plantio no tempo t (em dias);

Z_{ini} – é a profundidade de plantio na sementeira;

Z_x – é a profundidade efetiva máxima das raízes;

t₀ – é o tempo do plantio à emergência efetiva da cultura;

t_x – é o tempo após o plantio, quando Z_x é atingido; e

n – é um fator de forma da função em graus-dias (ou dia).

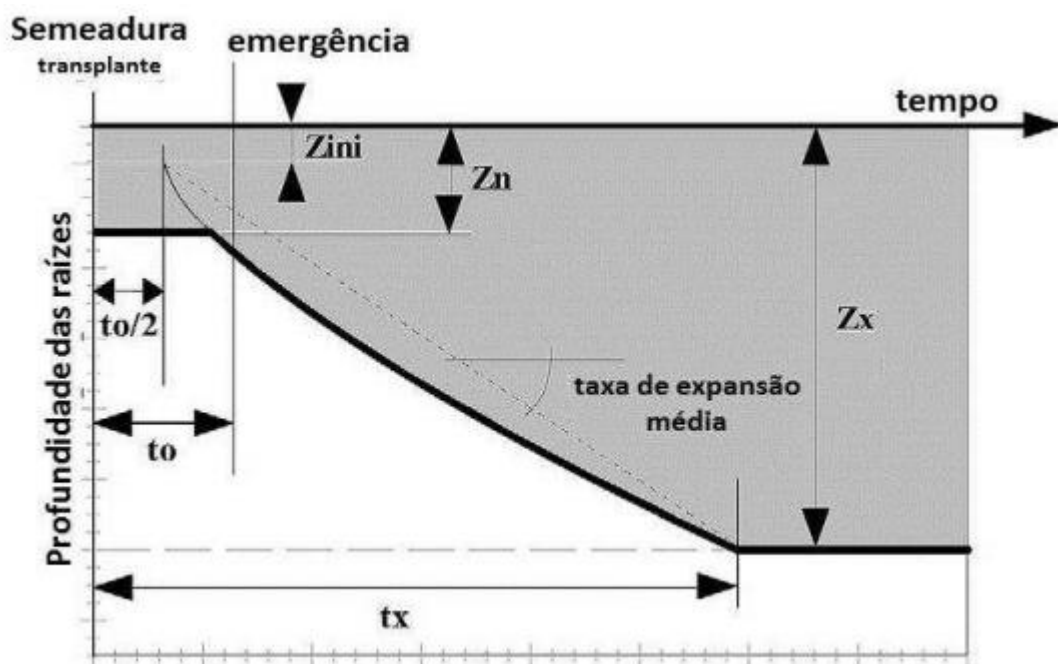


Figura 5. Representação esquemática do enraizamento profundo ao longo do tempo. Fonte: Steduto et al. (2009)

O crescimento da raiz é mais resistente ao estresse hídrico do que o crescimento foliar (HSIAO & XU, 2000), a expansão do dossel é reduzida à medida que a depleção da água no solo na zona radicular aumenta. A expansão do sistema radicular é simulada considerando a raiz enésima no

tempo, até quando a profundidade máxima de enraizamento é atingida (STEDUTO et al., 2009).

A taxa de expansão média das raízes ($dZ dt^{-1}$) é reduzida somente após a depleção da água no solo exceder o limite superior para o fechamento dos estômatos. A redução é determinada pela magnitude do coeficiente de estresse para o fechamento dos estômatos (K_{ssto}) e do fator de forma ($f_{shape} < 1$), representado pela equação 11 (Eq.11).

$$dZ_{a jus} = dZ \frac{e^{K_{ssto} - f_{shape} - 1}}{e^{f_{shape} - 1}} \quad \text{Eq.11}$$

em que:

$dZ dt^{-1}$ - taxa de expansão média das raízes;

f_{shape} - fator forma da curva; e

K_{sSTO} - coeficiente de estresse hídrico para o fechamento dos estômatos.

O componente de manejo do AquaCrop tem duas categorias principais: uma sobre o manejo no campo mais geral e o manejo da água. Na categoria campo, pode-se selecionar ou definir um nível de fertilidade do solo, restos de cultura sobre a superfície do solo, responsável por reduzir a evaporação do solo, e o uso de práticas conservacionistas para controle do escoamento superficial. O modelo AquaCrop não realiza o balanço de nutrientes, em vez disso, a parametrização é feita para vários diferentes níveis de fertilidade, tais como: sem restrição de fertilidade, média fertilidade e alta restrição da fertilidade. Estes níveis de fertilidade afetam CGC, CC, o início da senescência do dossel e taxa de declínio da cobertura do solo pelo dossel e a produtividade da água (WP).

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Realizar a parametrização e validação do modelo AquaCrop para forrageiras, de modo a torná-lo aplicável na avaliação da produtividade, em função da necessidade de água, fornecendo ferramenta importante no estudo de déficit hídrico.

3.2. Específicos

Determinar os parâmetros de ajustes do modelo;

Validar o modelo de predição de biomassa em função da disponibilidade hídrica;

T experimento de campo, avaliando a produtividade em função da lâmina de água;

Comparar a produtividade medida do experimento de campo com o modelo parametrizado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados a calibração, validação e teste do modelo de simulação do AquaCrop para pastagem, e também experimento de campo com diferentes lâminas de irrigação e medida a resposta da pastagem.

4.1 Parametrização, validação e teste do Modelo AquaCrop

A calibração do modelo e validação foi feita a partir da aquisição de dados de produção de pastagens irrigadas de experimentos.

4.1.1 Dados utilizados para a parametrização

Para a parametrização e validação do modelo para as forragens, foram utilizados dados de dois anos de experimento com pastagem irrigada. Foi utilizado com dados de entrada:

- Dados Climáticos diários
 - Temperatura máxima e mínima do ar;
 - Precipitação;
 - Evapotranspiração de referência.
- Solo
 - Umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente;
 - Densidade do solo;
 - Textura do solo (%argila).

- Irrigação
 - Lâmina de irrigação aplicada;
 - Eficiência do sistema de irrigação.
- Dados da cultura
 - Data do plantio;
 - Tipo de manejo;
 - Data de coleta da biomassa;
 - Biomassa amostrada;
 - Matéria seca;

4.1.2 Descrição das localidades

4.1.2.1 Experimento 1

O experimento foi conduzido pelos autores Carlos A. B. de Alencar, Rubens A. de Oliveira, Antônio C. Cóser, Carlos E. Martins, Fernando F. da Cunha & José L. A. Figueiredo, publicado na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Alencar et al., 2009a), conduzido de maio de 2003 a abril de 2005 e realizado na Universidade Vale do Rio Doce, localizado no município de Governador Valadares, MG, cujas coordenadas geográficas são 18° 47' 30" de latitude sul e 41° 59' 04" de longitude oeste e altitude de 223 m. As médias de precipitação e evapotranspiração potencial de referência durante os dois anos de experimento, foram de 1.064 mm e 1.277 mm, respectivamente.

O solo foi classificado como Cambissolo eutrófico de textura média, e antes da implantação do experimento foi feita a correção dos níveis de acidez e a adubação de plantio de 100 kg/ha de P₂O₅, cuja fonte foi superfosfato simples, sendo aplicado todo o fósforo no fundo do sulco. A adubação total foi de 50 kg/ha/ano de P₂O₅, 150 kg/ha/ano de K₂O e 300 kg/ha/ano de N, tendo como fontes o superfosfato simples, o cloreto de potássio e a uréia, respectivamente. As adubações potássicas e nitrogenadas foram parceladas em 6 vezes durante o ano.

A forrageira utilizada foi a *Brachiaria brizantha* e conduzido em parcelas, sendo as parcelas as lâminas de irrigação (0, 101, 252, 431, 560 e 672 mm/ano, correspondendo a 0, 18, 45, 77, 100 e 120% da lâmina de

referência, respectivamente) e nas subparcelas, as estações do ano (a estação outono/inverno compreendeu os meses de abril a setembro e a estação primavera/verão, os meses de outubro a março) no delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições.

As parcelas experimentais tinham 6 m de largura e 18 m de comprimento subdivididas em seis partes iguais, resultando em 6 x 3 m (18 m²) cada subparcela. A metodologia de variação da lâmina de água foi a do Line Source Sprinkler System descrita por Hanks et al. (1976). A lâmina de irrigação de referência foi determinada a partir de tensiômetros instalados a 15 e 45 cm de profundidade e as lâminas aplicadas medidas com pluviômetros instalados no local. Simultaneamente ao monitoramento da umidade do solo via tensiometria, dados meteorológicos diários foram coletados a partir de uma estação meteorológica automática, instalada dentro da área experimental.

O experimento foi conduzido sob manejo de pastejo e aos 45 dias após o corte de uniformização realizou-se o primeiro pastejo monitorado nas subparcelas, de maneira que o resíduo remanescente pós-pastejo apresentasse em torno de 15% de folhas verdes remanescentes, conforme Aroeira et al. (1999). Adotou-se o mesmo procedimento nas demais coletas e nos pastejos seguintes, porém com intervalo de 30 dias até o término do experimento. Os animais foram utilizados apenas como “ferramenta de corte” após a amostragem de cada gramínea, de maneira que a forragem disponível fosse consumida.

Foi feita a coleta de forragem com a finalidade de determinação da produtividade antes da entrada dos animais com auxílio de um estrutura retangular com área de 0,5 m² (1,0 x 0,5 m). Após a colheita, por meio da técnica de simulação de pastejo, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e pesadas, em seguida foi retirada uma amostra e levada à estufa afim de determinar a massa seca, as amostras permaneceram na estufa por 72 horas à 60 °C.

4.1.2.2 Experimento 2

A condução deste experimento foi realizada pelos autores Carlos Augusto Brasileiro De Alencar, Antônio Carlos Cóser, Rubens Alves Oliveira, Carlos Eugênio Martins, Fernando França Da Cunha E José Luís Aguiar Figueiredo, publicado na Revista Ciência e Agrotecnologia (Alencar et al., 2009b), durante o período de maio de 2003 a abril de 2005 e realizado na Universidade Vale do Rio Doce, localizado no município de Governador Valadares, MG, sendo as coordenadas geográficas 18º 47' 30" de latitude sul e 41º 59' 04" de longitude oeste e altitude de 223 m.

As médias de precipitação e evapotranspiração potencial de referência durante os dois anos de experimento foram de 1.064 mm e 1.277 mm, respectivamente. O solo na área experimental foi classificado como Cambissolo eutrófico, textura média, apresentando as seguintes características química: pH (H₂O) = 6,5; M.O.= 1,6 g dm⁻³; P = 6,0 mg dm⁻³; K⁺= 60 mg dm⁻³; Ca⁺² = 3,8 cmolc dm⁻³; Mg⁺² = 1,0 cmolc dm⁻³; Al⁺³ = 0,1 cmolc dm⁻³; H+Al = 4,0 cmolc dm⁻³ e V = 55%, na profundidade de 0 a 30 cm. Realizou-se adubação fosfata no sulco de plantio na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e adubação de estabelecimento de 50 kg/ha/ano de P₂O₅, 150 kg/ha/ano de K₂O e 300 kg/ha/ano de N. A adubação de N e K foi parcelada em 6 doses ao longo do ano.

O solo onde se implantou o experimento possuía 30% de argila, 25% de silte e 45% de areia, com capacidade de campo de 0,30 g/g, ponto de murcha de 0,17 g/g e densidade do solo de 1,38 g/cm³. O experimento foi conduzido em esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas a gramínea (*Brachiaria brizantha* cv. Xaraés) e nas subparcelas as lâminas de irrigação (0, 95, 236, 404, 525 e 630 mm ano⁻¹, correspondendo a 0, 18, 45, 77, 100 e 120% da lâmina de referência, respectivamente), no delineamento inteiramente casualizado com duas repetições.

As parcelas experimentais tinham 6 m de largura e 18 m de comprimento. As parcelas foram subdivididas em seis partes iguais, resultando em subparcelas de 6 x 3 m (18 m²). As lâminas de água foram originadas das diferentes distribuições de água na direção perpendicular à tubulação com os aspersores. Para isso, foi utilizado o sistema de irrigação

por aspersão com distribuição dos aspersores em linha (Line Source Sprinkler System), conforme HANKS et al. (1976). A lâmina de irrigação de referência (100%) foi determinada por meio do monitoramento do potencial de água no solo feita por tensiômetro digital instalado a 15 e 45 cm de profundidade. As irrigações foram efetuadas quando os tensiômetros instalados a 15 cm registraram valores de potencial matricial em torno de -60 kPa. A lâmina de irrigação aplicada foi medida com pluviômetros instalados em cada subparcela experimental.

Simultaneamente ao monitoramento da umidade do solo via tensiometria, foram coletados dados meteorológicos diários a partir de uma estação meteorológica automática, instalada dentro da área experimental. O experimento foi conduzido sob manejo de corte, as coletas de forragem foram realizadas com intervalos de 50 dias e a altura de corte foi de 20 cm do nível do solo. A obtenção da produtividade de matéria seca (MS) foi feita de forma manual, em uma área delimitada por uma unidade amostral metálica, de forma retangular e com o tamanho de 1,0 x 0,5 m (área útil de 0,5 m²). A unidade amostral foi posicionada em locais predeterminados, evitando-se coletar amostras sucessivas nas mesmas áreas. Toda a massa verde colhida foi acondicionada em sacos plásticos, devidamente identificados, e imediatamente pesada. Em seguida foi retirada uma subamostra, novamente pesada, acondicionada em saco de papel identificado, e colocada para secar em estufa com circulação de ar a 60 °C, por um período de 72 horas. Após secagem, as subamostras foram pesadas novamente para obtenção do teor de matéria seca (TMS) e produtividade de MS.

4.1.3 Parametrização do Modelo AquaCrop

A parametrização do modelo envolve operações de ajuste e comparação, entre os dados simulados e reais, obtendo-se melhores índices estatísticos. Foi utilizado o Experimento 1 para a parametrização do modelo. Alguns parâmetros do AquaCrop são conservativos, assumindo valores aplicáveis para a grande maioria das culturas, e outros são específicos de cada cultivar. A Tabela 3 apresenta os parâmetros que serão utilizados no modelo AquaCrop.

Tabela 3. Parâmetros à serem utilizados para parametrização do modelo AquaCrop

Símbolo	Parâmetro
Limites de temperatura do ar	
T_{base}	Temperatura basal (°C)
T_{upper}	Temperatura máxima limite (°C)
Desenvolvimento do dossel	
	Superfície do solo coberta por um indivíduo na emergência de 90% das plântulas (cm ² /planta)
	Números de plantas por hectare
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel (fração da cobertura do solo por dia ou graus dia)
CCx	Cobertura máxima do solo pela cultura (%)
	Tempo do plantio até o início da senescência (dias ou graus dias)
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (fração da cobertura do solo por dia ou graus dias)
	Tempo da semeadura até a maturação, ex ciclo da cultura (dias ou graus dias)
Desenvolvimento da zona radicular	
Z_n	Profundidade efetiva mínima das raízes (m)
Z_x	Profundidade efetiva máxima das raízes (m)
-	Fator forma da curva de crescimento das raízes
-	Tempo da semeadura até atingir a profundidade máxima das raízes (dias ou graus dias)
Transpiração da cultura	
K_{cbx}	Coefficiente de cultura quando o dossel está completo, mas antes da senescência
f_{age}	Declínio do coeficiente de cultura (%/dia) como resultado do envelhecimento, a deficiência de nitrogênio, etc
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no final do ciclo
Produção de biomassa	
WP	Produtividade de água da cultura normalizada para a ET _o e CO ₂ (g/m ²)
Índice de colheita	
HI_o	Índice de colheita de referência
Estresse hídrico	
p_{exp,upper}	Limites da depleção da água no solo para a expansão do dossel – Limite superior
p_{exp,low}	Limites da depleção da água no solo para a expansão do dossel – Limite inferior
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel
p_{sto}	Limite da depleção da água no solo para controle estomático – Limite superior

Tabela 6. Parâmetros à serem utilizados para parametrização do modelo AquaCrop (continuação)

-	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para o controle estomático
p_{sen}	Limites da depleção da água no solo para a senescência do dossel – Limite superior
-	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel
Estresse devido a fertilidade do solo	
Calibração	
Estresse devido a temperatura do ar	
-	Mínimo de graus-dias necessários para a produção de biomassa total ($^{\circ}\text{C-dia}$)

Para obtenção do valor de temperatura basal será considerado inicialmente os valores comumente encontrados na literatura. Este parâmetro tem influência direta na produção de biomassa. Assim, por tentativa e erro será comparada a produção de biomassa seca simulada com aquela observada ao longo do ciclo da cultura. O modelo AquaCrop trabalha com uma temperatura basal constante ao longo do ciclo da cultura.

Serão separadas as localidades de coleta de dados em dois grupos, destinados à calibração e outro grupo destinado à validação dos parâmetros

4.1.4 Validação do Modelo AquaCrop

Foram comparados os dados obtidos do modelo parametrizado com os dados observados, obtendo assim a comparação dos dados simulados com os observados. Serão utilizados os índices estatísticos: raiz do erro quadrático médio (REQM) (Eq.12), o coeficiente de determinação (R^2) (Eq.13), o índice de concordância de Willmontt (d) (WILLMONT, 1982) (Eq.14), o índice de eficiência (E) (Eq.15), coeficiente de correlação de Pearson (r) (Eq.16) e o índice de desempenho (c) (CAMARGO & SENTELHAS, 1997) (Eq.17).

$$\text{REQM} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq.12}$$

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)} \quad \text{Eq.13}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad \text{Eq.14}$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Eq.15}$$

$$r = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]}{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)} \quad \text{Eq.16}$$

$$c = d r \quad \text{Eq.17}$$

em que:

P_i – valores simulados pelo AquaCrop;

O_i - valores observados;

n - número de observações;

O - é a média dos valores observados;

P - é a média dos valores simulados.

4.2 Experimento de Campo

A pesquisa foi conduzida na área experimental de irrigação e drenagem pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. De acordo com a Köppen o clima é classificado como Cwa, com 20.6 °C de temperatura média anual e 1229 mm de pluviosidade média anual. O solo é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 2006). Foi utilizada a gramínea *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.

As características físico-hídricas do solo, onde foi instalado o experimento, estão descritas na Tabela 4. A média da capacidade real de armazenamento de água no solo (CRA) é de 64,8 mm (considerando profundidade efetiva do sistema radicular de 60 cm e fator f de 0,5), indicando um solo com alta capacidade de armazenamento de água e com isto os turnos de rega foram de aproximadamente 12 a 20 dias, variando em função do

clima. Durante todo o experimento foram realizadas 22 irrigações, totalizando 520,8 mm.

Tabela 4. Características físico-hídricas do solo onde foi realizado o experimento

Profundidade	CC	PMP	Ds	CTA	CRA
0-20	41,8	21,0	1,3	162,2	64,9
20-40	42,0	21,0	1,3	163,8	65,5
40-60	42,3	21,8	1,3	159,9	64,0

CC – Capacidade de campo; PMP – Ponto de Murcha Permanente; Ds – Densidade do solo; CTA – Capacidade total de armazenamento; CRA – Capacidade real de armazenamento.

Os tratamentos consistiram de 4 lâminas de irrigação (L1, L2, L3 e L4) e uma parcela sem irrigação (L0). O delineamento experimental foi em faixa com quatro blocos. A distribuição gradual da lâmina de irrigação nas parcelas, da maior lâmina (L4) à menor lâmina (L1), foi obtida por um sistema de aspersão em linha, com aspersores da marca Seninger (Modelo 5023-2 com duplo bocal), operando com pressão de 27,5 mca, com diâmetro de molhado de 33,8 m e vazão de 3,589 m³/h, de acordo com o catálogo do fabricante. Antes da implantação do sistema de irrigação foi realizado testes com coletores de precipitação para determinar o fator de distribuição do precipitado obtendo a lâmina de irrigação à aplicar em cada tratamento. Além disto foram calculados o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Coeficiente de Uniformidade de Distribuição de água (CUD). Para que se garanta a uniformidade de aplicação das lâminas em cada tratamento as irrigações foram realizadas somente quando a velocidade do vento era menor que 1,5 m/s, de acordo com a recomendação da ABNT para avaliação de sistemas de irrigação por emissores rotativos.

A variação de lâminas do experimento foi realizada através do line source sprinkler system, o espaçamento entre emissores foi de 6m para garantir maior sobreposição de lâminas e maior eficiência de irrigação, a determinação do tamanho das parcelas experimentais foi realizado através do teste de lâminas, utilizando coletores de 8 cm de diâmetro de coleta e hastes

para instalação destes coletores a 70 cm de altura em relação ao solo (Figura6).



Figura 6. Avaliação da lâmina de irrigação e uniformidade de distribuição de água.

Foram distribuídos os quatro tratamentos em faixa com 4 repetições, na área irrigada e mais um tratamento sem irrigação, fora da área irrigada, com 4 repetições. O manejo da irrigação foi realizado através da evapotranspiração de referência, calculada pelo método de Penman Monteith e amostragem do solo, para determinação da umidade, em cada tratamento, determinando a lâmina a ser aplicada.

A Figura 7 apresenta a distribuição dos tratamentos feita através do resultado do teste das lâminas. No centro da área as lâminas não tiveram um padrão de aplicação e a uniformidade de aplicação foi abaixo de 70%, não utilizando esta área, os demais tratamentos apresentaram uniformidade de aplicação de 98%. Foram utilizados 5 aspersores em todas as irrigações.

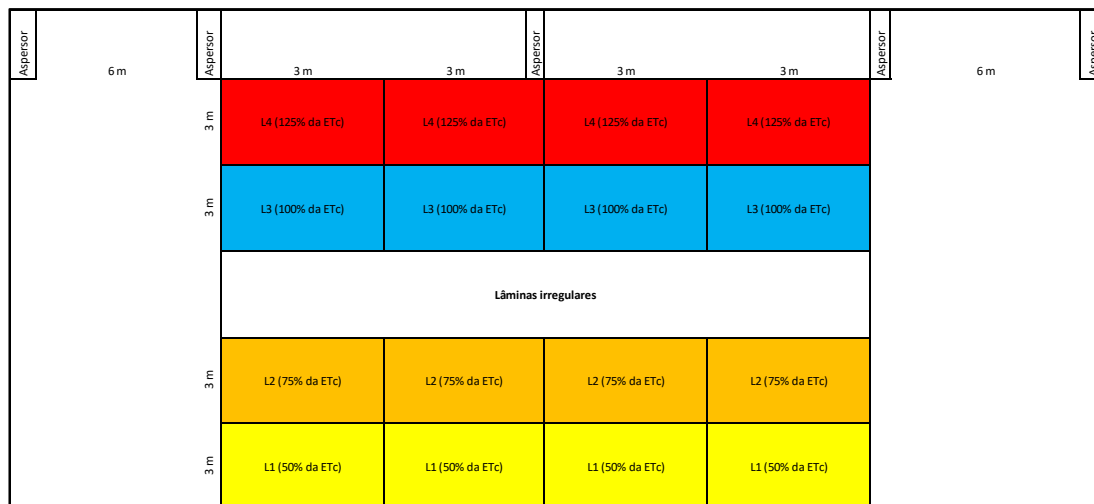


Figura 7. Distribuição da irrigação e dos tratamentos em campo.

A irrigação foi realizada com turno de rega variável, considerando a capacidade de armazenamento de água do solo e a evapotranspiração de cultura (ETc). A capacidade de retenção de água do solo foi determinada por meio do método de laboratório, com a utilização da câmara de Richards (RICHARDS, 1965) no laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. A ETc foi calculada conforme a metodologia proposta por BERNARDO et al. (2006), sendo necessário para o cálculo a evapotranspiração de referência (ETo), o Kc da cultura e o Ks. A ETo foi calculada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), o foi adotado um Kc da cultura fixo para a fase de produção, que conforme o boletim FAO-56 é de 0,85, o Ks é a frequência de molhamento obtida com o turno de rega. As lâminas corresponderam a sem irrigação (L0), L1 = 0,5; L2 = 0,75; L3 = 1,00 e L4 = 1,25 da ETc. Os dados meteorológicos diários foram coletados por uma Estação Meteorológica Automática instalada na área experimental.

O tamanho de cada parcela foi definido após à avaliação da precipitação dos aspersores, e as amostras de produtividade serão retiradas no centro desta parcela de forma aleatória. O plantio da forragem foi realizado 180 dias antes do início do experimento garantindo o estabelecimento da gramínea.

Foi realizada antes da implantação do experimento a correção da fertilidade do solo, pH e alumínio tóxico. A adubação de manutenção para o

capim Marandu foi a mesma para todos os tratamentos, sendo definida para uma produtividade esperada de 40 toneladas de matéria seca por hectare por ano, segundo Andrade & Drumond (2012) para esta produtividade esperada, considerando a extração de nutrientes da cultura e a utilização de irrigação, foram aplicados 560 kg/ha/ano de Nitrogênio, 76 kg/ha/ano de Fósforo, 280 kg/ha/ano de Potássio e 80 kg/ha/ano de Enxofre, sendo esta adubação será dividida em 12 vezes, realizada uma adubação no início de cada ciclo.

Os cortes foram feitos em datas fixas, adotando um período de crescimento médio de 28 a 32 dias. A determinação de produtividade da forragem foi realizada através da avaliação dos parâmetros, Massa de Forragem (MF), Taxa de Acúmulo de Forragem (TAF), Capacidade de Suporte (CS) e Densidade Média da Massa de Forragem (DMF) (Drumond & Aguiar 2005).

Os cortes foram feitos à 15 cm do solo em moldura quadrada de 0,25 m² (0,5 X 0,5 m) arremessada de forma aleatória em cada parcela (DRUMOND & AGUIAR, 2005). A massa coletada dentro da área da moldura quadrada foi acondicionada em sacos plásticos e levada ao laboratório para a pesagem da matéria original em balança de precisão. Posteriormente, retirada uma amostra de 100 g de material fresco e acondicionadas em sacos de papel para determinação da matéria seca da forragem, através da secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C até peso constante. Após a coleta destes dados foram calculadas todas as variáveis estudadas conforme DRUMOND & AGUIAR (2005) e submetidos a análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade, posteriormente análise de regressão e teste de médias.

Após a coleta dos dados, os tratamentos foram homogeneizados com o auxílio de uma roçadora manual a uma altura de 15 cm para o início de um novo ciclo, retirando a forragem cortada de dentro das unidades experimentais para evitar o acúmulo de palhada em cima da área submetida à avaliação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parametrização do modelo AquaCrop

5.1.1 Dados Climáticos

Para a parametrização foi utilizado os dados de produtividade do Experimento 1, os dados climáticos de entrada estão apresentados nas Figuras 8 e 9. Observamos que as temperaturas máximas e mínimas variaram de 30 a 25°C e 12 a 21°C, respectivamente, com isto o modelo foi parametrizado para simular a produtividade de biomassa da forrageira na faixa de temperatura de 12 a 30°C, abrangendo assim vários tipos de clima.

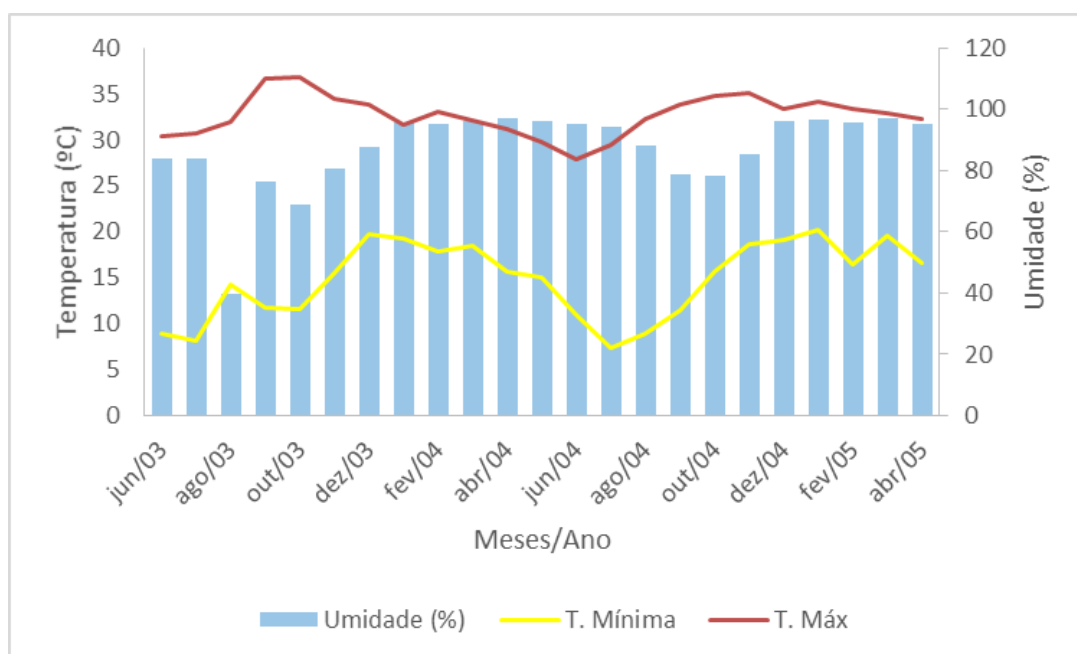


Figura 8. Variação mensal da umidade relativa (%), Temperatura mínima e máxima (°C), no período de junho de 2003 a abril de 2005.

A temperatura ótima para o desenvolvimento das gramíneas tropicais está entre de 25 a 35°C (GOMIDE, 1993), sendo que em temperaturas abaixo de 15°C a maioria das pastagens cultivadas cessam seu crescimento, causando queda na produção de matéria seca. No Brasil diversas regiões produtoras apresentam temperaturas abaixo de 15°C em alguns meses do ano e associado a isso temos a baixa intensidade luminosa e insolação. Um modelo ideal deverá ser capaz de simular a produtividade das forragens em

condições adversas, fornecendo dados para tomada de decisão em climas adversos (LIMA FILHO et al., 2013).

Um dos grandes desafios da produção das culturas é a distribuição irregular das chuvas, como exposto na Figura 9, as chuvas se concentraram nos meses de outubro a março, propiciando grande variação nas condições de umidade do solo para o cultivo em sequeiro. Segundo Moura et al. (2018), os elementos climáticos, principalmente a precipitação pluviométrica apresentam grande variabilidade espacial e temporal, causando a principal incerteza no planejamento agropecuário, principalmente quando se relaciona à água disponível no solo, sendo sua falta ou excesso no solo. A chuva é responsável por grande parte da influência na fotossíntese e produção vegetal, desde o plantio até a colheita (BASTOS et al., 1993)

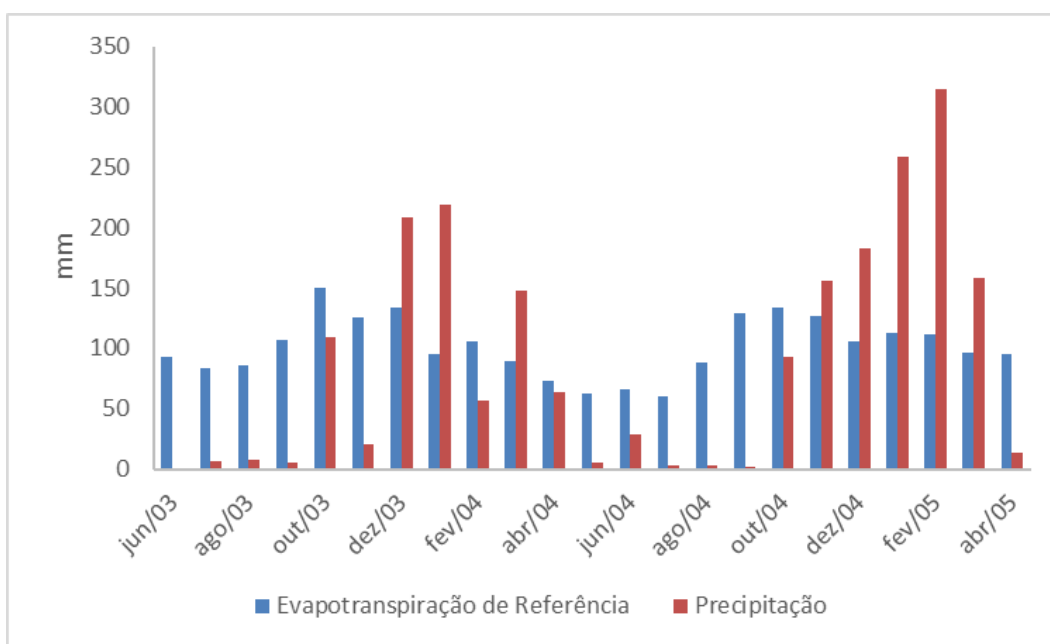


Figura 9. Variação mensal da evapotranspiração de referência (ETo)(mm) e da precipitação pluvial (mm), no período de junho de 2003 à abril de 2005.

Ainda segundo a Figura 9, a evapotranspiração de referência teve variações durante os meses do ano, influenciada pelas diferentes temperaturas, umidades relativas, radiações e velocidades do vento. O maior valor de ETo foi observado no mês de outubro do ano de 2003, com um total de 150mm e 5mm/dia de média e o menor valor foi encontrado no mês de julho do ano de 2004, com um total acumulado de 60mm e média diária de

2mm/dia. Como o modelo foi parametrizado com duração de 40 dias, essas variações foram consideradas e afetaram diretamente nos parâmetros do modelo, tornando confiável para aplicação nesta faixa de demanda hídrica.

Dantas (2007) avaliou diversos modelos aplicados a sistemas agrícolas e a maioria dos modelos analisados não possuíam grande variedade e quantidade de dados de entrada, prejudicando assim os dados de saída e com isto não sendo confiáveis para a utilização para predição de produtividade ou impactos a mudanças climáticas.

Para o crescimento e desenvolvimento das plantas, em resumo, é necessário que se tenha o mínimo de nutrientes no solo, água e luminosidade, com isto pode-se observar que a maioria dos meses dos anos observados a quantidade evapotranspirada foi maior que a quantidade total de chuvas e analisando os dados diários, observa-se que a quantidade total de precipitação foi mal distribuída dentro do mês. O mês de fevereiro de 2005 foi o mês mais chuvoso do período avaliado, com total de 298,9 mm, sendo que 124,9mm foi medido na primeira semana do mês, com isto a quantidade de precipitação aproveitada e armazenada no solo foi abaixo da quantidade de chuva.

Tonato et al. (2010) desenvolveu modelos preditores do acúmulo de forragens tropicas e ao analisar a influência de temperatura e radiação nos modelos das diversas espécies de gramíneas, chegaram à conclusão que todos as variáveis influenciaram significativamente todos os modelos propostos, destacando a maior interação com a radiação. O modelo AquaCrop não possui como variável de entrada a radiação solar, sendo este um importante variável quando se estuda a produtividade de pastagem, porém esta variável está incluída no cálculo da evapotranspiração de referência, considerando assim indiretamente a influência da radiação na produtividade de biomassa.

5.1.2 Parametrização do modelo AquaCrop

A parametrização foi realizada com os dados obtidos no Experimento 1, onde foram coletados dados de produtividade a cada 40 dias em cada tratamento, totalizando assim 7 ciclos de coleta. Como se observa na

descrição do Experimento 1 e 2, os autores avaliaram mais ciclos do que os utilizados na parametrização, porém alguns ciclos não possuíam dados climáticos completos e em alguns não eram claros os dados de irrigação e com isto não foram usados para a parametrização.

Os parâmetros utilizados para parametrização e obtidos posteriormente, do modelo AquaCrop para forrageiras estão apresentados na Tabela 7, sendo os parâmetros mais determinantes utilizados a temperatura basal e temperatura máxima (T_{base} e T_{upper}); o coeficiente declínio do dossel (CDC); Coeficiente de redução do coeficiente de cultura para transpiração (f_{age}); coeficiente de cultura para a transpiração com dossel completo (K_{cbx}); limites de depleção da água no solo para a inibição do crescimento foliar, da condutância estomática e da senescência do dossel. Emdad et al. (2018) avaliando a produtividade de grãos com o modelo AquaCrop durante 5 anos, observaram que os parâmetros que mais influenciaram o modelo durante a parametrização foram os mesmos utilizados neste presente trabalho, apenas com o acréscimo do parâmetro de entrada da diferenciação foliar para floração, não sendo este importante para produtividade de biomassa em pastagens.

São escassos os trabalhos de modelagem do crescimento e produtividade de pastagem no Aquacrop, portanto inicialmente foram utilizados parâmetros encontrados na literatura e para aqueles que são exclusivos para entrada no modelo utilizando-se modelos de cana de açúcar, milho e sorgo. Após a definição dos parâmetros iniciais, foram feitas várias simulações e comparações com os valores obtidos em campo, encontrando assim os valores dos parâmetros que abrangeram a grande maioria dos dados medidos. A parametrização obteve os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros do modelo AquaCrop para forrageiras

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade ou Significado
T _{base}	Temperatura basal	12	°C
T _{upper}	Temperatura máxima	32	°C
-	Área foliar por plântula na emergência de 90%	5	(cm ²)
K _{c Tr}	Coeficiente de cultura para transpiração quando CC=100%	1,1	Transpiração em relação à ETo quando dossel está completo
CDC	Coeficiente de declínio do dossel	0,08	Redução na CC relativo a CCx (%.dia ⁻¹)
f _{age}	Coeficiente de redução do coeficiente de cultura para transpiração	0,4	Declínio em função do envelhecimento foliar
p _{exp, upper}	Limite da depleção da água no solo para expansão do dossel – Limite superior	0,25	Acima deste limite o crescimento foliar não é inibido
P _{exp, lower}	Limite da depleção da água no solo para expansão do dossel – Limite inferior	0,55	A expansão foliar cessa neste valor
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	3	
p _{sto}	Limite da depleção da água no solo para controle estomático – Limite superior	0,5	Acima deste limite não ocorre fechamento dos estômatos
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para o fechamento estomático	3	
p _{sen}	Limite da depleção da água no solo para a senescência do dossel – Limite superior	0,85	Acima deste limite não ocorre senescência das folhas
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	3	
-	Fator forma da curva de crescimento do sistema radicular	15	

O método de tentativa e erro é o mais usual no caso de parametrização e após realizar sucessivas simulações e comparações com os valores medidos é necessário ainda o teste de comparação entre os valores e assim a validação destes parâmetros (Sales et al., 2018).

Há várias cultivares de *Brachiaria* sp. cultivadas e os parâmetros conservativos do AquaCrop devem abranger a maioria das cultivares que possuem diferenças quanto a resistência a estresses hídricos, pragas, entre outros. Essas diferenças são geralmente pequenas e espera-se que os parâmetros conservativos da cultura, possam ser amplamente aplicáveis sem calibração para cada cultivar (HSIAO et al., 2009). Os valores da temperatura basal e temperatura máxima encontram-se dentro dos limites sugeridos na literatura pois, abaixo de 15°C a forrageira cessa ou reduz seu crescimento e metabolismo, diminuindo assim sua produtividade (SANTOS et al., 2009). Neste sentido, este valor foi usado como partida para a parametrização, porém, ao se fazer as simulações a temperatura basal que mais se aproximou da produtividade medida foi de 12°C, como as simulações foram feitas em temperaturas mínimas de 12°C, esta temperatura é aplicável no modelo. O coeficiente do fator forma que descreve o estresse hídrico refere-se à aclimação da cultura ao estresse, desta forma, quanto maior o valor, maior sua resistência ao estresse hídrico.

O módulo de pastagem do AquaCrop foi retirado do software em 2015, pois este apresentava uma série de problemas de simulação e obtenção de parâmetros confiáveis (AGP - INFORMATION RESOURCES, FAO, 2019), com isto a parametrização do modelo foi feita considerando o plantio em cada ciclo e utilizando o resíduo da cultura no solo para que simulassem os ciclos da cultura perene.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores parametrizados no módulo projeto do AquaCrop, que fixa os valores dos parâmetros e variam-se as condições de clima, irrigação e data de plantio. Grande parte dos parâmetros da Tabela 5, estão apresentados na Tabela 6, porém alguns deles podem ser modificados apenas no arquivo com a extensão “.CRO” do AquaCrop, o qual é parametrizado para uma cultura específica, em função de suas características morfológicas e genéticas. Os módulos utilizados na parametrização foram o clima (dados de temperatura, evapotranspiração e precipitação), Crop (desenvolvimento da cultura, resposta a estresse hídrico, nutricional e salinidade, resposta a variação de água no solo e temperatura do ar, dentre outros), irrigação (quantidade e datas das irrigações, método de irrigação utilizado e eficiência do sistema), field (fertilidade do solo, cobertura

do solo, práticas de conservação do solo e manejo de plantas daninhas), soil profile (perfis do solo com as devidas capacidade de retenção de água) e initial conditions (determinação das condições iniciais de cada ciclo da cultura). O modelo faz o preenchimento das temperaturas e irrigações caso os dados de entrada não tenham estas informações.

Tabela 6. Valores parametrizados no módulo Projeto do AquaCrop*.

Parâmetro	Valor	Unidade
CROP		
Evaporation decline fator for stage II	2	
Ke(x): Soil evaporation coefficient for fully wet and non-shaded soil surface	1,25	
Threshold for green CC below which HI no longer increase	10	%
Starting depth of root zone expansion curve	40	% of Zn
Maximum allowable root zone expansion	5,00	cm/day
Shape factor for effect of water stress on root zone expansion	-6	
Required soil water content in top soil for germination	20	%TAW
Adjustment factor for the FAO-adjustment by ETo of the soil water depletion thresholds (p)	0,5	
Number of days at wich the deficient aeration conditions in the root zone are fully effective	4	days
Exponent of senescence factor adjusting the drop in photosynthetic activity of a crop losing its green canopy	0,50	
Decrease of p(senescence) once early canopy senescence is triggered	12	%
Thickness top soil in which soil water depletion has to be determined	10	
FIELD MANAGEMENT		
Depth of soil profile from which water can be extracted by soil evaporation	15	Cm
SOIL		
Considered depth of soil profile for calculation of mean soil water content for CN adjustment	0,50	m
Adjustment CN to Antecedent Moisture Class	No	
Salt Difusion factor	5	%
Salt solubility	100	g/liter
Shape factor for effect of soil water content gradient on capillary rise	16	
CLIMATE		
Default minimum temperature if no temperature file is specified	12	°C
Default maximum temperature if no temperature file is specified	32	°C
Method number for the calculation of growing degree days	3	

*Tabela em inglês para facilitar a substituição dos valores no software.

Neste modelo, as condições iniciais foram de extrema importância, visto que o modelo não simula ciclos de corte e crescimento, e com isso as condições iniciais foram determinadas para que o modelo simulasse um alto resíduo ao final do modelo, mas não comprometendo a produtividade. Na Figura 10 está apresentada a tela inicial do software para realização da simulação.

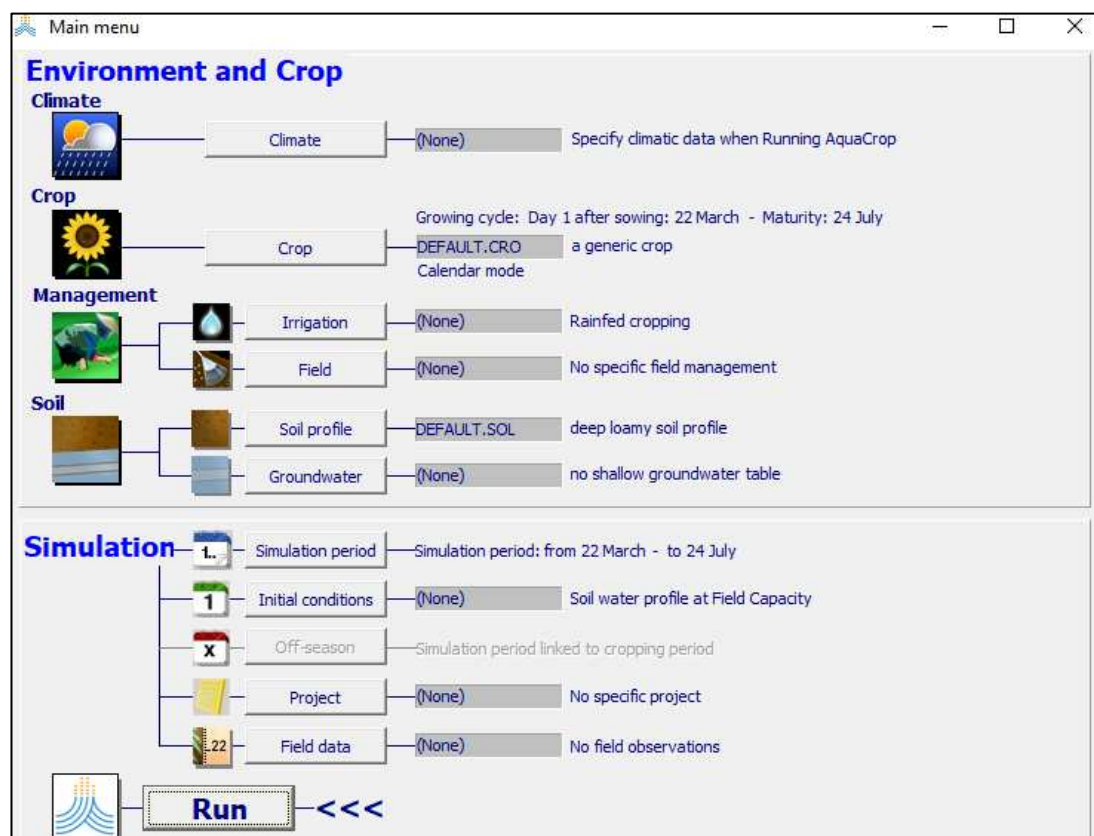


Figura 10. Tela inicial do AquaCrop para entradas dos arquivos nos módulos.

5.3 Produtividade de Biomassa Seca

5.3.1 Parametrização do modelo

Um dos principais fatores que se procura com a parametrização de um modelo é a produtividade. Para pastagens, tem-se a produção de biomassa seca, o resultado mais importante para o planejamento de colheita para feno ou pastejo. Na Figura 11 estão contidos os valores observados (medidos em campo) e os valores estimados pelo modelo após a parametrização. Foram utilizadas todas as lâminas para se fazer a parametrização, visando a obtenção de um modelo mais confiável. Segundo

Andrade et al. (2012a) e Jagtap et al. (1998) a parametrização deve ser feita a partir dos dados coletados da cultura em sequeiro e a cultura irrigada sem déficit hídrico e com isto poder estimar com confiança a produtividade. Porém, no presente trabalho foi realizado com todas as lâminas, possuindo assim mais variações para a modelagem, totalizando 42 dados simulados e medidos para a comparação.

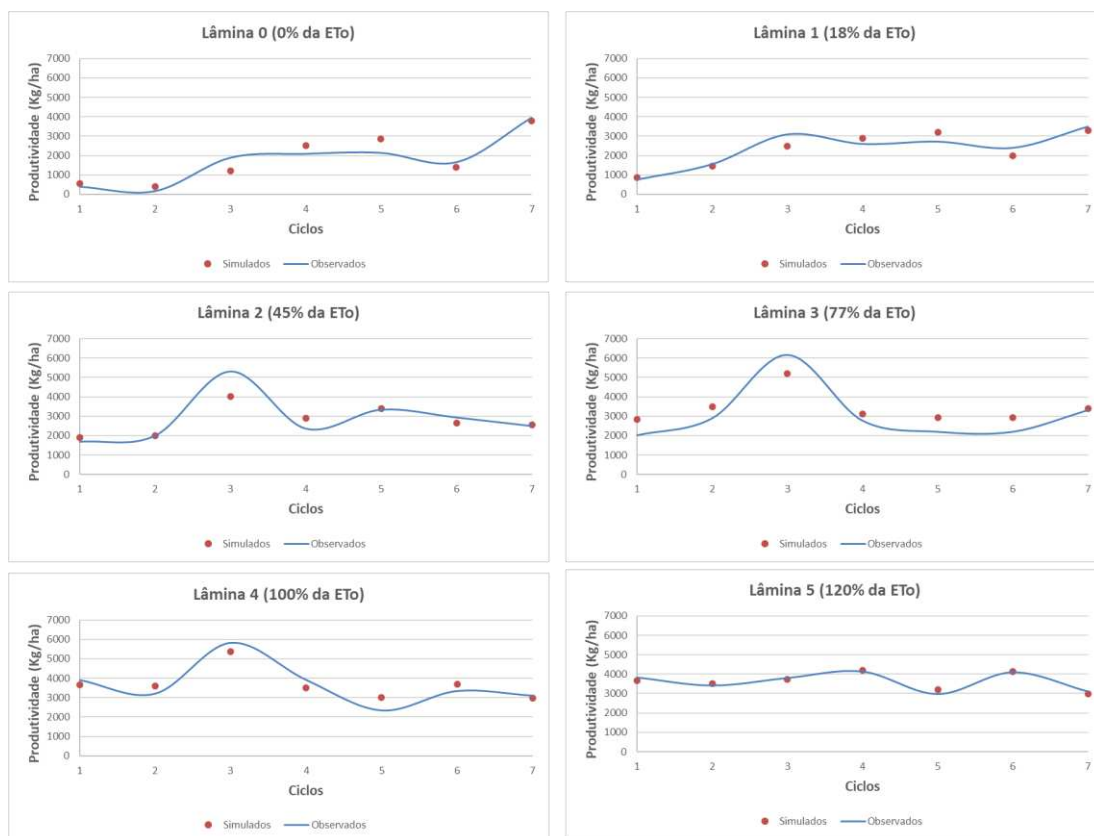


Figura 11. Produtividade de matéria seca dos ciclos para as lâminas de irrigação L0, L1, L2, L3, L4, L5, na parametrização do modelo

A maior diferença na parametrização foi encontrada na lâmina 2 (45% da ETo), apresentando uma diferença de 1290 kg/ha, considerando todas as simulações desta lâmina, sendo o valor simulado inferior ao observado, isto pode ser devido à alguma diferenciação amostral ou de adubação visto que todos as outras simulações foram próximas às observadas. Outro fator a ser observado é o resíduo deixado após a simulação de pastejo pois, se este resíduo for maior ou menor em algum local do experimento pode ocorrer diferenças anormais na produtividade de biomassa (SALES et al., 2014; CARVALHO et al., 2014; CARDOSO et al., 2019).

O comportamento do modelo não seguiu um padrão durante as simulações, obtendo valores acima e abaixo dos observados, isto se deve ao fato das diversas variáveis de entrada e sua interação (temperatura, evapotranspiração, irrigação, solo, etc.). Porém analisando os gráficos da Figura 11, o comportamento dos dados simulados está acompanhando os dados observados, mostrando tendência de resposta do modelo aos fatores climáticos assim como em campo, diferenças existem devido ao método de obtenção dos dados de campo, que foram obtidos através de pastejo.

Outro fator a se analisar é o aumento da produtividade com irrigação, atingindo os picos de produtividade na lâmina 3 e lâmina 4 (77 e 100% da ETo, respectivamente) e o comportamento com a variação do clima durante os anos.

Considerando os 7 ciclos utilizados para a parametrização, a Tabela 8 apresenta os totais de produtividade de biomassa seca observados e simulados. A maior diferença é observada no tratamento L3, que se evidenciou também na Figura 11, sendo que no ciclo 3 a produtividade simulada pelo modelo foi de 4001 kg/ha e a medida em campo foi de 5300 kg/ha, os outros tratamentos mostraram pequenas diferenças comparando os somatórios. Algumas diferenças entre os ciclos podem ser explicada pelo resíduo de adubação do ciclo anterior, principalmente nos tratamentos que tinha irrigação abaixo de 100% da ETo. Devido à restrição do crescimento pelo déficit hídrico o excesso de alguns nutrientes são acumulados no solo e utilizados nos outros ciclos, como alguns apresentaram precipitação acima da demanda, produziram mais em função do resíduo de adubação encontrado. Fato este também observado por Costa et al. (2016) avaliando níveis de adubação em capim massai, e sua resposta em eficiência de uso do nitrogênio, morfogênese e produção de forragem.

Tabela 8. Totais de produtividade de matéria seca (ton/ha) dos 7 ciclos utilizados para a parametrização do modelo AquaCrop.

	L0	L1	L2	L3	L4	L5
Observada	12,38	16,60	20,08	21,62	25,64	25,37
Simulada	12,69	16,20	19,41	19,41	25,83	25,44

Foi realizada a comparação entre as médias de cada ciclo para a validação do modelo e apresentados na Tabela 7. A raiz da diferença média entre os valores observados e simulados, medidos pelo índice RQME, teve menor valor para o tratamento L5, como em alguns ciclos os valores simulados possuíam diferença, comparados com os valores observados, esse índice obteve valores acima dos outros na parametrização.

Tabela 7. Parâmetros estatísticos utilizado para comparação entre os dados observados e simulados, na parametrização

	RQME	r	d	c	R²	E
L0	0,43	0,9	0,99	0,93	0,87	0,86
L1	0,37	0,9	0,99	0,90	0,83	0,82
L2	0,55	0,9	0,98	0,91	0,86	0,76
L3	0,66	1,0	0,97	0,96	0,98	0,75
L4	0,41	0,9	0,98	0,92	0,88	0,84
L5	0,12	1,0	1,00	0,95	0,92	0,92

As maiores diferenças entre observados e simulados estão no ciclo 3, em que todos os tratamentos apresentaram valores simulados maiores que os observados (0,7; 0,62; 1,29; 0,96 e 0,66, para L0, L1, L2, L3, L4 e L5, respectivamente). Os valores de RQME evidenciam que o modelo não apresenta boa exatidão, apesar dos outros índices estarem dentro do ideal. A utilização do RQME é realizada por diversos autores para parametrizar modelos e, principalmente no modelo AquaCrop, são encontrados valores que indicam baixa exatidão do modelo (ALENCAR, 2014; RAZZAGHI et al., 2017), além disto a modelagem de pastagem é feita para o ano todo, sendo considerada uma cultura de produção perene, sendo feita várias colheitas durante o ano e em todas as estações do ano.

Alencar (2014) parametrizando o modelo Aquacrop para cana de açúcar também não encontrou exatidão no modelo para a predição da biomassa total, porem obteve um bom ajuste, sendo o modelo capaz de explicar 99% dos da variabilidade das simulações.

A correlação entre os valores observados e simulados, medida pelo coeficiente r , foi classificada como “quase perfeita”, sendo encontrada a correlação perfeita nos tratamentos L3 e L5, sendo que este score indica a variação conjunta dos valores observados e simulados, mostrando assim que

quando a produtividade medida aumentou a simulada acompanhou este aumento perfeitamente.

O índice de concordância (d) foi utilizado por não sofrer influência de outliers, calculado pela razão entre o erro quadrático médio e o erro potencial. Com isto quanto mais próximo do seu valor unitário maior a concordância ou menor o erro de predição da simulação comparado com os valores observados, para todos os tratamentos foram obtidos valores acima de 0,95, considerados ótimos (WILLMOTT, 1982).

Conforme Camargo e Sentelhas (1997), o coeficiente “ c ” foi classificado como “ótimo”, pois para todos os tratamentos este índice foi maior que 0,85, confirmando assim a eficiência do método na predição dos dados.

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado pois é um dos índices mais encontrados na literatura para a comparação, mas este possui influência dos outliers, e como existiram variações entre os ciclos (de 0,41 a 3,97, ciclos 1 e 7, respectivamente para o L0), este coeficiente não se mostrou eficiente nesta comparação entre os métodos, com valores abaixo de 0,8. Para as lâminas 3 e 5, o modelo explica acima de 90% da variabilidade das simulações.

Assim como o r^2 e o RQME, o índice E também sofreu influência da grande variação entre os ciclos e assim não se mostrou eficiente na comparação entre os métodos, sendo que valores mais próximos de zero indicam eficiência da simulação. Estes coeficientes utilizam em seu cálculo a diferença entre os valores observados e simulados em relação a sua média. Devido existir o efeito da estacionalidade da cultura, os ciclos nas estações de outono e inverno, produzem menor matéria seca, influenciando na média e na diferença dos valores em relação à mesma.

O modelo é aceitável para a predição de produtividade de biomassa seca, pois os índices que medem a concordância e a variação conforme o clima, possuíram classificação “ótima” e “quase perfeita” (c e r), e analisando o somatório da produtividade anual também se obteve valores ideais para um modelo de simulação de produtividade de biomassa.

A parametrização do modelo conseguiu simular as produtividades da forragem em todas as condições simuladas, variando o clima (entre os ciclos) e disponibilidade de água.

5.3.2 Validação do modelo

Para a validação do modelo, foi utilizado o experimento 2, que possuiu variações de temperatura idênticas aos do experimento 1, porém intervalo de coletas diferente (50 dias), testando o modelo tanto para variações climáticas e de irrigação, quanto para variações da colheita da forragem em menor tempo do parametrizado. Estão apresentados na Figura 12, os valores de produtividade observados e simulados pelo modelo.

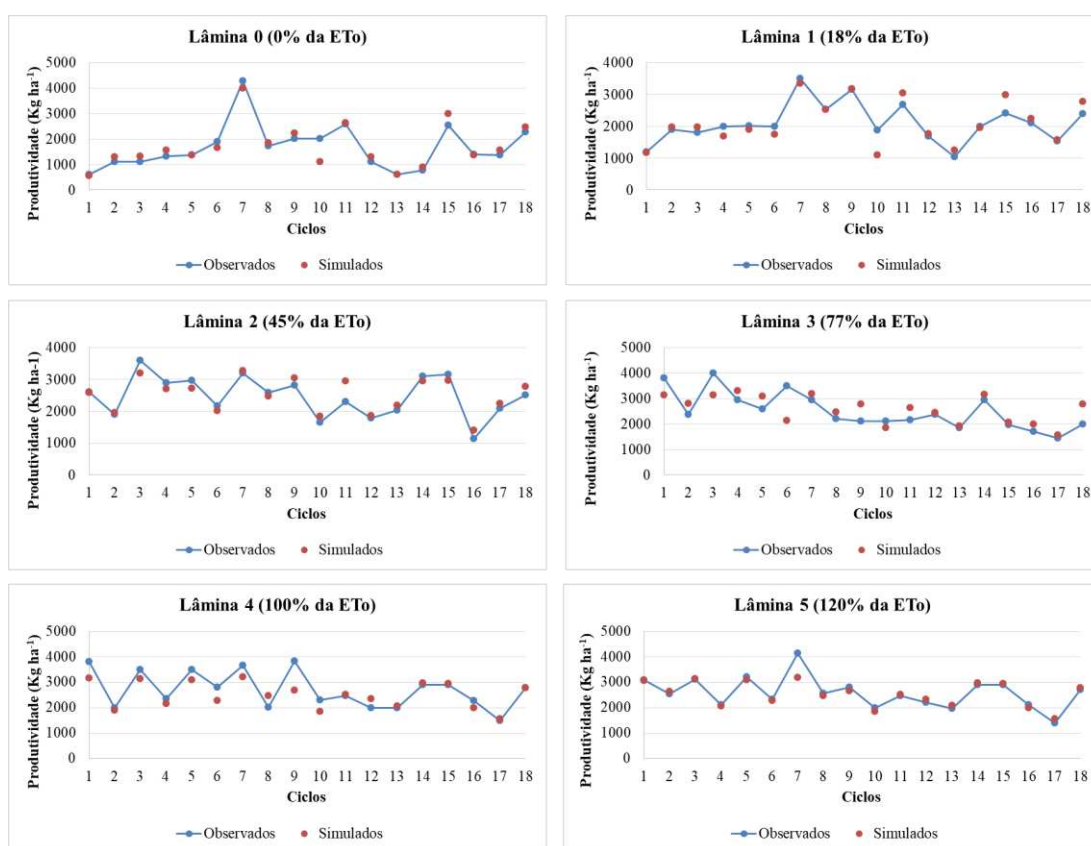


Figura 12. Produtividade de matéria seca dos ciclos para as lâminas de irrigação L0, L1, L2, L3, L4, L5, na validação do modelo.

O tratamento sem irrigação (L0) apresentou maior variação em produtividade no ciclo 10 ocorrido em junho de 2004, mês que apresentou 10 dias de temperaturas mínimas de 15°C registradas pela estação meteorológica, fator este que o modelo considerou para diminuição da produtividade da cultura conforme foi parametrizado, e juntamente com o déficit hídrico. Porém a produtividade medida foi 1.000 kg/ha acima da produtividade simulada, sendo o modelo não foi capaz de prever os fatores

que permitiram uma produtividade maior do que a medida. Contudo a produtividade média do tratamento L0 medida foi de 3009 kg/ha e a simulada de 3061 kg/ha, mostrando pequena variação para um período de 2 anos de dados, considerando a média anual, esta diferença cai para apenas 26 kg/ha.

O ciclo 15, que ocorreu no mês de junho de 2004, mostrou variações entre as produtividades medidas e simuladas, para as lâminas 0 e 1, neste ciclo a temperatura variou de 8,4 a 29,5°C, porém o modelo não considera esta variação horária, sendo isto determinante para a produtividade das gramíneas. Como o modelo considera apenas a amplitude térmica diária a produtividade pode ser superestimada ou subestimada, dependendo da quantidade de horas no dia que teve temperaturas abaixo da faixa de temperatura ideal para as gramíneas. Fator agravado pelo déficit hídrico destes tratamentos, nos tratamentos que tiveram irrigação acima de 45% da ETo tiveram simulações mais próximas das medidas, diminuindo assim o efeito da temperatura na simulação.

A simulação para o tratamento L3 foi a que os piores ajustes, podendo ser observado na Figura 12 e na Tabela 8. Gráficamente observa falta de coerência nas simulações, possuindo produtividades simuladas de 1400 kg/ha acima da medida e produtividades de 800 kg/ha abaixo da produtividade medida.

Tabela 8. Parâmetros estatísticos utilizado para comparação entre os dados observados e simulados, na parametrização

	RQME	r	d	c	r²	E
L0	0,29	0,9	1,00	0,94	0,89	0,88
L1	0,29	0,9	1,00	0,90	0,82	0,82
L2	0,24	0,9	1,00	0,92	0,86	0,78
L3	0,54	0,6	0,99	0,64	0,42	-0,03
L4	0,42	0,9	0,99	0,84	0,73	0,38
L5	0,24	0,9	1,00	0,92	0,86	0,74

Apesar de o índice d, estar próximo de 1, indicando concordância entre os valores e E próximo de 0, expondo a baixa diferença entre os valores simulados e observados em relação a suas respectivas médias, todos os outros índices não estão dentro de padrões considerados ótimos. O RQME foi o maior dentre os os outros tratamentos, indicando diferença de 0,54 ton/ha,

o coeficiente r e c classificados como “alta” e “mediana”, indicando a baixa concordância do modelo. O R^2 foi de apenas 42%, ou seja apenas 42% da variabilidade é explicada pelo modelo.

Assim como a parametrização, os coeficientes RQME e E, não foram capazes de considerar a variação dos ciclos, a solução para utilização destes coeficientes para forrageiras seria a separação das simulações em dois grupos de estações do ano, outono/inverno e primavera/verão, para que as produtividades médias se aproximassem das produtividade medidas durante os ciclos, com isto para todos os valores o RQME e o E tiveram valores máximos de 0,029 e -0,012, respectivamente. Porém o modelo é capaz de prever a produtividade em diferentes estações, não sendo assim necessário dois modelos de predição, modelo para outono/inverno e outro para primavera/verão.

Como o ciclo da cultura é considerado curto (30 dias), em comparação com as grandes culturas (milho, soja, feijão, café, etc.), o modelo se defere de todos os outros modelos do AquaCrop e DSSAT encontrados na literatura, o que mais se aproxima são modelos para a cana de açúcar, obtendo os mesmos resultados de baixa exatidão (ALENCAR, 2014; COSTA, 2016; NASSIF et al., 2012; MARIN, et al., 2009), porém com altos valores de r^2 , mostrando a capacidade dos modelos em prever a variabilidade da produtividade em função do clima, solo e irrigação.

5.4 Experimento de Campo

O experimento teve duração de 17 meses, com 3 meses até a gramínea se estabelecer em campo, e 14 meses de avaliação, porém como pode ser observar na Figura 13 e 14, em alguns ciclos houve excesso de chuvas, causando saturação do solo em alguns tratamentos, não sendo possível a coleta de dados destes ciclos, sendo coletados 11 ciclos.



Figura 13. Precipitação e Evapotranspiração de Cultura durante a condução do experimento.

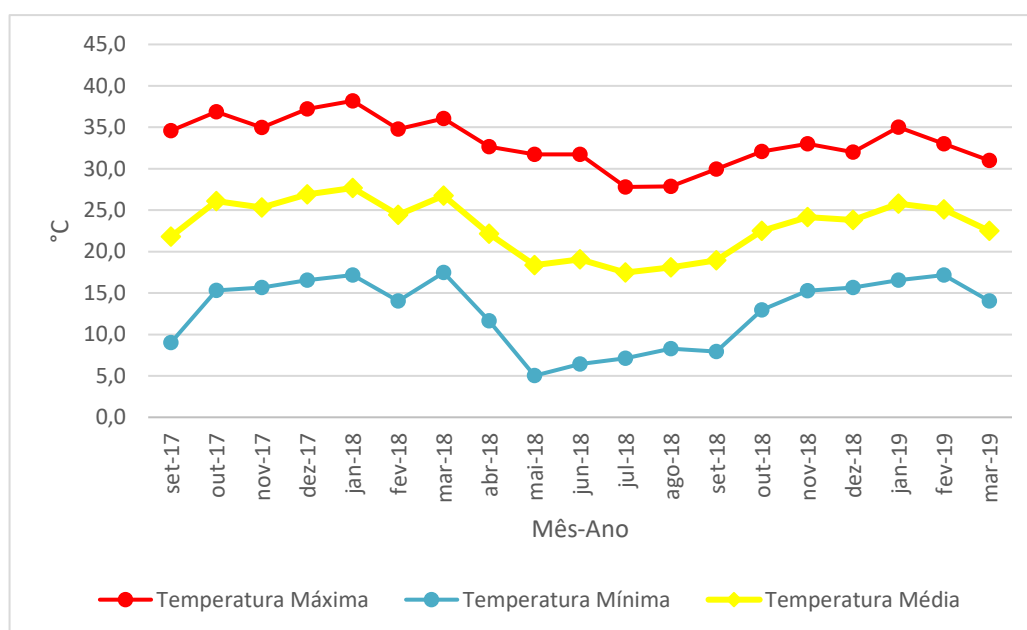


Figura 13. Temperaturas medidas durante os meses de condução do experimento.

As temperaturas mínimas e máximas, durante a realização do experimento, foram de 5°C em maio de 2018 e 38°C em Janeiro de 2018, as temperaturas máximas, mínimas e médias estão apresentadas na Figura 13. A alta variação de temperaturas afeta diretamente a produtividade das pastagens, principalmente nas estações de inverno e outono, que apresentaram as menores temperaturas mínimas e máximas (5°C e 38°C) a

produtividade da cultura foi menor comparada aos meses de que estão nas estações de primavera e verão que tiveram temperaturas máximas e mínimas de 38 e 13°C, respectivamente.

Inicialmente a análise estatística foi realizada considerando o período total do experimento, porém a análise de regressão apresentou interação significativa ($p > 0,05$) entre os ciclos e os tratamentos, portanto o período avaliado foi dividido em duas épocas de avaliação, primavera e verão, com 6 ciclos de avaliação (180 dias) e outono e inverno, com 5 ciclos de avaliação (150 dias).

Os dados da época outono e inverno (E1), foram analisados estatisticamente pelo teste F a 1% (Tabela 9) de probabilidade e todos os tratamentos (Lâminas) e ciclos apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$), e para a interação entre ciclo e lâmina não apresentou diferença significativa, a interação entre a lâmina e ciclo expõe a influência do clima diretamente nas lâminas de irrigação, como a interação é não significativa, as lâminas se diferenciaram dentro de cada ciclo e os ciclos se diferenciaram entre si.

Tabela 9. Quadro de anova com quadrados médios (QM) das variáveis analisadas e sua significância, para a época outono e inverno

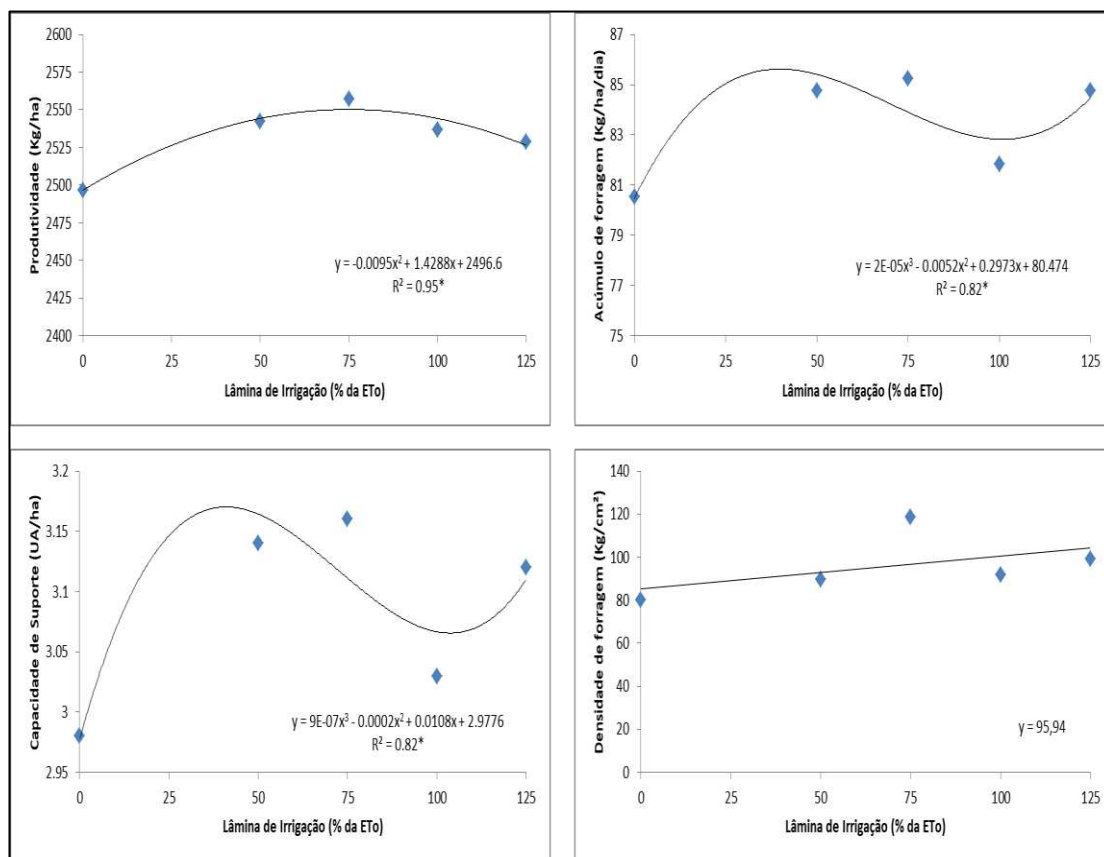
Fator de Variação	Graus de Liberdade	QM da Massa de Forragem	QM da Taxa de Acúmulo de Forragem	QM da Capacidade de Suporte	QM da Densidade da Massa Forragem
Blocos	3	1557,12 ^{ns}	1,63 ^{ns}	0,00238 ^{ns}	677,39 ^{ns}
Lâmina	4	1035971 ^{**}	1120,62 ^{**}	1,53 ^{**}	913,40 ^{**}
Erro (a)	12	29473	2,66	0,002	340,52
Ciclo	4	40492 ^{**}	83,07 ^{**}	0,112 ^{**}	4096,39 ^{**}
Erro (b)	16	4242	3,58	0,0048	6,84
Ciclos x Lâminas	16	3452,74 ^{ns}	3,58 ^{ns}	0,0048 ^{ns}	6,84 ^{ns}
Erro (c)	44	582	30,16	0,0010	2,50

^{**}Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} - Não significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Como houve diferença significativa entre as lâminas, foram ajustadas e testadas a 1% de probabilidade, regressões para todos os parâmetros estudados (Figura 13). O modelo que se ajustou à variável massa de forragem foi o quadrático ($p < 0,01$), ajuste este também encontrado por Dupas et al. (2010)

e Dantas et al. (2016), estudando a produtividade de capim Marandu no outono e inverno.



* $p < 0,01$

Figura 16. Estimativa da produtividade de matéria seca (kg/ha) do capim Marandu, sob condições de corte, no período de outono/inverno, em função das lâminas de irrigação (% da ETo).

As lâminas de irrigação proporcionaram efeito ($p < 0,01$) na produtividade de matéria seca. A produtividade da cultura máxima foi de 2550,3 Kg/ha com a lâmina de 73,56% conforme a equação da reta (Figura 14). As lâminas L2, L3 e L4, obtiveram as maiores produtividades, iguais estatisticamente conforme a Tabela 10, que apresenta os resultados do teste Tukey a 1% de probabilidade, com isto não teve acréscimos significativos de produtividade no outono e inverno com aumento da lâmina de irrigação acima de 75% da ETo. Dantas et al. (2016), estudando a produtividade de capim Marandu sob diferentes níveis de manutenção da água no solo, encontraram a produtividade máxima de 2359 Kg/ha, quando a irrigação foi acima de 50% da evapotranspiração, no outono.

Tabela 10. Valores médios de massa de forragem, taxa de acúmulo de forragem, capacidade de suporte e densidade da massa de forragem, em combinação com as lâminas de irrigação, para a época outono e inverno

	Massa de Forragem		Taxa de Acúmulo de Forragem		Capacidade de Suporte		Densidade da Massa Forragem	
L0	2496	B	80,54	b	2,98	b	80,07	d
L1	2542	ab	84,75	a	3,14	a	89,76	C
L2	2556	A	85,23	a	3,16	a	118,84	A
L3	2536	ab	81,83	b	3,03	b	91,84	c
L4	2528	ab	84,75	a	3,12	a	99,18	B

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,01$).

Já para a Taxa de Acúmulo de Forragem e Capacidade de Suporte a equação que teve melhor ajuste foi de terceiro grau com R^2 de 82% para ambas, com isto podemos observar alta variação entre as lâminas e influenciados pelas condições climáticas. Como as condições climáticas nestes ciclos foi de temperaturas abaixo de 15° por mais de 12 horas de duração nos dias, nos meses de maio a setembro abaixo de 10°C (Figura13), mesmo sendo irrigado e adubado, o desenvolvimento e crescimento das plantas foi afetado devido às baixas temperaturas alterarem o metabolismo das plantas, reduzindo conseqüentemente a produtividade e as demais variáveis. As gramíneas de clima tropical e subtropical se distinguem das forrageiras de clima temperado por exibirem ponto de saturação de luz mais elevada e baixo ponto de compensação de CO_2 , ausência de fotorrespiração e fotossíntese máxima a temperaturas entre 30 e 35°C e a mínima à temperaturas de 10 a 15°C (TONATO, 2003; RODRIGUES, 2004), com isto a resposta em produtividade das gramíneas expostas à estas condições de temperatura podem ser de difícil mensuração. Fato este também observado na Tabela 10, sendo a lâmina de 100% da evapotranspiração de referência igual ao tratamento em sequeiro, para Taxa de Acúmulo de Forragem e Capacidade de suporte.

A Capacidade de Suporte variou de 2,98 a 3,16 UA/ha, valores acima da média brasileira de 0,4UA/ha porém, quando comparado a outros trabalhos, com pastagens adubadas e irrigadas, estes valores se mostraram

inferiores. Dantas et al. (2016) encontraram valores de 2,91 UA/ha no outono e de 2,17 UA/ha no inverno, valores que se aproximam dos obtidos no presente trabalho. Já Alencar et al. (2009), estudando a resposta em produtividade da gramínea Marandu sob lâminas de irrigação, encontraram para a estação de outono/inverno capacidade de suporte de 1,04 UA/ha, porém com a adubação de manutenção de 50 Kg/ha/ano de P_2O_5 , 150 Kg/ha/ano de K_2O e 300 Kg/ha/ano de N, verificaram valores abaixo dos obtidos com a adubação realizada neste trabalho e bem como no de Dantas et al. (2016).

A análise de regressão não gerou índices significativos ($P>0,01$) para Densidade da Massa de Forragem, até a equação de quinto grau, e por isto foi considerada não significativa, não propondo assim equação para aplicação. O resultado do teste Tukey ($p<0,01$), para esta variável, apresentou na seguinte ordem: L2 (75% da ETo), L4 (125% da ETo), L3 e L1 (100 e 50% da ETo) e L0 (0% da ETo), em ordem decrescente, mostrando irregularidade na resposta de densidade. Os tratamentos L1, L2, L3 e L4, tiveram produtividades semelhantes estatisticamente ($p<0,01$), porém tiveram diferentes alturas do dossel aos 30 dias, sendo 28,3; 21,5; 27,6; 25,5 cm, de média para todos os ciclos, respectivamente, contudo a lâmina L2 por ter menor altura e produtividade igual as lâminas L1, L3 e L4, a densidade foi mais alta, pois teve maior quantidade de massa de forragem em função de uma menor altura de corte.

Magalhães et al. (2016) avaliando o alongamento foliar em relação às condições climáticas e lâminas de irrigação, chegaram à conclusão de que uma menor lâmina de irrigação nas mesmas condições climáticas, promove menor alongamento foliar e maior expansão horizontal do dossel, devida a necessidade da planta à procurar água e radiação.

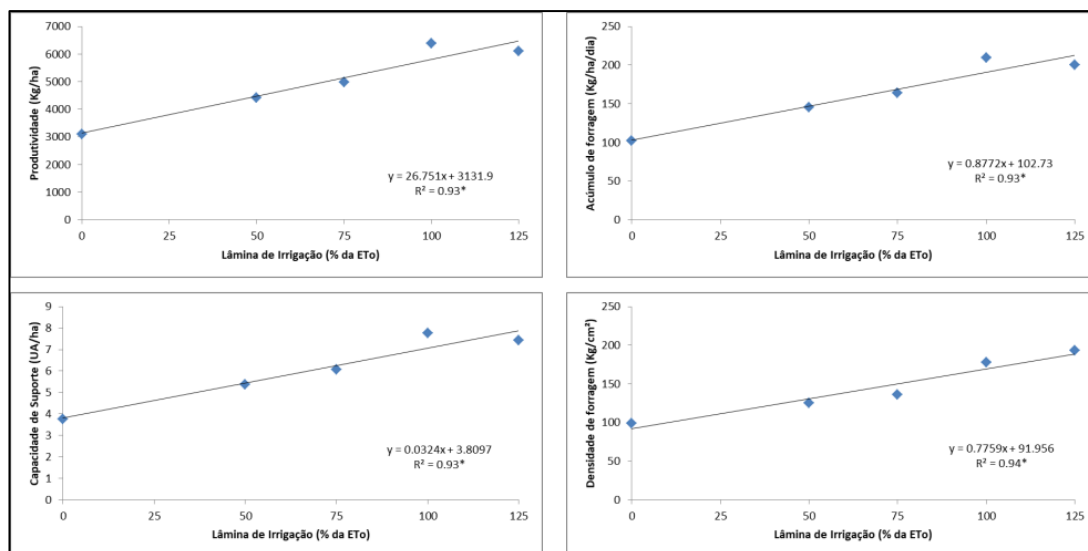
Para a época primavera e verão a Anova, apresentada na Tabela 11, forneceu resultados semelhantes em relação à época de outono e inverno, sendo a interação entre os ciclos e as lâminas não significativa ($p>0,01$), não possuindo influência entre da alteração climáticas dos ciclos nas variáveis analisadas, porém com diferença entre as Lâminas e entre os ciclos.

Tabela 11. Quadro de anova com quadrados médios (QM) das variáveis analisadas e sua significância, para a época primavera e verão

Fator de Variação	Graus de Liberdade	QM da Massa de Forragem	QM da Taxa de Acúmulo de Forragem	QM da Capacidade de Suporte	QM da Densidade da Massa Forragem
Blocos	3	461,34 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,000694 ^{**}	1792,00 ^{**}
Lâmina	4	42697173 ^{**}	45907,70 ^{**}	62,99 ^{**}	35492,19 ^{**}
Erro (a)	12	2520,64	2,70	0,0036	10,82
Ciclo	4	2857,52 ^{ns}	194,8 ^{**}	0,272 ^{**}	486,83 ^{**}
Erro (b)	16	9323,95	9,79	0,13 ^{ns}	16,29
Ciclos x Lâminas	16	9323,95 ^{ns}	9,79 ^{ns}	0,13	16,29 ^{ns}
Erro (c)	44	237	0,33	0,0005 ^{**}	2,27
Total	99				

Após a Anova, foi realizado também análise de regressão e propostas equações para os fatores avaliados ($p < 0,01$), sendo todos significativos à 1% de probabilidade e apresentados na Figura 17. Para todos foi ajustado o modelo linear com coeficiente de determinação de 93% para massa de forragem, taxa de acúmulo de forragem e capacidade de suporte e de 94% para densidade da massa de forragem, indicando que 93 e 94% dos dados são explicados pela equação proposta. Segundo a análise de regressão quando em sequeiro (L0), nas condições analisadas a produtividade da pastagem foi de 3131,9 Kg/ha e quando irrigado sem déficit (L3) a produtividade foi de 5807 Kg/ha.

Machado et al. (2007), realizaram o estudo da produtividade do capim Marandu irrigado e adubado, e obtiveram 3627 Kg/ha no verão de 2003. Já Machado et al. (2004) e Carnevalli (2003), chegaram a produtividade máxima de 2088 e 2010 Kg/ha, respectivamente. Martha Júnior et al. (2004), estudando a resposta da cultura em variação a disponibilidade hídrica chegou a produtividade de 2700 kg/ha. Todos estes autores, usaram níveis baixos de adubação, principalmente nitrogenadas, entre 100 e 180 Kg/ha/ano de N.



* $p < 0,01$

Figura 17. Estimativa da produtividade de matéria seca (kg/ha) do capim Marandu, sob condições de corte, no período de outono/inverno, em função das lâminas de irrigação (% da ETo).

Neste presente trabalho foi utilizado para recomendação de adubação a metodologia proposta de Andrade & Drumond (2012), considerando a extração de macronutrientes e micronutrientes necessárias para atingir em uma produtividade de 40000 Kg/ha/ano. Outro fator a se analisar é a área experimental, antes da implantação da forrageira a área foi cultivada por vários anos com café e também com alguns experimento envolvendo águas residuárias, com isto a área experimental possuía fertilidade inicial alta, sendo necessário pequenas correções iniciais no pH (H_2), aumentando de 5,5 para 6, favorecendo a alta produtividade apresentada em relação à outros autores.

Outros autores usaram adubação semelhante à utilizada neste trabalho chegaram a produtividade de aproximadamente 6500 Kg/ha, sob irrigação, corroborando com os dados obtidos (GIMENES et al., 2011; DIFANTE et al. 2011).

Para todas as variáveis o tratamento que apresentou as menores médias foi o sequeiro (L0), com produtividade inferior de 3294 Kg/ha em relação ao L3. A Lâmina de 100% da ETo (L3), proporcionou maior massa de forragem, taxa de acúmulo de forragem e capacidade de suporte, maior estatisticamente que todas as outras lâminas, mostrando a vantagem de uma

irrigação correta, aplicando apenas o que a planta necessita, ocasionando melhor aproveitamento de adubo, dentre outros, devido a redução da lixiviação, a manutenção do solo na capacidade de campo, possuindo água e oxigênio nas raízes em proporção ideal (Tabela 12)

Tabela 12. Valores médios de massa de forragem, taxa de acúmulo de forragem, capacidade de suporte e densidade da massa de forragem, em combinação com as lâminas de irrigação, para a época primavera e verão

	Massa de Forragem		Taxa de Acúmulo de Forragem		Capacidade de Suporte		Densidade da Massa de Forragem	
L0	3100	E	101,70	E	3,77	E	99,36	E
L1	4426	D	145,20	D	5,38	D	124,91	D
L2	4986	C	163,55	C	6,06	C	136,19	C
L3	6395	A	209,72	A	7,77	A	177,95	B
L4	6113	B	200,50	B	7,42	B	192,92	A

Já para a Densidade da Massa de Forragem a maior média foi do tratamento L4 (125% da ETo), pois este apresentou menor altura do que o tratamento L3, possuindo assim maior densidade. A Taxa de Acúmulo máxima (L3), foi de 209,72 Kg/ha/dia. Difante et al. (2011), analisando características morfológicas e períodos de rebrota do capim Marandu irrigado e adubado, obtiveram um acúmulo de 187,5 Kg/ha/dia, e densidade de 250 Kg/cm².

A densidade da massa de forragem é afetada pela altura de corte da pastagem, pois as práticas de manejo adotadas na forrageira influenciam em suas características morfológicas, afetando a população de plantas, capacidade produtiva e estrutura do dossel (SBRISSIA et al., 2007). O correto é que o manejo de corte ou pastejo seja realizado em função da altura das plantas, sendo a altura indicada para cada espécie de forrageira, altamente correlacionada com 95% de interceptação de luz. O resíduo remanescente após corte ou pastejo também depende da espécie forrageira, visando deixar de 15 a 20% de folhas verdes para a fotossíntese no processo de rebrotação, reduzindo a utilização de reservas para rebrota. (TRINDADE et al. 2007; GIACOMINI et al., 2009a, 2009b)

Todos os valores encontrados para a época outono e inverno foram inferiores aos encontrados para a época primavera e verão, fato este devido

a estacionalidade da cultura e da influência do foto período e temperatura em seu desenvolvimento e crescimento.

Considerando o total de produtividade anual, que foi de 38371 e 15220 Kg/ha, nas épocas de primavera e verão e outono e inverno, respectivamente, e um total de 53592 Kg/ha, no tratamento sem déficit hídrico, já no tratamento sequeiro essa produtividade foi de 18603 e 14978, nas épocas de primavera e verão e outono e inverno, respectivamente, totalizando 33582, representando um incremento de 37,34% em produtividade.

Feitosa (2017) estudando respostas agronômicas do capim Marandu à irrigação, chegou a conclusão que a irrigação proporcionou aumento da produção de massa seca de forragem, produção de colmos e fotossíntese da planta e redução da porcentagem de material morto, da relação folha/colmo.

Visando à redução da estacionalidade de produção de forragem, Dupas et al. (2010) avaliaram a produtividade de matéria seca e valor nutritivo de *Brachiaria brizantha*, cv. Marandu, utilizando doses de nitrogênio e irrigação por aspersão em duas épocas do ano, estação chuvosa e seca. A irrigação promoveu aumento de 15% na produtividade de matéria.

Rassini (2002) mostrou que a irrigação melhorou a distribuição de forragem de capim Tanzânia ao longo do ano. Verificando que na área não irrigada, a produção de forragem foi 21% da produção anual, enquanto que com o uso de irrigação a produção foi incrementada em 35% da produção anual.

Porém se considerarmos apenas as estações de primavera e verão, que não possuíam restrição quanto a luminosidade e temperatura, este acréscimo de produtividade passa para 51,52%.

Para esta região, no entanto, gramíneas que resistem ou toleram temperatura mais baixa, entre 10 e 15°C de mínima, são mais indicadas por não apresentarem efeitos tão expressivos devido à estacionalidade da cultura, e com isto mantendo uma média anual de UA por hectare mais contínuo, sendo que o capim Marandu apresentou em média 7,77 e 3,03 UA/ha, nas épocas de primavera e verão e outono e inverno, respectivamente, menos da metade dos animais nas estações com menor temperatura em relação às épocas com maior temperatura, no tratamento L3.

5.5 Utilização do Modelo AquaCrop em capim Marandu

Com a finalidade de testar e validar o modelo para outra cultivar, foi realizada a simulação de produtividade do capim Marandu pelo uso do modelo AquaCrop proposto para a cultivar Xaraés. Como o experimento de campo foi dividido em duas épocas (outono e inverno, primavera e verão) os resultados da simulação para outono e inverno estão apresentados na Figura 18 e os resultados da simulação para a primavera e verão, na Figura 19.

As produtividades observadas e simuladas apresentaram ajustes próximos à igualdade para todos os tratamentos e em ambas as épocas. Porém a estimativa de produtividade sempre foi abaixo a produtividade medida, com variação no erro entre 10 e 30%. Este fato se deve às características do solo utilizado para a parametrização, que não possuía efeitos de saturação e apresentava menor retenção de água, como no experimento de campo o solo possuía uma alta capacidade de retenção de água o modelo não simulou a capacidade máxima de produtividade nas duas épocas.

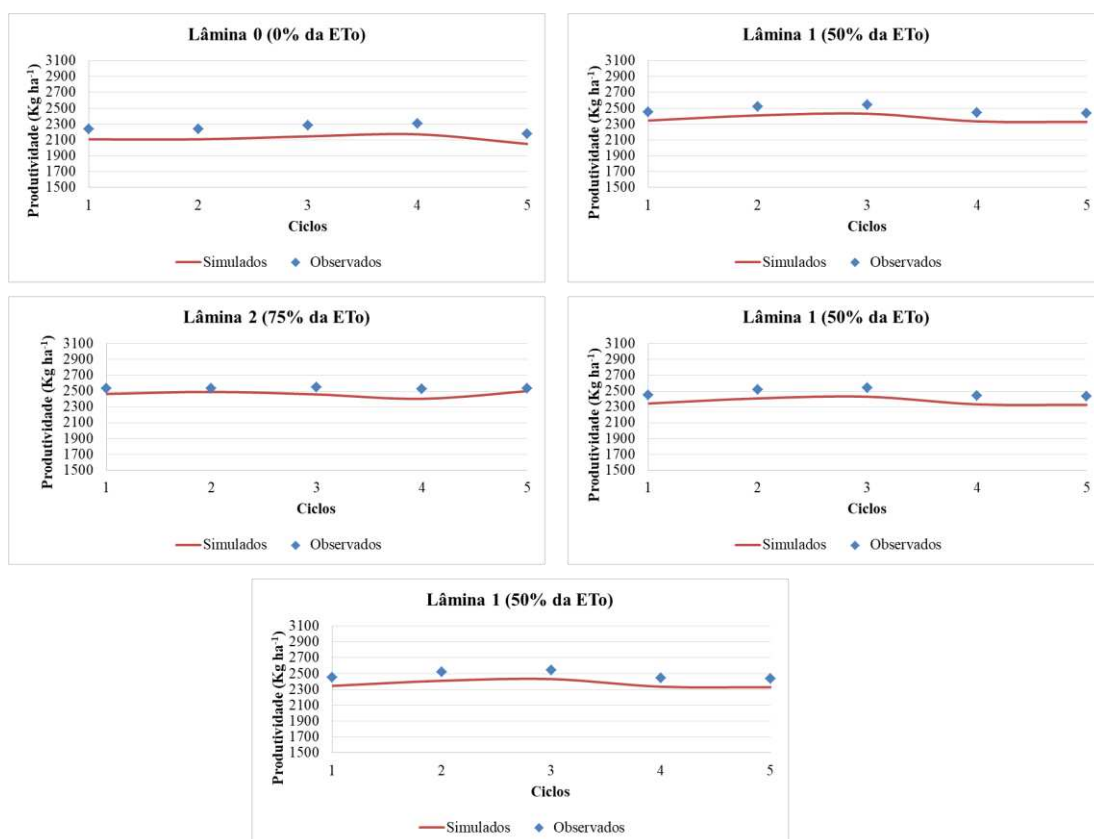


Figura 18. Produtividade observadas e simuladas dos ciclos para as lâminas de irrigação L0, L1, L2, L3 e L4, para a época outono e inverno.

Rosa et al. (2015) propuseram um modelo para simulação da produção e crescimento para a cultura de arroz e observaram precisão de 70% na predição deste modelo, assim como Bouman & Laar (2006) encontrando precisões do modelo Oryza de 61 a 86%. Já Piekarski et al. (2016) avaliando o modelo AquaCrop para predição da produtividade de soja, chegou a precisão de 92%.

Tonato et al. (2010) utilizando a ferramenta de desenvolvimento de modelos IBAAdmin, para identificação de variáveis de entrada mais determinantes na produção de pastagens e simulação da produção de gramíneas do gênero *Brachiaria* sp. e *Cynodon* sp., chegaram a precisões de 60 e 70% para os gêneros, respectivamente.

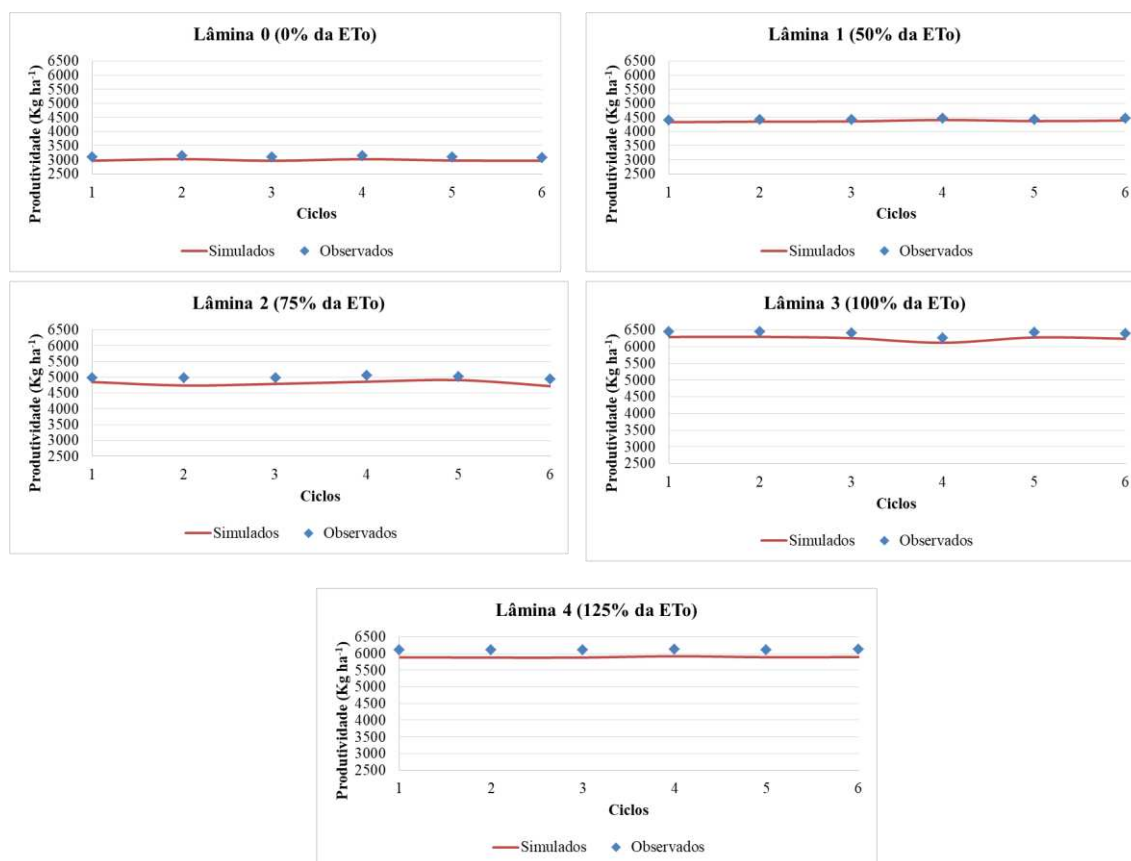


Figura 19. Produtividade observadas e simuladas dos ciclos para as lâminas de irrigação L0, L1, L2, L3 e L4, para a época primavera e verão.

Contudo, a Tabela 13, apresenta os índices estatísticos utilizados para a comparação entre os dados simulados e observados. Os ajustes para o capim Marandu foram melhores do que para o capim Xaraés, apesar da

parametrização ser realizada pelo uso desta cultivar. Os valores de RQME para todas as lâminas indicaram que a diferença entre os valores estimados e simulados foi maior nas lâminas com menor aplicação de água (L0 e L1). Com exceção da L2, todas as lâminas foram classificadas como “quase perfeita” e “ótimo”, para valores dos coeficientes r e c, indicando alta correlação entre os dados simulados e observados (HOPKINS, 2014; CAMARGO & SENTELHAS, 1997), estas lâminas também apresentaram baixos valores de E e alto R².

Tabela 13. Parâmetros estatísticos utilizado para comparação entre os dados observados e simulados

Ep.	RQME		r		d		c		R ²		E	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
L0	0,13	0,12	0,99	0,99	0,88	0,89	0,88	0,88	0,99	0,99	-8,3	-18,0
L1	0,11	0,06	0,99	0,99	0,89	0,91	0,89	0,90	0,99	0,93	-5,1	-4,3
L2	0,08	0,18	0,32	0,74	0,79	0,87	0,26	0,65	0,10	0,56	-110,3	-23,5
L3	0,06	0,15	0,99	0,99	0,87	0,90	0,87	0,89	0,99	0,99	-15,6	-5,23
L4	0,08	0,22	0,99	0,95	0,88	0,85	0,88	0,80	0,98	0,90	-6,9	-401

Ep. – Épocas avaliadas, 1 – outono e inverno, 2 – primavera e verão.

O tratamento L2 apresentou baixa diferença entre os valores simulados e observados (0,08), iguais a lâmina L4, porém o coeficiente de correlação foi classificado como “baixa” e “muito alta”, para o outono e inverno, e primavera e verão, respectivamente, sendo estes valores muito abaixo dos demais. O coeficiente c, indicou um desempenho da estimativa no L2 de “péssimo” e “mediano”, para as épocas 1 e 2. Porém o índice d, que indica a exatidão do método teve valores próximo às outras lâminas, indicando que o método foi exato na predição porém pouco preciso quando comparado às outras lâminas.

Portanto a simulação nestas condições climáticas é indicada para as lâminas L0, L1, L3 e L4, não conseguindo simular a lâmina de 75% da Evapotranspiração de cultura.

6. CONCLUSÕES

Diante das observações ao longo do trabalho, conclui-se que a parametrização do modelo AquaCrop, para a simulação do crescimento e

produtividade de pastagens, foi bem sucedida, obtendo parâmetros estatísticos aceitáveis e compatíveis com outros autores.

O modelo de pastagens proposto, através do AquaCrop, simula com boa precisão a biomassa seca das pastagens ao longo de todo ano, abrangendo assim condições climáticas favoráveis e adversas ao crescimento e desenvolvimento das gramíneas.

O modelo durante a parametrização e validação não apresentou boa exatidão, porém para os testes no experimento de campo, o mesmo foi adequado (exatidão e precisão), exceto para a L2 que corresponde a 75% da ETo.

O modelo Aquacrop simulou com precisão as produtividades em função das lâminas de irrigação.

Apesar do software AquaCrop não possuir o módulo de ciclos de corte/colheita e crescimento, a parametrização foi eficiente, obtendo boa precisão na simulação da biomassa seca da pastagem.

A lâmina de 75% da evapotranspiração de referência maximizou a produtividade do capim Marandu em ambas épocas (outono/inverno e primavera/verão), além disto a irrigação proporcionou redução do efeito da sazonalidade de produção.

O modelo AquaCrop comprovou-se ser uma ferramenta importante para o planejamento de produção de matéria seca de capins Xaraés e Marandu em função da disponibilidade hídrica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE. Estatísticas de Exportação, 2012. Disponível em: < <http://www.abiec.com.br/texto.asp?id=31>>. Acesso em: jul. 2017.

ABIEC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. Perfil da Pecuária no Brasil. 2016. Disponível em: <<http://abiec.siteoficial.ws/images/upload/sumario-pt-010217.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

AGUIAR A. P. A.; SILVA A. M. Técnicas de medição da pastagem para planejamento alimentar ao longo do ano em sistema de pastejo. In: Simpósio De Pecuária De Corte, 2, Lavras, 2002. **Anais...** Lavras: NEPEC/UFLA, 2002. p.109-164.

AGUIAR, A.P.A.; DRUMOND, L.C.D.; MORAES NETO, A.R.; PAIXÃO, J.B.; RESENDE, J.R.; BORGES, L.F.C.; MELO JUNIOR, L.A.; SILVA, V.F.; APONTE, J.E.E. Composição química e taxa de acúmulo dos capins Mombaça, Tanzânia-1 ("*Panicum maximum*" Jacq. cv. Mombaça e Tanzânia-1) e Tifton 85 ("*Cynodon dactylon*" x "*Cynodon nlemfuensis*" cv. Tifton 68) em pastagens intensivas. **FAZU em Revista**, n.3, p.15-19, 2006.

AGUIAR A.P.A., NETO A.R.M., PAIXÃO J.B., RESENDE J.R., BORGES L.F.C., JUNIOR L.A.M., SILVA V.F. Taxa de Acúmulo de forragem dos Capins Mombaça, Tanzânia-1 ("*Panicum maximum*" Jacqcv Mombaça E Tanzânia-1) E Tifton 85 ("*Cynodon dactylon*" X "*Cynodon nlemfuensis*" cv. Tifton 68) em Pastagens Intensivas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.1, n.3 p.15-1, 2008.

ALENCAR, C.A.B; OLIVEIRA, R.A.; CÓSER, A.C.; MARTINS, C.E.; CUNHA, F.F.; FIGUEIREDO, J.L.A. Produção de capins cultivados sob pastejo em diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p.680-686, 2009a.

ALENCAR, C.A.B; CÓSER, A.C.; OLIVEIRA, R.A.; MARTINS, C.E.; CUNHA, F.F.; FIGUEIREDO, J.L.A. Produção de seis gramíneas manejadas por corte sob efeito de Diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. **Ciência Agrotetecnológica**, v. 33, n. 5, p.1307-1313, 2009b.

ALENCAR, L.P. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 2014. 133f. Tese (Doutor em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World Agriculture Towards 2030/2050, The 2012 Revision**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 154p. 2012.

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

ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A.; NOVELLY, P.E. Produção de gramíneas tropicais e temperadas, irrigadas na época da seca. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 15, n. 5, p. 384-392, 1986.

ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A.; REZENDE, H.; XAVIER, D.F. Avaliação sob pastejo do potencial forrageiro de gramíneas do gênero *Cynodon*, sob dois níveis de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.32, n.1, p.47-54, 2003.

ANDRADE, A.S.; DRUMOND, L.C.D. Adubação de pastagens irrigada: princípios e recomendações. **Revista Cerrado Agrociências**. Patos de Minas, v.18, n.2, p.1-19. 2012.

ANDRADE, A.S.; DRUMOND, L.C.; APPELT, M.F.; MOREIRA, D. D.; ARAÚJO, F.C.; GOOD GOD, P.I.V. Crescimento e composição bromatológica de tifton 85 e vaqueiro em pastagens fertirrigadas. **Global Science and Technology, Rio Verde**, v. 05, n. 02, p.56 -68, 2012.

ANDRADE, C.L.T.; AMARAL, T.A.; DUARTE, J.O.; GARCIA, J.C.; SILVA, D.F.; MARTINS, P.C. **Simulated yield and net return of a maize crop fertilized with different sources and rates of nitrogen**. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 11, n.1, p. 254-267, 2012.

ANJOS, F.A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop. 2011.** 70f. Dissertação (Mestre em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011.

AROEIRA, L.J.M.; LOPES, F.C.F.; DERESZ, F.; VERNEUQUE, R.S.; DAYRELL, M.S.; MATOS, L.L.; MALDONADO VASQUEZ, H.; VITTORI, A. Pasture availability and dry matter intake of lactating crossbred cows grazing elephant grass (*Pennisetum purpureum*, Schum). **Animal Feed Science and Technology**, v.78, n.3, p.313-324, 1999.

BASTOS, T.X.; SANTOS, A.R.A.; SÁ, T.D. de A.; SANTOS, A.R. dos; OLIVEIRA, R. P.; PACHECO, N.A.; KOBAYASHI, L.T. (1993): Flutuação das chuvas no nordeste paraense e sua implicação para o calendário agrícola. **Anais...** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 8, Porto Alegre, p.13.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação.** 8.ed. – Viçosa: Ed. UFV, 2006. 625p.

BHALAGE, P.; JADIA, B.B.; SANGALE, S.T. **Case studies of innovative irrigation management techniques. Aquatic Procedia**, v.4, n.1, p. 1197-1202, 2015.

BLUM, F.A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Res.** v.112, pp.119–123. 2009.

BOOTE, K.J., JONES, J.W, PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal.** v.88, n.1, p.704–716. 1996.

BOTREL, M.A.; ALVIM, M.J.; XAVIER, D.X. Avaliação de gramíneas forrageira na região sul de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília.** v.34, n.4, p. 683-689, 1999.

BOUMAN, B.A.M.; LAAR, H.H.VAN. Description and evaluation of rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. **Agricultural Systems**, v.87, n.1, p.249-273, 2006

BRAGA, G.N.M. Fertilidade do solo e manejo do pasto para recuperar pastagens degradadas. Na sala com Gismonti: Assuntos sobre Agronomia.2013.Disponível em:<<http://agronomiacomgismonti.blogspot.com.br/2013/05/fertilidade-do-solo-e-manejo-do-pasto.html>> . Acesso em 30 de Maio de 2016.

BUNGENTAB, D.J. (Ed.). Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta: a produção sustentável. Campo Grande, **Gado de Corte**, 2011. 118p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARDOSO, R.R.; SOUSA, L.F.; FERREIRA, A.C.H. ; NEIVA, J.N. M. ; FERREIRA, D.A. ; SILVA, A.G. M.E. ; NOBREGA, E.B. ; SILVA, T.V.S. Ingestive behavior of sheep on Massai grass under different pre-grazing heights under rotational stocking. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 20, p. 1-12, 2019.

CARNEVALLI, R.A. **Dinâmica da rebrotação de pastos de capim marandu submetidos a regimes de desfolhação intermitente**. 2003. 136p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CARVALHO, F.A.N.; BARBOSA, F.A.; McDOWELL. **Nutrição de bovinos a pasto**. 2. ed. Belo Horizonte: PapelForm, 2005. 438 p.

CARVALHO, W.F.; MOURA, R.L.; SANTOS, M.S.; SILVA, S.F.; LEAL, T.M. Morfogênese e estrutura de capim-massai em diferentes sistemas de cultivo sob pastejo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 4, n. 1, p. 28-37, 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_12_20_10_56_08_boletim_portugues_-_dez_2016_3o_-_original.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2019.

COSTA, L.C.; BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.9, n.1, p. 75-82. 2001.

COSTA, N.L; PAULINO, V.T.; MAGALHÃES, J.A.; RODRIGUES, B.H.N.; SANTOS, F.J.S. Eficiência do nitrogênio, produção de forragem e morfogênese do capim-massai sob adubação. **Nucleus**, v.13, n.2, p.173-182, 2016.

COSTA, N.L; PAULINO, V.T.; MAGALHÃES, J.A.; RODRIGUES, B.H.N.; SANTOS, F.J.S. Eficiência do nitrogênio, produção de forragem e morfogênese do capim-massai sob adubação. **Nucleus**, v.13, n.2, p.173-182, 2016.

DANTAS, O.D. **Avaliação de métodos para parametrização de modelos aplicados em sistemas agropecuários**. 2007. 85f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2007.

DANTAS, G.F. ; FARIA, R.T. ; SANTOS, G.O. ; Dalri, A.B. ; Palaretti, L.F. . Produtividade e qualidade da brachiaria irrigada no outono/inverno. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 469-481, 2016.

DIAS FILHO, M.B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém, PA: Amazônia, 2014. 230p.

DIAS FILHO, M.B. **Estratégias de recuperação de pastagens degradadas na Amazônia brasileira**. Belém: Amazônia Oriental, 2015. 25p.

DIAS FILHO, M.B. **Degradação de pastagens : o que é e como evitar**, 2017. 19 p.

DIFANTE, G.S.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; SILVA, S.C.; EUCLIDES, V.P.B.; MONTAGNER, D.B.; SILVEIRA, M.C.T.; PENA, K.S. Características morfogênicas e estruturais do capim-marandu submetido a combinações de alturas e intervalos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v.40, n.5, p. 955-963. 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. **Irrig. And Drainage Paper no. 33**. FAO, Rome. 1979. 110p.

Drumond L.C.D. & Aguiar A.P.A. **Irrigação de Pastagem**. Uberaba: Ed. Drumond, 2005. 210 p.

Drumond L.C.D. Irrigação de pastagens. In: Simpósio internacional de produção de gado de corte, 6., 2008, Viçosa. **Anais...** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, v. 1, p. 307-320, 2008.

DUPAS, E.; BUZETTI, S.; SARTO, A.L.; HERNANDEZ, F.B.T.; BERGAMASCHINE, A.F. Dry matter yield and nutritional value of Marandu grass under nitrogen fertilization and irrigation in cerrado in São Paulo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 12, p. 2598-2603, 2010.

EMDAD, M.R.; TAFEHM A. GHALEBI, S. Validation of AquaCrop model for simulating wheat yield in diferente irrigation events. **Journal of Water and Soil**. v.32, n.3, p.463-473. 2018.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Solos, 2006. 306p.

EUCLIDES, V.P.B.; MACEDO, M.C.M.; VALLE, C.B.; BARBOSA, R.A.; GONÇALVES, W.V. Produção de forragem e características da estrutura do dossel de cultivares de *Brachiaria brizantha* sob pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1805-1812, 2008.

EUCLIDES, V.P.B.; MONTAGNER, D.B.; BARBOSA, R.A.; NANTES, N.N. Manejo do pastejo de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf e de *Panicum maximum* Jacq. **Revista Ceres**. v. 61, Supl., p.808-818, 2014.

FEITOSA, T.S. **Respostas Agronômicas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e *Panicum maximum* cv. Mombaça em função do suprimento de nitrogênio e água**. 2017. 54f. Dissertação (Mestre em Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

FERRAZ, A.S.; SOARES, V.P.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, C.A.S. A.; GLERIANI, J.M. Uso de imagens do satélite IKONOS II para estimar biomassa aérea de um fragmento de floresta estacional semidecidual. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. 2013, Foz do Iguaçu. **Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 2794-2801.**

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agriculture Water Manage.** v.96, n.1, 1275–1284. 2009.

GHELFI FILHO H. Efeito da irrigação sobre o capim colômbio (*Panicum maximum* Jacq.). **O Solo**, v.58, n.1, p.12-15, 1976.

GIACOMINI, A.A.; DA SILVA, S.C.; SARMENTO, D.O. L.; ZEFERINO, C.V.; SOUZA JÚNIOR, S.J.; TRINDADE, J.K.; GUARDA, V. del'A.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. do. Growth of marandu palisadegrass subjected

to strategies of intermitente stocking. **Scientia Agricola**, v.66, p.733-741, 2009a.

GIACOMINI, A.A.; DA SILVA, S.C.; SARMENTO, D.O. de L.; ZEFERINO, C.V.; TRINDADE, J.K. da; SOUZA JÚNIOR, S.J.; GUARDA, V. del'A.; SBRISSIA, A.F.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. do. Components of the leaf area index of marandu palisadegrass swards subjected to strategies of intermittent stocking. **Scientia Agricola**, v.66, p.721-732, 2009b.

GIMENES, F.M.A.; SILVA, Sila Carneiro da ; Fialho, Cleunice Auxiliadora ; Gomes, Marcelo Barcelo ; BERNDT, Alexandre ; Gerdes, Luciana ; Colozza, Maria Tereza . Ganho de peso e produtividade animal em capim-marandu sob pastejo rotativo e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 46, p. 751-759, 2011.

GOMES, E.P.; RICKLI, M.E.; CECATO, U.; VIEIRA, C.V.; SAPIA, J.G.; SANCHES, A.C. Produtividade de capim Tifton 85 sob irrigação e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.4, p. 317-323. 2015.

GOMIDE, J.A. Produção de leite em regime de pasto. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 22, n.4, p.591-613, 1993.

GRIGERA, G.; OESTERHELD, M.; PACÍN, F. Monitoring forage production for farmers' decision making. **Agricultural Systems**, v. 94, n. 3, p. 637-648, 2007.

HANKS, R.J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V.P.; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science of American Journal**. v. 40, n.3, p. 426-429, 1976.

HENG, L.K.; HSIAO, T.C., EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. **Agronomy Journal**. v. 101, pp. 488–498. 2009

HOPKINS, W.G. Correlation coefficient. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 20 out. 2018.

HSIAO, T.C.; XU, L.K. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. **Journal of Experimental Botany**. v. 51, n.1, p.1595-1616, 2000.

HSIAO, T.C., HENG, L.K., STEDUTO, P., ROJAS-LARA, B., RAES, D., FERERES, E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water III parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**. v.101, n.1, p. 448–459. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/pecuaria.html>. **Acesso em: 20 out. 2018**

JAGTAP, S.S.; ALIBI, R.T.; ADELEYE, O. The influence of maize density on resource use and productivity: an experimental and simulation study. **African Crop Science Journal**, v. 6. n. 3, p. 259-272, 1998.

JANK, L.; BRAZ, T.G.S.; MARTUSCELLO, J. A. Gramíneas de clima tropical. In: Ricardo Andrade Reis; Thiago Fernandes Bernardes; Gustavo Resende Siqueira. (Org.). **Forragicultura: ciência, tecnologia e gestão dos recursos forrageiros**. 1ed.Jaboticabal: Gráfica Multipress, 2014, p. 109- 124.

KICHEL A.N. Reforma de pastagens. **CNPGC Informa, Campo Grande, MS, v.8, n.2, p.3, 1995**.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**. v.5, n.1, p.89–97, 2005.

LADEIRA, N.P.; SYKES, D.J.; DAKER, A.; GOMIDE, J.A. Estudos sobre produção e irrigação de capins Pangola, Sempre-verde, e gordura, durante o ano de 1965. **Revista Ceres. v.13, n.74, p.105-116, 1966.**

LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation modeling and analysis. 2. ed. Singapore: McGraw-Hill series in industrial engineering and management science, 1991. 759p.**

LEGATES, D.R.; MCCABE J.R.G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, **Water Resour. v.35., n.1, p.233–241, 1999.**

LIMA FILHO, A.F.; COELHO FILHO, M.A.; HEINEMANN, A.B. Calibração e avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.17, n.12, p.1286-1293. 2013.**

LOPES, R.S.; FONSECA, D.M.; OLIVEIRA, R.A.; NASCIMENTO JR., D.; ANDRADE, A.C.; STOCK, L. A.; MARTINS, C.E. Disponibilidade de matéria seca em pastagens de capim-elefante irrigadas. **Ciência e Agrotecnologia, v.27, n.6, p.1388-1394, 2003.**

LOURENÇO, L.F. **Avaliação da produção de capim-tanzânia em ambiente protegido sob disponibilidade variável de água e nitrogênio no solo.** Piracicaba: ESALQ, 2004. 77p. Dissertação Mestrado

MACHADO, L.A.M.; KICHEL, A.N. Ajuste de lotação no manejo de pastagens. Dourados: Agropecuária Oeste, 2004. 55p. (Agropecuária Oeste. Documentos, 62). Disponível em: <http://www.cpaoo.br/publicacoes>. Acesso em: 11 ago. 2006.

MACHADO, L.A.Z.; FABRÍCIO, A. C.; ASSIS, P. G. G.; MARASCHIN, G. E. Estrutura do dossel de pastagens de capim-marandu submetidas a quatro ofertas de lâminas foliares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.42, n.10, p-1495-1501. 2007.

MAGALHÃES, J.A.; CARNEIRO, M.S.S.; ANDRADE, A.C.; RODRIGUES, B.H.N; COSTA, N.L.; SANTOS, F.J.S.; ARAUJO NETO, R.B. Características morfogênicas e estruturais do capim-marandu sob irrigação e adubação. **Revista Holos**, v.8, n.32, p.113-124. 2016.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana de açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, p.111-130. 2009.

MARTHA JÚNIOR, G.B.; CORSI, M; BARIONI; L.G.; VILELA, L. Intensidade de desfolha e produção de forragem do capim-marandu irrigado na primavera e no verão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.927-936, 2004.

MATSUMOTO, E.; ISEPON, O.J.; BASTOS, J.F.P. et al. Produção de matéria seca de cinco cultivares de *Panicum maximum* Jacq. submetidos à irrigação. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39., 2001, Piracicaba. **Anais...**Piracicaba: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2001.

MCMMASTER, G.S., WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agric Forest Meteorol**, n.87, v.1, p.291-300. 1997.

MENDONÇA, F.C. **Curso teórico prático de manejo e projetos de irrigação em pastagens**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008. 63 p.

MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modelling. **Agronomy Journal**. v.88, n.1, p.695–697. 1996.

MOURA, M.N.; VITORINO, M. I.; ADAMI, M. Análise de componentes principais da precipitação pluvial associada à produtividade de soja na Amazônia legal. **Revista Brasileira de Climatologia**. Curitiba, v.22, n.14, p.574-588. 2018.

NASH, J.E.; STUCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. **I. A discussion of principles. Journal of Hydrology**. v. 10, p. 282-290, 1970

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.47, n.3, p.311-318, 2012.

OCDE/FAO - ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO/FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024**. 2015. OECD Publishing, Paris. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en>. Acesso em: 06 nov. 2016.

PARIZI, A.R.C.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; GOMES, A.C.S.; SOARES, F.C.; VIVAN, G.A. Calibração e teste de um modelo mecanístico para a produção da cultura do milho em diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, v.1, n.1, p.1-18, 2016.

PIEKARSKI, K.R.; SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; TASUKAHARA, R.Y.; OLIVEIRA. Simulação da produtividade da soja em três tipos de solo com o modelo AquaCrop. **Revista Convibra. Brasil**, n.0, v.0. p.1-10. 2016.

PIRMORADIAN, N.; DAVATGAR, N. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. **Agricultural Water Management**. v. 213, p. 97-106, 2019.

QUINTANILHA, S. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; VANZELA, L. S.; LIMA, R. C.; UPAS, E.; BUZETTI, S. Respostas do capim Mombaça e Brizanta a irrigação. In: CONGRESSO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18., 2006, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal, UNESP, 2006.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**. v.101, n.1, p.438–447. 2009.

RAN, H.; KANG, S.; LI, F.; DU, T.; TONG, L.; LI, S.; DING, R.; ZHANG, X. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. **Agricultural Water Management**, v.203, n.1, p.438-450, 2018

RASSINI, J. B. Período de estacionalidade de produção de pastagens irrigadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.39, n.8, p.821-825, 2004.

RAZZAGHI, F.; ZHOU, Z.; ANDERSEN, M.N.; PLAUBORG, F. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, v. 191, p. 113- 123, 2017.

ROCHA G.P., EVANGELISTA A.R., LIMA J.A. DE, ROSA B. Adubação Nitrogenada em Gramíneas do Gênero *Cynodon*. **Revista de Ciência Animal Brasileira** v.3, n,1, p.1-9, 2002.

RODRIGUES, D.C. **Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) Stapf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas**. Piracicaba: ESALQ, 2004. 94p. Dissertação Mestrado

ROSA, T.H.; WALTER, L.C.; STRECK, N.A.; CARLI, C.; RIBAS, G.G.; MARCHESAN, E. Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.12, p.1159-1165, 2015.

SALES, E.C.J.; REIS, S.T.; ROCHA JÚNIOR, V.R.; MONÇÃO, F.P.; MATOS, V.M.; PEREIRA, D.A.; AGUIAR, A.C.R.; ANTUNES, A.P.S. Características morfológicas e estruturais da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu submetida a diferentes doses de nitrogênio e alturas de resíduos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 5, p. 2673- 2684, 2014.

SALES, R. A. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura do Yacon. 2018.** 74f. Dissertação (Mestre em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2018.

SANTOS, Manoel Eduardo Rozalino et al. Características estruturais e índice de tombamento de brachiaria decumbens cv. basilisk em pastagens diferidas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 4, p. 626–634, 2009.

SBRISSIA, A.F.; DA SILVA, S.C.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. **Ecofisiologia de plantas forrageiras e o manejo do pastejo.** Palestra apresentada no 24º Simpósio sobre Manejo da Pastagem. FEALQ, Piracicaba, 3-5 de setembro de 2007.

SCS. **'Irrigation water requirements' National Engineering Handbook, part 623 Soil Conservation Service, US Dept. of Agriculture.** Washington, USA. 1993.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p.698–704, 1996.

SOUZA E.M., ISEPON O.J., ALVES J.B., BASTOS J.F.P. & LIMA R.C. Efeitos da irrigação e adubação nitrogenada sobre a massa de forragem de cultivares de *Panicum maximum* Jacq. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, n.4, p.1146-1155, 2005.

STEDUTO, P., HSIAO, T.C., FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**. v.25, n.1, p.189–207. 2007.

STEDUTO, P., T.C. HSIAO, D. RAES, E. FERERES. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**. v.101, n.1, p.426–437 2009.

STEDUTO, P.; RAES, D. HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: Crop Yield Response to Water. **Irrigation & Drainage**, v.66, Rome, 2012.

TSAKMAKIS, I.D.; KOKKOS, N.P.; GIKAS, G.D.; PISINARAS, V.; HATZIGIANNAKIS, E.; ARAMPATZIS, G.; SYLAIOS, G.K. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. **Agricultural Water Management**, v. 213, n.1, p. 419-432, 2019.

Thornley, J.H.M., Johnson, I.R. **Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology**. Clarendon Press. 2000.

TONATO, F. **Determinação de parâmetros produtivos de Cynodon spp. Em função de variáveis climáticas**. 2003. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

TONATO, F.; BARIONI, L. G.; PEDREIRA, C. G. S.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V. Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de

forragem em pastagens tropicais. **Pesquisa Agropecuária brasileira**. v.45, n.5, p.522-529. 2010.

TRINDADE, J.K. da; DA SILVA, S.C.; SOUZA JÚNIOR, S.J. de; GIACOMINI, A.A.; ZEFERINO, C.V.; GUARDA, V.A.; CARVALHO, P.C.F. de. Composição morfológica da forragem consumida por bovinos de corte durante o rebaixamento do capim-marandu submetido a estratégias de pastejo rotativo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.883-890, 2007.

Viali, L. Correlação e Regressão. Disponível em: <http://www.pucrs.br/famat/viali/graduacao/engenharias/material/apostilas/Apostila_5.pdf>. Acesso em: 01 maio 2017.

VILELA, D.; RESENDE, J. C.; LEITE, B. J.; ALVES, E. A evolução do leite no Brasil em cinco décadas. **Revista de Política Agrícola**. n.1, v.1 p.5-24. 2017.

VITOR, C.M.T.; FONSECA, D.M; CÓSER, A.C., MARTINS, C.E.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; RIBEIRO JÚNIOR, J.I. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 3, p. 435-442, 2009.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society, Easton**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

XU, J.; BAI, W.; LI, Y.; WANG, H.; YANG, S.; WEI, Z. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. **Agricultural Water Management**, v. 213, n.1, p. 289-297, 2019.