



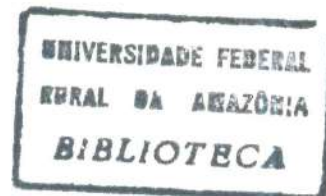
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
DOUTORADO EM AGRONOMIA

HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

ANÁLISE DA RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI A DISTINTAS LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO USANDO O MODELO AQUACROP

BELÉM

2018



HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

**ANÁLISE DA RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI A DISTINTAS LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO USANDO O MODELO AQUACROP**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Área de Concentração: Manejo e Conservação de Recursos Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza.

Biblioteca



54740019

**BELÉM
2018**

NC : 56786

TESE
633.33
N 972
EX: 01



Universidade Federal Rural da Amazônia
BIBLIOTECA
Nº 54740019 Data 23/10/18

Nunes, Hildo Giuseppe Garcia Caldas

Análise da resposta do feijão-caupi a distintas lâminas de irrigação usando o modelo aquacrop / Hildo Giuseppe Garcia Caldas. – Belém, 2018.
94 f.

Tese (Doutorado em Agronomia / Área de Concentração - Manejo e Conservação de Recursos Ambientais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

Orientador: Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza.

1. Feijão Caupi (*Vigna Unguiculata* L Walp). 2. Modelagem Agrícola. 3. Modelo AquaCrop. 4. Irrigação por Gotejamento 5. Déficit Hídrico I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de (orient.) II. Título.

CDD – 633.33

HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

**ANÁLISE DA RESPOSTA DO FELJÃO-CAUPI A DISTINTAS LÂMINAS DE
IRRIGAÇÃO USANDO O MODELO AQUACROP**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de Doutorado em Agronomia, para obtenção do título de Doutor. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Recursos Ambientais.

Aprovada em Julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza – Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

Dr. Alailson Venceslau Santiago – 1º Examinador
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL – EMBRAPA

Dr. Everaldo Barreiros de Souza – 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA

Dr. Joaquim Alve de Lima Júnior – 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Dr. Thieres George Freire da Silva – 4º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE

Dedico,

Aos meus pais,

Ildo Amaral Nunes & Maria Alice Garcia Caldas Nunes,

*Por todos os ensinamentos, incentivos para estudar e crescer profissionalmente, torcida,
dedicação, carinho e amor durante todos os anos de minha vida.*

A minha irmã, cunhados e sogra,

Anna Alice Garcia Caldas Nunes, Ivonete Sousa dos Santos, Iran Carlos Sousa dos Santos &

Maria Assunção Sousa,

Por toda torcida, companheirismo, amor, carinho e amizade.

A minha noiva,

Joyse Tatiane Sousa dos Santos,

Por toda a paciência, carinho, compreensão, companheirismo, ajuda e amor.

Ofereço,

Aos meus avôs,

Etelvino Caldas & Maria Raimunda Garcia Caldas,

Por toda sabedoria repassada, amor e carinho.

Aos meus familiares,

Por todos os ensinamentos, amor e carinho e por ser o meu horizonte a seguir.

AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus, pela força e pela fé, que faz brotar dentro de cada um de nós e em cada momento das nossas vidas;

Aos meus pais, Alice e Ildo por todo o apoio nessa grande caminhada da vida, a minha irmã, Anna Alice, meus cunhados pela força e torcida em todos os momentos da minha vida;

A minha noiva, que em todos os momentos difíceis esteve sempre ao meu lado. Te amo, Amor! Não teria páginas suficientes e tempo para escrever meu agradecimento por tudo o que você fez e faz por mim;

A minha família, em especial a todos meus tios e tias por todo o incentivo desde a graduação em Meteorologia;

Aos irmãos que ganhei na Universidade Federal do Pará e que são fundamentais em minha vida: Gabriel, Selma, Takeshi, Dayana, Glayson, Hugo, Mirlen, Kleyson, Alex, Diego, Ana Carla, Miriam, Ronaldo, Guilherme, Paulinho, João Athaides, Zezinho, Welbert, Rommel e outros mais que participaram e posso ter se esquecido de agradecer pelo nome aqui, peço desculpas, mas todos são importantes nesta caminhada. Desde o início da graduação até meu Doutorado, obrigado por toda a força, incentivo e companheirismo durante todos esses anos;

Aos colegas do grupo de pesquisa Interações Solo-Planta-Atmosfera na Amazônia (ISPAAM): Marcus, Vivian, Denis, Denílson, Déborah Pires, Daniely, Amanda, Wylker, Thaynara, Lene, Cenneya, Sueyla, Lucas, Thaís, Gustavo, Hamilton Neto, Allan, Igor, Irna, Bruna, João, Erika, Belfort, Grasiela, Bianca, Fernanda, Bruno, Jaime e Lucas Belém por toda a ajuda durante os anos de elaboração dessa tese;

Aos amigos do Programa de Pós Graduação em Agronomia – UFRA, pelas discussões científicas, troca de ideias e amizade durante estes quatro anos, em especial a todos os professores deste programa que repassaram todo seu conhecimento e aos diretores Gisele e Mário pela brilhante condução do programa;

Ao amigo, Evandro Chaves, de Colatina no Espírito Santo – professor no IFES, pelo auxílio, parcerias e ensinamentos, no modelo AquaCrop, além de toda a força nesta pesquisa e por toda a paciência.

Queria agradecer em especial aos funcionários da Fazenda Escola da UFRA em Castanhal: Tia Neide (mãezona), Dona Sandra, Ladeira, Darlan, Erick, Junior, Kedson, Renato, Mica, Raimundinho (gerente) por toda a paciência e ajuda na condução dos experimentos, Maradona, Gilson, Paulo, Tito, Fernando, Maciel e Nairon, pela amizade e

apoio nos experimentos de campo e pela ajuda nestes experimentos e que sem a ajuda de vocês nada disso teria sido alcançado;

Ao meu orientador, professor Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza, pela confiança depositada em mim, pelo exemplo de ética profissional e por todos os ensinamentos que serão de grande relevância para minha atividade profissional;

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos e auxílios pedagógicos neste doutorado;

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho científico.

Muito Obrigado!

RESUMO

O Nordeste paraense tem sido o principal polo produtivo do feijão-caupi no estado do Pará, onde foram aplicados altos investimentos para diminuir o baixo rendimento atual (788 kg ha^{-1}), decorrente do mau manejo e em parte pelas variabilidades climáticas. Nesse sentido, adotaram-se diversas formas para aumentar esta produção, como exemplo, o uso de modelos que pretendem antecipar o uso de diversos manejos auxiliando na tomada de decisão e na obtenção de melhores produções. Os modelos de culturas ainda são utilizados na simulação da biomassa (B) e do rendimento (Y) sob distintas condições climáticas e lâminas de irrigação. Desta forma o objetivo geral do trabalho foi calibrar (avaliar) e aplicar um modelo genérico de cultura (AquaCrop) para o feijão-caupi, em Castanhal, com vistas a definição do calendário agrícola e na realização do zoneamento agrícola no estado do Pará. Assim, esta tese abordou o uso do modelo AquaCrop nas estimativas de cobertura do dossel (CC), B e Y, bem como sua aplicação na estimativa do teor de água no solo (SWC). Após a validação, o modelo foi usado na identificação da janela ótima de semeadura (JOS) para Castanhal, e por fim foi realizado um zoneamento agropedoclimático das áreas aptas ao cultivo do feijão-caupi no estado, levando em consideração as diversas características da região, através da espacialização dos resultados simulados. Os resultados mostraram que o AquaCrop, após sua calibração para a CC, em função do índice de área foliar (IAF), obteve ótimas estimativas de B e Y, apresentando erros médios quadráticos normalizados (NRMSE) inferiores a 20% e 6%, para todos os tratamentos adotados e durante as etapas de calibração e validação, respectivamente. Estes valores de NRMSE obtidos demonstram a eficiência do modelo (EF) na simulação do rendimento do feijão-caupi, apresentando valores superiores a 0,88, indicando um desempenho muito bom. O modelo ainda pode auxiliar na gestão de água, pois ao comparar o SWC simulado pelo modelo com os dados obtidos em campo, sua eficiência (EF) foi sempre superior a 0,70, o que indica um bom desempenho na simulação deste parâmetro. O município de Castanhal possui uma JOS que vai de 10 a 20 de Abril, decorrentes da quebra de rendimento médio inferior a 10%, a uma probabilidade de 90% para ocorrerem rendimentos superiores a 1300 kg ha^{-1} , e pelo baixo risco de chuva na sua colheita. Estes resultados mostram que o modelo pode auxiliar na gestão e manejo adequado da irrigação pelo cultivo do feijão-caupi e que pode contribuir para o desenvolvimento desta cultura no estado.

Palavras-chave: Modelagem Agrícola. *Vigna Unguiculata* L. Walp. Irrigação por Gotejamento. Déficit Hídrico.

ABSTRACT

The Northeastern part of Pará State has been the main productive pole of cowpea in the state regarding high investments that were applied to reduce current low yield (788 kg ha^{-1}), which is due to poor management and partly due to climatic variability. Thereby, several ways have been adopted to increase its production, as an example, the use of models that intend to anticipate the use of different managements, aiding in the decision making and the obtaining of better productions. The crop models are still used in simulation of biomass (B) and yield (Y) under different climatic conditions and applied water blades. Therefore, this work aimed to calibrate (evaluate) and apply a generic model of culture (AquaCrop) for cowpea in Castanhal, in attempt to define an agricultural calendar and zoning in the state of Pará. Thus, this thesis addressed the use of the AquaCrop model in canopy cover (CC), B and Y estimations, as well as its application in the estimation of soil water content (SWC). After validation, the model was used to identify the optimum seeding window (OSW) for Castanhal, and finally an agropedoclimatic zoning of the areas suitable for the cultivation of cowpea in the state, taking into account the diverse characteristics of the region, through the spatialization of the simulated results. The results showed that AquaCrop, after its calibration for the CC, according to the leaf area index (LAI), obtained excellent estimates of B and Y, presenting mean normalized quadratic errors (NRMSE) of less than 20% and 6% for all the treatments adopted and during the calibration and validation stages, respectively. These values of NRMSE obtained demonstrate the efficiency of the model (EF) in the yield simulation of the cowpea, presenting values higher than 0.88, which indicates a very good performance. The model can also help in water management, because when comparing the SWC simulated by the model with the data obtained in the field, its efficiency (EF) was always higher than 0.70, which indicates a good performance in the simulation of this parameter. The municipality of Castanhal has an OSW that runs from April 10th to 20th, due to the average yield loss of less than 10%, to a 90% probability for yields exceeding 1300 kg ha^{-1} , and to the low rain risk in its harvesting period. These results show that the model can help in the management of irrigation by cowpea cultivation and that can contribute to the development of this crop in the state.

Keywords: Agricultural Modelling. *Vigna Unguiculata* L. Walp. Drip Irrigation. Water Deficit.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O feijão-caupi, na atual produção agrícola do Brasil, é uma cultura que vem se destacando na produção de grãos, servindo de alimento e como incorporadora de emprego e renda para as famílias. Possui importante papel socioeconômico nas regiões nordeste e norte, sendo estas as principais regiões produtoras de feijão-caupi no país (LIMA FILHO et al., 2013a; LIMA et al. 2016).

Em decorrência de sua importância para estas regiões estão sendo realizados investimentos com o objetivo de obter cultivares adaptadas as diferentes condições edafoclimáticas e na obtenção de técnicas que aumentem seus rendimentos, e mais especificamente ainda na região do nordeste paraense, principal polo produtivo do estado do Pará (TEIXEIRA et al., 2010; SOUSA, 2016). Estes investimentos têm contribuído para a expansão da produção do feijão-caupi possibilitando o uso de máquinas e técnicas que auxiliem nesta expansão aguçando o interesse de grandes produtores de grãos do país e de novas áreas de produção, como a região centro oeste do Brasil (CONAB, 2017; FARIAS et al., 2017).

Apesar do desenvolvimento de cultivares adaptadas ao clima da região, do elevado investimento em técnicas e no avanço dos sistemas de produções adotados, o feijão-caupi ainda apresenta uma produção média (788 kg ha^{-1}) relativamente baixa em relação ao seu potencial ($1435,60 \text{ kg ha}^{-1}$) e continua caindo ao longo dos anos (FREIRE FILHO et al., 2011; FAPESPA, 2015; SOUSA, 2016; CONAB, 2017). Isso é resultado de diversos fatores, como o manejo inadequado e a grande adversidade climática, que provoca a deficiência hídrica nestas regiões diminuindo seu rendimento ao final do ciclo e limitando seu plantio apenas a uma safra (safra das águas), ou seja, durante o período chuvoso da região plantada (SOUSA, 2016; SOUZA et al., 2017; FARIAS et al., 2017).

Por este motivo, a água, é o principal fator limitante à produção agrícola, principalmente em regiões onde as chuvas não suprem todas as necessidades de um determinado cultivo, assim o seu uso pela agricultura têm se tornado o objetivo de vários estudos pelo mundo (HSIAO et al., 2009; PAREDES et al., 2015; PAREDES; TORRES, 2016). O aumento da demanda de áreas irrigadas se intensificou nos últimos anos, ampliando em 73% na vazão de retirada das bacias do país, em 2013 (ALENCAR, 2014; ANA, 2013). Muito disto se deve pelo grande potencial que o Brasil possui para a irrigação (FAO, 2017), mas apesar desse potencial apenas uma pequena parte ainda é utilizada e em muitas das vezes é usada de forma inadequada não alcançando o objetivo desejado (SOUZA et al., 2012).

Logo estudar a resposta de uma cultura associada a diversas lâminas de irrigação em campo é muito trabalhoso e se torna indispensável para alavancar principalmente a produção nestas áreas. Portanto, o uso de modelo de cultura ou modelo agronômico pode auxiliar na análise de riscos climáticos e agroclimáticos, na gestão (manejo da cultura e irrigação) e no aumento dos rendimentos, através da geração de informação tecnológica e agrícola de forma antecipada, da simulação do impacto do estresse hídrico na produção, permitindo determinar a biomassa e o rendimento que também são usados na avaliação das práticas de manejo de culturas e irrigação (BARTERNG et al., 2010; CARVALHO et al., 2014; PAREDES et al., 2014; PEREIRA et al., 2015; LIMA, 2016; PAREDES; TORRES, 2016).

Os atuais modelos agronômicos partiram de modelos mais simplistas como o CERES (JONES; KINIRY, 1986) e o EPIC (WILLIAMS et al., 1989), derivando assim modelos mais robustos como o ALMANAQUE (KINIRY et al., 1992), o CropSyst (STOCKLE et al., 2003) e o DSSAT (JONES et al., 2003; LIMA, 2016). Apesar de existir uma grande variedade de modelos capazes de auxiliar na gestão de culturas há poucas aplicações para a simulação do rendimento do feijão-caupi, como exemplo, temos a aplicação do BEANGRO para o feijão (HOOGENBOOM et al., 1992) e simulações do rendimento do feijão-caupi com o CROPGRO (BASTOS et al., 2002; LIMA FILHO et al., 2013b) para o nordeste brasileiro (Piauí e Recôncavo Baiano) e para o município de Cruz Alta, no Rio Grande do Sul (OLIVEIRA et al., 2012).

Atualmente um modelo vem sendo bastante utilizado pela sua simplicidade, robustez e precisão na estimativa das diversas respostas (rendimento, biomassa) da cultura à necessidade de água e sob diferentes lâminas e métodos de irrigação. Este modelo é o AquaCrop (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009; STEDUTO et al., 2012; RAES et al., 2017), ele foi desenvolvido pela FAO (sigla em inglês para, Food and Agriculture Organization of the United Nations) em 2009 sob supervisão da divisão de terra e água da organização para ser usado em diversas culturas e dar auxílio na gestão de água pela agricultura.

O AquaCrop requer um menor número de parâmetros quando comparado a outros modelos (DSSAT, por exemplo) e estes são facilmente obtidos em campo, na sua maioria, dando origem a sua simplicidade (ALENCAR, 2014; FAO, 2017). Ele já foi testado para diversas culturas que já estão incorporadas ao seu módulo, como o milho (HSIAO et al., 2009), o algodão (FARAHANI et al., 2009) e o trigo (ANDARZIAN et al., 2011) e ainda há outros pesquisadores que resolveram testar novas culturas, parametrizando elas no AquaCrop, como a ervilha, por exemplo, os pesquisadores obtiveram bons resultados e demonstraram

que uma nova cultura pode ser utilizada no AquaCrop desde que os dados obtidos em campo sejam confiáveis (PAREDES; TORRES, 2016).

Outra vantagem é que o modelo pode ser incorporado a um sistema de informação geográfica (SIG) (AquaCrop-GIS) permitindo o auxílio na simulação de vários anos e na espacialização das informações de saída (LORITE et al., 2013). O uso de modelos incorporados a uma plataforma SIG permite o conhecimento de informações em regiões não monitoradas e de difícil acesso e que são de grande importância para o desenvolvimento das culturas (LORITE et al., 2015; NGOLO et al., 2018). Permitindo o auxílio no manejo de uma cultura e na área a ser plantada, como por exemplo, através do zoneamento agropedoclimático, identificando as áreas adequadas e as datas de semeadura para uma dada cultura, considerando alguns aspectos climáticos (NGOLO et al., 2018), através do uso de geotecnologias, técnicas e produtos usados na coleta e no processamento de informações espaciais (BACANI; LUCHIARI, 2014).

Um zoneamento necessita de menos levantamentos de campo e análises laboratoriais, pois o SIG pode ser usado para caracterizar o ambiente físico de uma determinada região de forma mais rápida e com um baixo custo, por isso o SIG tem sido amplamente utilizado, pela sua facilidade de operação e a sua grande capacidade de aplicação quando associado aos modelos (NGOLO et al., 2018). Vale ressaltar que para o cultivo do feijão-caupi ainda não se encontra disponível um zoneamento agropedoclimático para o estado do Pará e nem o uso do modelo AquaCrop na simulação dos rendimentos e auxílio no melhor entendimento das práticas adotadas nas regiões produtoras.

1.1 Objetivos

➤ Objetivo geral:

Modelos agrícolas que auxiliem no melhor manejo da cultura objetivando principalmente o aumento da produção, seja pelo uso de práticas que diminuam os riscos climáticos, como a identificação de áreas aptas ao cultivo do feijão-caupi no estado podem ser vistos como somadores de conhecimentos e geradores de informações.

Portanto, esta tese tratou da parametrização do feijão-caupi para a estimativa da biomassa e rendimento sob diferentes lâminas de irrigação, durante a fase reprodutiva, no município de Castanhal, Nordeste Paraense, através da calibração e validação do modelo AquaCrop testando ainda a capacidade do modelo em simular a quantidade de água disponível no solo, para os tratamentos adotados, comparando com os dados observados durante duas safras (2013 e 2014) e auxiliando na gestão e manejo adequado do feijão-caupi.

➤ Objetivos específicos:

1. Inserção da cultura do feijão-caupi ao modelo AquaCrop, através das informações obtidas para o município de Castanhal;
2. Avaliação da concordância entre os valores estimados e observados de biomassa, rendimento, cobertura do dossel e teor de água no solo;
3. Simulação dos rendimentos potenciais e reais pelo modelo AquaCrop, para o período de 2003 a 2014, associando a uma quebra de rendimento relativo para as simulações;
4. Identificação da janela ótima de semeadura para o município de Castanhal baseando-se na variabilidade climática da região e na obtenção de elevados rendimentos;
5. Aplicação de um limiar de irrigação (60 % da água prontamente disponível) através da irrigação automática pelo modelo para as datas de semeaduras adotadas na região;
6. Avaliação da eficiência do uso da água pela irrigação, cultura e datas de semeadura;
7. Identificação das áreas aptas (zoneamento agropedoclimático) ao plantio do feijão-caupi no estado do Pará através das características da cultura, dos solos e das mesorregiões somado as áreas desmatadas no estado;
8. Simulação do rendimento do feijão-caupi, para as mesorregiões, com o uso do modelo AquaCrop-GIS sob diferentes datas de semeadura.

1.2 Referencial Teórico

1.2.1 Aspectos do feijão-caupi

O feijão-caupi é uma planta dicotiledônea, que pertence à ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolina, de gênero e subgênero *Vigna* e seção *Catjang*. Sua origem é africana, é chamado ainda de feijão de corda ou feijão macassar e foi introduzido no Brasil, mais precisamente na Bahia, durante a segunda metade do século XVI (FREIRE FILHO et al., 2011).

Possui um crescimento rápido por ser uma leguminosa anual e herbácea, possibilitando assim boa cobertura ao solo, suas flores são hermafroditas e autóferas produzindo frutos do tipo vagem. Seu desenvolvimento está relacionado às condições de temperatura elevadas, solos arenosos ou de textura média, com boa drenagem (FREIRE FILHO et al., 2005). Mundialmente, os principais produtores do feijão-caupi são a Nigéria, Níger, Brasil, Mali e Tanzânia (FREIRE FILHO et al., 2011).

No país, sua produção se concentra nas regiões Nordeste e Norte (Nordeste Paraense), sendo amplamente cultivado pelos pequenos produtores (agricultura familiar), tornando-se um dos principais componentes da dieta alimentar (LIMA FILHO et al., 2013a), principalmente pelas altas taxas de proteínas (23-25% em média) e por possui os aminoácidos essenciais a alimentação, além de carboidratos (62%, em média), vitaminas e minerais, somadas as grande quantidades de fibras dietéticas e baixas taxas de gordura (ANDRADE JUNIOR et al., 2003), sendo importante na geração de emprego e renda (FARIAS et al., 2017).

Nos últimos anos, seu cultivo vem sendo utilizado na região Centro-Oeste do país, em razão do desenvolvimento de cultivares com características que favorecem o cultivo mecanizado (TEIXEIRA et al., 2010) e durante a entre safra da soja e milho (CONAB, 2017).

1.2.1.1 Cultivar BR3 – Tracuateua

Foi lançada em 1984 pelo Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido (CPATU) - atual Embrapa Amazônia Oriental – é a mais recomendada para a região produtora do estado (região Nordeste) por atender as demandas da região e dos produtores que necessitavam de uma cultivar de porte, ciclo e grãos mais uniformes (FREIRE FILHO et al., 2009).

Em geral, apresenta um porte prostrado e não forma um grande volume de ramas, possui inserção das vagens ao nível da folhagem, os grãos são de coloração branca, grandes, reniformes e com tegumento levemente enrugado, tendo um ciclo que varia de 60 a 75 dias. O

seu plantio ocorre principalmente entre os meses de Dezembro a Maio, que é quando se tem água prontamente disponível não havendo a necessidade do uso de irrigação (regime de sequeiro). Além de atender a demanda local são comercializadas em outros estados, como Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (EMBRAPA, 2005).

1.2.2 Déficit hídrico versus produtividade

A produção agrícola é afetada por diversos fatores, dentre eles, o déficit hídrico no solo é o que mais ocorre e sua intensidade pode provocar grandes consequências no rendimento final (SOUZA et al., 2017). Quanto menor é a disponibilidade de água no solo, mais negativo é o potencial de água na folha, afetando a bioquímica, a morfologia e os processos de desenvolvimento das plantas, reduzindo diretamente a fotossíntese, o que acarreta em prejuízos na produção agrícola em caso de períodos de estiagem ou falta de água no solo durante períodos essenciais para a produção (PEIXOTO, 2011; SOUZA et al., 2017).

O feijão-caupi possui um consumo hídrico que varia de acordo com o seu desenvolvimento (LIMA et al., 2006), sendo seu consumo mínimo durante a fase vegetativa e o máximo durante a fase reprodutiva, ocorrendo um decréscimo durante a maturação dos grãos. Variando de 258 a 420 mm por ciclo para a cultivar BR3-Tracuateua e nas condições edafoclimáticas de Castanhal, sendo que durante os estádios de desenvolvimento (fase vegetativa) esse consumo dificilmente excede os 3,7 mm por dia e chega a um máximo de 6 mm por dia durante a fase reprodutiva (FARIAS et al., 2017).

Souza et al. (2017), estudando o efeito do déficit hídrico sob dois tratamentos (irrigado e não irrigado) durante a fase reprodutiva do feijão-caupi em Castanhal, observaram que quanto menor o suprimento hídrico na planta, maiores são os efeitos negativos do déficit hídrico nos parâmetros de crescimento da cultura, acarretando em menor produção de matéria seca (até 54 %) e consequentemente em menor produtividade (reduziu em até 72 % a produção nos tratamentos não irrigados). Portanto, os estádios do feijão-caupi mais sensíveis ao déficit hídrico são os da fase reprodutiva (CARVALHO et al., 2014; LIMA et al., 2016; SOUZA et al., 2017).

1.2.3 Modelo AquaCrop e AquaCrop-GIS

O modelo AquaCrop (STEDUTO et al., 2012; RAES et al., 2012) simula o crescimento de diversas culturas (algodão, cevada, batata, beterraba, sorgo, trigo e etc.) em função da cobertura do dossel (CC). Foi desenvolvido pela FAO (Food and Agriculture

Organization of the United Nations) para auxiliar na gestão e na produção agrícola através do efeito da água no rendimento das culturas. Ele já foi amplamente testado para culturas, como o milho e tomate (KATERJI et al., 2013; PAREDES et al., 2014), e através da parametrização de novas culturas ao modelo, como a ervilha (PAREDES; TORRES, 2016), auxiliando no planejamento destas culturas e nas análises de cenários futuros demonstrando bons desempenhos nos seus resultados.

O AquaCrop usa um número relativamente pequeno de parâmetros e que requerem na sua determinação metodologias simples e por outro lado, os procedimentos de cálculos dentro do modelo são baseados nos processos biofísicos básicos das plantas que na maioria das vezes são bastantes complexos, garantindo uma simulação precisa da resposta da cultura a água no sistema solo-planta (RAES et al., 2009).

Atualmente o modelo AquaCrop já se encontra na versão 6.0 e também possui uma versão que pode ser integrada ao software ArcGis (AquaCrop-GIS), estes aplicativos são totalmente gratuitos e encontram-se disponíveis para seu download na página da FAO. Para sua simulação, o modelo necessita de dados meteorológicos, das características de culturas, das características do solo e das práticas de manejo, assim ele definirá como a cultura irá se desenvolver até atingir sua produção. Maiores detalhes sobre os parâmetros necessários, são descritos em Raes et al. (2015).

Com a criação do AquaCrop-GIS, o usuário pode simular vários projetos e ainda auxilia na geração dos arquivos de entrada e saída para o AquaCrop, na versão integrada ao sistema de informação geográfica (SIG) os resultados são elaborados e mostrados em formas de mapas, facilitando assim o seu entendimento e proporcionando uma melhor visualização das saídas do modelo (LORITE et al., 2015).

1.2.4 Zoneamento agropedoclimático

O levantamento de informações é indispensável para o desenvolvimento de qualquer cultura, pois permitem focar nas suas limitações fisiológicas, determinando, assim, seu potencial de uso (CARVALHO JÚNIOR, 1996). Neste sentido, muitos métodos têm sido utilizados para avaliar o potencial agrícola das terras e auxílios nos manejos das culturas, uma delas, é o zoneamento agrícola que permite a identificação de áreas com potencial ao plantio de determinada cultura através do cruzamento de diversas informações (clima, solo, risco, características da cultura e outros) (BRASIL, 2001; NGOLO et al., 2018).

Apresentando um histórico antigo no país e inicialmente contemplando apenas o componente climático, foram realizados alguns zoneamentos agroclimáticos, como exemplo, o zoneamento do estado do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 1994) e alguns zoneamentos ecológicos econômicos, como exemplo, o do estado do Pará (MENEZES et al., 2010).

A utilização das técnicas de geoprocessamento nos planejamentos agrícolas tem aumentado significativamente nos últimos anos, uma vez que fornecem análises e representações na forma de mapas, que são utilizadas na comunicação das informações relacionadas com o ambiente de forma integrada (BRASIL, 2001).

No estado do Pará, o uso dos zoneamentos agropedoclimáticos, que utilizam banco de dados ambientais com o objetivo de obter uma classificação (aptas e não aptas) que integre diversas variáveis por meio das operações de geoprocessamento, com o uso de uma plataforma SIG, reclassificando e cruzando as diferentes informações das áreas em questão com a cultura (CARVALHO JÚNIOR et al., 2003), ainda não foi testado para o feijão-caupi.

O uso de um SIG permite explorar os diferentes dados e assim gerar informações por meio de análises espaciais, fornecendo soluções rápidas e precisas para diversos problemas relacionados com a distribuição, espacial e temporal, dos dados em análise. Este tipo de metodologia permite fazer uma avaliação que antecipe a tomada de qualquer decisão (NGOLO et al., 2018).

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. de. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura de cana-de-açúcar**. 2014. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: 2013: Ed. Especial. Brasília: [s.n.], 2013. 98 p. Disponível em: < http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf >. Acesso em: 30 mai. 2017.
- ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M. A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 1-8. 2011.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; SANTOS, A. A. dos; SOBRINHOS, C. A.; BASTOS, E. A.; MELO, F. de B.; VIANA, F. M. P.; FREIRE FILHO, F. R.; CARNEIRO, J. da S.; ROCHA, M. de M.; CARDOSO, M. J.; SILVA, P. H. S. da; RIBEIRO, V. Q. **Cultivo de Feijão Caupi**. Embrapa Meio-Norte, Ano 2003.
- BACANI V. M.; LUCHIARI, A. Geoprocessamento aplicado ao zoneamento ambiental da bacia do alto rio Coxim - MS. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 184-197. 2014.
- BASTOS, E. A.; FOLEGATTI, M. V.; FARIA, R. T. de; JÚNIOR, A. S. de A.; CARDOSO, M. J. Simulation of growth and development of irrigated cowpea in Piauí State by CROPGRO model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1381-1387, out. 2002.
- BARTERNG, P.; HOOGENBOOL, G.; PATANOTHAI, A.; SINGH, P.; WANI, S. P.; PATHAK, P.; TONGPOONPOL, S.; ATICHART, S.; SRIHABAN, P.; BURANAVIRIYAKUL, S.; JINTRAWET, A.; NGUYEN, T. C. Application of the Cropping System Model (CSM) – CROPGRO Soybean for Determining Optimum Management Strategies for Soybean in Tropical Environments. **Journal Agronomy and Crop Science**, v. 196, p. 231-242. 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Coordenação Nacional do Zoneamento Agrícola. **Zoneamento agrícola: safra 2000/2001**. Brasil: culturas algodão, arroz, feijão, maçã, milho, soja e trigo. Estados RS, SC, PR, MG, RJ, SP, DF, GO, MT, MS, TO, AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN, SE. Brasília, 2001.
- CARVALHO, J. J.; SAAD, J. C. C.; BASTOS, A. V. S.; NAVES, S. S.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, V. M. Teor e acúmulo de nutrientes em grãos de feijão comum em semeadura direta sob déficit hídrico. **Irriga**, Edição Especial 01, p. 104-117. 2014.
- CARVALHO JÚNIOR, W. **Modelos de planejamento agrícola conservacionista com suporte de geoprocessamento**: Estudo de caso nos municípios de Paty de Alferes e Miguel Pereira - RJ. 1996. 72 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

- CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; PEREIRA, N. R.; STRAUCH, J. C. M. Elaboração de zoneamentos agropedoclimáticos por geoprocessamento: soja em municípios do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 379-387. 2003. ISSN 1806-9657. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000200018>.
- CONAB. **Monitoramento agrícola**: safra 2016/17. Brasília: Companhia nacional de abastecimento, 2017. p. 164. (acompanhamento da safra brasileira (grãos)). Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaS/uploads/arquivos/boletim_graos_agosto_2017.pdf. Acesso em: 18 jun. 2017.
- EMBRAPA - AMAZÔNIA ORIENTAL. **Cultivar de Feijão Caupi: BR3 – Tracuateura purificada para o estado do Pará**. [S.I.: s.n.], 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/br3tracuateua_000fljvhfns02wyiv80lcx0a9xtkboga.pdf>. Acessado em: 17 mar. 2017.
- FAO 2017 - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSOFTWARE**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostatgateway/go/to/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 01 maio 2017.
- FAPESPA - FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ. **Boletim Agropecuário do Estado do Pará 2015**. Belém: FAPESPA, 2015. nº 1, 38 f.: il. jul.
- FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; STEDUTO P.; OWEIS, T. Y. Parameterization and Evaluation of AquaCrop for Full and Deficit Irrigated Cotton. **Agronomy Journal**, vol. 101, p. 469-476. 2009.
- FARIAS, V. D. S. et al. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 190-200, jan./mar. 2017. DOI - <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>.
- FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; LOPES, A. C. A. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos de feijão-caupi. **Revista Ciência Rural**, v. 35, p. 24-30. 2005.
- FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. S. R.; RODRIGUES, E. V. Produção, melhoramento genético e potencialidades do feijão-caupi no Brasil. In: REUNIÃO DE BIOFORTIFICAÇÃO, 4., 2011, Teresina. **Anais...** Teresina: EMBRAPA, CPAMN, 2011. p. 21.
- FREIRE FILHO, F. R.; ROCHA, M. de M.; SILVA, K. J. D.; RIBEIRO, V. Q.; NOGUEIRA, M. do S. da R. Feijão-Caupi: Melhoramento genético, resultados e perspectivas. In: simpósio nordestino de genética e melhoramento de plantas, Fortaleza. O melhoramento genético no contexto atual. **Anais...** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical/UFC. p. 25-59. 2009.
- 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. 3, p. 448-459. 2009.

- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using Soygro, Pnutgro, and Beangro: A review. **Transactions of the ASAE**, v.35, p. 2043-2055. 1992.
- JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. DSSAT Cropping System Model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 235-265. 2003.
- JONES, J. W.; KINIRY, J. R. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. **Texas A&M University Press**, College Station, 1986.
- KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 14-26. 2013.
- KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; GASSMAN, P. W.; DEBAEKE, P. A general, process oriented model for two competing plant species. **Transactions of the ASAE**, v. 35, p. 801-810. 1992.
- 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. 2013a.
- LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no Recôncavo Baiano através do modelo CROPGRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1294-1300. 2013b.
- LIMA, J. R. S.; ANTONIO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SILVA, I. F. Estimativa da evapotranspiração do feijão-caupi utilizando o modelo de Penman-Monteith. **Irriga, Botucatu**, v. 11, p. 477-491. 2006.
- LIMA, M. J. A. **Aplicação do modelo CROPGRO-SOYBEAN para otimizar épocas de semeadura e colheita de soja em polos de grãos do Pará**. 2016. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2016.
- LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P.; SAMPAIO, L. S.; SOUZA, P. J. O. P. Efeito combinado das variáveis meteorológicas sobre a condutância estomática do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v. 34, p. 547-553. 2016. DOI - <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620160414>
- LORITE, I. J.; GARCÍA-VILA, M.; FERERES, E. **AquaCrop-GIS/Version 2.1: Reference Manual**. Rome: FAO copyright materials, 2015. 20 p. (FAO DOCS). Disponível em: <<https://www.fao.org/aquacropgis/documents>>. Acesso em: 01 jan. 2018.
- LORITE, I. J.; GARCÍA-VILA, M.; SANTOS, C.; RUIZ-RAMOS, M.; FERERES, E. AquaData and AquaCrop-GIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 96, p. 227-237. 2013.

- MENEZES, C. R. C.; MONTEIRO, M. de A.; GALVÃO, I. M. F. **ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico das Zonas Leste e Calha Norte do Estado do Pará: Diagnóstico do Meio Socioeconômico**. 3. ed. Belém: Núcleo de Gerenciamento do Programa Pará Rural, 2010. 309 p. ISBN 978-85-64183-00-1
- NGOLO, A. O.; FERNANDES FILHO, E. I.; FERREIRA, W. P. M.; FERNANDES, R. B. A. Agroclimatic zoning for coffee crop in Angola. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 1, p. 19-28. 2018.
- OLIVEIRA, E. C.; COSTA, J. M. N.; PAULA JÚNIOR, T. J.; FERREIRA, W. P. M.; JUSTINO, F. B.; NEVES, L. O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum**, v. 34, p. 239-246. 2012.
- PAREDES, P.; DE MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**. v. 144, p. 81-97. 2014.
- PAREDES, P.; TORRES, M. O. Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. **Irrigation Science**, 15 f. 2016. DOI - <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-016-0520-x>
- PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**. v. 152, p. 57-71. 2015.
- PEIXOTO, C. P. **Curso de Fisiologia Vegetal**. Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo Bahiano, 2011. 177 p.
- PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; NEVES, M. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. **Agricultural Water Management**. v. 159, p. 39-254. 2015. Corrigendum in **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 408. 2016. DOI - <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.017>
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop-the FAO description. **Agronomy Journal**. v. 101, p. 438-447. 2009.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Crop water productivity: Calculation procedures and calibration guidance**, AquaCrop version 4.0. Rome: FAO Land and Water Development Division, 2012. 118 p.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual: version 5.0, Calculation Procedures**. Rome: FAO Land and Water Development Division, 2015. 65 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acessado em: 30 abr. 2017.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual, version 6.0. Chapter 1. FAO crop-water productivity model to simulate yield response to**

water. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acessado em: 01 abr. 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. **Macrozoneamento agroecológico e econômico do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMBRAPA-CNPT. 1994. 307 p.

SOUSA, D. de P. **Eficiência do uso da radiação solar pelo feijão-caupi sob diferentes lâminas de irrigação nas condições climáticas do nordeste paraense**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2016.

SOUZA, P. J. de O. P. de; FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; RAMOS, T. F.; SOUSA, A. M. L. de. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 748-759, jul./set. 2017.

SOUZA, R. O. R. de M.; PANTOJA, A. V.; AMARAL, M. A. C. M.; PEREIRA NETO, J. A. Cenário da Agricultura irrigada no estado do Pará. **Irriga** (UNESP. CD-ROM), v. 17, p. 177-188. 2012.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop - The FAO crop-water model to simulate yield response to water: Chapter I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, 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: FAO, 2012.

STOCKLE, C. O.; DANATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal Agronomy**. v. 130, p. 269-281. 2003.

TEIXEIRA, I. R.; SILVA, G. C.; RIBEIRA-OLIVEIRA, J. P.; SILVA, A. G.; PELÁ, A. Desempenho agrônomo e qualidade de sementes de cultivares de feijão-caupi na região do cerrado. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, p. 300-307, abr. jun. 2010.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. In: _____. **The EPIC model**. 1 ed. Texas: USDA-ARS, Temple, 1989.

2 ANÁLISE DA RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI A DISTINTAS LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO USANDO O MODELO AQUACROP

2.1 INTRODUÇÃO

Apesar do feijão-caupi ainda não apresentar uma produção significativa no Brasil, quando comparado ao feijão comum decorrente do nível tecnológico usado na atividade, somada ao uso de cultivares com baixo potencial produtivo e o seu mau manejo (CARDOSO; RIBEIRO, 2006), ainda assim vem ganhando destaque na atual produção de grãos (LIMA FILHO et al., 2013a), pois possui importância socioeconômica, principalmente para as famílias produtoras das regiões Norte e Nordeste devido ao seu alto valor nutritivo servindo de alimentação e renda a estas famílias (TEIXEIRA et al., 2010; LIMA FILHO et al., 2013a; LIMA et al., 2016).

No estado do Pará o seu principal polo produtivo se encontra na mesorregião do Nordeste Paraense (SOUZA et al., 2017) porém, alguns levantamentos mostram que cerca de 122 municípios do estado, cultivam alguma espécie de feijão-caupi revelando a importância desta cultura para o estado (IBGE, 2010; CONAB, 2017). Freire Filho et al. (2009), afirmam que nos últimos anos vem sendo empregado e desenvolvido o uso de cultivares adaptadas as regiões (variabilidade climáticas) somadas à incorporação de técnicas e tecnologias aos sistemas de produção com o objetivo de diminuir o ataque de doenças e obter a planificação da produção no estado.

No entanto, há uma grande oscilação da produção estadual anual (CONAB, 2017) decorrente de fatores bióticos, como as pragas e doenças e o mais atuante, os fatores de origem abiótica, como as condições físicas e químicas do solo e a grande variabilidade climática das regiões produtoras, em especial a radiação, temperatura e precipitação (FARIAS et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2015; SOUZA et al., 2017). Estas variáveis possuem grande importância para o planejamento nas produções agrícolas e qualquer mudança afeta diretamente no plantio e consequentemente na técnica de manejo a ser adotada (MINUZZI et al., 2015).

Por exemplo, para satisfazer as exigências do cultivo do feijão-caupi, uma região deve ter uma temperatura média, durante seu ciclo, entre 27 e 29 °C, sendo a ótima em torno de 28,20 °C (FARIAS et al., 2015). Por isso, que a temperatura é a variável que mais interfere no desenvolvimento das plantas (WAHID et al., 2007), uma vez que, elevadas temperaturas prejudicam a fotossíntese líquida provocando alterações no crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi (CRAUFURD et al., 1996a). Também, as baixas temperaturas podem acarretar

além da má germinação, o abortamento de flores e o retardo do processo de crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi (CRAUFURD et al., 1996b).

Com relação às precipitações, afetam diretamente a disponibilidade hídrica dos solos, influenciando na absorção de água pelas raízes e no status hídrico das culturas que por sua vez, implicam diretamente sobre a biomassa (crescimento) e o rendimento do feijão-caupi (SOUZA et al., 2017).

A ocorrência de grandes quantidades de precipitação durante a fase de maturação fisiológica dos grãos pode prejudicar o rendimento final e sua qualidade, pelo ambiente propício ao surgimento de doenças e pelo processo de aceleração de deterioração dos grãos da cultura (DINIZ et al., 2013). Também a ocorrência de déficit hídrico causa prejuízos para a economia de uma região, que é dependente das atividades agrícolas, somadas a sua intensidade, sua duração, o período de ocorrência e a interação com outros fatores (manejo dos solos e da cultura) que provocam perdas no rendimento final, definindo o seu impacto (FERNANDES et al., 2015).

Por isso o fator de maior importância na variação do rendimento final das culturas é a variabilidade interanual das condições hídricas do solo que é determinada pela variabilidade das chuvas (SILVA et al., 2009). Portanto, se o déficit principalmente ocorrer durante a fase reprodutiva do feijão-caupi que está intimamente ligada ao mau manejo provoca uma diminuição da produção dos grãos, pois durante esta fase ocorre a formação dos grãos e o mesmo estando sob déficit provoca uma diminuição da biomassa e da condutância estomática provocando uma diminuição relativa da produção de grãos (FARIAS et al., 2017; SOUZA et al., 2017).

Atualmente têm sido empregadas e estudadas várias formas de diminuir o efeito do déficit principalmente durante a fase reprodutiva, como o emprego da irrigação, por exemplo, objetivando diminuir os impactos do déficit hídrico sobre o rendimento do feijão-caupi e assim proporcionar um aumento da quantidade e qualidade dos grãos (LOUZADA; JOBIM, 2011; CARVALHO et al., 2014; FARIAS et al., 2017; SOUZA et al., 2017). No entanto, estudos com a prática de irrigação são muito onerosos e necessitam de um tempo relativamente grande para sua implementação e avaliação dos seus resultados (SENTELHAS et al., 2015).

Assim, formas que sejam capazes de auxiliar na escolha das estratégias adotadas no plantio e na colheita pode ser uma ótima solução para antecipar e reduzir os riscos de forma rápida e maximizar os rendimentos (LIMA FILHO et al., 2013b). Atualmente, existem os modelos de culturas (CERES, CROPGRO) que são capazes de simular o desenvolvimento de

uma cultura em função das condições edafoclimáticas locais, características da cultura, características do solo e manejo adotado e assim auxiliar na gestão e planejamento das práticas a serem adotadas (SENTELHAS et al., 2015).

Dentre vários modelos, destaca-se o modelo AquaCrop da FAO, que vem sendo amplamente utilizado em diversas culturas, como o milho (PAREDES et al., 2014), a cevada (TAVAKOLI et al., 2015) e a ervilha (PAREDES; TORRES, 2016). O modelo foi desenvolvido a partir de estudos e simplificações das relações no sistema solo-planta-atmosfera, realizando suas simulações por meio de informações referentes ao clima, solo, cultivar e práticas de manejo adotadas (RAES et al., 2017). Desde 2013, ele também possui uma versão que pode ser acoplado a um sistema de informação geográfica (AquaCrop-GIS) aumentando sua capacidade de simulação (vários projetos e vários anos), simplificando e auxiliando na formatação dos arquivos de entrada nos modelos e espacializando seus resultados de saída e a sua visualização por meio de mapas, ampliando suas formas e capacidades de uso para as culturas (LORITE et al., 2015).

Apesar da grande quantidade de modelos de cultura existentes, poucos foram utilizadas na simulação de rendimento e manejo do feijão-caupi, como exemplo, o BEANGRO (HOOGENBOOM et al., 1992) e o CROPGRO (OLIVEIRA et al., 2012; LIMA FILHO et al., 2013a) e seus estudos se restringem a região Nordeste do Brasil (principal polo produtivo do país) limitando as informações para as demais regiões produtoras e assim ocasionando um mau manejo da cultura em outros estados e/ou partes do Brasil (Norte e Centro Oeste) (LIMA FILHO et al., 2013b).

Aliado à carência de estudos desta natureza para o auxílio da cadeia produtiva estadual (Pará) e/ou local somada a praticidade e robustez dos modelos AquaCrop e AquaCrop-GIS, este trabalho realizou a parametrização do feijão-caupi aos modelos com dados experimentais de campo (município de Castanhal) sob diferentes lâminas de irrigação durante a fase reprodutiva, avaliando sua capacidade na simulação de biomassa, rendimento e teor de água no solo e ainda como ferramenta de análise de risco climático, previsão do rendimento e na escolha de áreas aptas ao plantio no estado do Pará.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área experimental e manejo da cultura

O experimento de campo foi realizado na fazenda escola, pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizada no município de Castanhal (1,32° S; 47,96° W; 41m de altitude), próximo ao nordeste paraense, durante os anos de 2013 e 2014. O clima local é do tipo Am, conforme a classificação climática de Koppen (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual de 26 °C, e com temperatura máxima e mínima correspondente a 28 e 22 °C, respectivamente. A precipitação anual média no período estudado foi de 1781,60 mm com duas estações bem definidas, a primeira denominada de “período chuvoso” que vai de Janeiro a Maio (35 % do total de precipitação), e a segunda denominada de “período seco” que vai de Agosto a Dezembro (16 % do total) (FARIAS et al., 2017).

Os dados meteorológicos diários (2003 a 2014) foram obtidos de uma estação meteorológica automática em superfície gramada, localizada a aproximadamente 3 km do campo experimental, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizadas as temperaturas média, máxima e mínima (T_{med} , T_{max} e T_{min} , °C), umidade relativa (UR, %), velocidade do vento a 2 metros (U^2 , $m\ s^{-1}$), radiação solar (R_s , $W\ m^{-2}$ ou $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e precipitação (PRP, mm). Estas variáveis foram utilizadas para calcular a evapotranspiração de referência diária (ET_0 , $mm\ d^{-1}$), através da metodologia proposta por Allen et al. (1998).

Durante os experimentos (2013 e 2014), também foi instalada uma estação meteorológica automática para o monitoramento das variáveis meteorológicas em campo (temperatura, UR, U^2 , radiação global (R_G , $W\ m^{-2}$), PRP e conteúdo volumétrico de água no solo (teor de água no solo) (SWC , $cm^3\ cm^{-3}$)) ligadas a um datalogger modelo CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM16/32A (Campbell Scientific, Inc.) que registravam e armazenavam a cada 10 minutos as médias destas variáveis. A PRP foi medida na área experimental para realizar o cálculo da lâmina bruta (LB, mm) de água que deveria ser aplicada, em função evapotranspiração de cultura diária (ET_C , $mm\ d^{-1}$) do dia anterior. Este valor era subtraído da lâmina a ser aplicada no dia. Para o cálculo da ET_C , foi utilizado o coeficiente de cultura sugerido por Bastos et al. (2008) para o feijão-caupi (Tabela 1).

Tabela 1 - Coeficiente de Cultura usado no experimento.

Estádios Fenológicos	KC
Inicial	0,8
Crescimento	0,8 a 1,1
Reprodutivo	1,1 a 1,4
Final	1,4 a 0,3

Fonte: Bastos et al. (2008). O estágio inicial e de crescimento são considerados fase vegetativa.

A área foi cultivada, com a cultivar BR3-Tracuateua, de porte prostrado e de crescimento indeterminado, a qual possui um ciclo de 60 a 70 dias. Freire Filho et al. (2009) afirmam que é a mais recomendada para a região e é a mais utilizada por agricultores no estado, por apresentar moderada tolerância as altas temperaturas e ao clima da região (SOUZA et al., 2017). As sementeiras ocorreram mecanicamente com um espaçamento de 0,50 m entre as linhas, com média de 10 plantas por metro linear (totalizando, 200.000 plantas por ha), realizadas no dia 01 de Outubro de 2013 e 09 de Setembro de 2014, ambas durante o período menos chuvoso da região.

O solo da área foi classificado como, latossolo amarelo distrófico (LIMA et al., 2016) de textura franco arenosa (RAMOS et al., 2016), suas texturas e características físicas foram obtidas em laboratórios de solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/AMAZÔNIA ORIENTAL), determinadas em amostras de solo, coletadas na área de estudo (15 amostras), com estrutura indeformada, com o uso da câmara de pressão de Richards para encontrar o ponto de murcha permanente (θ_{WP} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e a mesa de tensão para a capacidade de campo (θ_{FC} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e saturação (θ_{SAT} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) (Tabela 2). Para encontrar o θ_{WP} foi utilizada a pressão de 1,500 kPa e de 10 e 0 kPa, para θ_{FC} e θ_{SAT} , respectivamente (TEIXEIRA; BEHRING, 2017).

Tabela 2 - Propriedades texturais e hidráulicas do solo na área experimental (Fazenda Escola).

	Camada do solo (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	θ_{SAT}	θ_{FC}	θ_{WP}	K_{SAT}
Fazenda Escola	0,0-0,20	80	12	8	0,29	0,22	0,07	153
	0,20-0,40	71	13	16	0,31	0,24	0,08	61
	0,40-0,60	71	17	12	0,26	0,21	0,08	88
	0,60-0,80	72	12	16	0,27	0,21	0,06	62
	0,80-1,00	71	15	14	0,27	0,23	0,08	72

Fonte: Autor (2018). Teor de água no solo na saturação (θ_{SAT} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), na capacidade de campo (θ_{FC} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e no ponto de murcha permanente (θ_{WP} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e a condutividade hidráulica saturada (K_{SAT} , cm d^{-1}).

Os valores de condutividade hidráulica saturada (K_{SAT} , cm d^{-1}) foram obtidos por funções de pedotransferência, através dos dados de matéria orgânica, densidade e textura, das

camadas do solo, como entrada (SAXTON; RAWLS, 2006; RAMOS et al., 2014). O conteúdo de água disponível no solo (CAD, mm) foi calculado também a partir das características físico-hídricas do solo e profundidade efetiva da raiz (Z_r , m), que neste estudo foi de 0,30 m. No estudo, de Souza et al. (2017) na área, observaram que a raiz efetiva do feijão-caupi foi de 0,25 m de comprimento, nas amostras de plantas coletadas para a análise de biomassa, ou seja, 0,05 m que o mínimo do modelo e o valor utilizado neste estudo. Após a parametrização foi avaliado como o modelo simulou o conteúdo de água no solo (SWC, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), comparando com os valores observados em campo.

A adubação foi sugerida pelo laboratório da EMBRAPA para o cultivo do feijão-caupi e pelas informações das análises químicas do solo (amostra deformada) coletadas na área de estudo, maiores detalhes desta análise ver em Farias et al., (2017). Ela foi dividida e realizada antes da semeadura e 30 dias após a semeadura (DAS), sendo usado 0-60-45 kg ha^{-1} de NPK no primeiro ano e 0-40-45 kg ha^{-1} de NPK para o segundo. Durante os experimentos foram feitos tratos culturais, mantendo a área livre de plantas invasoras, doenças e pragas.

2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com seis blocos e quatro tratamentos, em uma área de 100 m^2 . Estes tratamentos possuíam diferentes lâminas de irrigação, durante a fase reprodutiva do feijão-caupi, pois é a fase mais sensível ao déficit hídrico (CARVALHO et al., 2014; LIMA et al., 2016), enquanto que durante a fase vegetativa todos os tratamentos receberam a mesma lâmina de água (100% de reposição da ET_C), com o objetivo de mantê-los na capacidade de campo (FC).

O tratamento 1 (T1) consistiu da reposição de 100 % da água perdida pela ET_C , o tratamento 2 (T2) foi repostado 50 % da água perdida pela ET_C , o tratamento 3 (T3) repôs 25 % da água perdida pela ET_C e o tratamento 4 (T4, controle) não houve reposição por meio da irrigação, conforme é utilizado por agricultores da região. Estes tratamentos se iniciaram aos 35° DAS e se estenderam até o 58° e 56° DAS, nos anos de 2013 e 2014, respectivamente, quando foi atingido o início da fase de maturação dos grãos (R9) do feijão-caupi, cessando a irrigação.

O turno de rega adotado foi diário em 2013 e a cada dois dias em 2014, com o objetivo de manter os tratamentos em função da FC ($0,22 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) decorrentes da perda de água da cultura por evapotranspiração e assim garantir que as análises ocorreram em função da diminuição desta reposição e não pelo déficit decorrente de vários dias.

As lâminas líquidas de água ou Irrigação (I, mm), aplicadas nos diferentes tratamentos, foram calculadas em razão da lâmina bruta (LB, mm) pela eficiência de aplicação (Ea, decimal) do sistema de irrigação. Estes valores são demonstrados na Tabela 3, junto com a PRP nos diferentes anos de experimento e fases do feijão-caupi. Embora o experimento tenha sido realizado no período menos chuvoso em ambos os anos, foram registradas a ocorrência de PRP durante ambas às fases. A fase vegetativa do ano de 2014 (126 mm) foi mais chuvosa que o ano de 2013 (111,75 mm), ajudando na manutenção dos tratamentos na FC, já durante a fase reprodutiva, a PRP (153,41 e 36,82 mm, no ano de 2013 e 2014, respectivamente) atrapalhou a manutenção dos tratamentos desejados, adicionando mais água a ambos (T2 adicionou 30% a mais, T3 adicionou 45% a mais e T4 adicionou 60% a mais), principalmente no ano de 2013 (Tabela 3).

Tabela 3 – Irrigações (I) usadas nos tratamentos e Precipitação (P) nos dois anos de experimento, divididos em fases do feijão-caupi.

Experimento, dividido em fases do reijão-caupi.											
Fase	2013					2014					
	I (mm)				PRP (mm)	I (mm)				PRP (mm)	
	T1	T2	T3	T4		T1	T2	T3	T4		
Vegetativa		47,76					75,66				
Reprodutiva	96,77	48,39	24,19	0	153,41	83,04	41,52	20,76	0	36,82	
Total	144,53	96,15	71,95	47,76	265,16	158,70	117,18	96,42	75,66	162,82	
Fonte: Autor (2018)											

Fonte: Autor (2018).

2.2.3 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado nos experimentos foi por gotejamento, com vazão de $1,03 \text{ l h}^{-1}$, tendo seus emissores espaçados em 0,20 m, entre si. As fitas gotejadoras eram de polietileno aditivado, com um diâmetro de 16 mm e com emissores do tipo pastilha integrado. A lâmina de água aplicada durante os experimentos controlados em função do tempo, com o auxílio de manômetros, registros, cronômetros e de acordo com a vazão dos emissores. Foram realizadas as avaliações hidráulicas, determinando o desempenho do sistema usado, conforme a metodologia proposta por Bernardo et al. (2006). Essa análise foi realizada em todos os tratamentos e blocos, através de recipientes coletores (1000 ml) que foram posicionados no início, meio e final das linhas de irrigação, num total de 196 na área experimental, por um período de 20 minutos e com duas repetições.

Estes valores foram utilizados para obter: O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC, %) (96 % em 2013 e 94 % em 2014), do coeficiente de uniformidade de

distribuição (CUD, %) (92 % em 2013 e 89 % em 2014) e o Ea (%) (94 % em 2013 e 92 % em 2014). Apesar da diminuição dos valores de avaliação de um ano para o outro, o que é normal em um sistema que é usado em vários anos, o sistema ainda teve um desempenho aceitável, em ambos os anos experimentais (MERRIAM; KELLER, 1978).

2.2.4 Dados da cultura

O desenvolvimento da cultura foi monitorado diariamente, desde a emergência até o fim do ciclo do caupi. Para isso foi utilizada a escala de Gepts and Fernández (FARIAS et al., 2017), em que foram observadas 10 plantas em uma linha de 1 m linear, exclusiva para este monitoramento. As medidas de crescimento foram coletadas a partir do 15° e 9° DAS em 2013 e 2014, respectivamente e em escala semanal, através da seleção de duas linhas de 20 metros em cada tratamento, sendo retiradas 5 plantas por tratamento (0,50 m linear), seguindo o delineamento experimental adotado, para cada bloco (6 repetições). Os órgãos foram separados em amostras de caule, pecíolo, folha, discos, pedúnculo, flor, vagem e grão (quando presentes).

O rendimento foi realizado quando 90% das plantas se encontravam em estágio R9 (66° e 63° DAS, em 2013 e 2014, respectivamente). Foram selecionadas três linhas centrais de 2 m lineares, exclusivas para análise de rendimento em cada tratamento, desta forma não foram utilizadas as bordas dos tratamentos em qualquer análise evitando-se quaisquer efeitos de bordadura, sendo coletados e contados os grãos e vagens. Todas estas amostras foram pesadas com uma balança de precisão (0,001 g), para obter o peso fresco de cada amostra, peso de 1000 grãos (quando existiam) e depois levadas a estufas aeradas a 70 °C, até obter o peso seco constante (72 horas), da matéria seca total (MSt) (Biomassa acima do solo e rendimento, kg ha⁻¹), e novamente pesados.

O índice de área foliar (IAF, cm² cm⁻²) foi determinado pelo método dos discos, em que foram retirados três discos foliares de 0,01 m de raio em cada planta, para este cálculo, através das amostras de matéria seca da folha (MS_f) (FARIAS et al., 2017). Estes valores foram usados para derivar a cobertura do dossel (CC, %) e usados na comparação dos valores simulados pelo modelo AquaCrop (PAREDES et al., 2015; PEREIRA et al., 2015). Todos esses parâmetros podem ser obtidos de dados observados da CC, ou de valores de CC derivados do IAF, metodologia adotada no trabalho, usando uma função exponencial da degradação temporal (PAREDES; TORRES, 2016):

$$CC = [1 - \exp(-\alpha IAF)] \quad (1)$$

Onde, α (adimensional) é o coeficiente de extinção de luz da copa. Este coeficiente foi discutido inicialmente por Jeuffroy e Ney (1997), sugerindo diversas formas de obtenção.

Ele depende e varia para cada cultura e pela densidade de plantas utilizadas no plantio (KATERJI et al., 2013; PEREIRA et al., 2015). Vários valores de α são relatados para o feijão-caupi e foram obtidos através da densidade de plantas, espaçamento adotado, manejo e como foi considerada a radiação no experimento, por exemplo, San José et al. (2004), estudando a cultivar M-28-6-6, obtiveram um valor de α médio de 0,66 e Tesfaye et al. (2006), estudando a cultivar Roba-1, na Etiópia, obtiveram um valor de 0,86, em ambos os casos, sob condições ideais (sem déficit hídrico). Teixeira et al. (2015), estudando as cultivares feijão perola e radiante, obtiveram um valor de 0,79 e 0,74, respectivamente.

Neste estudo, considerando a densidade de plantas e a radiação fotossintética interceptada pela planta, desta relação, o α foi obtido pelo coeficiente da função exponencial ao longo do ciclo do feijão-caupi (PENGELLY et al., 1999; SOUSA, 2016). Foram encontrados os valores de α de 0,83, 0,80, 0,77 e 0,74, respectivamente para cada tratamento T1, T2, T3 e T4. Plantas do tipo C3, como o feijão-caupi, quando comparadas a do tipo C4 apresentam comportamentos diferente, para a competição de luz e água, durante seu desenvolvimento vegetativo, o que explica o alto valor para o T1, pois quanto maior o α , mais o dossel superior intercepta radiação diminuindo a perda de água no solo por evaporação (CASAROLI et al., 2007) proporcionando um maior IAF e uma maior CC, o que foi observado nos experimentos (SOUSA, 2016).

O índice de colheita (HI, %) foi determinado pela razão entre a produção de grãos e a produção de biomassa total acima do solo (MEIRELES et al., 2003). Este índice avalia o desempenho da cultivar quando é submetida a diferentes condições com o objetivo de verificar se a mesma pode ser utilizada para uma determinada região (SOUZA et al., 2014).

2.2.4.1 Análise estatística do rendimento e biomassa em função dos tratamentos adotados (Deficiência hídrica no solo)

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SPSS Statistics 25 (IBM, 2018). Primeiro, foi aplicado o teste de normalidade de *Kolmogorov-Smirnov*, com o objetivo de verificar se os dados da variável dependente (Y), ou seja, a produtividade e a biomassa seguem a distribuição normal, ao nível de significância de 5% (α) (SILVA; AZEVEDO, 2016). Nesta primeira análise os dados de biomassa de 2014 não apresentaram distribuição normal, portanto foi necessário realizar uma transformação nestes dados

utilizando-se o Box-Cox, que é um procedimento automático que escolhe a melhor transformação (equação) a ser aplicada aos dados, desta forma a normalidade exigida para os dados foi atendida. Onde o mesmo sugeriu a transformação usando $\lambda = -0,33$, que corresponde à transformação inversa = $0,33 / \text{valor original}$ (IBM, 2018). Já os demais dados de biomassa e rendimento apresentaram uma distribuição normal, conforme os resultados da ANOVA, não sendo necessário realizar transformações.

Após isso, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de $p < 0,05 \%$ para todos os anos, com o objetivo de demonstrar que o déficit hídrico durante a fase reprodutiva do feijão-caupi influencia na perda de biomassa e produtividade na região.

2.2.5 Modelo Aquacrop e Aquacrop-GIS

O modelo AquaCrop foi desenvolvido pela FAO e agora também possui uma versão denominada AquaCrop-GIS que pode ser integrada ao software ArcGis (RAES et al., 2017), e mais recentemente foi lançada uma versão com código aberto (FOSTER et al., 2017). Neste estudo, foi usada a sua versão 5.0 que foi projetada para oferecer ótima precisão nos seus resultados de saída relacionando com o uso da água pela cultura (STEDUTO et al., 2012).

Os modelos consideram basicamente o efeito da água sobre os rendimentos de diversas culturas incorporadas ao aplicativo através de seus módulos e o usuário pode ainda inserir novas culturas através dos parâmetros essenciais para sua simulação (RAES et al., 2015).

Os modelos utilizam o passo de tempo diário, para calcular a ET_C , separando em transpiração da cultura (T_C , mm d^{-1}) e evaporação do solo (E_s , mm d^{-1}). No entanto, esta separação é diferente da utilizada pela FAO56, e é amplamente discutido por Pereira et al. (2015). Assim, a T_C é dada por uma equação simples:

$$T_C = CC^* K_{cTr,x} ET_0 \quad (2)$$

Onde a T_C é calculada pela cobertura de dossel ajustada pelos efeitos micro advectivos (CC^* , %), pelo coeficiente de transpiração máximo ($K_{cTr,x}$, adimensional) (neste estudo foi utilizado o valor de 1,14, este valor foi ajustado do valor obtido por Farias et al. (2017)) e pela ET_0 . O $K_{cTr,x}$ é ajustado pelo modelo levando em consideração os estádios fenológicos e senescência da cultura. A transpiração real ou ajustada (T_A , mm d^{-1}) pode ser obtida ajustando a T_C às condições de estresse hídrico do solo, usando o coeficiente de estresse hídrico (K_s , varia de 0 a 1), através de $T_A = K_s T_C$.

O K_s descreve os efeitos do estresse hídrico do solo sobre os seguintes processos de crescimento da cultura (RAES et al., 2012): (1) redução da taxa de expansão do dossel; (2) aceleração da senescência das folhas; (3) fechamento dos estômatos; e (4) pela penalizações sobre o HI, após o início da fase reprodutiva. Este valor é definido em termos de indicador de estresse (p , adimensional) se especificando um limiar superior (neste estudo o valor usado foi de 0,40) e inferior (RAES et al., 2012; VANUYTRECHT et al., 2014), diferente da abordagem FAO56 que considera uma relação linear entre o estresse hídrico e a T_c . No AquaCrop este efeito de estresse sobre os diferentes processos na cultura, podem não ser de forma linear. Assim, os valores de p propostos pela FAO56 não devem ser usados, pois na maioria das culturas os processos envolvidos não possuem uma relação linear (PAREDES; TORRES, 2016).

Os modelos ainda realizam um balanço diário da água do solo, na zona radicular, em termos de depleção (D_R , mm). D_R é expresso como uma fração da água total disponível (TAW, mm) (RAES et al., 2012). O D_R varia de zero, quando a água do solo está na FC (isto é, 0 % de depleção, portanto $K_s = 1$) e um, quando a água do solo está esgotada (100 % de depleção, $K_s = 0$). O estresse hídrico começa a afetar o processo de crescimento da planta, quando a D_R excede a água prontamente disponível ($RAW = pTAW$) (VANUYTRECHT et al., 2014).

Desta forma, diversos programas de manejo de irrigação podem ser projetados com o auxílio do modelo. Quando se pretende evitar o estresse hídrico, o modelo aplica imediatamente a irrigação antes que o D_R atinja a RAW. E diferentemente, quando o estresse hídrico é permitido, o limiar para a aplicação de água é maior do que a RAW. Assim cada processo afetado pelo estresse hídrico do solo (senescência, abertura de estômatos e etc.) possui o seu próprio nível de limiar superior e inferior (RAES et al., 2012). Já a E_s , também é obtida a partir da CC^* e pela ET_0 , através da equação:

$$E_s = K_R (1 - CC^*) K_{ex} ET_0 \quad (3)$$

Onde, K_{ex} (adimensional) é o coeficiente máximo de evaporação do solo e K_R (varia de 0 a 1) é o coeficiente de redução da evaporação, quando os valores de $K_R < 1$, significa que há disponibilidade de água no solo para responder à demanda evaporativa da atmosfera.

Portanto, no modelo, a ET_C depende diretamente da CC. Assim, a capacidade do modelo em produzir boas previsões de biomassa e rendimento depende da parametrização adequada da curva CC (PAREDES et al., 2015; PEREIRA et al., 2015).

A simulação do crescimento da CC ocorre através da combinação de quatro partes (submodelos) (STEDUTO et al., 2012; RAES et al., 2012): (1) o balanço de água no solo; (2) o desenvolvimento, o crescimento e o rendimento da cultura; (3) um submodelo atmosférico, o ciclo de chuvas, a demanda evaporativa (ET_0) e a concentração de CO_2 ; (4) um submodelo de manejo, que inclui a irrigação e a fertilização (PAREDES et al., 2014). Para um conhecimento detalhado sobre o modelo ver em: Steduto et al. (2012); Raes et al. (2012); Paredes et al. (2014); Paredes; Torres (2016).

Esta estimativa da curva de CC ocorre para todo o ciclo, considerando três fases de crescimento (RAES et al., 2012; VANUYTRECHT et al., 2014): a primeira começa na emergência e é caracterizado pela cobertura inicial do dossel no solo (CC_0 , %), e termina quando metade do CC máximo (CC_x , %) é atingida. A função exponencial do tempo que descreve a taxa de crescimento da CC usa um coeficiente de crescimento do dossel (CGC, % GDD^{-1}); a segunda fase dura até o CC_x ser atingido, onde o modelo adota uma função exponencial usando o mesmo CGC; e a terceira é referente ao declínio da CC após o início da senescência e utiliza um coeficiente de diminuição do dossel (CDC, % GDD^{-1}).

Como o feijão-caupi é colhido alguns dias após o início da senescência das folhas, não foi relevante uma determinação detalhada do CDC, em decorrência dos curtos períodos de tempo. Wellens et al. (2013) fizeram o mesmo procedimento ao parametrizar o AquaCrop para o repolho e Paredes; Torres (2016) para a ervilha. Neste estudo, a derivação da CC (PAREDES; TORRES, 2016) ocorreu a partir de valores observados do IAF (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de índice de área foliar (IAF) observados no experimento e usados na derivação da CC, divididos por ano e dias após semeadura (DAS).

IAF									
2013					2014				
DAS	T1	T2	T3	T4	DAS	T1	T2	T3	T4
15	0,35	0,34	0,33	0,36	9	0,16	0,15	0,16	0,15
19	0,53	0,56	0,54	0,59	12	0,30	0,27	0,29	0,27
25	0,95	1,04	0,86	0,96	16	0,73	0,59	0,66	0,56
29	1,54	1,52	1,36	1,56	19	0,98	0,87	0,92	0,83
32	2,27	2,33	2,12	1,99	22	1,68	1,59	1,50	1,45
36	2,71	2,55	2,37	2,37	25	2,24	2,20	2,13	2,09
39	2,86	2,78	2,64	2,47	30	2,64	2,59	2,56	2,49
43	3,25	3,04	2,81	2,84	32	2,84	2,79	2,70	2,64
46	3,20	3,03	2,81	2,70	36	3,03	2,94	2,87	2,85
50	3,26	3,07	2,93	2,66	39	3,23	3,12	3,07	2,99
54	3,16	2,83	2,71	2,43	43	3,49	3,25	3,14	3,01
57	3,07	2,68	2,53	2,25	46	3,52	3,28	3,16	3,03
64	2,71	2,52	2,33	2,07	50	3,30	3,05	2,87	2,74
					53	3,14	2,88	2,69	2,55
					60	2,85	2,49	2,27	2,15

Fonte: Autor (2018). Foram utilizados os valores de α de 0,83, 0,80, 0,77 e 0,74 para T1, T2, T3 e T4, respectivamente, na derivação da CC.

O modelo simula a matéria seca acima do solo usando a razão da produção de biomassa e água transpirada pela cultura durante o dia. O rendimento da cultura (Y , kg ha^{-1}) é simulado pelo modelo a partir da biomassa (B , kg ha^{-1}), através da equação:

$$Y = f_{HI} HI_0 B \quad (4)$$

Onde HI_0 (%) é o índice de colheita de referência (SOUZA et al., 2014), indicando a proporção colhível e f_{HI} (adimensional) é um fator de ajuste que é calculado internamente e que depende do tratamento usado, estresse hídrico e outras penalizações. Este ajuste pode incluir impactos da água e temperatura no rendimento final. Como tal parâmetro está intimamente ligado às características de cada região, alguns autores afirmam que o índice às vezes só pode ser utilizado para a região e cultivar estudados (FANCELI, 2003). Neste estudo o HI_0 (29%) foi considerado o encontrado para o T1 no experimento, pois não houve restrição de água em nenhum dos estádios do feijão-caupi neste tratamento. Portanto, os dados de entrada do modelo, neste estudo incluíram:

- (I) Dados climáticos da série de 2003 a 2014, consistindo em valores diários e a concentração média anual de CO_2 na atmosfera. No presente estudo foi utilizada a concentração de CO_2 da base de dados do modelo e os valores ET_0 calculados;
- (II) Dados do solo referentes às propriedades texturais e hidráulicas de cinco camadas (1 m);
- (III) A água facilmente evaporável (REW, mm) e a curva número (CN, adimensional), que são ainda calibrados e que caracterizam respectivamente a evaporação do solo e o escoamento superficial. O REW foi estimado usando as características texturais e de retenção de água da camada superior (0-0,20 m) (Allen et al., 1998);
- (IV) Dados sobre práticas de manejo do solo que influenciam no balanço hídrico do solo, ou seja, práticas de irrigação, cobertura vegetal e redução de escoamento;
- (V) Dados sobre a irrigação: (1) lâminas líquidas de irrigação; (2) quando não houve irrigação; (3) um programa de irrigação pré-determinado; e (4) geração de um programa de irrigação. A geração de um cronograma de irrigação se baseou em critérios de tempo usados nos experimentos (intervalo fixo, esgotamento admissível expresso em mm ou em % de RAW) e critérios de profundidade (reenchimento à FC ou usando uma aplicação líquida fixa expressa em mm ou em % de RAW).

Outras informações necessárias na entrada do modelo são fornecidas por Raes et al. (2012).

2.2.6 Parametrização, calibração e validação do modelo

A parametrização do modelo foi realizada utilizando os conjuntos de dados independentes e relativo ao sítio experimental de Castanhal. Inicialmente a parametrização foi realizada para os parâmetros que influenciam a curva de CC e no tratamento T1 que não sofreu restrição hídrica e posteriormente para os demais tratamentos.

Os valores iniciais para os parâmetros conservadores do feijão-caupi foram selecionados a partir de valores reportados para a ervilha, que é uma cultura de leguminosa de grão relativamente similar e por parâmetros obtidos experimentalmente, conforme a metodologia adotada por Steduto et al. (2012). A mesma abordagem foi adotada por Paredes e Torres (2016), ao considerarem como valores iniciais dos parâmetros conservadores da soja para a ervilha em seu estudo. Estes valores foram posteriormente refinados através de um procedimento de tentativa e erro, visando garantir o melhor desempenho entre as variáveis simuladas e observadas.

Depois de concluir este procedimento, outro procedimento de tentativa e erro foi aplicado para procurar o melhor valor de BWP* (Biomassa por produção de água, g m^{-2}), através da execução de sucessivas simulações do modelo (biomassa final) usadas na comparação com os valores observados. Em suma, o procedimento de tentativa e erro começou com o ajuste dos parâmetros da curva CC, seguidos por $K_{cTr,x}$ e CN até ao fim com o BWP*.

Para calibrar e validar o modelo, são necessárias no mínimo duas séries distintas de dados reais da cultura em estudo. Na primeira etapa (calibração) (ano de 2013), os parâmetros do modelo foram ajustados até que as respostas se aproximassem dos valores observados. Os parâmetros foram considerados ajustados a partir do momento que apresentaram baixos valores de erros e altos valores de eficiência nas simulações.

Para a validação (ano de 2014) os resultados obtidos para as duas séries temporais foram comparados utilizando-se métodos gráficos, como hidrogramas e retas de regressão, ou de análise estatística, como o Teste T de Student, o índice de concordância de Willmott (d) e a eficiência do modelo (EF) de Nash e Sultcliffe (PEREIRA et al., 2015; LIMA et al., 2016).

2.2.6.1 Avaliação do desempenho do modelo

Na avaliação do modelo e no auxílio do melhor ajuste dos parâmetros usado na cultura foram utilizados, alguns índices estatísticos, conforme a metodologia empregada por Paredes e Torres (2016):

(I) O coeficiente de determinação da regressão dos mínimos quadrados ordinários (R^2) e a inclinação (b_0) de regressão forçada à origem (FTO).

(II) Indicadores de erros de estimativa residual: erro quadrático médio normalizado (NRMSE), percentual médio de erro (PBias) e o erro absoluto médio (MAE), todos expresso em porcentagem. Estes indicadores foram calculados para cada interação, auxiliando na parametrização, através do menor erro obtido.

(III) A eficiência da modelagem (EF), indicando a qualidade da modelagem e fornecendo uma indicação da magnitude relativa do erro quadrático médio comparado a variância dos dados observados. Todos estes valores foram calculados no Excel.

Como há um pequeno número de observações (O_i), o NRMSE não pôde ser calculado para as previsões de rendimento (P_i), portanto, apenas a diferença bruta e a relativa foram utilizadas, respectivamente $GD = (P_i - O_i)$ e $RD = (P_i - O_i) / O_i$, este último expresso em porcentagem.

2.2.7 Previsão de rendimento pelo modelo e diminuição do rendimento relativo (Quebra de rendimento)

Após a validação do modelo foram realizadas as simulações do rendimento do feijão-caupi, através do seu módulo sazonal, programando 36 datas de semeadura, realizadas no 1º, 10º e 20º dia de cada mês, iniciando em Novembro e terminando em Outubro, para cada um dos 12 anos (2003-2014) inseridos, totalizando 432 simulações de rendimento. Todas as práticas adotadas são referentes às usadas pelos produtores da região e da área estudada, como a cultivar, o espaçamento, a adubação e o sistema de irrigação.

Foram adotadas duas condições de crescimento: (1) Condição Potencial Atingível, onde foi acionada a função de irrigação automática do modelo, quando a RAW (água prontamente disponível, %) baixava até 60 %; e (2) Condição Atual, onde a função de irrigação era desativada, deixando a cultura sujeita às condições de disponibilidade pluvial (OLIVEIRA et al., 2012).

Todas as simulações foram avaliadas em termos de diminuição do rendimento relativo (RYD, %) (PAREDES; TORRES, 2016), calculada através:

$$RYD = \left[\frac{(Y_m - Y_a)}{Y_m} \right] \times 100 \quad (5)$$

Onde Y_m (kg ha^{-1}) é o rendimento potencial e Y_a (kg ha^{-1}) é o rendimento real, observado ou estimado (LIMA FILHO et al., 2013b). Ainda, foi calculada a faixa de

confiança de 95 % por reamostragem, com o uso do bootstrap no software R. Nela, o software é programado para gerar 1000 reamostragens com reposição, construindo uma distribuição empírica e determinando percentis de 2,5 % e 97,5 % usados na obtenção da faixa com 95 % de probabilidade de ocorrência do valor, maiores detalhes sobre esta técnica ver em Efron e Tibshirani (1993).

Foi realizado ainda o balanço hídrico climatológico normal do solo (método de Thornthwaite & Mather) sugerido por Pereira (2005), usado no auxílio das estratégias de irrigação suplementares, escolha da janela de semeadura e uso da água pela cultura na área estudada, e para o cálculo dos componentes do balanço (DEF (Deficiência, mm), CAD (Conteúdo de água disponível, 45 mm), ARM (Armazenamento, mm)) aqui analisados, semelhante ao trabalho de Souza et al. (2017).

2.2.7.1 Avaliação de datas de semeaduras adotadas na região e estratégia suplementar de irrigação

Considerando a capacidade do modelo AquaCrop de prever o rendimento do feijão-caupi e a simulação do conteúdo de água do solo sob irrigação, os impactos no rendimento e no uso da água irrigada foram avaliados para três datas de semeaduras (01, 10 e 20 de abril), que são geralmente utilizadas por produtores da região (CONAB, 2017). Foram avaliados tanto os anos de 2013 e 2014, como para a série de 12 anos (2003-2014), em relação à estação meteorológica automática do município de Castanhal. Como para os agricultores o objetivo é alcançar elevados rendimentos de feijão-caupi somados a uma economia (Irrigação), foram avaliadas apenas duas situações de programação automática pelo modelo, para as três datas:

1. Irrigado até a capacidade campo (I) com o objetivo de minimizar as perdas de rendimento e economia com a irrigação, foi utilizado um limiar de irrigação para a depleção admissível no feijão-caupi, correspondente a 60 % da RAW, neste ponto a irrigação automática do modelo era acionada para repor até a θ_{FC} (Teor de água no solo na capacidade de campo);

2. Não irrigado (NI) com o objetivo de avaliar o estresse provocado pela falta de água no rendimento, considerando que é desta forma que é produzido o feijão-caupi na região.

Todas as simulações foram avaliadas em termos de diminuição do rendimento relativo ou quebra de rendimento (RYD). Para avaliar os diferentes impactos sobre o uso da água pela cultura também foram utilizados os indicadores de produtividade da água (PEREIRA et al.,

(I) Eficiência do uso da água na irrigação (WP_{Irrig} , kg m^{-3}).

$$WP_{Irrig} = \frac{Y_a}{IWU} \quad (6)$$

Onde IWU (mm) é água usada na irrigação e Y_a (kg ha^{-1}) é o rendimento real, observado ou estimado. O IWU foi calculado entre a razão da lâmina líquida usada ou estimada pelo modelo e a fração benéfica de uso da água (BWUF, adimensional), que é a fração de água irrigada e que foi adicionada ao armazenamento de água no solo na zona de raiz. Ele foi obtido em função da eficiência de distribuição sazonal (0,9) do sistema usado, medidos a partir da água capturada ao longo da profundidade de raiz do cultivo (PEREIRA et al., 2012).

(II) Eficiência do uso da água pela cultura (WP_{ET} , kg m^{-3}).

$$WP_{ET} = \frac{Y_a}{ET_{C act}} \quad (7)$$

Onde $ET_{C act}$ (mm) é a estimativa da evapotranspiração real da cultura pelo modelo.

(III) Eficiência do uso da água (WP , kg m^{-3}).

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} = \frac{Y_a}{(P_e + CR + \Delta SW + IWU)} \quad (8)$$

Onde o TWU (mm) é o consumo total de água, obtido pela soma da precipitação efetiva (P_e , mm), ascensão capilar (CR, mm), uso sazonal da água no solo (ΔSW , mm) e IWU. Como o lençol freático é muito profundo na área estudada, o CR foi nulo. A P_e foi obtida subtraindo a água perdida pelo escoamento superficial (RO, mm), estimado pelo AquaCrop, da PRP. O ΔSW foi calculado subtraindo-se a água final (SW_{end}) à água inicial do solo (SW_{ini}), ambas também estimada pelo modelo.

Utilizando a série de dados meteorológicos (12 anos), ainda foram calculadas as necessidades líquidas de irrigação (NIR, mm) para as três datas de semeadura, resultando em séries de valores de NIR para ambas as datas (PAREDES; TORRES, 2016).

2.2.8 Identificação das áreas aptas ao plantio do feijão-caupi no estado do Pará

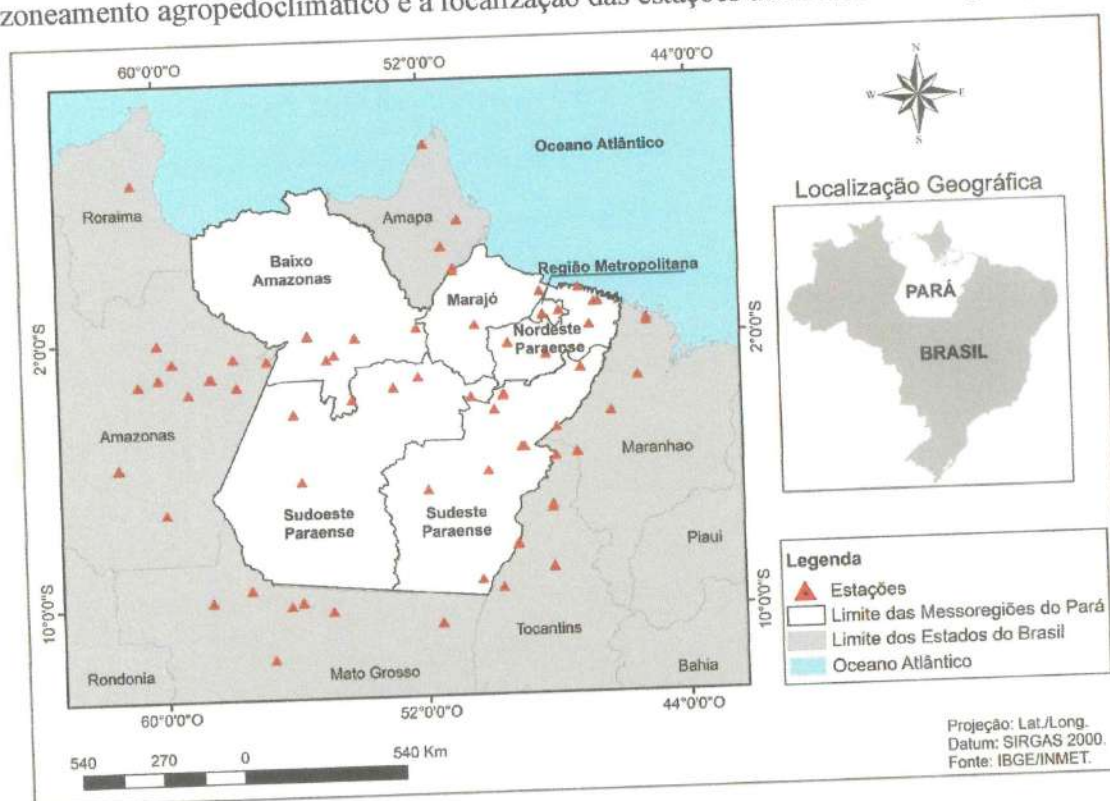
Ainda foi utilizado o SIG (AquaCrop-GIS) na identificação de áreas com potencial ao plantio do feijão-caupi se baseando nas características do solo das regiões, nas características climáticas provenientes das estações automáticas e convencionais (precipitação e temperatura), nas características da cultura e no uso do solo (áreas desmatadas), no estado do Pará, dividido

em mesorregiões. E ainda, estas informações foram utilizadas na simulação do rendimento do feijão-caupi no estado do Pará para várias datas de semeaduras.

2.2.8.1 Área estudada pelo zoneamento agropedoclimático

O estudo foi realizado no estado do Pará, que fica situado na região norte do Brasil, mais especificamente entre as coordenadas, $02,59^{\circ}$ e $-54,93^{\circ}$ ao Norte; $-01,83^{\circ}$ e $-57,10^{\circ}$ ao Leste; $-02,09^{\circ}$ e $-46,28^{\circ}$ ao Oeste; e $-09,65^{\circ}$ e $-53,18^{\circ}$ ao Sul e com uma área de 1.247.954,67 km². O estado é subdividido em 22 microrregiões, mas neste trabalho foram utilizadas as 6 mesorregiões existentes: Baixo Amazonas; Sudoeste; Sudeste; Marajó; Nordeste; e Região metropolitana de Belém (RMB) (IBGE, 2018). O Pará apresenta climas do tipo Af, Am e Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013). Seus limites são com o estado do Amapá a norte, Roraima a noroeste, Amazonas a oeste, Mato Grosso a sul, Tocantins a sudeste, Maranhão a leste; além do Suriname e Guiana ao extremo norte (Figura 1).

Figura 1 - Localização do Estado do Pará com as respectivas mesorregiões utilizadas para o zoneamento agropedoclimático e a localização das estações utilizadas na interpolação.



Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

2.2.8.2 Determinação da aptidão de áreas

Para a avaliação da aptidão de áreas pelo zoneamento agropedoclimático foram utilizados: a época de semeadura (1º decêndio de cada mês) adotada ao plantio do feijão-caupi, que no estado é utilizado o período chuvoso (CONAB, 2017), e é dependente das variáveis climáticas (temperatura e precipitação) e o cruzamento das características da cultura (cultivar BR3-Tracuateua), com os solos favoráveis ao seu plantio somadas as áreas desmatadas no estado do Pará até o ano de 2017 (INPE, 2018).

Como havia um pequeno número de estações meteorológicas no estado (Automáticas e Convencionais), foi realizada a interpolação das informações de temperatura e precipitação, sendo utilizados os dados (Fevereiro a Julho) das estações que apresentaram um mínimo de 3 anos de informações e suas séries consistidas. Foram selecionadas e utilizadas 80 estações (Figura 1), sendo que 42 estão localizadas no estado do Pará e as demais nas proximidades do mesmo, para que fosse possível realizar a interpolação. As estações utilizadas são de domínio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e suas séries possuíam dados desde 1960 para as estações convencionais (25 estações) e desde 2000 para algumas estações automáticas (55 estações).

Os dados foram interpolados pela ferramenta de análise espacial, no software ArcGIS 10.3, através do interpolador “krigagem”, por meio do método de krigagem ordinária e com o uso de um modelo esférico. Esta ferramenta leva em consideração as características espaciais da correlação das variáveis regionalizadas, permitindo que os dados obtidos por amostragem de certos pontos, possam ser usados para parametrizar a estimativa de outros pontos, ou seja, onde o valor da variável seja desconhecido e/ou necessário (FERNANDES; CARVALHO, 2013).

Estas características de temperatura e precipitação para o cultivo do feijão-caupi são objetos de estudos de muitos autores (FARIAS et al., 2015; FERNANDES et al., 2015; FARIAS et al., 2017), principalmente por determinarem a deficiência hídrica imposta pela falta de água durante fases essenciais (reprodutiva) a obtenção do rendimento final (SOUZA et al., 2017). A cultura exige, aproximadamente, 268 mm $\pm$ 10,21 mm (FARIAS et al., 2017) de lâmina total durante todo seu ciclo, para que produza satisfatoriamente, sem a necessidade de prática da irrigação e uma temperatura média em torno de 28 °C, para que não aumente o período de colheita (65 a 70 dias) do feijão-caupi, já que temperaturas mais baixas além de aumentar este período, pode afetar no abortamento de flores (CRAUFURD et al., 1996b) e aumentar os riscos de ocorrência de precipitações durante a colheita.

Mas regiões cujas cotas pluviométricas oscilam entre 280 mm e 420 mm, durante o ciclo, também são consideradas aptas para a implantação da cultura. Entretanto, devem-se observar as características dos solos a que estão condicionadas e a distribuição destas cotas em relação às fases do feijão-caupi, mais do que a quantidade de precipitações ocorridas no período (ciclo) (FREIRE FILHO et al., 2011; FARIAS et al., 2017).

Em geral, o feijão-caupi desenvolve-se em solos com regular teor de matéria orgânica, arejados e dotados de média a alta fertilidade. Portanto, os tipos de solos que merecem destaque para o seu cultivo são: Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Flúvico (FREIRE FILHO et al., 2009). Entretanto, outros solos, como Latossolos e Neossolos Quartzarênicos, com baixa fertilidade, podem ser usados mediante aplicações de fertilizantes químicos e/ou orgânicos (FREIRE FILHO et al., 2011). Assim na análise das áreas aptas foram utilizados os dados de tipos e características de solos, limites estaduais e das mesorregiões foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em formatos de vetores (shapefiles) (IBGE, 2018).

Após a interpolação dos dados de temperatura e precipitação e da inserção dos shapefiles de solos, foi realizado o cruzamento com as condições favoráveis ao plantio do feijão-caupi, para a cultivar BR3-Tracuateua (Tabela 5), pois é a mais recomendada e utilizada pelo polo produtivo do estado, por apresentar tolerância as elevadas temperaturas e ao déficit hídrico (FREIRE FILHO et al., 2009).

Tabela 5 - Condições favoráveis ao cultivo do feijão-caupi.

Atributos	Características
Temperatura	18 a 37 °C.
Lâmina necessária (Precipitação)	250 a 450 mm.
Textura do solo	Textura média, argilosa e arenosa.
Drenagem	Solos bem drenados.
Profundidade efetiva	25 a 40 cm.
REFERÊNCIAS	Farias et al. (2015); Souza et al. (2017); Vale et al. (2017)

Fonte: Autor (2018).

Estas áreas foram espacializadas em mapas e separadas em três tipos de classes: áreas aptas, áreas aptas com restrição e áreas não aptas (Tabela 6), correlacionando com as áreas desmatadas no estado e assim identificando as áreas que podem ser utilizados ao plantio do feijão-caupi.

Tabela 6 - Características adotadas nas identificações de áreas aptas ao plantio do feijão-caupi, no estado do Pará, e suas respectivas referências.

Classificação	Temperatura (T °C)	Precipitação (PRP mm)	Solos
Áreas aptas	$27 > T < 28,9$	$257 > PRP < 278$	LA; LVA; AVA e NF
Áreas aptas com restrição	$25 > T < 26,9$	$280 > PRP < 420$	LA; LVA; AVA e NF
Áreas não aptas	$T > 29$ $T < 24,9$	$PRP < 256$ $PRP > 421$	Demais solos
REFERÊNCIAS	Farias et al. (2015); Freire Filho et al. (2011)	Farias et al. (2017); Freire Filho et al. (2011)	Freire Filho et al. (2011)

Fonte: Autor (2018). Onde: LA – Latossolo Amarelo; LVA – Latossolo Vermelho Amarelo; AVA – Argissolo Vermelho Amarelo; e NF – Neossolo Flúvico.

Como o objetivo é apresentar áreas com aptidão ao plantio do feijão-caupi em função da data de semeadura, não foram consideradas semeaduras no período seco (2º semestre), pois seria necessária a implantação de irrigação em grande parte do estado. Portanto, foi considerado o plantio no 1º decêndio de cada mês até o fim do ciclo (70 dias), durante o período chuvoso, no qual é adotado por produtores do estado (CONAB, 2017). Foi realizada a análise em 1º de Fevereiro; 1º de Março; 1º de Abril; e 1º de Maio, em conjunto com a base de dados geográficos desenvolvida no SIG, executando os procedimentos computacionais para a seleção espacial, usando as características dos atributos, reclassificação, cruzamentos e análises de resultados.

Portanto, a indicação dos períodos favoráveis de semeadura com a sua respectiva área, neste estudo, levou em consideração as principais características da cultura (FREIRE FILHO et al., 2011) somadas ao ponto de vista hídrico com o tempo para colheita (FARIAS et al., 2015; FARIAS et al., 2017).

2.2.8.3 Simulação com o modelo AquaCrop-GIS

Após a identificação das áreas aptas ao plantio do feijão-caupi no Pará por data de semeadura, foi realizada a simulação do rendimento pelo modelo AquaCro-GIS que pode ser acoplada a uma versão de um SIG, neste estudo foi utilizado a versão 10.3 do ArcGIS, tanto para visualização dos vetores de saídas (shapefiles) quanto para uso dos bancos de dados de cada simulação.

O AquaCrop-GIS facilita o uso do modelo AquaCrop na simulação de vários projetos, auxiliando na geração dos arquivos de entrada e saída, tais resultados são elaborados e mostrados em um SIG facilitando assim seu entendimento e proporcionando uma interpolação

dos dados de saídas (LORITE et al., 2015). O modelo utiliza arquivos (formato xlsx) com todas as informações exigidas na simulação pelo AquaCrop (STEDUTO et al., 2009).

Os principais arquivos necessários são referentes: a cultura; as condições iniciais do plantio; aos solos; e ao manejo adotado. E ainda são necessários os dados meteorológicos, foram utilizadas as 80 estações localizadas no estado e no seu entorno, para cada ponto de simulação desejada e que se pretende extrapolar. Estas informações são utilizadas pelo programa na criação dos arquivos utilizados nos projetos de simulações, mais detalhes sobre o funcionamento do AquaCrop-GIS e os arquivos necessários para entrada e simulação ver em Lorite et al. (2013).

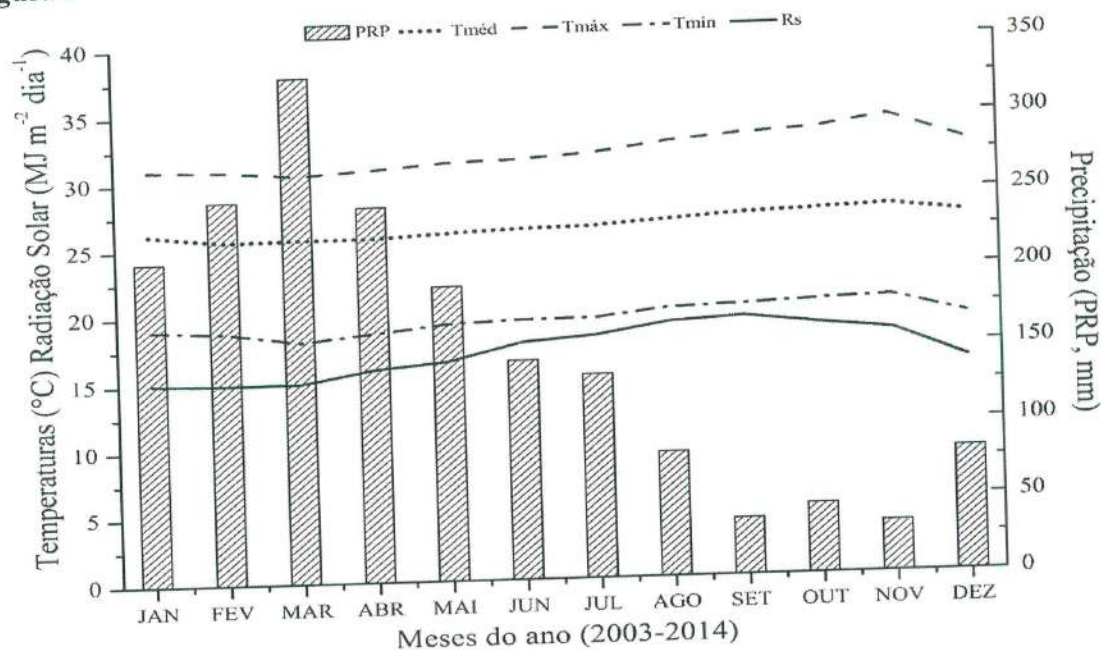
O AquaCrop-GIS gera em seus resultados várias saídas gráficas, usando os arquivos construídos dentro do seu banco de dados “dBase” (valores médios, coeficientes de variação e resumo dos dados), estes resultados, podendo ser exibidos em um ambiente SIG. Para cada simulação, os arquivos de saídas são gerados e armazenados na pasta referente à simulação (geralmente é utilizada a pasta “Resultados”).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Variabilidade climática

O município de Castanhal está inserido em uma zona climática Ami (ALVARES et al., 2013; LIMA et al., 2016; SOUZA et al., 2017), conforme Koppen, e possui um período chuvoso que vai de Janeiro a Maio, representando 70 % do total de PRP anual, e um período seco que vai de Agosto a Dezembro, representando apenas 16 % do total de PRP anual (SOUZA et al., 2017). Neste estudo (Figura 2), o trimestre chuvoso foi de Fevereiro a Abril, sendo Março (330,35 mm) o mês mais chuvoso, tais características implicam diretamente na escolha da data de semeadura do feijão-caupi no Pará, ocorrendo neste trimestre (FREIRE FILHO et al., 2011).

Figura 2 - Variabilidade climática mensal do município de Castanhal (2003 a 2014).



Fonte: Autor (2018).

Já o trimestre mais seco foi de Setembro a Novembro (PRP < 45 mm), sendo este período considerado o mais crítico na região (FARIAS et al., 2017), com o mês de Novembro (33 mm) sendo o mais seco. As temperaturas mensais do ar (Tmed) apresentam valores elevados ($\approx 26,5$ °C) e não sofrem grandes variações ao longo do ano, com valores de temperaturas médias máximas (Tmax) e mínimas (Tmin) do ar, variando de 34,0 °C (Novembro) a 18,0 °C (Março), respectivamente.

A RS que é muito importante para o cultivo do feijão-caupi, também não apresenta grandes variações ao longo do ano, ficando acima de $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e atingindo seus maiores valores durante o período seco da região, mais precisamente durante o mês de Setembro ($19,23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Portanto, a PRP é o que mais define o clima da região, já que variáveis como a Tmed e a RS, não apresentam grandes variações sazonais (LIMA et al., 2016; SOUZA et al., 2017). Logo, além do manejo adequado para a obtenção de elevados rendimentos do feijão-caupi, o período chuvoso foi considerado na avaliação da escolha da janela de semeadura na região, pois se deve evitar a PRP durante a colheita do feijão-caupi (FREIRE FILHO et al., 2011).

2.3.2 Análise estatística da biomassa e do rendimento durante os anos experimentais (2013 e 2014)

Ocorreu um efeito significativo ($p < 0,05$) dos tratamentos (T1 a T4) para as variáveis analisadas, com exceção para o ano experimental de 2013 (nos tratamentos T2 e T3) que não apresentaram diferenças significativas para o rendimento (Tabela 7). Já o feijão-caupi sob ótima condição (T1) pode atingir uma média de biomassa total de $538,45 \text{ kg ha}^{-1}$ (2013) ao final da fase reprodutiva. Durante esta fase, houve um déficit hídrico (T4) de 23 e 36 mm, para 2013 e 2014, respectivamente. Esta deficiência ocasionou uma redução de $\approx 28 \%$ na biomassa e $\approx 40 \%$ no rendimento do caupi, quando comparado ao tratamento T1. Portanto, o déficit hídrico durante a fase reprodutiva do feijão-caupi ocasiona uma perda na produção de biomassa e por sua vez no rendimento final, principalmente pela falta de água durante a fase de enchimento de grãos.

Tabela 7 - Valores médios de biomassa (kg ha^{-1}), rendimento (ton ha^{-1}), lâminas totais de irrigação (mm) e precipitação (mm) para o ciclo do feijão-caupi, em Castanhal, e o déficit hídrico (mm) imposto pelos tratamentos adotados durante a fase reprodutiva, nos anos de 2013 e 2014.

Ano	Tratamentos	Irrigação	Precipitação	Déficit Hídrico	Biomassa	Rendimento
2013	T1	144,53	265,16	0	538,45 a	1319,97 a
	T2	96,15		6	473,77 b	1222,16 b
	T3	71,95		14	450,79 c	1188,49 b
	T4	47,76		23	397,71 d	817,94 c
2014	T1	158,70	162,82	1,4	$*63,77 \times 10^{-5}$ a	1569,18 a
	T2	117,18		9	$*71,25 \times 10^{-5}$ b	1233,54 b
	T3	96,42		21	$*73,22 \times 10^{-5}$ c	1002,26 c
	T4	75,66		36	$*76,14 \times 10^{-5}$ d	792,34 d

Fonte: Autor (2018). Letras diferentes representam que houve diferença significativa entre as médias na coluna, pelo teste Tukey ($p < 0,05$). *Valores de biomassa transformados em função da equação, $X = 0,33/\text{valor original}$, sugerida pelo método Box-Cox para normalização dos dados. Os valores de deficiência foram calculados para uma CAD de 45 mm.

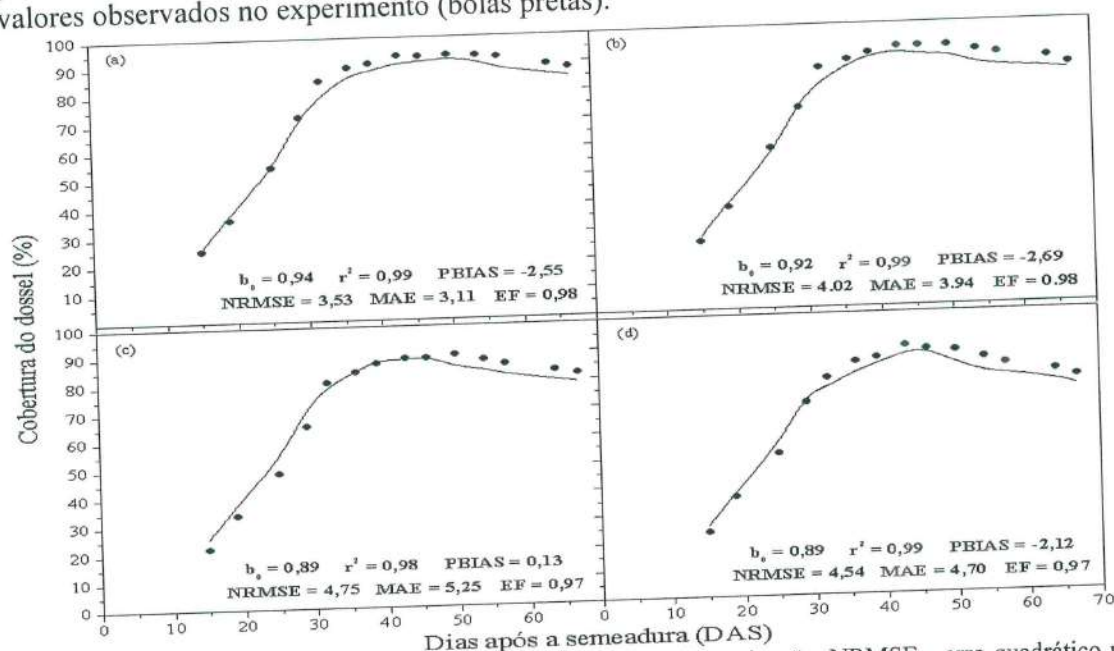
Isso também é evidenciado em outros estudos, como o de Souza et al. (2017), que também verificaram, que o déficit ocasionou uma diminuição na condutância estomática do feijão-caupi, provocando a diminuição do rendimento final em até 72 % nos tratamentos que não foram irrigados. Isto comprova que o déficit durante a fase reprodutiva pode ser um condicionante na produção do feijão-caupi na região.

2.3.3 Parametrização do feijão-caupi ao modelo AquaCrop

Os parâmetros usados (como o CGC, CDG, α e etc.) e que influenciam na simulação da CC pelo modelo, foram avaliados pelos diferentes indicadores de “qualidade de ajustes” e são apresentados nas Figuras 3 e 4, com relação à comparação de valores de CC observados, nos diferentes tratamentos adotados e durante as etapas de calibração (2013) e validação (2014) do modelo.

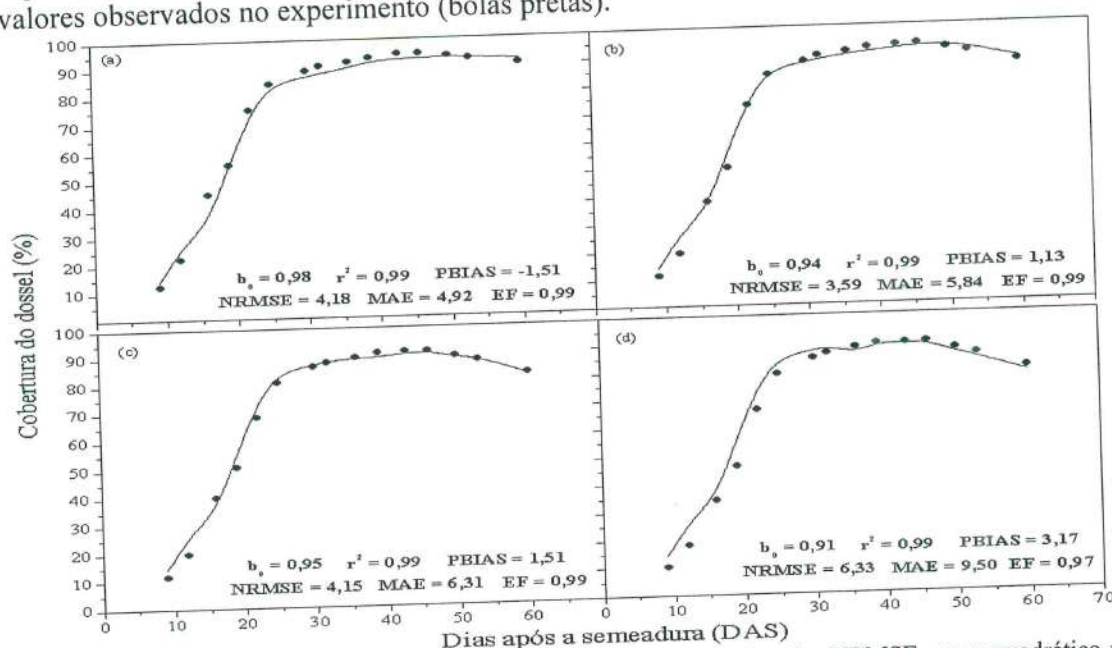
No ano de calibração, os valores de parâmetros adotados para a simulação da CC obtiveram baixos erros estimativos ($\text{NRMSE} < 4,75\%$) e elevada EF $> 0,97$, em todos os tratamentos. Tais resultados foram decorrentes da alta correlação ($R^2 > 0,98$) dos valores observados e simulados e por apresentarem pequenas tendências de subestimativa na simulação da CC ($b_0 > 0,93$ e $-2,69\% < \text{PBIAS} < 0,13\%$) na maioria dos tratamentos (T1, T2 e T4). Isso contribuiu para um baixo MAE ($\text{MAE} < 5,25\%$), em todos os tratamentos (Figura 3). Já durante o ano de validação (2014), a tendência de subestimativa da CC ($b_0 > 0,98$ e $1,13\% < \text{PBIAS} < 3,17\%$) é observada nos tratamentos T2, T3 e T4. No entanto, os erros de estimativas foram baixos e aceitáveis ($\text{NRMSE} < 6,33\%$) e a EF foi elevada ($\text{EF} > 0,97$), para todos os tratamentos (Figura 4). Assim, estes resultados mostram que foi obtida uma boa parametrização da curva de CC.

Figura 3 - Simulação da cobertura de dossel (linha preta) (CC, %) do modelo AquaCrop, para o período de calibração (2013) (T1 = a; T2 = b; T3 = c; T4 = d) em comparação com os valores observados no experimento (bolas pretas).



Fonte: Autor (2018). b_0 e r^2 são os coeficientes de regressão e determinação; NRMSE - erro quadrático médio normalizado, MAE - erro absoluto médio, PBIAS - porcentagem de erro, estes valores são expressos em porcentagem; EF - eficiência do modelo.

Figura 4 - Simulação da cobertura de dossel (linha preta) (CC, %) do modelo AquaCrop, para o período de validação (2014) (T1 = a; T2 = b; T3 = c; T4 = d) em comparação com os valores observados no experimento (bolas pretas).



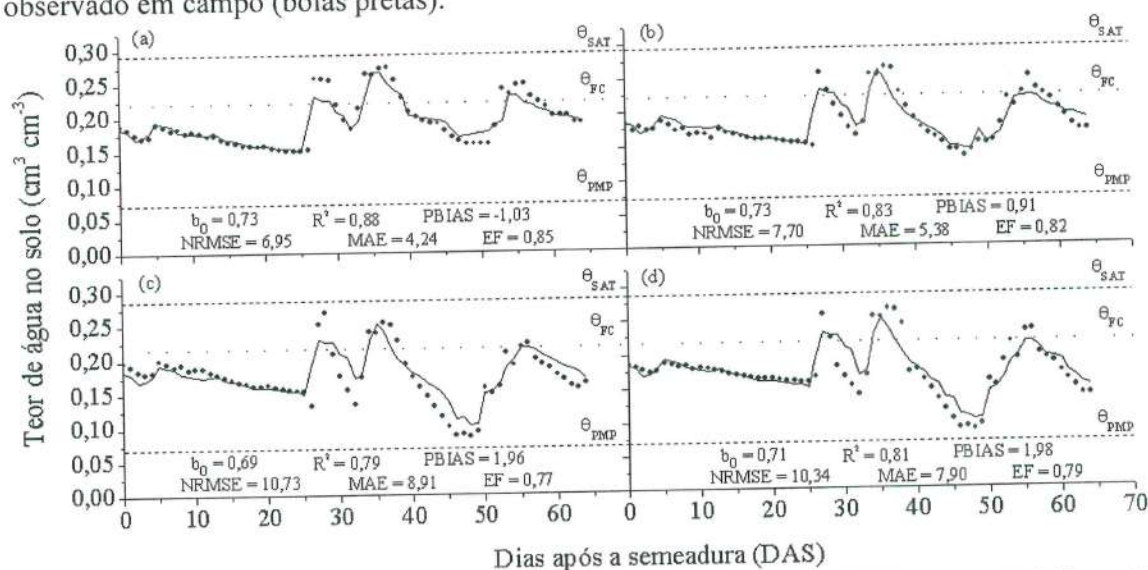
Fonte: Autor (2018). b_0 e r^2 são os coeficientes de regressão e determinação; NRMSE - erro quadrático médio normalizado, MAE - erro absoluto médio, PBIAS - porcentagem de erro, estes valores são expressos em porcentagem; EF - eficiência do modelo.

Uma forma de avaliar se a simulação da irrigação pelo modelo está coerente é através da dinâmica do conteúdo ou teor de água no solo (SWC) e muitos autores, afirmam que para ser obtido o equilíbrio hídrico do solo pelo modelo é necessária uma adequada parametrização da curva de CC e dos parâmetros de uso da água (PAREDES et al., 2015; PEREIRA et al., 2015). Assim o AquaCrop pode auxiliar nas estratégias de irrigação e na previsão dos rendimentos da cultura (PEREIRA et al., 2015). Estas dinâmicas do SWC simuladas pelo modelo são apresentadas, nas Figuras 5 e 6, em comparação ao observado em campo.

Neste estudo, foram obtidos bons resultados da simulação do SWC, durante ambos os anos (calibração e validação), mostrando que estes valores estão coerentes aos valores observados em campo, indicando também que tanto a parametrização do modelo para a curva de CC quanto aos parâmetros relativos ao conteúdo da água no solo (K_{CTR} , coeficiente de estresse hídrico no solo (K_s), REW e CN) sofreram bons ajustes e estão adequados.

Os indicadores de “qualidade de ajuste” mostram uma pequena tendência de subestimativa do SWC no ano de calibração, com $b_0 > 0,73$ e baixos valores de PBIAS ($-1,03\% < \text{PBIAS} < 1,96\%$), para todos os tratamentos. Além disso, os erros de estimativas são baixos e aceitáveis ($\text{NRMSE} < 10,73\%$ e $\text{MAE} < 8,91\%$), pois não prejudicaram a EF do modelo que foi superior a 0,77 para os tratamentos. Assim os erros estimativos são pequenos, $\text{NRMSE} = 10,73\%$ e $\text{MAE} = 8,91\%$, e aceitáveis (Figura 5).

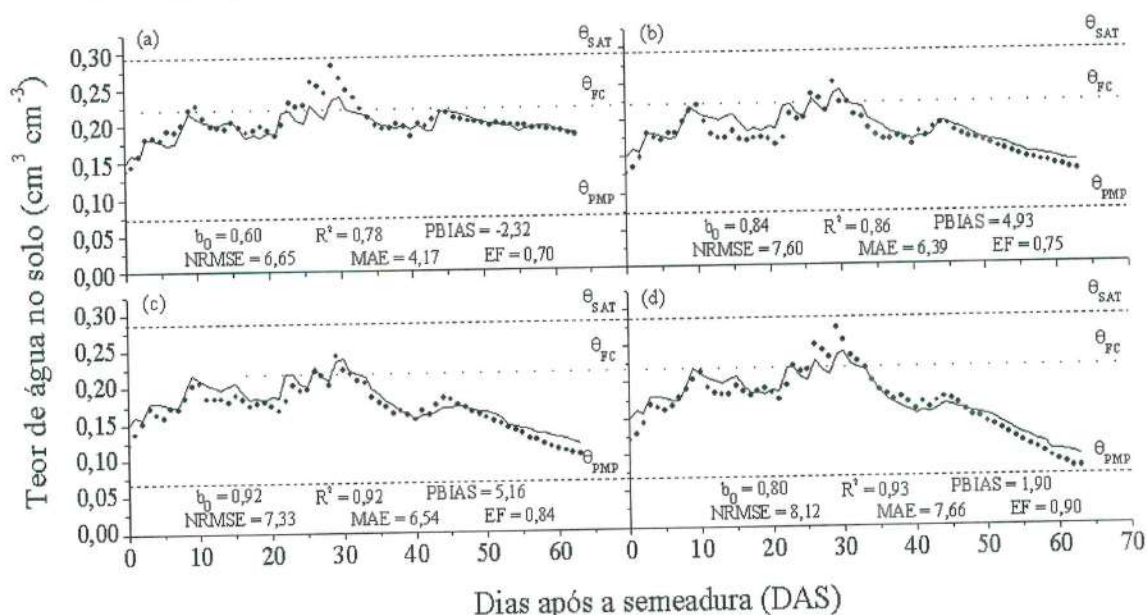
Figura 5 - Simulação do Teor de água no solo (Linha preta) (SWC, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) durante a etapa de Calibração (2013) do modelo AquaCrop (T1 = a; T2 = b; T3 = c; T4 = d) comparado ao observado em campo (bolas pretas).



Fonte: Autor (2018). b_0 e R^2 são os coeficientes de regressão e determinação; NRMSE - erro quadrático médio normalizado, MAE - erro absoluto médio, PBIAS - porcentagem de erro, estes valores são expressos em porcentagem; EF - eficiência do modelo.

Durante a etapa de validação (2014) os resultados também foram satisfatórios para a simulação do SWC, com os resultados dos indicadores de “qualidade dos ajustes” demonstrando uma pequena tendência de subestimativa, com valores de b_0 próximos de 0,92 e baixos valores de PBIAS, variando de 2,32% a 5,16%, para todos os tratamentos. Além dos erros de estimativas estarem aceitáveis ($6,65\% < \text{NRMSE} < 8,12\%$ e $4,17\% < \text{MAE} < 7,66\%$) para estes tratamentos. Em geral, estes valores de erros não influenciaram na eficiência do modelo na simulação do SWC, durante a etapa de validação, pois os valores de EF foram maiores que 0,70 (T1) (Figura 6).

Figura 6 - Simulação do Teor de água no solo (Linha preta) (SWC, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) durante a etapa de Validação (2014) do modelo Aquacrop (T1 = a; T2 = b; T3 = c; T4 = d) comparado ao observado em campo (bolas pretas).



Fonte: Autor (2018). b_0 e R^2 - são os coeficientes de regressão e determinação; NRMSE - erro quadrático médio normalizado, MAE - erro absoluto médio, PBIAS - porcentagem de erro, estes valores são expressos em porcentagem; EF - eficiência do modelo.

Estes resultados demonstram que o modelo pode auxiliar nas estratégias de irrigação na área estudada, pois a variação do SWC observado foi bem simulada pelo modelo. Quando comparado a outros estudos de modelos, que foram testados na simulação do SWC, o modelo AquaCrop demonstrou um melhor desempenho. Dallacort et al. (2010), por exemplo, usando o modelo CS-CROPGRO para diferentes condições e lâminas no cultivo de feijão comum, encontraram uma correlação (R^2), que variou de 0,70 a 0,74 e ainda obtiveram elevadas diferenças entre os valores observados e simulados pelo modelo, apontando uma ineficiência na simulação da absorção e redistribuição da água no solo. Mais recentemente, Santos et al. (2016), usando o mesmo modelo (CS-CROPGRO) em Jaboticabal (SP), para a cultivar IAC-

Carioca, também relataram uma baixa eficiência do modelo na simulação do SWC no seu estudo, evidenciados pela baixa correlação dos valores ($R^2 = 0,55$) e pelo altos erros de estimativas ($RMSE = 0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), para os anos analisados.

Portanto, o modelo AquaCrop demonstrou ser útil na estimativa do SWC para o local e condições experimentais. A melhor simulação do modelo, durante a fase inicial da cultura do feijão-caupi se deu pela mesma utilização de água durante esta fase, conforme também foi observado por Pereira et al. (2015), em seu estudo. Para a fase (fase reprodutiva) em que houve diferenciação nos tratamentos observou-se pequenos valores de subestimativas decorrentes dos tratamentos adotados, mas que não afetaram o desempenho do modelo. Isto é decorrente do estágio final do feijão-caupi ser curto, o que facilita a sua parametrização (CC) e consequentemente a simulação do SWC, T_A e E_s , conforme também foi observado por Paredes e Torres (2016), em seu estudo.

A segunda fase que dura até o CC_X (neste estudo foi utilizado o valor de 93%) ser atingido, onde o modelo adota uma função exponencial usando o mesmo CGC; e a terceira é referente ao declínio da CC após o início da senescência e utiliza um coeficiente de diminuição do dossel (CDC, $\% \text{ GDD}^{-1}$). Os parâmetros CGC e CDC (12,7 e 0,63 $\% \text{ GDD}^{-1}$), respectivamente, foram ajustados e utilizados para ambos os anos para simular a curva de CC.

A Tabela 8 apresenta todos os valores dos parâmetros obtidos e utilizados em relação a CC, ao uso e rendimento de água da cultura, aos limiares da fração de depleção da água do solo e ao balanço hídrico do solo. As abordagens utilizadas para obter esses valores de parâmetro também são referidas e incluem observações de campo, o procedimento de parametrização descrito acima e os valores padrão, foram os propostos por Raes et al. (2012).

Tabela 8 – Valores dos parâmetros do AquaCrop usados para as simulações do feijão-caupi.

DESCRIÇÃO	SÍMBOLOS E UNIDADES	VALOR	FORMA DE DETERMINAÇÃO
<i>PARÂMETROS DA CURVA DO DOSSEL</i>			
COBERTURA DO DOSSEL COM 90% DE EMERGÊNCIA	CC ₀ , %	1,7	AJUSTADO
COBERTURA MÁXIMA DO DOSSEL	CC _x , %	93	OBSERVADO (EXPERIMENTAL)
COEFICIENTE DE CRESCIMENTO DO DOSSEL	CGC, Fração por grau de crescimento dia	12,7	AJUSTADO
COEFICIENTE DE REDUÇÃO DO DOSSEL	CDC, Fração por grau de crescimento dia	0,63	AJUSTADO
<i>PARÂMETROS DA CULTURA</i>			
COEFICIENTE BASAL DA CULTURA PARA TRANSPIRAÇÃO NA CC _x	K _{CTR x} , Coeficiente de transpiração da cultura, não dimensional	1,14	OBSERVADO (EXPERIMENTAL)
PRODUTIVIDADE AJUSTADA DA BIOMASSA (ÁGUA)	BWP ^a , g m ⁻²	6,5	AJUSTADO
PROFUNDIDADE MÁXIMA EFETIVA DE RAIZ	Z _e , m	0,3	OBSERVADO (EXPERIMENTAL)
ÍNDICE DE COLHEITA DE REFERÊNCIA	HI ₀ , %	27	OBSERVADO (EXPERIMENTAL)
COEFICIENTE DE INIBIÇÃO DO CRESCIMENTO FOLIAR EM DECORRÊNCIA DO HI	Aumento do HI pela inibição de Crescimento foliar na antese	10	AJUSTADO
COEFICIENTE DE INIBIÇÃO DOS ESTÔMATOS EM DECORRÊNCIA DO HI	Aumento do HI pela inibição dos estômatos na antese	8	AJUSTADO
<i>LIMITES DE DEPLEÇÃO DA ÁGUA NO SOLO</i>			
LIMAR DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PARA EXPANSÃO FOLIAR	P _{exp upper} , Fração de TAW em que CGC se torna nulo	0	AJUSTADO
LIMAR DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA O CRESCIMENTO FOLIAR	P _{exp lower} , Fração de TAW em que CGC começa a ser reduzido	0,35	AJUSTADO
FORMA DA CURVA DO COEFICIENTE DE CRESCIMENTO FOLIAR	Curva altamente convexa	1	PADRÃO DO MODELO
LIMAR DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA FECHAMENTO ESTOMÁTICO	P _{sto} , Fração de TAW em que começar a fechar os estômatos	0,5	AJUSTADO
FORMA DA CURVA DO COEFICIENTE DE CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA	Curva altamente convexa, não dimensional	3	PADRÃO DO MODELO
LIMAR DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA A SENESCÊNCIA	P _{sen} , Fração de TAW em que começa a senescência	0,38	AJUSTADO
LIMAR DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA POLINIZAÇÃO	P _{pol} , Fração de TAW em que há uma falha na polinização	0,9	PADRÃO DO MODELO
<i>PARÂMETROS DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO</i>			
ÁGUA FACILMENTE EVAPORADA	REW, mm	9	OBSERVADO (EXPERIMENTAL)
NÚMERO DA CURVA	CN, não dimensional	70	AJUSTADO

Fonte: Autor (2018).

O modelo AquaCrop, não segue a abordagem sugerida pela FAO56 e utiliza diferentes limiares para os impactos do estresse hídrico no solo nos diversos processos fisiológicos. Assim, se o valor limite superior proposto, por Allen et al. (1998) ($p_{upper} = 0,45$), fosse usado neste estudo, o modelo consideraria o feijão-caupi, como extremamente tolerante ao estresse

hídrico “em termos de expansão foliar” e “moderadamente sensível à senescência”, nestes casos não concordando com os estudos de Fernandes et al. (2015) e Farias et al. (2017). Além disso, para a falha na polinização (p_{upper}) no AquaCrop é limitado a um valor mínimo de 0,75.

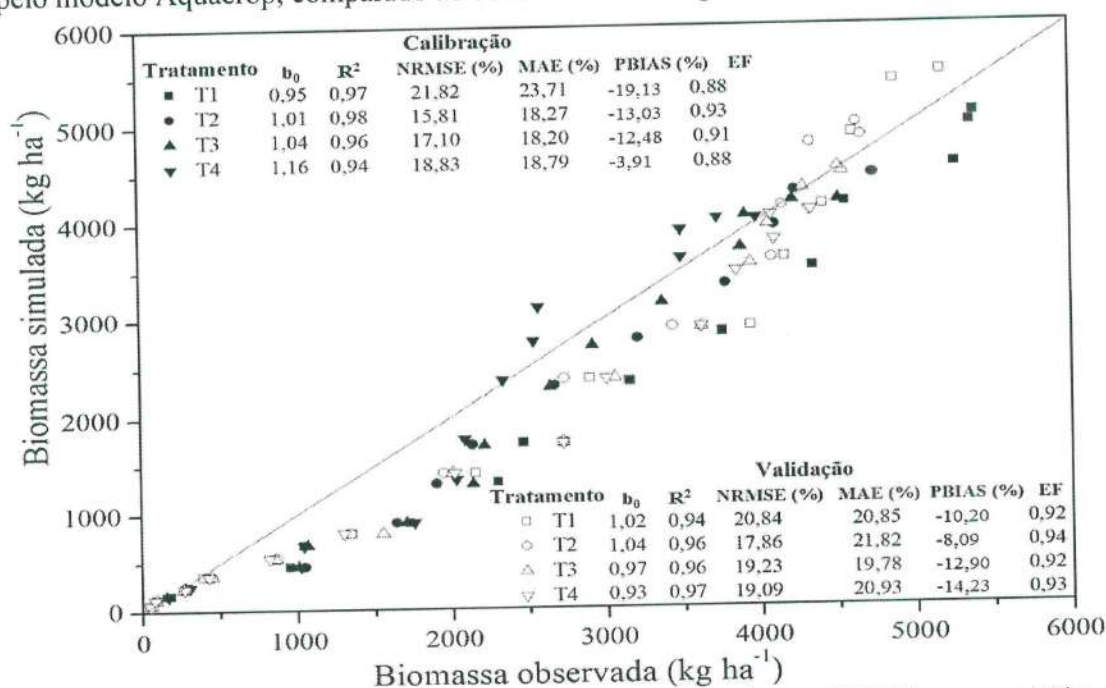
Assim, de acordo com diversos estudos, a cultura do feijão-caupi é considerada como “sensível ao estresse hídrico” (SOUZA et al., 2017) e nesse estudo, adotou-se valores para estes parâmetros (P_{upper} e formas de curva de K_s) referentes a esta condição, por convicção e referências (Tabela 8).

2.3.3.1 Simulação da biomassa e do rendimento do feijão-caupi pelo modelo AquaCrop

A biomassa (B) e o rendimento de grãos (Y_a) do feijão-caupi, ambas simuladas pelo modelo, foram utilizadas para validar as previsões em comparação aos valores observados. Como a curva de CC foi bem simulada, pelo modelo AquaCrop (Figuras 3 e 4), a simulação e precisão tanto para a B (Figura 7) como para o Y (Tabela 9), também foram boas.

Em geral, as simulações da biomassa ao longo das duas safras (calibração e validação) demonstraram uma tendência de subestimativa, com um coeficiente de regressão (b_0) variando entre 0,93 e 1,16 e um viés negativo nesta estimativa (PBIAS), variando entre -3,91 e -19,13 %. Esta tendência não afetou o desempenho do modelo, pois ele apresentou elevada eficiência (EF) na simulação da B , para ambas as safras, que resultaram em valores superiores a 0,88. Além disso, os erros de estimativas foram aceitáveis ($15,81\% < NRMSE < 21,82\%$ e $18,20\% < MAE < 23,71\%$), para estas simulações decorrentes da elevada EF do modelo na simulação da biomassa (Figura 7). Essa subestimativa foi observada nos estádios iniciais da cultura do feijão-caupi, particularmente, estando relacionado à subestimativa da curva de CC (Figuras 3 e 4) nesses referidos estádios, padrão semelhante ao observado nos estudos de Paredes e Torres (2016).

Figura 7 - Simulação da Biomassa (B , kg ha^{-1}), durante as etapas de calibração e validação, pelo modelo Aquacrop, comparado ao observado em campo.



Fonte: Autor (2018). b_0 e R^2 - são os coeficientes de regressão e determinação; NRMSE - erro quadrático médio normalizado, MAE - erro absoluto médio, PBIAS - porcentagem de erro, estes valores são expressos em porcentagem; EF - eficiência do modelo.

Em geral, o modelo também demonstrou uma boa eficiência (EF) na simulação do rendimento do feijão-caupi, tanto na calibração como na validação para todos os tratamentos adotados. Durante o ano de 2013 (calibração), o valor de eficiência foi de 0,95, devido à tendência de superestimativa do rendimento para o tratamento T4 (diferença de 8,81 % do valor observado). Por outro lado, os demais tratamentos demonstraram uma baixa diferença entre os valores de rendimento observados e simulados, variando de -2,68 a 1,13 %, dos valores médios observados.

Desta forma, os tratamentos T1 e T3 apresentaram uma tendência de subestimativa na calibração (-2,65 % e -2,48 % dos valores médios observados). Já durante a validação, o modelo foi mais eficiente (EF = 0,99) na simulação do Y, decorrentes da pequena tendência de superestimativa dos valores simulados de Y, variando de 0,34 a 5,39 % do rendimento médio observado (Tabela 9).

Tabela 9 – Diferenças entre o rendimento observado (Y) e simulado (Y_a) para o feijão-caupi e a eficiência do modelo AquaCrop para este tipo de predição.

Ano	Tratamentos	Observado	Simulado	Indicadores		
		Rendimento	Rendimento	Diferença		
		Y (kg ha ⁻¹)	Y _a (kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(%)	EF
2013 (CALIBRAÇÃO)	T1	1319,97	1285,00	-34,97	-2,65	0,95
	T2	1222,16	1236,00	13,84	1,13	
	T3	1188,49	1159,00	-29,49	-2,48	
	T4	817,94	890,00	72,06	8,81	
2014 (VALIDAÇÃO)	T1	1569,18	1590,00	20,82	1,33	0,99
	T2	1233,54	1300,00	66,46	5,39	
	T3	1002,26	1013,00	10,74	1,07	
	T4	792,34	795,00	2,66	0,34	

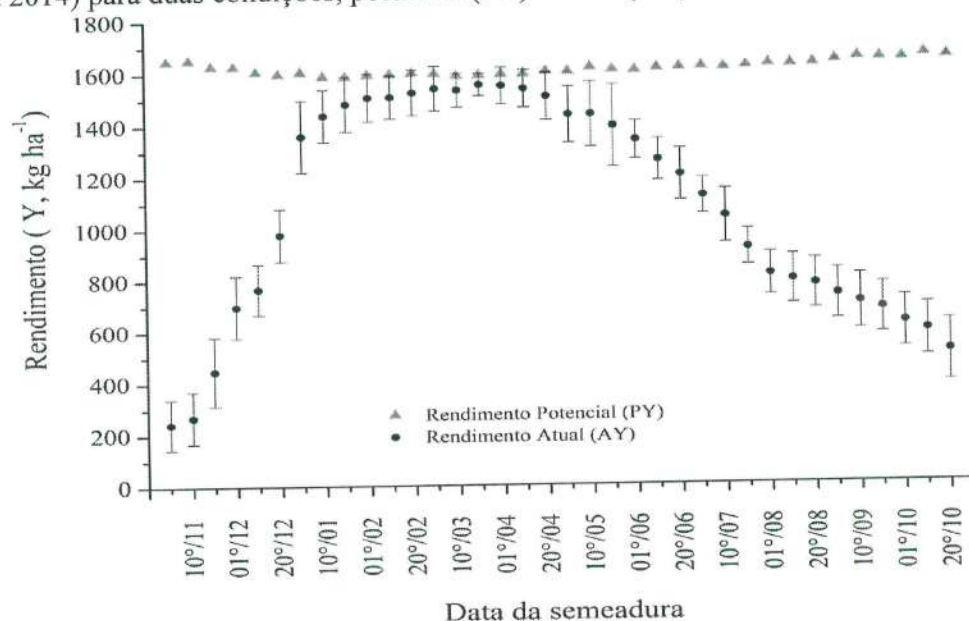
Fonte: Autor (2018). EF – Eficiência do modelo.

Estes resultados mostram a adequada parametrização adotada neste estudo, e ainda que o AquaCrop, demonstrou uma boa eficiência para a simulação e previsão da produção de biomassa e rendimento do feijão-caupi, para todos os tratamentos aqui adotados. Estes resultados são semelhantes a outras aplicações de modelos para o feijão: Bastos et al. (2002), obtiveram diferenças variando de -2,0 a -9,8 %, com o CROPGRO, para a cultivar BR 14 Mulato de feijão-caupi; e Dallacort et al. (2011), usando CS-CROPGRO obtiveram uma diferença de 29 %. Outros resultados foram obtidos por Santos et al. (2016), que também usaram o CS-CROPGRO na simulação do rendimento do feijão comum, e obtiveram uma diferença que variou de -16,7 a 51,6 %, nos tratamentos adotados em seu experimento.

2.3.4 Previsão de rendimento pelo modelo e quebra de rendimento

O rendimento potencial simulado (PY) do feijão-caupi, apresentou uma pequena variação (1584 a 1651 kg ha⁻¹), apresentando seus maiores valores para as semeaduras ocorridas entre 01 de Setembro e 10 de Novembro (Figura 8). Por outro lado o rendimento atual simulado (AY) apresentou maior variação, oscilando de 242 a 1590 kg ha⁻¹, decorrente da variação da PRP ao longo do ano.

Figura 8 - Rendimentos (Y) do feijão-caupi, simulados pelo modelo AquaCrop (série de 2003 a 2014) para duas condições, potencial (PY) e atual (AY).



Fonte: Autor (2018).

Os resultados evidenciam um bom período para semeadura do feijão-caupi em Castanhal com uma janela ótima de semeadura (JOS) entre 10 de Janeiro e 20 de Maio, onde se nota uma diminuição nos desvios padrões do rendimento atual (AY), os quais se aproximam do rendimento potencial (PY) médio (1610 kg ha⁻¹).

Durante a JOS o feijão-caupi apresentou elevados rendimentos (AY > 1300 kg ha⁻¹), acima do rendimento médio no estado (788 kg ha⁻¹) (CONAB, 2017), enquanto que as semeaduras fora da JOS demonstraram grandes variações de AY (242 a 1357 kg ha⁻¹) decorrentes da falta de PRP neste período, provocando um déficit hídrico durante a fase vegetativa do feijão-caupi (> 14,12 mm ± 13,07) (Tabela 10).

Tabela 10 - Deficiência média (DEF) durante as fases vegetativa (VEG) e reprodutiva (REP) do feijão-caupi, simuladas pelo modelo AquaCrop para as diferentes datas de semeaduras (DS) (1º, 10º e 20º dia) e as precipitações (PRP) ocorridas 10 dias após o início da maturação dos grãos (DAM), durante o período de 2003 a 2014.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
DS													
DEF VEG (mm)	1	10,45	5,28	2,34	1,22	2,21	14,12	18,13	41,16	67,03	66,48	74,31	38,15
		±17,68	±15,65	±15,13	±10,09	±14,62	±13,07	±12,68	±7,38	±4,85	±6,55	±4,86	±8,56
	10	8,54	4,65	1,06	0,89	5,89	17,14	22,84	45,41	59,73	65,51	52,00	23,44
		±11,92	±15,90	±14,08	±11,12	±15,42	±12,47	±11,88	±8,19	±7,14	±6,77	±6,92	±7,87
	20	7,45	3,92	1,00	0,56	8,78	18,43	30,79	50,18	67,58	72,10	34,24	12,31
		±13,61	±16,04	±16,84	±6,86	±12,21	±10,00	±9,30	±8,56	±5,52	±6,46	±20,10	±9,41
DEF REP (mm)	1	8,56	2,83	0,86	2,89	9,98	21,13	22,15	38,91	42,18	45,16	34,15	23,16
		±14,78	±12,56	±3,78	±6,89	±12,89	±14,78	±13,45	±8,78	±7,45	±4,89	±2,89	±9,15
	10	7,45	1,98	1,76	3,76	13,76	24,15	27,89	35,41	39,73	41,72	30,17	22,18
		±10,67	±7,87	±4,87	±5,78	±15,86	±13,67	±12,34	±9,65	±12,89	±7,45	±7,89	±10,24
	20	5,78	1,75	1,65	2,78	18,57	26,18	36,17	41,71	57,45	56,64	28,19	20,67
		±14,89	±3,89	±1,34	±5,34	±10,09	±9,87	±8,89	±7,23	±19,01	±8,55	±10,04	±14,17
PRP 10 DAM (mm)	1	80,17	79,58	84,42	35,14	36,92	27,42	27,08	20,00	17,00	26,25	36,27	46,45
		±14,69	±26,47	±17,87	±11,60	±18,60	±20,20	±21,36	±14,38	±19,79	±25,23	±21,71	±14,78
	10	87,33	76,25	68,00	30,87	32,13	29,08	11,83	17,42	14,08	28,92	43,36	86,82
		±34,41	±18,30	±25,50	±17,74	±15,03	±27,04	±10,88	±16,05	±17,28	±36,26	±23,14	±14,78
	20	96,83	82,75	69,12	20,00	19,20	25,92	11,50	8,75	8,33	22,92	55,82	71,82
		±25,92	±23,85	±19,50	±25,96	±10,96	±19,14	±8,39	±11,98	±12,49	±19,44	±36,33	±14,78

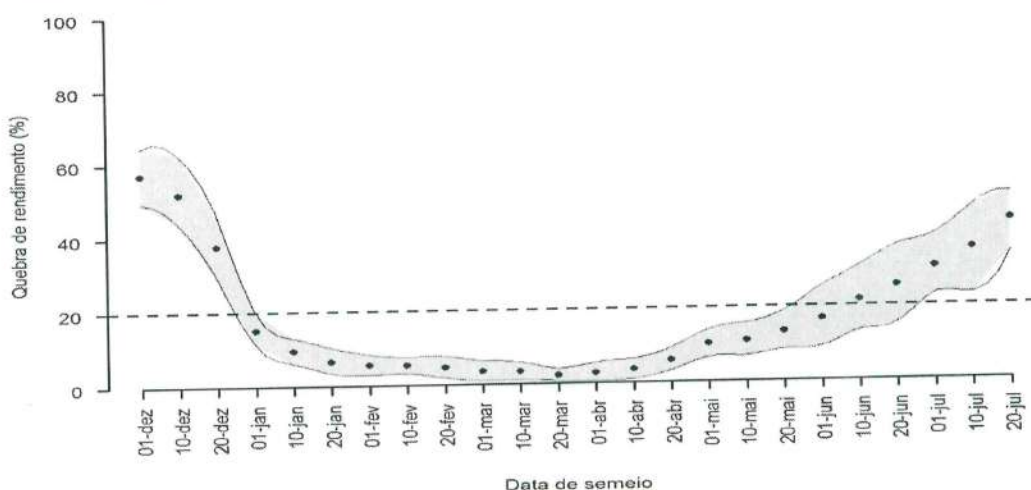
Fonte: Autor (2018).

O déficit hídrico durante esta fase provoca uma redução da taxa de desenvolvimento do dossel que intercepta menos RS, diminuindo a sua condutância estomática, reduzindo sua capacidade de realizar a fotossíntese e acumular biomassa, ou seja, produz um efeito negativo no desenvolvimento da cultura afetando diretamente no rendimento final (FERNANDES et al., 2015; SOUZA et al., 2017).

Os resultados das simulações de rendimento pelo modelo demonstram que a PRP representa o verdadeiro limitante para sua produção na região de estudo, fato este várias vezes evidenciados em estudos na região norte (FARIAS et al., 2017; SOUZA et al., 2017), nordeste (LIMA FILHO et al., 2013b; FERNANDES et al., 2015) e centro-oeste (OLIVEIRA et al., 2012) que acarretam os riscos climáticos da produção agrícola no Brasil.

A relação entre o AY e PY, denominado também de quebra de rendimento médio (RYD, %) com valor aceitável de 20 % do PY (LIMA FILHO et al., 2013b), também foi analisada em Castanhal. A RYD foi menor que 18 % (quebra de 290 kg ha⁻¹ do PY) no período que vai de 01 de Janeiro até 01 de Junho, em mais de 95 % das simulações (Figura 9). Houve um aumento da YD para sementeiras anteriores e posteriores, como por exemplo, nas sementeiras de 20 de Julho, que atingiram valores de 45 % (quebra de 724 kg ha⁻¹ do PY) e em 01 de Dezembro, com valor de 58 % de YD (quebra de 934 kg ha⁻¹ do PY), os quais são elevados em resposta ao déficit hídrico ocorrido durante a fase vegetativa e/ou reprodutiva.

Figura 9 - Quebra de rendimento médio (RYD, %) por data de semeio (semeadura), associada a uma faixa de 95 % de confiança.



Fonte: Autor (2018). dez – Dezembro; jan – Janeiro; fev – Fevereiro; mar – Março; abr – Abril; mai – Maio; jun – Junho; jul – Julho.

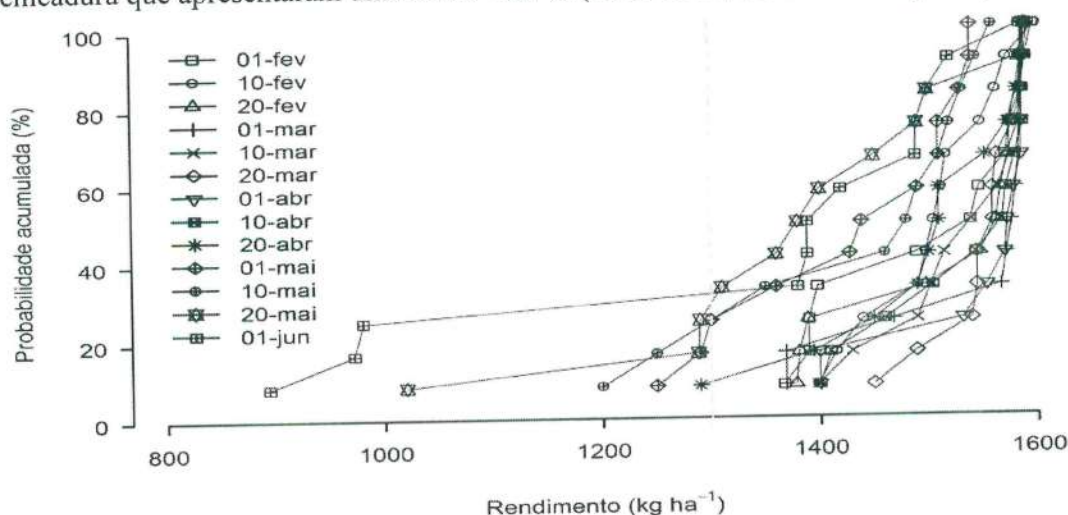
Não foram analisadas datas posteriores às apresentadas graficamente, pois à medida que se inicia o período seco da região, a RYD é bastante elevada, pois não há como a cultura do feijão-caupi se estabelecer (Tabela 10) e produzir altos rendimentos decorrentes da falta de água neste período, conforme foi observado por Lima Filho et al. (2013b) e por Souza et al. (2017).

2.3.4.1 Janela ótima de sementeira em Castanhal

O modelo AquaCrop foi sensível às variações ambientais de Castanhal, pois mesmo dentro do período de RYD < 20 % (01 Janeiro a 01 Junho) houve uma grande variação na probabilidade de alcançar altos rendimentos do feijão-caupi ($Y > 1300 \text{ kg ha}^{-1}$) (Figura 10). Nas sementeiras, ocorridas entre 01 de Fevereiro e 10 de Abril, houve 100 % de probabilidade de serem obtidos altos rendimentos. Já nas simulações a partir de 20 de Abril, houve uma

probabilidade superior a 90 %, e para datas posteriores, a partir de 01 de Maio os altos rendimentos são obtidos com apenas 75 % de probabilidade, segundo as simulações do modelo.

Figura 10 - Probabilidade acumulada (2003 a 2014) de rendimento (kg ha^{-1}) para datas de semeadura que apresentaram uma RYD < 20 % (de 01 de fevereiro a 01 de junho).



Fonte: Autor (2018). A linha tracejada na vertical (cinza) é o rendimento de 1300 kg ha^{-1} . fev – Fevereiro; mar – Março; abr – Abril; mai – Maio; jun – Junho.

Estudos mostram que a ocorrência de PRP, durante a colheita de grãos, favorece o surgimento de doenças fúngicas, e dependendo do período destas chuvas aumenta a severidade das doenças, diminuindo o rendimento final e sua qualidade (LIMA FILHO et al., 2013b; CASTRO et al., 2016). Assim, as semeaduras de Janeiro não foram consideradas, pois a colheita de sua safra coincidiria com o período chuvoso de Castanhal (Tabela 10), ou seja, com o mês mais chuvoso (Março) e vale ressaltar que o modelo não realiza este tipo de análise.

Desta forma, os resultados mostram que o período, de 01 a 20 de Abril seria o mais recomendado para o cultivo do feijão-caupi em Castanhal, pois teve uma baixa RYD (RYD < 10 %), elevada probabilidades (90 % acima de 1300 kg ha^{-1}) de atingir altos rendimentos e menores possibilidades de ocorrer PRP durante sua colheita.

Este estudo, confirma a eficiência do uso de modelos, como o trabalho de Lima Filho et al. (2013b), que avaliaram a RYD do feijão-caupi com o CROPGRO, no município de Cruz das Almas, sem o uso de probabilidades na sua análise, identificando que a melhor época para o semeio no recôncavo baiano foi do meio para o final do período chuvoso da região, tentando fugir das PRP na colheita da cultivar BRS Guariba. Já a Embrapa (2003) (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) indicou para o nordeste brasileiro e para as variedades de feijão-

caupi, que possuem um ciclo de 71 a 90 dias, que as semeaduras sejam feitas a partir da metade do período chuvoso de cada região evitando-se que a colheita seja feita em períodos chuvosos, pois aumentaria a probabilidade de apodrecimento dos grãos.

Isso demonstra que o modelo AquaCrop pode auxiliar como ferramenta de previsão de rendimento, e que ainda pode ser usado em outras culturas desde que tenha informações referentes ao solo, o clima e a cultura que se deseja simular. Porém a potencialidade do modelo só é alcançada se o mesmo for utilizado de forma correta, entendendo seu funcionamento, limitações e possibilidades.

2.3.5 Datas de semeaduras adotadas na região e aplicação de uma estratégia suplementar de irrigação com o modelo

A estratégia de irrigação suplementar para os anos de 2013 e 2014 e para a série meteorológica (2003 a 2014) inserida no modelo, considerando as três datas de semeaduras (1, 10 e 20 de abril), são apresentadas na Tabela 11.

Os resultados mostram que para o cenário I (Irrigado), os valores de água usada na irrigação e a evapotranspiração real estimada (IWU e $ET_{C\ act}$) aumentaram ao atrasar a data de semeadura, desde o início até o final de abril, nos dois anos simulados (2013 e 2014) e para a série analisada (2003 a 2014), decorrente da diminuição das precipitações ao final de abril o que aumenta a necessidade de irrigar e a quantidade de água perdida pela cultura. Diferentemente, os valores de consumo total de água (TWU) foram diminuindo, na maioria dos anos simulados (2014 e 2003 a 2014), à medida que ocorreu o atraso da semeadura, isto pode estar relacionado com a distribuição das precipitações na região.

Desta forma, os rendimentos são maiores para as últimas datas de semeadura, para o ano de 2013 (1700 kg ha^{-1}) e para a série meteorológica (1598 kg ha^{-1}), com exceção do ano de 2014 (maior rendimento em 10 de abril). A RYD para o ano de 2013 variou de 5,6 a 7,8 %, enquanto que no ano de 2014 variaram de 3,9 a 9,9 % e na média (2003 a 2014) aumentou na medida em que houve um atraso na semeadura. Assim, ao utilizar o cenário I, as semeaduras que ocorrem no período de início de abril, têm uma menor chance de RYD e uma menor utilização de IWU , confirmados pelos valores de WP_{Irrig} , que são maiores a medida que a semeadura é antecipada (01 de abril), atingindo valores entre $1,41$ a $4,69\text{ kg m}^{-3}$ (Tabela 11).

Tabela 11 - Indicadores de produtividade e eficiência do uso da água da estratégia suplementar de irrigação e diferentes datas de semeaduras adotadas na região, para os anos de 2013 e 2014 e em relação à série (2003 a 2014) da estação automática do INMET.

Ano	Semeadura	Cenário	Y_a (kg ha ⁻¹)	RYD (%)	P_e (mm)	IWU (mm)	$ET_{C\ act}$ (mm)	TWU (mm)	WP_{Irrig} (kg m ⁻³)	WP_{ET} (kg m ⁻³)	WP (kg m ⁻³)
2013	01/abr*	I	1585	6,8	219	42	196	256	3,77	0,81	0,62
		NI	1400	17,6	219	-	173	221	-	0,81	0,63
	10/abr*	I	1585	7,8	264	44	201	327	3,60	0,79	0,48
		NI	1410	18	264	-	178	285	-	0,79	0,49
	20/abr*	I	1700	5,6	292	47	221	349	3,62	0,77	0,49
		NI	1593	11,5	292	-	207	315	-	0,77	0,51
2014	01/abr*	I	1633	3,9	180	116	133	290	1,41	1,23	0,56
		NI	1400	17,6	180	-	114	159	-	1,23	0,88
	10/abr*	I	1648	4,2	117	131	138	259	1,26	1,19	0,64
		NI	1400	18,6	117	-	118	116	-	1,19	1,21
	20/abr*	I	1622	9,9	137	136	152	284	1,19	1,07	0,57
		NI	1450	19,4	137	-	136	153	-	1,07	0,95
2003-2014	01/abr*	I	1590	6,5	354	34	202	397	4,69	0,79	0,40
		NI	1546	9,1	354	-	197	362	-	0,79	0,43
	10/abr*	I	1588	7,7	335	40	204	386	3,99	0,78	0,41
		NI	1533	10,9	335	-	197	335	-	0,78	0,46
	20/abr*	I	1598	11,2	319	48	210	372	3,31	0,76	0,43
		NI	1503	16,5	319	-	198	326	-	0,76	0,46

Fonte: Autor (2018). Y_a – Rendimento estimado; RYD – Diminuição do rendimento relativo; P_e – Precipitação efetiva; IWU – Água usada na irrigação; $ET_{C\ act}$ – Evapotranspiração real estimada; TWU – Consumo total de água; WP_{Irrig} – Eficiência do uso da água irrigada; WP_{ET} – Eficiência do uso da água pela cultura; WP – Eficiência do uso da água; I – Irrigado; NI – Não irrigado; abr – Abril. *- Representam que houve diferença significativa entre as médias (rendimento estimado) para as datas de semeaduras, pelo teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Já para o cenário NI (Não irrigado), que é comumente utilizado pelos agricultores da região, a RYD teve uma menor variação entre as datas de semeadura, no entanto, foram bastante elevadas. No ano de 2013 variaram de 11,5 a 18 %, já em 2014 variou de 17,6 a 19,4 % e para a série de dados meteorológicos variou de 9,1 a 16,5 %, ficando evidente a relação com a distribuição de água no solo. Quando atrasamos a semeadura, neste cenário (NI), o risco de ocorrer uma maior RYD é alto (RYD = 16,5 %, para a série de 2003 a 2014), principalmente pela falta de água para a cultura em estádios em que há uma maior necessidade hídrica (fase reprodutiva). Assim como no cenário I, o NI apresentou um aumento dos valores de $ET_{C\ act}$ à medida que há um atraso na semeadura, diminuindo a eficiência do uso da água pela cultura (WP_{ET}) (Tabela 11).

Com relação à WP em ambos os cenários I e NI, respectivamente, os maiores valores, no ano de 2013, foram obtidos para a semeadura de 01 de abril (0,62 e 0,63 kg m⁻³), já no ano de 2014, foram os valores referente ao semeio em 10 de abril (0,64 e 1,21 kg m⁻³) e para a

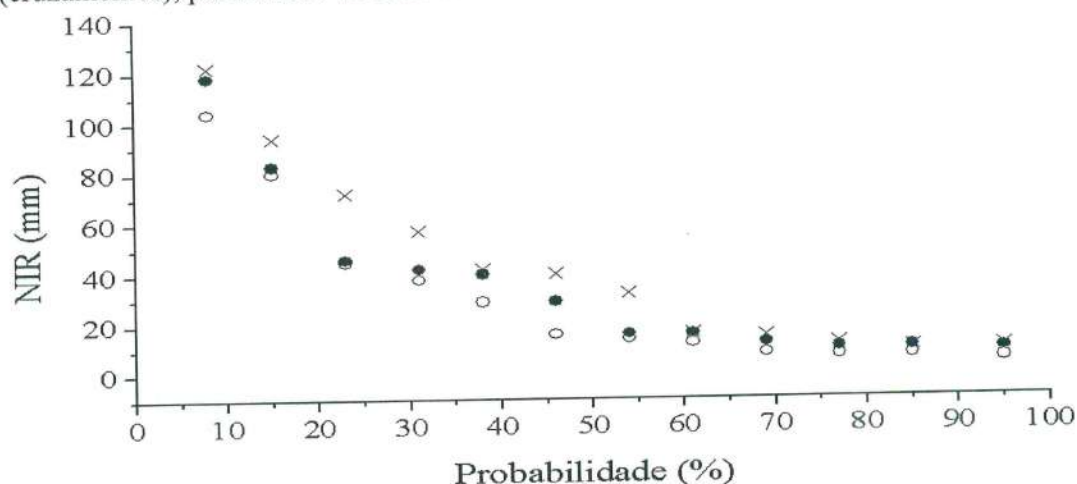
série (2003 a 2014) foram os valores referentes a 20 de abril (0,43 e 0,46 kg m⁻³), em decorrência dos elevados rendimentos nestas datas e menor TWU. Estes valores demonstram que em um ano com ausência de déficit hídrico (2013 e na série de 2003 a 2014) há uma menor variação do WP, quando consideramos os cenários utilizados e em anos com menor distribuição de precipitações (2014) há uma maior variação desta eficiência (Tabela 11).

As diferenças entre os cenários adotados são relevantes, assim como a data de semeadura (apresentaram diferenças estatísticas), as quais indicam que a semeadura mais tardia deve ser evitada, o que já é praticado por grande parte dos produtores (CONAB, 2017). Assim como a adoção de irrigação principalmente no período reprodutivo do feijão-caupi (FARIAS et al., 2017; SOUZA et al., 2017).

Como o modelo também foi aplicado para a série de condições climáticas da região (2003 a 2014), a duração do ciclo do feijão-caupi para as semeaduras até 01 de abril, variou de 67 a 69 dias. Para as semeaduras de 10 de abril o ciclo variou de 65 a 66 dias e tiveram pequenas durações de 64 a 65 dias, correspondentes à semeadura até 20 de abril. Estas diferenças se relacionam com o fato do ciclo da cultura se desenvolver antecipadamente sob temperaturas elevadas (PAREDES; TORRES, 2016), o que acontece quando se semeia mais tardiamente em Castanhal, sendo necessário menos dias para a colheita.

As curvas de probabilidade de necessidade de irrigação (NIR) resultante da simulação do modelo para série inserida são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Curvas de probabilidade para as necessidades de irrigação (NIR) até a colheita do feijão-caupi, durante a semeadura em 01 (círculos brancos), 10 (círculos pretos) e 20 de abril (cruzamentos), para a série de 2003 a 2014.



Fonte: Autor (2018).

Estas curvas de probabilidade mostram que a NIR variou bastante, de 5 a 104 mm, para 01 de abril, de 9 a 118 mm para 10 de abril e de 10 a 122 mm para a última data de

semeadura. Esta variabilidade resulta principalmente da grande variabilidade da precipitação efetiva entre os anos na região, que variou de 180 a 513 mm, 117 a 482 mm e 137 a 442 mm quando a semeadura é realizada em 01, 10 e 20 de abril, respectivamente (Figura 11).

Logo o agricultor que optar por um plantio ao final de Abril tem a maior probabilidade de ter que realizar a irrigação em Castanhal, aumentando ainda mais para anos de verão severo (122 mm). No geral apesar da primeira data experimentar uma maior quantidade de precipitação efetiva, o agricultor deverá aplicar uma pequena lâmina de água demonstrando a necessidade de irrigação.

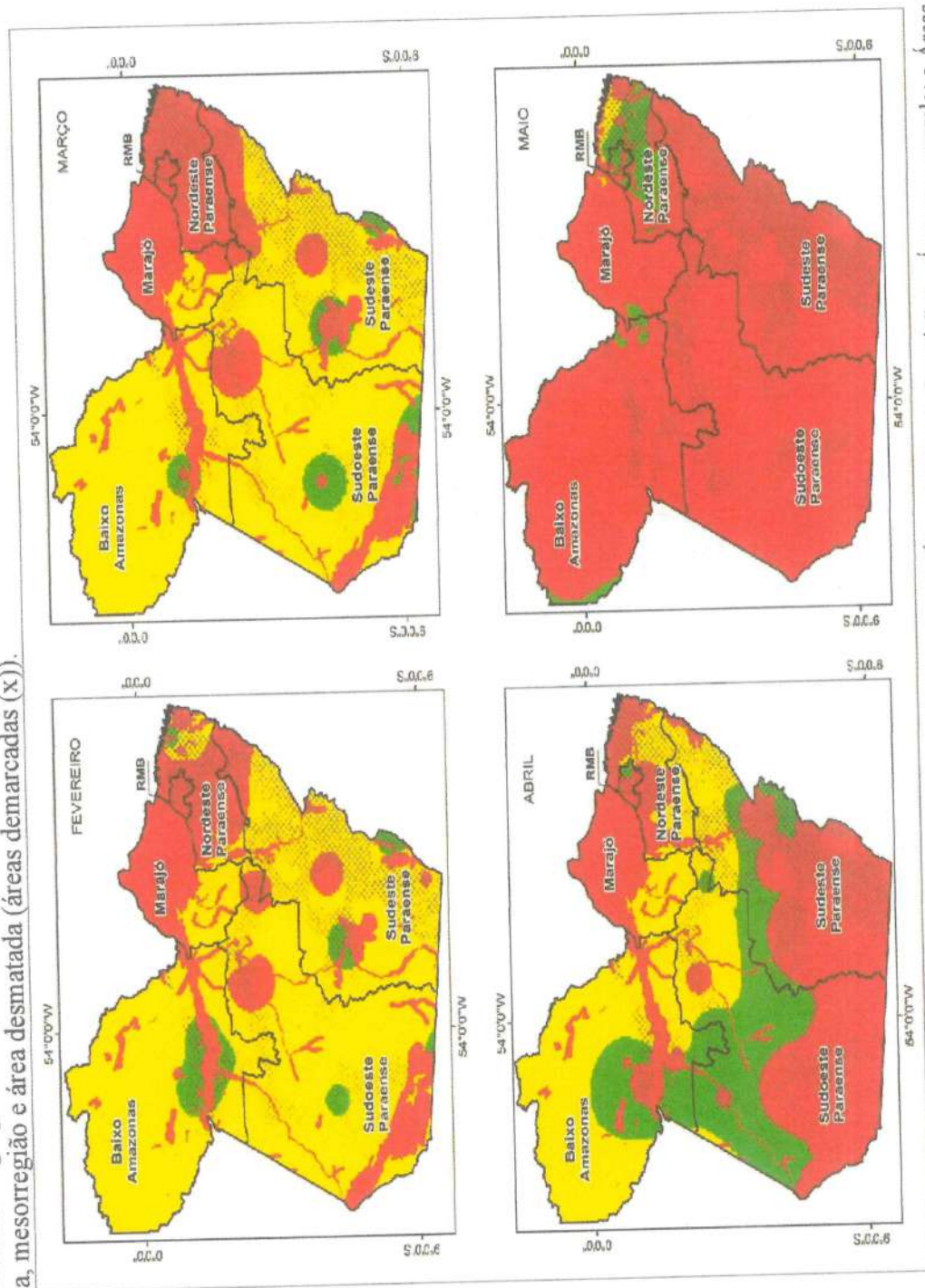
2.3.6 Áreas aptas ao plantio do feijão-caupi no estado do Pará

Os resultados demonstraram que há uma grande variação das áreas aptas ao plantio do feijão-caupi, em relação à data de semeadura. Ainda foi possível notar que a data de semeadura (Maio) adotada no principal polo produtivo do estado (mesorregião do Nordeste Paraense) (CONAB, 2017) é bem coerente com os resultados deste zoneamento agropedoclimático (Figura 12).

Os resultados ainda indicam que, devido a grande variabilidade climática (precipitação e temperatura) que pode provocar os riscos de deficiência hídrica ou excesso hídrico, implicam diretamente na abrangência das áreas com aptidão a semeadura do feijão-caupi dos períodos adotados, estando diretamente ligadas ao ciclo da variedade BR3-Tracuateua quanto ao tipo de solo de cada mesorregião. Ainda é possível notar que, a mesorregião do Marajó em grande parte, não demonstrou ter aptidão ao plantio do feijão-caupi em nenhuma das datas analisadas, principalmente pelo tipo de solo da região (Gleissolos e Plintossolos) (Figura 12).

Já em Março, há uma diminuição das áreas aptas (47.879,44 km²) ao plantio com relação a Fevereiro, principalmente na região do Baixo Amazonas e do Nordeste Paraense não demonstrando condições de plantio neste período, segundo o zoneamento agropedoclimático. Ocasionalmente uma diminuição das áreas aptas com restrição (amarelo) (833.457,32 km²), causadas pela possibilidade da ocorrência de excesso hídrico, e um aumento das áreas não aptas (vermelho) (375.012,74 km²) inviabilizando o plantio do feijão-caupi nestas áreas (Figura 12).

Figura 12 - Zoneamento Agropedoclimático usado na identificação das áreas com potencial ao plantio do feijão-caupi no estado do Pará, por data de semeadura, mesorregião e área desmatada (áreas demarcadas (x)).



Fonte: Autor (2018). RMB – Região Metropolitana de Belém; Áreas Aptas – Áreas em verde; Áreas Aptas com Restrições – Áreas em amarelo; e Áreas Não Aptas – Áreas em vermelho.

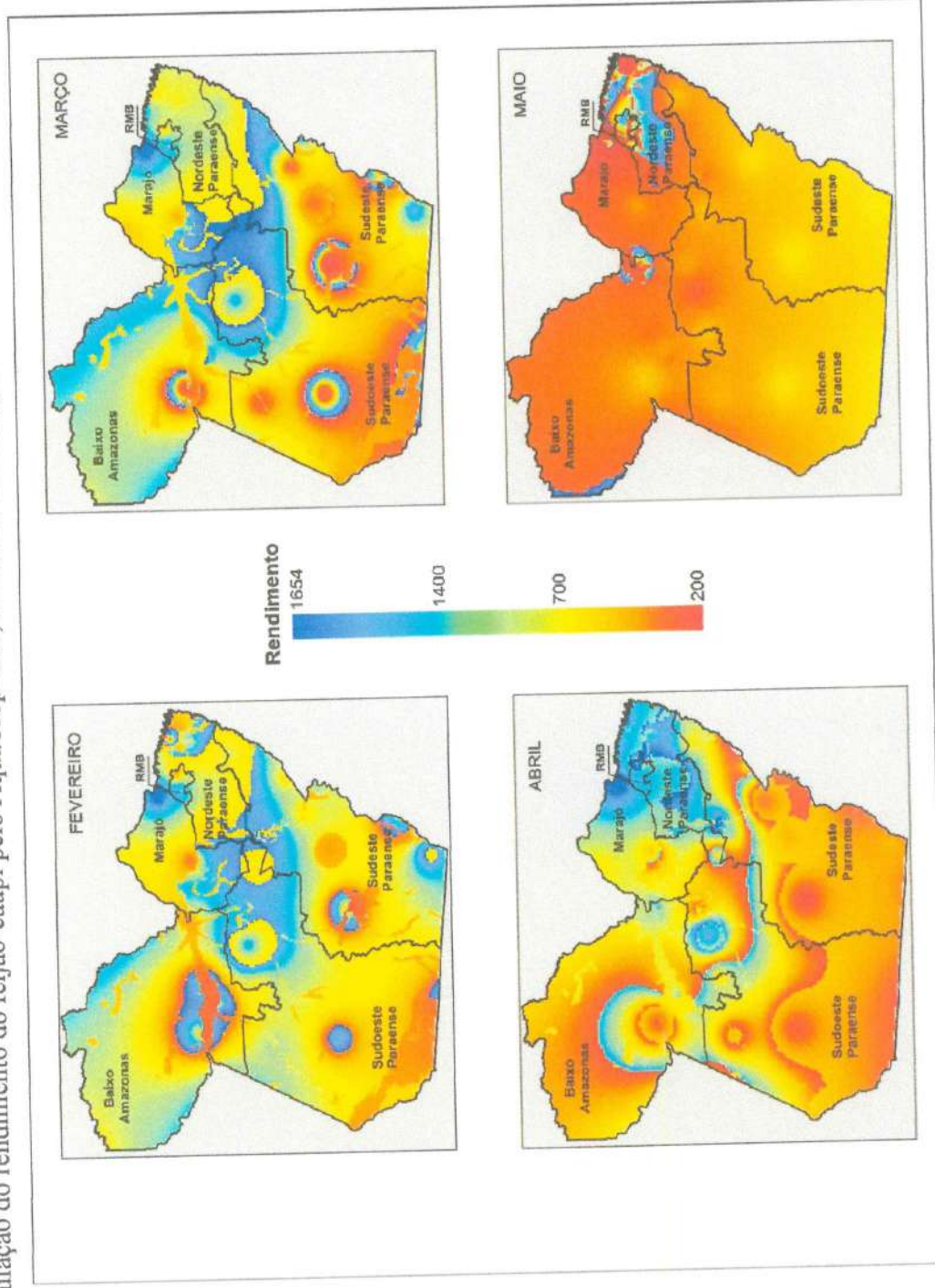
Com a adoção da semeadura no mês de Abril, houve um maior aparecimento de áreas aptas (272.124,78 km²) ao plantio do feijão-caupi (verde), no estado, como a grande parte do Sudoeste Paraense, partes centrais do Baixo Amazonas e Sudeste paraense, diminuindo principalmente as áreas em amarelo (áreas com restrição) (417.603,86 km²) quando comparada a semeadura ocorrendo em Fevereiro e Março. Já a mesorregião RMB (Região Metropolitana de Belém) (Abril) começa a apresentar uma pequena área de aptidão ao plantio do caupi, mas especificamente no município de Castanhal, decorrente da lâmina ideal ($257 > PRP < 278$) para o cultivo do feijão-caupi (Figura 12).

No mês de Maio, ocorre uma elevada diminuição das áreas aptas (verde) (50.055,22 km²) ao cultivo do feijão-caupi inviabilizando o plantio nesta data em grande parte do estado (1.199.671,53 km²), ocasionada principalmente pela diminuição das precipitações (INPE, 2018) e podendo haver uma deficiência hídrica no estado e nas áreas não aptas (vermelho), durante o ciclo, principalmente durante as fases de reprodução (enchimento de grãos) que são as mais sensíveis à falta de água, podendo diminuir a produção de biomassa e rendimento (SOUZA et al., 2017). Nesta data de semeadura (Maio) as áreas aptas ao plantio quase em sua maioria se dão nas mesorregiões da RMB e Nordeste Paraense, o que coincide com o período indicado, final do período de cada região, para a semeadura do feijão-caupi nas regiões produtoras e no estado (EMBRAPA 2003; CONAB, 2017) (Figura 12).

2.3.6.1 Simulação dos rendimentos com o modelo AquaCrop-GIS

Os resultados das simulações do rendimento do feijão-caupi, pelo AquaCrop-GIS, demonstraram que há uma grande variação em relação à data de semeadura e a mesorregião, como por exemplo, no mês de Fevereiro que apresentou rendimentos variando de 350 a 1350 kg ha⁻¹ ao longo do estado. É possível notar que a escolha da data de semeadura somada à mesorregião de plantio pode proporcionar a obtenção de maiores rendimento (por exemplo, 1654 kg ha⁻¹ em Abril) reforçando a influencia da variabilidade climática na produção do feijão-caupi (produção de 200 kg ha⁻¹ em Maio a 1654 kg ha⁻¹ em Abril) (Figura 13).

Figura 13 - Simulação do rendimento do feijão-caupi pelo AquaCrop-GIS, no estado do Pará, por data de semeadura e mesorregião.



Fonte: Autor (2018). RMB – Região Metropolitana de Belém; e o rendimento em kg ha^{-1} .

Os resultados das simulações ainda reforçam que, grande parte da mesorregião do Nordeste Paraense, considerada o polo produtivo no estado (FREIRE FILHO et al., 2009), ao realizar o plantio em Maio, pode obter elevados rendimentos (entre 1350 a 1651 kg ha⁻¹), conforme é recomendado pela EMBRAPA (2003) (Figura 13).

No entanto, a antecipação da semeadura para o mês de Abril, segundo a simulação pelo modelo AquaCrop-GIS, pode proporcionar uma aumento do rendimento do feijão-caupi (variação de 1400 a 1654 kg ha⁻¹) nas mesorregiões do Nordeste Paraense e RMB (≈1400 kg ha⁻¹). Com relação às mesorregiões do Baixo Amazonas, nordeste do Sudoeste Paraense e norte do Sudeste Paraense, em sua maioria, o período de semeadura recomendado é Fevereiro (variação de 500 a 1350 kg ha⁻¹) e Março (variação de 500 a 1380 kg ha⁻¹) (Figura 13).

Resultado parecido foi alcançado em um estudo com um modelo mais complexo reforçando que o modelo AquaCrop-GIS pode ser usado no estado para a previsão dos rendimentos e auxílio no manejo adequado ao cultivo do feijão-caupi. Lima Filho et al. (2013a) que usaram o modelo CROPGRO-Cowpea para a simulação do rendimento no Recôncavo Baiano, em Cruz das Almas, e mostraram que o modelo foi capaz de simular com coerência os valores de rendimento da região, principalmente pela sensibilidade do modelo às variações climáticas inter e intra-anuais.

2.4 CONCLUSÕES

A parametrização do feijão-caupi aos modelos AquaCrop e AquaCrop-GIS foi testada com sucesso resultando em pequenos desvios na simulação da biomassa e uma ótima eficiência para a simulação dos rendimentos simulados quando comparados aos dados observados. As boas simulações de biomassa e rendimento obtidas, no presente estudo, se relacionam com a parametrização adequada da curva da cobertura do dossel, bem como com a qualidade dos dados obtidos em campo, com relação aos parâmetros de cultura e a boa parametrização dos parâmetros relativos ao conteúdo de água no solo.

O modelo AquaCrop ainda foi utilizado na avaliação da irrigação suplementar para o feijão-caupi em Castanhal, em termos de rendimento e produtividade da água. Os resultados mostram que, a utilização do limiar que correspondeu a 60 % da água prontamente disponível (RAW) minimizaram as perdas do rendimento, mesmo em uma época chuvosa (Abril), diminuindo a quebra de rendimento relativo (RYD) em até 10 %, o que ocasionou em um ganho de produção do feijão-caupi (aumento médio de 65 kg ha⁻¹ na produção) na região.

Logo os modelos podem auxiliar na previsão de rendimento já que se demonstraram sensíveis às variações climáticas no estado somadas aos períodos de semeaduras adotados nas análises dos estudos. Porém as potencialidades dos modelos só são alcançadas se os mesmos forem utilizados corretamente, entendendo seus funcionamentos, limitações e possibilidades de usos.

Já o uso do SIG, por meio do modelo AquaCrop-GIS, se mostrou viável para identificação de áreas aptas ao plantio do feijão-caupi, no estado Pará, principalmente pela possibilidade do cruzamento de informações importantes nesta escolha, como as características da cultura, dos solos e climáticas da cada mesorregião associadas as áreas desmatadas. Os resultados reforçam que a variabilidade climática é a principal condicionadora na escolha das áreas aptas ao plantio, de qualquer cultura e na obtenção de elevados rendimentos quando se trata da diminuição dos riscos a colheita. Portanto, o modelo AquaCrop-GIS pode auxiliar de várias formas, como por exemplo, na planificação e manejo adequado do feijão-caupi no estado.

A mesorregião do Baixo Amazonas apresentaram áreas aptas na sua região central para as semeaduras ocorridas em Fevereiro se estendendo até as semeaduras ocorridas em Abril. Já a mesorregião do Sudoeste Paraense apresentou comportamento parecido ao Baixo Amazonas com as áreas se deslocando para o norte da mesorregião as semeaduras ocorridas em Abril. Com relação à mesorregião do Marajó foi à única que não apresentou em nenhuma

das datas analisadas, áreas aptas ao plantio do feijão-caupi segundo o zoneamento agropedoclimático realizado neste estudo.

O principal polo produtivo do feijão-caupi no estado, a mesorregião do Nordeste Paraense, apresentou aptidão (áreas aptas) somente nas semeaduras ocorridas no mês de Maio. Estas áreas podem ser aumentadas caso seja utilizada a mesorregião da Região Metropolitana de Belém (RMB), mais especificamente o município de Castanhal, que apresentou aptidão ao plantio nos meses de Abril a Maio. Todos estes resultados são comprovados pelas simulações de rendimentos que foram realizadas pelo modelo AquaCrop-GIS e que demonstram que os rendimentos (200 a 1654 kg ha^{-1}) são variáveis em decorrência das datas de semeaduras e da mesorregião analisada, demonstrando que o modelo conseguiu entender as variações climáticas do estado do Pará.

Assim, pode-se concluir que os modelos podem auxiliar no manejo da cultura e irrigação para o feijão-caupi em Castanhal além de ser uma ferramenta útil na tomada de decisões no estado do Pará, como a identificação das áreas aptas ao plantio no estado e nas simulações para estas regiões.

Os modelos podem ainda auxiliar em estudos futuros na agilidade da produção de informações determinantes nas práticas de manejo, tomadas de decisões, auxílio do uso da água pela cultura do feijão-caupi, visando melhorar o rendimento do feijão-caupi na região. Expondo que o modelo possui grandes potencialidades para seu uso no estado do Pará e para outras culturas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma. 1998. 300 p.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728. 2013 (publicado online em: jan. 2014).
- BASTOS, E. A. et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no Vale do Gurguéia. **Irriga**, v. 13, p. 182-190. 2008.
- BASTOS, E. A.; FOLEGATTI, M. V.; FARIA, R. T. de; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; CARDOSO, M. J. Simulation of growth and development of irrigated cowpea in Piauí State by CROPGRO model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1381-1387. 2002.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2006. 625 p.
- CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Desempenho agrônômico do feijão-caupi, cv. Rouxinol, em função de espaçamentos entre linhas e densidades de plantas sob regime de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 01, p. 102-105. 2006.
- CARVALHO, J. J.; SAAD, J. C. C.; BASTOS, A. V. S.; NAVES, S. S.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, V. M. Teor e acúmulo de nutrientes em grãos de feijão comum em semeadura direta, sob déficit hídrico. **Irriga**, Spec. Ed., v. 1, p. 104-117. 2014.
- CASAROLI, D. D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P. A.; NETO, D.; LIER, Q. de J. van; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja - uma revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia (FZVA)**, v. 14, p. 102-120. 2007.
- CASTRO, E. de M.; OLIVEIRA, J. A.; LIMA, A. E.; SANTOS, H. O.; BARBOSA, J. I. L. Physiological quality of soybean seeds produced under artificial rain in the pre harvesting period. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 1, p. 014-021. 2016. DOI: 10.1590/2317-1545v38n1154236
- CONAB. **Monitoramento agrícola: safra 2016/17**. Brasília: Companhia nacional de abastecimento, 2017. p. 164. (acompanhamento da safra brasileira (grãos)). Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaS/uploads/arquivos/boletim_graos_agosto_2017.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.
- CRAUFURD, P. Q.; SUMMERFIELD, R. J.; ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*). III. Effect of temperature and photoperiod on time to flowering in photoperiod- sensitive genotypes and screening for photothermal responses. **Experimental Agriculture**, v. 32, n. 1, p. 29-40. 1996a.

CRAUFURD, R. J.; ELLIS, R. H.; SUMMERFIELD, P. Q.; MENIN, L. Desenvolvimento in cowpea (*Vigna Unguiculata*). I. The influence of temperature on seed germination and seedling emergence. **Experimental Agriculture**, v. 32, n. 1, p. 1-12. 1996b.

DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T. de; GONÇALVES, A. C. A.; JÁCOME, G. A.; REZENDE, R. Soil water balance simulated by CROPGRO-Drybean model for edaphoclimatic conditions in Maringá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 351-357. 2010.

DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T. de; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; GUIMARÃES, R. M. L. Simulation of bean crop growth, evapotranspiration and yield in Paraná State by the CROPGRO-Dry bean model. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 429-436. 2011.

DINIZ, F. O.; REIS, M. S.; DIAS, L. A. S.; ARAÚJO, E. F.; SEDIYAMA, T.; SEDIYAMA, C. A. Physiological quality of soybean seeds of cultivars submitted to harvesting delay and its association with seedling emergence in the field. **Journal of Seed Science**, v. 35, n. 2, p. 147-152. 2013.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. **An introduction to the bootstrap**: confidence intervals based on bootstrap percentiles. New York: Chapman & Hall/CRC, 1993. 430 p.

EMBRAPA. **Cultivo de feijão-caupi**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. p. 67. Disponível em: <http://www.cpamn.embrapa.br/pesquisa/graos/FeijaoCaupi/referencias.html>. Acesso em: 30 abr. 2016.

FANCELLI, A. L. **Fisiologia, nutrição e adubação do milho para alto rendimento**. Piracicaba: Departamento de Produção Vegetal - ESALQ/USP, 2003. 9 p.

FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P.; SOUZA, P. J. de O. P. de; TAKAKI, A. Y.; LIMA, M. J. A. de. Temperaturas basais e necessidade térmica para o ciclo de desenvolvimento do feijão-caupi. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1781-1793. 2015.

FARIAS, V. D. S.; LIMA, M. J. A.; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. P.; SOUZA, P. J. O. P. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 190-200. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>.

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, p. 506-515. 2015.

FERNANDES, R. C.; CARVALHO, A. L. Espacialização da precipitação pluvial no município de Piranhas, Alagoas. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 295-303. 2013.

FREIRE FILHO, F. R.; CRAVO, M. da S.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; CASTELO, E. de O.; BRANDÃO, E. dos S.; BELMINO, C. S.; MELO, M. Í. S. de. BRS Milênio e BRS Urubuquara: cultivares de feijão-caupi para a região Bragantina do Pará. **Revista Ceres**, v. 56, p. 749-752. 2009.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. S. R.; RODRIGUES, E. V. Produção, melhoramento genético e potencialidades do feijão-caupi no Brasil. In: Reunião de Biofortificação, 4., 2011, Teresina. **Anais...** Teresina: EMBRAPA, CPAMN, 21 p., Ano 2011.

FOSTER, T.; BROZOVIC, N.; BUTLER, A. P.; NEALE, C. M. U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T. C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's Crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 18-22. 2017. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.015

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using soygro, pnutgro, and beangro: A review. **Transactions of the ASAE**, v. 35, p. 2043-2055. 1992.

IBM SPSS Statistics 25. IBM. 2018. **Software**. Disponível: <<http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/products/statistics/>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Cidades: Produção Agrícola Municipal. Lavoras Temporárias e Permanentes**, 2010. 81 p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Mapas: Limite dos Estados Brasileiros e suas regiões**. Brasília: Portal de Mapas, 2018. (Mapas digitais e Modelos Numéricos de Terrenos. Banco de Mapas). Disponível em: <<https://downloads.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **CPTEC/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos: estações do ano, características gerais**. São José dos Campos: CPTEC, 2018. 8 p. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacoes/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **PRODES: áreas desmatadas por estado em 2017**. Estado do Pará. São José dos Campos: Prodesdigital, 2018. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/estados.php?&ano=2017&ESTADO=PA>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

JEUFFROY, M. H.; NEY, B. Crop physiology and productivity. **Field Crop Research**, v. 53, p. 3-16. 1997.

KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 14-26. 2013.

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. 2013a.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no recôncavo baiano através do modelo CROPGRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1294-1300. 2013b.

LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P.; SAMPAIO, L. S.; SOUZA, P. J. O. P. Efeito combinado das variáveis meteorológicas sobre a condutância estomática do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v. 34, p. 547-553. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620160414>

LORITE, I. J.; GARCÍA-VILA, M.; FERERES, E. **AquaCrop-GIS/Version 2.1: Reference Manual**. Rome: FAO copyright materials, 2015. 20 p. (FAO DOCS). Disponível em: <https://www.fao.org/aquacropgis/documents>. Acesso em: 01 jan. 2018.

LORITE, I. J.; GARCÍA-VILA, M.; SANTOS, C.; RUIZ-RAMOS, M.; FERERES, E. AquaCrop and AquaCrop-GIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 96, p. 227-237. 2013.

LOUZADA, J. A.; JOBIM, C. I. P. Demanda de irrigação suplementar e rendimento relativo de grãos de feijão no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 237-247. 2011.

MEIRELES, E. J. L.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, p. 163-171. 2003.

MERRIAN, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation**. Utah: Engineering Department - Utah State University, 1978. 42 p.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, J. M. N. da; VIANELLO, R. L. Influência do El niño nas épocas de plantio e fenologia da cultura da soja na Região Sudeste do Brasil. **Revista Ceres**, v. 54, n. 313, p. 214-221. 2015.

OLIVEIRA, E. C.; COSTA, J. M. N.; PAULA JÚNIOR, T. J.; FERREIRA, W. P. M.; JUSTINO, F. B.; NEVES, L. O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 239-246. 2012. DOI: 10.4025/actasciagron.v34i3.13424

PAREDES, P.; DE MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 81-97. 2014.

PAREDES, P.; TORRES, M. O. Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. **Irrigation Science**, v. 35, p. 27-41. 2016. DOI - 10.1007/s00271-016-0520-x

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 57-71. 2015.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313. 2005.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 39-51. 2012.

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; NEVES, M. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 239-254 (Corrigendum **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 408 (2016)). 2015. DOI: doi:10.1016/j.agwat.2015.08.017

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual, version 6.0. Chapter 1. FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water**. 2017. 75 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Crop water productivity: Calculation procedures and calibration guidance**. AquaCrop version 4.0. Roma: FAO Land and Water Development Division, 2012. 80 p.

RAMOS, T. B.; GONÇALVES, M. C.; MARTINS, J. C.; PEREIRA, L. S. Comparação de diferentes funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas em Portugal. In: GONÇALVES, M. C.; RAMOS, T. B.; MARTINS, J. C. (Ed.). **Solo**. Oeiras: Produção Agrária e Sustentabilidade dos Ecossistemas, Instituto de Nacional de Investigação Agrária e Veterinária - INIA-V, 2014. p. 29-34.

RAMOS, T. B.; GONÇALVES, M. C.; PEREIRA, L. S. **Características de retenção de água no solo para utilização na rega das culturas**. Oeiras: Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária - INIA-V, 2016. 65 p. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/309735078>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

SAN JOSÉ, J. J.; MONTES, R.; NIKONOVA, N.; VALLADARES, N.; BUENDIA, C.; MALAVE, V.; BRACHO, R. Dry-matter partitioning and radiation-use efficiency in cowpea cultivars (*Vigna unguiculata* (L.) Walp. cvs TC-9-6 and M-28-6-6) during consecutive seasonal courses in the Orinoco llanos. **Journal of Agricultural Science**, v. 142, p. 163-175. 2004.

SANTOS, M. G. dos; FARIA, R. T. de; PALARETTI, L. F.; DANTAS, G. de F.; DALRI, A. B.; LOPES, A. da S. Calibration and testing of CS-CROPGRO Model for common beans. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 36, n. 6, p. 1239-1249. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1239-1249/2016>

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1569-1578. 2006.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agriculture Science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411. 2015. DOI: 10.1017/S0021859615000313

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733-3740. 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11522

SILVA, L. L. da; COSTA, R. F. da; CAMPOS, J. H. B. da C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454-461. 2009.

SOUSA, D. de. P. **Eficiência do uso da radiação solar pelo feijão-caupi sob diferentes lâminas de irrigação nas condições climáticas do nordeste paraense**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2016.

SOUZA, L. H. B. de; PEIXOTO, C. P.; SILVEIRA, P. S. da; LEDO, C. A. da S.; LIMA, V. P.; SANTOS, A. P. S. G. dos. Características agrônômicas e rendimento de girassol em diferentes épocas de semeadura e populações de plantas no recôncavo da Bahia. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1 suplemento, p. 90-10. 2014.

SOUZA, P. J. de O. P. de; FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; RAMOS, T. F.; SOUSA, A. M. L. de. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 30, n.3, p. 748-759. 2017.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper 66, 2012. 500 p.

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

TAVAKOLI, A. R.; MOGHADAM, M. M.; SEPASKHAH, A. R. Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 161, p. 136-146. 2015. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.07.020

TEIXEIRA, I. R.; SILVA, G. C.; RIBEIRA-OLIVEIRA, J. P.; SILVA, A. G.; PELÁ, A. Desempenho agrônômico e qualidade de sementes de cultivares de feijão-caupi na região do cerrado. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, p. 300-307, abr./jun. 2010.

TEIXEIRA, G. C. S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 9-17. 2015.

TEIXEIRA, W. G.; BEHRING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Ed.) **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. p. 34-46. ISBN 978-85-7035-771-7.

TESFAYE, K.; WALKER, S.; TSUBO, M. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. **European Journal of Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 60-70. 2006.

VALE, J. C. do; BERTINI, C.; BORÉM, A. **Feijão-Caupi do plantio à colheita**. 1. ed. Viçosa: UFV/Universidade Federal de Viçosa, 2017. 267 p. ISBN: 978-85-7269-578-7

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; GARCIA-VILA, M.; MEJIAS MORENO, P. AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. **Environmental Model Software**, v. 62, p. 351-360. 2014.

WAHID, A.; GELANI, S.; ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, p. 199-223. 2007.

WELLENS, J.; RAES, D.; TRAORE, F.; DENIS, A.; DJABY, B.; TYCHON, B. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 127, p. 40-47. 2013.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DO MODELO AQUACROP

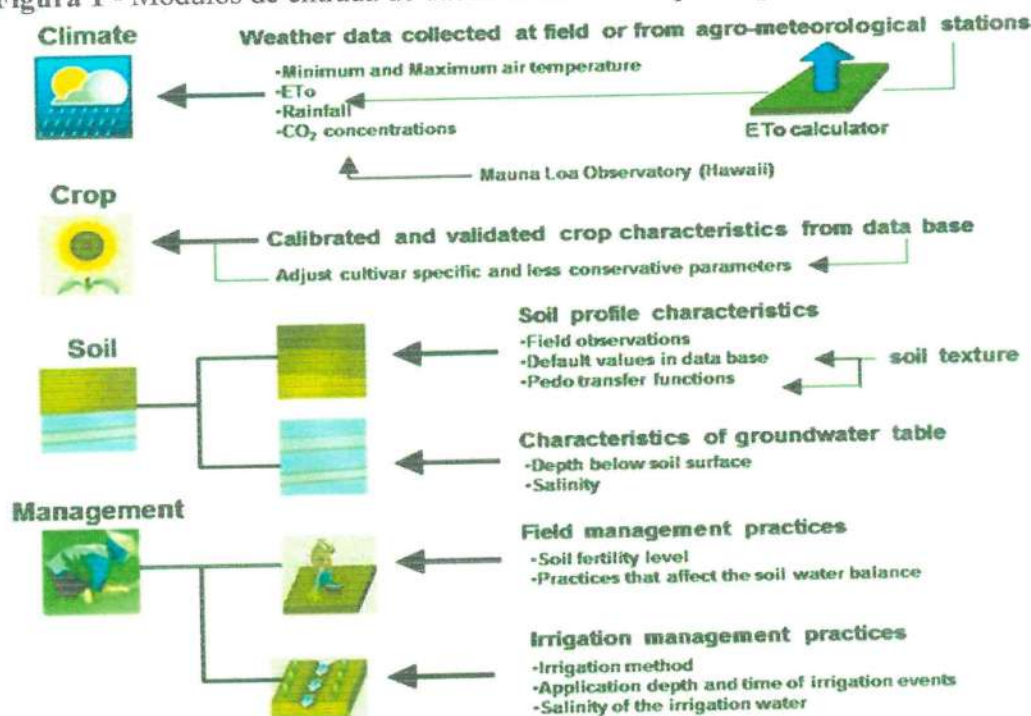
O AquaCrop é um modelo que foi desenvolvido para considerar o efeito da água no rendimento das culturas avaliando o efeito de questões relacionadas ao meio ambiente (solo-planta-atmosfera) na gestão e produção agrícola abordando da forma mais simples a segurança alimentar (FAO, 2017). Ele foi desenvolvido pela divisão de terra e água da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), que resolveram projetar um modelo buscando um ótimo equilíbrio entre a simplicidade, precisão e robustez, e que este modelo fosse amplamente usado por usuários (pesquisadores, produtores, gestores e etc.) preocupados principalmente com a gestão e uso adequado da água na agricultura sendo esta um fator essencial para a produção agrícola (STEDUTO et al., 2012).

O AquaCrop usa um número relativamente pequeno de parâmetros e que requerem na sua determinação metodologias simples e por outro lado, os procedimentos de cálculos dentro do modelo são baseados nos processos biofísicos básicos das plantas que na maioria das vezes são bastantes complexos garantindo uma simulação precisa da resposta da cultura a água no sistema solo-planta (RAES et al., 2009).

Atualmente o modelo AquaCrop se encontra na versão 6.0 e também possui uma versão que pode ser integrada ao software ArcGis (AquaCrop-GIS), estes aplicativos são totalmente gratuitos e encontram-se disponíveis para seu download na página da FAO na internet (<http://www.fao.org>). Na versão (5.0) utilizada nesta pesquisa o modelo apresenta quatro componentes que simulam o crescimento de uma ampla variedade de culturas herbáceas, incluindo as forrageiras, hortaliças de folhas, grãos, frutas, raízes e tubérculos (RAES et al., 2015; PAREDES; TORRES, 2016).

Estas entradas consistem em dados meteorológicos, características de culturas, características do solo e práticas de manejo definindo o ambiente (área) em que a cultura se desenvolverá (Figura 1). Os parâmetros necessários nestas entradas, são descritos detalhadamente em Raes et al. (2015), estas informações referem-se aos dados da área analisada, dados meteorológicos diários, que pode ser de uma série climática ou durante o ciclo de crescimento da cultura, características químicas e físicas do solo e o manejo adotado se houver (aplicação de fertilizantes e irrigação usada).

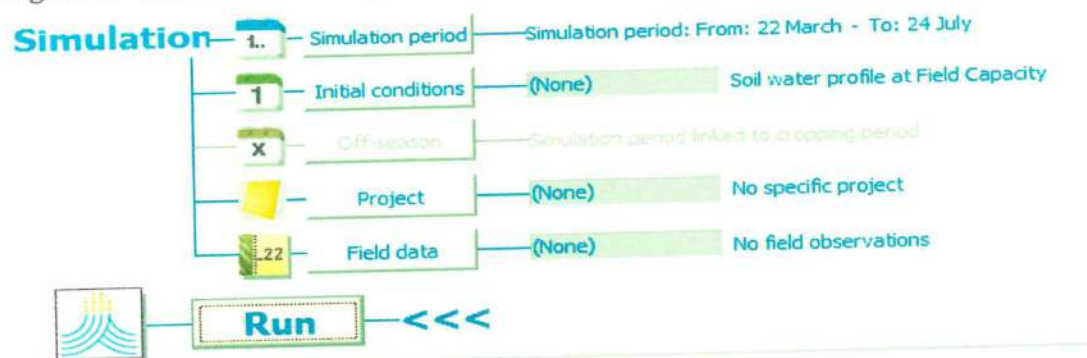
Figura 1 - Módulos de entrada de dados no modelo AquaCrop.



Fonte: Adaptado da FAO, 2017.

Após a inserção destes dados o usuário pode iniciar a simulação, podendo também salvar seus projetos para eventuais calibrações e validações através da comparação dos resultados da simulação com os dados obtidos em campo e pela modificação nos parâmetros genéticos (cultura) melhorando a estimativa destas simulações. Nesta parte do modelo podemos salvar projetos sazonais permitindo que o pesquisador realize várias simulações em relação à série histórica inserida no módulo de clima do modelo, geralmente essa função é usada para avaliar riscos associados ao manejo pretendido (data de semeadura, densidade de plantas, tipo de irrigação, lâminas de irrigação e seu período, avaliação de produtividade potencial e etc.) (PAREDES et al. 2014; FAO, 2017) (Figura 2).

Figura 2 - Módulo de simulação do modelo AquaCrop.



Fonte: Adaptado do modelo AquaCrop, versão 5.0.

MÓDULO DE CLIMA

Os componentes atmosféricos que interferem na cultura devem ser inseridos no componente de clima do modelo AquaCrop (Figura 1), as variáveis (meteorológicas) necessárias são: médias diárias de temperaturas máxima (T_x) e mínima (T_n) do ar, média diária da umidade relativa máxima (UR_x) e mínima (UR_n) do ar, média diária da velocidade do vento à 2 metros (VV), Radiação solar global diária (RG) precipitação pluviométrica diária (PRP), evapotranspiração de referência diária (Et_0) e a concentração de CO_2 . Os valores de T_x e T_n , UR_x , UR_n , VV e RG são usados para calcular a Et_0 através do próprio modelo já que ele possui um calculador de Et_0 integrado que gera este valor em função da equação FAO Penman-Montheith (ALLEN et al., 2011; FAO, 2017).

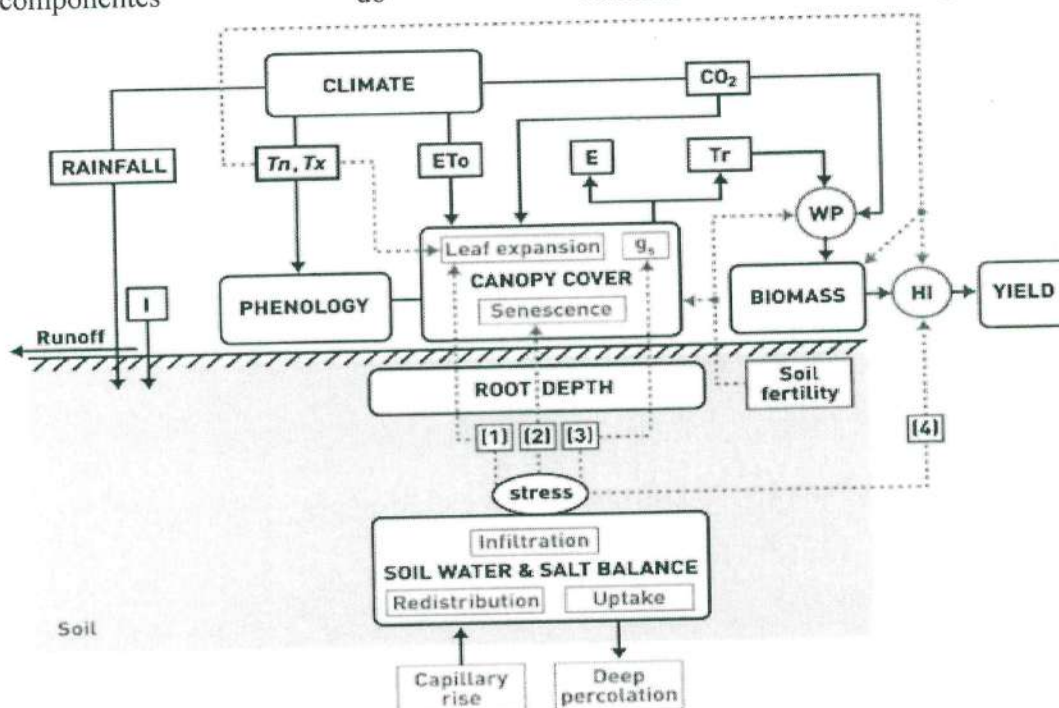
Se o usuário já possuir a Et_0 , ele necessita apenas inserir por meio de arquivos (TXT.) as variáveis de T_x , T_n , a Et_0 , a PRP e o CO_2 . Geralmente estas cinco primeiras variáveis são obtidas ou derivadas a partir de dados de estações meteorológicas ou agrometeorológicas, já a concentração de CO_2 é obtida a partir dos registros da concentração média de CO_2 na atmosfera, oriundas junto ao observatório de Mauna Loa no Havaí ou ainda para diferentes cenários de mudanças climáticas dentro do próprio modelo, onde estes valores são ajustados pelo modelo para o ano simulado (RAES et al., 2015).

Quando os dados meteorológicos diários não estão disponíveis, existe a opção de inserir os registros em duas formas: arquivos de 10 dias ou arquivos mensais, estes dados são transformados pelo AquaCrop em valores diários. Esta conversão é possível porque o modelo possui um gerador climático integrado (CLIGEN) (CAVIGLIONE et al., 2013) usado na transformação de valores de 10 dias ou mensais em diários ele ainda pode estimar precipitação efetiva na área em estudo a partir dos dados inseridos (10 dias ou mensais), através de duas opções, cabendo ao usuário escolher: pelo método USDA da SCS (SOIL

CONSERVATION SERVICE, 1993) ou determinar através da porcentagem do total de precipitação, todas estas transformações consideram a localização da área estudada, já que neste componente são também informadas as coordenadas locais da área (RAES et al., 2011).

Logo a inserção das variáveis meteorológicas é o passo inicial para o processamento do modelo tendo a temperatura do ar influenciando diretamente no desenvolvimento das culturas (fenologia, crescimento e senescência do dossel, produção da biomassa e etc.) já a PRP e a E_{t0} , são as entradas para o balanço hídrico no solo na zona radicular da cultura e a concentração de CO_2 da atmosfera influencia diretamente na taxa de crescimento do dossel da cultura e na produtividade da água (WP) (Figura 3).

Figura 3 - Fluxograma de funcionamento do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera.



Fonte: Adaptado de Raes et al., 2017. Onde: I – irrigação; E – Evaporação do solo; Tr – Transpiração da cultura; g_s – Condutância Estomática; WP – Produtividade da água; HI – índice de colheita; ES – Escoamento Superficial; (1) – (Expansão foliar), (2) – (Senescência), (3) – (g_s), (4) – (HI) – diferentes funções de resposta ao estresse de água. As linhas contínuas mostram as ligações diretas entre as variáveis e processos. As linhas tracejadas mostram a retroalimentação.

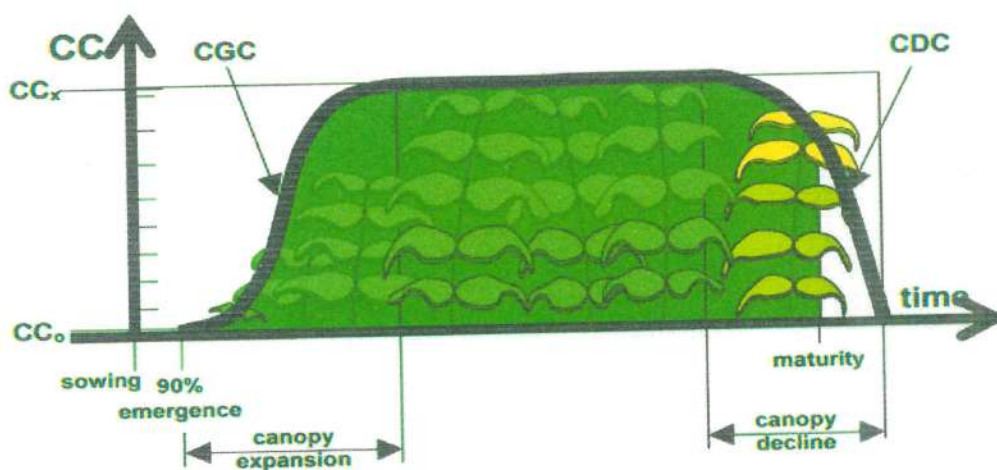
O AquaCrop usa o tempo térmico (graus-dias, GD) como padrão, mas o usuário pode inserir no formato de calendário, de forma alternativa, em dias após a semeadura (DAS), esta opção é usada quando não possuímos os dados para derivar os graus-dias necessário pelo cultivo. Se for inserido em DAS, o número de graus-dias é calculado conforme o sugerido por

McMaster e Wilhelm (1997), através da atribuição do limite superior de temperatura (temperatura basal superior), valor este em que o desenvolvimento da cultura não ocorre em decorrência da temperatura do ar (ALENCAR, 2014).

MÓDULO DE CULTURA

Neste módulo o modelo utiliza cinco componentes principais referentes à cultura: a fenologia; a cobertura do solo pelo dossel (CC); profundidade de enraizamento da cultura; a produção de biomassa; e a produção alcançável (RAES et al., 2011). O modelo demonstra o crescimento da cultura desde seu início, isso ocorre quando 90% das sementes emergem e cobrem o solo inicialmente (CC_0), o usuário ainda deve informar o coeficiente de crescimento (CGC) da cultura, o CGC demonstra como é o padrão (exponencial neste estudo) de crescimento da cultura simulada até que a mesma alcance a máxima cobertura do dossel (CC_x) e ao atingir o estágio de maturação a cultura inicia sua senescência que é determinada pelo coeficiente de declínio do dossel (CDC) (Figura 4).

Figura 4 - Variação da cobertura do solo pelo dossel (CC) ao longo do ciclo da cultura em condições ideais.



Fonte: Adaptado de Raes et al., 2017.

CRESCIMENTO DA COBERTURA DO SOLO PELO DOSSEL (CC)

O modelo AquaCrop expressa o CC, que demonstra a fração coberta do solo pelo dossel verde, usada na produção de biomassa, distinguindo o AquaCrop dos demais modelos que calculam em função do índice de área foliar (IAF). Estas equações que simulam a CC expressam diretamente o efeito provocado pela densidade de plantas, dentro da faixa

comumente encontrada (ALENCAR, 2014). Todo o equacionamento do modelo pode ser encontrado com detalhes em Raes et al. (2017).

Quando a CC é pequena, seu crescimento depende principalmente da quantidade e tamanho de dossel que realiza a fotossíntese, e pode ser expresso por uma curva cinética de primeira ordem (HSIAO, 1982). Isso explica porque a CC_0 é extremamente importante na simulação do CC. Este valor de CC_0 é dado pela densidade de plantas multiplicada pela área foliar de uma plântula, e quando ocorrem 90% de emergência das plântulas semeadas (RAES et al., 2011).

Em geral a expansão do dossel, da emergência até a CC_x , é representada por uma curva do tipo sigmoide obtida em função exponencial até a metade da cobertura do solo (máxima cobertura) e a outra metade é função de decaimento exponencial (senescência) (Figura 4). Em princípio, o crescimento exponencial do dossel ocorre 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. Já durante 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 (RAES et al., 2017). Esta segunda metade da curva segue um decaimento exponencial, dado pela equação 1:

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0) \times e^{-CGC t} \quad (1)$$

Onde estes valores (CC, CC_x , CGC e CC_0) são expressos pela fração (%) cobertura do solo durante o tempo (t, em dias ou graus-dias (GD)). Matematicamente, a CC_x ocorre em $t = \infty$.

Durante o seu desenvolvimento, o crescimento do dossel pode ser facilmente modulado em decorrência do estresse hídrico, pois o crescimento foliar é muito sensível a este estresse e ainda pode ser retardado quando apenas uma pequena fração de água disponível está no solo, isto é, o limite superior para o coeficiente de estresse hídrico no seu crescimento expansivo (KS_{exp}) está abaixo de um valor “p” (PAREDES; TORRES, 2016). No modelo este efeito é calculado, por:

$$CGC_{ajus} = KS_{exp} \times CGC \quad (2)$$

O KS_{exp} varia de 0 a 1, logo a CC começa a diminuir quando a depleção da água no solo fica abaixo do limite superior e para completamente quando a depleção atinge o limite inferior (PAREDES et al., 2014). O valor de CGC deve ser obtido logo após a emergência das plântulas até aproximadamente 60% da CC, antes da obtenção do CC_0 (STEDUTO et al.,

2012). Após a cultura se desenvolver, o dossel pode ter uma duração variável antes de entrar na senescência (Figura 4). A cultura ao senescer, ou seja, no estágio de maturação, sua CC começa a declinar, este declínio é calculado pela equação 3:

$$CC = CC_x \left[1 - 0,05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_x} t} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

O CDC é expresso em % dia⁻¹ ou em GD⁻¹. Contudo a senescência do dossel é acelerada pelo estresse provocado pelo déficit hídrico se houver e a qualquer estágio da cultura, desde que, este estresse seja intenso e provoque um declínio da CC. Se houver este estresse o CDC sofre um ajuste (CDC_{ajus}, em % do dia⁻¹ ou GD⁻¹) pelo modelo em função do coeficiente de estresse hídrico na senescência (K_{sen}), conforme:

$$CDC_{ajus} = (1 - K_{sen}^8) \times CDC \quad (4)$$

BIOMASSE E PRODUÇÃO

A CC representa a fonte de transpiração da cultura (Tr, em mm d⁻¹), transformando uma parte em biomassa (B, em t ha⁻¹), ela é obtida em função da produtividade da água (BWP, em g m⁻²). Neste ponto temos as principais equações do modelo, uma para calcular a B e outra para o cálculo do rendimento (Y, em kg ha⁻¹), que é dado pelo índice de colheita (HI, em %) da cultura simulada e específico para aquela cultura (ALENCAR, 2014; ANJOS, 2011). Desta forma o modelo simula a B e o Y pelas seguintes equações:

$$B = BWP \times \sum Tr \quad (5)$$

$$Y = B \times HI \quad (6)$$

Com o objetivo de deixar o modelo mais robusto, aplicável a diversas condições climáticas, incluindo cenários futuros, a normalização do BWP (BWP*) para o clima é baseada na demanda evaporativa da atmosfera e definida pela evapotranspiração de referência (E_{t0}) e pela concentração de CO₂ da atmosfera. Com isso o modelo consegue fazer com que o valor de BWP seja específico para a cultura e que ele seja aplicável a diversas localidades e diferentes épocas do ano (STEDUTO et al., 2012). O valor de BWP* é calculado por:

$$BWP^* = \left[\frac{B}{\sum \frac{Tr}{E_{t0}}} \right]_{[CO_2]} \quad (7)$$

O somatório é usado para indicar que o modelo calcula e soma a B ao longo de todo o ciclo da cultura, já o CO₂ fora do colchete indicada que a normalização é para um

determinado ano, ou seja, a concentração média anual de CO₂. Maiores detalhes sobre a o BWP* em função do CO₂, ver em Raes et al. (2017).

O modelo AquaCrop não realiza o particionamento da B em órgãos da planta (folha, pecíolo, pedúnculo, caule, flores, vagens e etc.) apesar de usar o HI como parâmetro chave no cálculo do Y. Isso é justificado no manual como uma maneira de evitar a complexidade e incertezas associadas ao processo de particionamento, que são de difícil modelagem e pelo baixo entendimento desta parte na fisiologia das culturas, segundo os elaboradores do modelo (RAES et al., 2011). O déficit hídrico também pode afetar o valor do HI final e isso pode ser ajustado pelo modelador para a simulação de diferentes lâminas com efeitos sobre o Y (STEDUTO et al., 2012).

TRANSPIRAÇÃO DA CULTURA (Tr)

A Tr é simulada separadamente da evaporação no solo (E) à medida que a CC se desenvolve, e como foi dito anteriormente, a Tr é a base para a produção de B na cultura simulada pelo AquaCrop (Equação 5). Desse modo a Tr é proporcional a CC quando não temos o fechamento estomático da cultura causado pelo estresse (déficit hídrico). Sendo assim os elaboradores do modelo criaram um ajuste com o objetivo de considerar os efeitos da microadvecção das entrelinhas do cultivo decorrido da cobertura parcial do solo (RAES et al., 2011). Tal ajuste na percentagem de cobertura do solo pelo dossel (CC*) é necessário para calcular a Tr: Este ajuste é calculado pelo modelo usando a equação:

$$CC^* = 1,72 \times CC - CC^2 + 0,3CC^3 \quad (8)$$

Quando não ocorre o estresse provocado pelo déficit hídrico, a Tr simulada no AquaCrop é proporcional à CC*, conforme a equação:

$$Tr = (CC^* \times Kc_{Tx}) \times Et_0 \quad (9)$$

Onde o Kc_{Tx} (não dimensional) é o coeficiente de transpiração máxima da cultura (FARIAS et al. 2017).

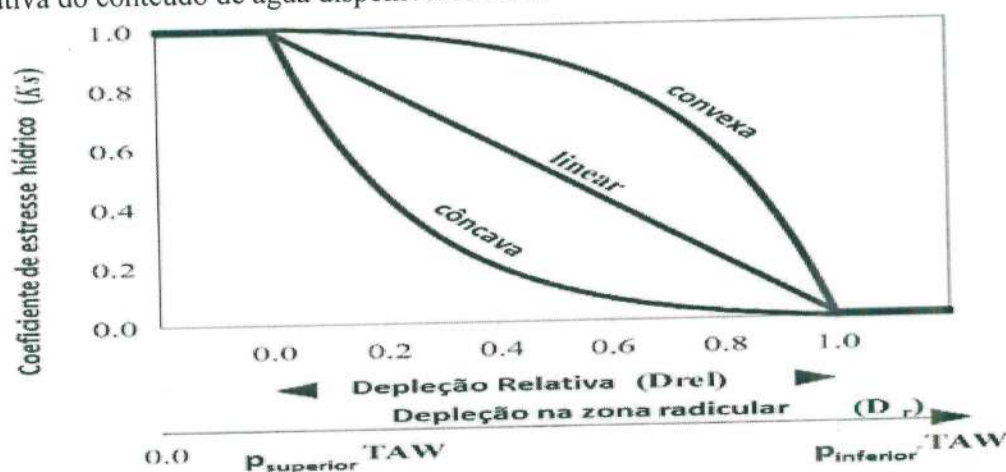
A cultura ao atingir sua máxima CC que ocorre antes da senescência, sofre pequenas reduções na Tr e na sua capacidade de realizar fotossíntese, isso é simulado pelo modelo através de um ajuste que diminui o Kc_{Tx}. Isto ocorre porque é aplicado ao Kc_{Tx} sua diminuição por uma fração constante reduzindo o seu valor (RAES et al., 2017).

ESTRESSE PROVOCADO PELO DÉFICIT HÍDRICO

O déficit hídrico provoca grande impacto no Y , e isso está relacionado ao tempo, grau de déficit e duração deste déficit. Pensando nisso o modelo AquaCrop leva em consideração quatro efeitos do estresse provocado pelo déficit hídrico na cultura: sob o crescimento foliar; sob a condutância estomática; sob a senescência do dossel; e sob o HI. Todos esses efeitos são simulados pelo modelo por meio de seus respectivos coeficientes de estresse (K_s , varia de 0 a 1), com exceção do HI, este K_s serve como um indicador da intensidade do efeito do estresse sob determinada rotina da cultura (STEDUTO et al., 2009).

Como o modelador usa limites superiores e inferiores para indicar o conteúdo de água disponível no solo (TAW), e estes são expressos como fração (p, %) desse TAW, que está entre a capacidade de campo (FC) e o ponto de murcha permanente (WP). Se o valor de K_s estiver acima do limite superior do conteúdo de água no solo, o déficit hídrico não é considerado logo tal rotina é tolerante a “falta de água”, e o K_s é “1”, já se este valor de K_s estiver abaixo do limite inferior o efeito do déficit é grande, e o K_s é “0”, já se o K_s estiver entre $0 < K_s < 1$, a rotina entra dentro de classe de moderadamente tolerante a levemente tolerante ao estresse por déficit hídrico (Figura 5) (ALENCAR, 2014).

Figura 5 - Exemplos dos coeficientes de estresse (K_s) em função da resposta a redução relativa do conteúdo de água disponível no solo.



Fonte: Adaptado de Steduto et al., 2009.

Em geral, esta relação do K_s e p , não são lineares (rotinas da cultura), decorrente da aclimação das plantas e a adaptação da cultura a falta de água, e porque não existe uma linearidade do potencial matricial com o TAW sendo mais bem descrita nos outros tipos de relação (convexa ou côncava) (Figura 5). Assim a forma e o grau de curvatura destas curvas

em relação à depleção de água na zona radicular (D_r), são descritos pela equação (ALENCAR, 2014):

$$0 \leq K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} \times f_{shape} - 1}}{e^{f_{shape} - 1}} \leq 1 \quad (10)$$

Onde D_{rel} é a depleção relativa de água no solo e f_{shape} é a forma da curva de estresse. Se $f_{shape} = 1$ a curva é linear, se $f_{shape} > 1$ a curva é convexa (quase que nas maiorias das culturas) e se $f_{shape} < 1$ a curva é côncava (raramente uma cultura apresenta este padrão). Muitos autores afirmam que são mais plausíveis os limites (p) e as formas das curvas em muitas culturas serem consideradas conservativas (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009).

MÓDULO DE SOLO E O SISTEMA RADICULAR NO MODELO AQUACROP

É necessário inserir no AquaCrop as seguintes informações do solo: Camadas (Até 5, em m); Texturas por camadas (em %); Teor de água na saturação (θ_{sat} , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Capacidade de Campo (θ_{FC} , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ponto de murcha permanente (θ_{WP} , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e Condutividade hidráulica saturada (K_{sat} , em cm d^{-1}). Geralmente estas informações são obtidas através de amostras de solos analisadas em laboratório ou por funções de transferências de pedóide (SAXTON; RAWLS, 2006; RAMOS et al., 2014).

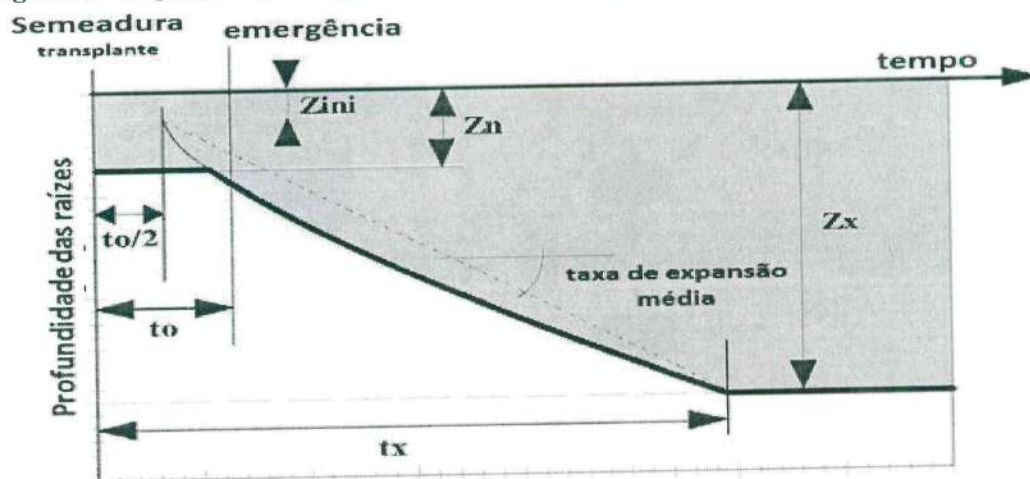
Para simular a dinâmica do sistema radicular o modelo utiliza a profundidade máxima de enraizamento (Z_x , em m) e como ela extrai a água do solo. A Z_x é por definição, a profundidade onde a absorção de água pelas raízes ocorre, ou seja, a profundidade efetiva de raiz, apesar de que, para algumas culturas possuem algumas raízes além desta profundidade (RAES et al., 2011).

No modelo esta extração de água pelas raízes segue o padrão de 40%, 30%, 20%, e 10% para cada $\frac{1}{4}$ da profundidade máxima das raízes, começando com o quarto superior, e pode ser estabelecido pelo modelador casos diferentes deste padrão, dados a partir de limitações físicas ou químicas do solo em estudo (STEDUTO et al., 2009). Contudo o modelo realiza um 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. Através do balanço hídrico diário é mantido o controle dos fluxos (entrada e saída) de água nos limites da zona radicular estabelecido pelo usuário e da água retida nela. A dinâmica da profundidade efetiva de enraizamento do início do plantio até ele alcançar a profundidade máxima (Figura 6), é descrita pela seguinte equação empírica no modelo (ALENCAR, 2014):

$$Z = Z_{ini} + (Z_x - Z_{ini}) \times \sqrt[n]{\frac{(t - \frac{t_0}{Z})}{tx - \frac{t_0}{Z}}} \quad (11)$$

Onde Z é a profundidade efetiva das raízes após o plantio no tempo t (em dias), Z_{ini} é a profundidade de plantio na semeadura, t_0 é o tempo que leva para emergir efetivamente a cultura, tx é o tempo que leva para atingir a Z_x e n é um fator de forma da função em GD (ou em dia).

Figura 6 - Representação esquemática do enraizamento da cultura ao longo do tempo.



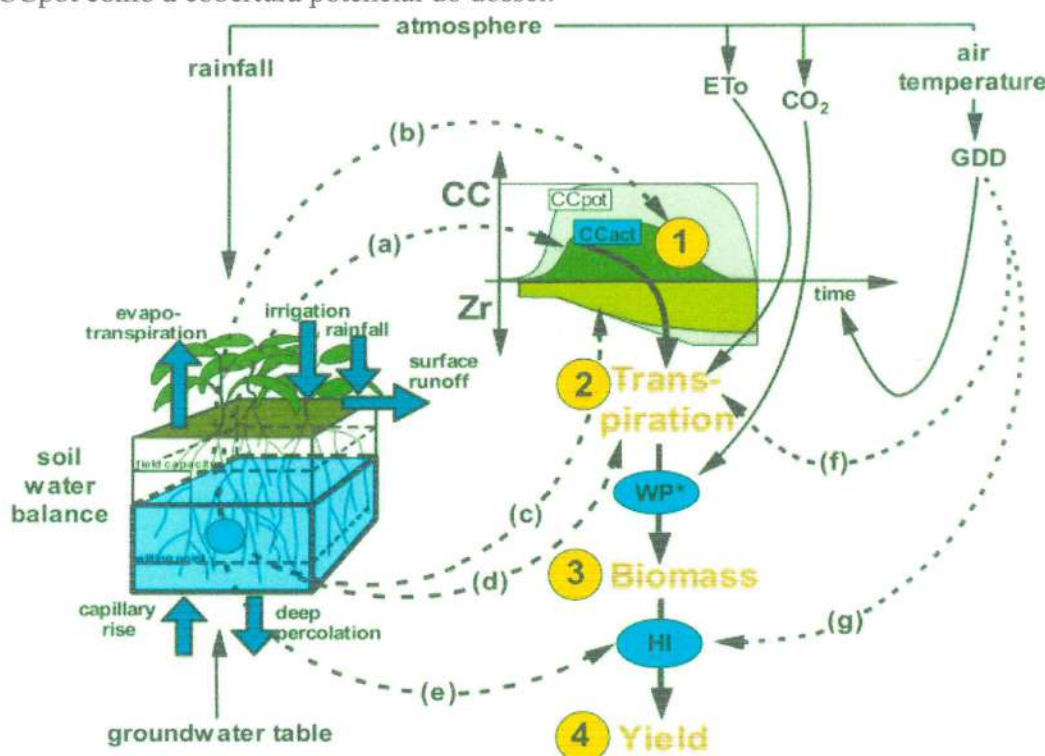
Fonte: Adaptado de Steduto et al., 2009.

Como o crescimento da raiz é mais resistente ao déficit hídrico quando comparado ao crescimento foliar (BRADFORD; HSIAO, 1982; HSIAO; XU, 2000; PAREDES et al., 2014), no modelo a expansão do dossel é reduzida à medida que a depleção da água no solo na zona radicular aumenta. Assim a expansão do sistema radicular é simulada considerando a raiz enésima do tempo, até quando a Z_x é atingida (STEDUTO et al., 2009). A taxa de expansão média das raízes ($dZ/dt-1$, em m) 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 ($K_{s_{sto}}$) e do fator de forma ($f_{shape} < 1$), conforme a equação (ANJOS, 2011; ALENCAR, 2014):

$$dZ_{ajus} = dZ \frac{e^{K_{s_{sto}} - f_{shape}} - 1}{e^{f_{shape}} - 1} \quad (12)$$

Para melhor entendimento da dinâmica de resposta de uma cultura submetida ao déficit hídrico, e como o modelo AquaCrop simula esta ocorrência, é demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Representação esquemática da resposta da cultura ao estresse hídrico, com indicação (setas pontilhadas) dos processos (“a” a “e”) afetada pelo déficit hídrico. Entenda o CCpot como a cobertura potencial do dossel.



Fonte: Adaptado de Raes et al., 2017.

MÓDULO DE MANEJO

O módulo de manejo do modelo AquaCrop possui duas categorias: a primeira refere-se ao manejo no campo (fertilidade no solo), já a segunda é referente manejo da água (irrigação) (Figura 1). Na primeira categoria, o modelador deve inserir a fertilidade adotada ao solo, restos de culturas usadas na área anterior ao experimento caso tenha ocorrido, estas informações podem reduzir principalmente a evaporação de água no solo. Podem ser atribuídas práticas conservacionistas (sulcos, por exemplo) no modelo também, elas são geralmente usadas no controle do escoamento superficial na área experimental (ANJOS, 2011). O modelo não realiza o balanço de nutrientes no solo, mas o usuário pode parametrizar através de níveis (4 níveis, que vai de sem restrição de fertilidade a alta restrição da fertilidade) dentro do modelo. Tais níveis afetam diretamente na CC, CGC, no início da senescência e na taxa de declínio da cobertura do solo pelo dossel e no WP (STEDUTO et al. 2012).

Na segunda categoria, o modelador pode inserir uma cultura submetida a regime de sequeiro (não irrigada) ou irrigada. Se o cultivo for irrigado, deve-se selecionar o método de

aplicação adotado (aspersão, localizada ou superfície). Após selecionar o método o usuário deve inserir sua programação, informando a lâmina aplicada ou a ser aplicado, o tempo adotado (turno de rega) ou pode acionar o módulo automático do modelo para realizar a irrigação automática, informando um turno de rega fixo ou variável, bem como uma lâmina fixa ou fixar uma umidade no solo que ao ser atingido o modelo realize a irrigação automática (RAES et al., 2017).

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. de. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura de cana-de-açúcar**. 2014. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011.
- ANJOS, F. A. dos. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeadura em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011.
- BRADFORD, K. J.; HSIAO, T. C. Physiological responses to moderate water stress. In: LANGE, O.L. et al. (Eds.) **Physiological plant ecology. II. Water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology**. 12. ed. New York: New Series, Springer-Verlag, 1982. p. 263-324.
- CAVIGLIONE, J. H.; FONSECA, I. C. de B.; FILHO, J. T. Viability of CLIGEN in the climatic conditions of Paraná state, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 655-664. 2013.
- FARIAS, V. D. S. et al. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 190-200, jan-mar. 2017. DOI - <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>.
- FAO 2017 (Food and Agriculture Organization of the United Nations). **FAOSOFTWARE**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostatgateway/go/to/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 01 maio 2017.
- 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, p. 488-498. 2009.
- HSIAO, T. C. The soil-plant-atmosphere continuum in relation to drought and crop production. In: _____. **Drought resistance in crops, with emphasis on rice**, 1. ed. Philippines: IRRI, Los Banos, 1982. p. 39-52.

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, p. 448-459. 2009.

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

PAREDES, P.; DE MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, v.144, p. 81-97. 2014.

PAREDES, P.; TORRES, M. O. Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. **Irrigation Science**, 2016. DOI - 10.1007/s00271-016-0520-x

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. 3, p. 438-447. 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual, version 3.1 plus. Chapter 3. Calculation Procedures**. jan, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acessado em: 02 maio 2017.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual, version 5.0. Chapter 3. Calculation Procedures**. 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acessado em: 30 abril 2017.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual, version 6.0. Chapter 1. FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water**. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/wateraquacrop.html>>. Acessado em: 01 abr. 2017.

RAMOS, T. B.; GONÇALVES, M. C.; MARTINS, J. C.; PEREIRA, L. S. Comparação de diferentes funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas em Portugal. In: GONÇALVES, M. C.; RAMOS, T. B.; MARTINS, J. C. (Eds.) **Solo. Produção Agrária e Sustentabilidade dos Ecossistemas**. INIA-V. Oeiras: ACTA, 2014. p. 29-34.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of Agronomy Journal**, v. 70, n. 5, p. 1569-1578. 2006.

SCS - SOIL CONSERVATION SERVICE. Soil-plant-water relationships. Irrigation water requirements. In: _____. **National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, USDA**. Washington: DC Section of Agriculture, 1993. cap. 1, p. 1-56.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water. I: Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, 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**. Rome: FAO, 2012.

APÊNDICE B - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE CASTANHAL (2003 A 2014)

Tabela 1. Valores médios das variáveis meteorológicas para o município de Castanhã, para o período de Janeiro de 2003 a Dezembro de 2014.

Meses	TMED(°C)	TMAX(°C)	TMIN(°C)	UR(%)	UR_MX(%)	UR_MN(%)	VV(m s ⁻¹)	DV(°)	RS(MJ m ⁻² dia ⁻¹)	PRP(mm)
JAN	26,15	31,00	19,00	82,92	84,75	80,30	1,87	84,32	15,03	210,54
FEV	25,59	30,87	18,75	86,62	88,67	84,20	1,78	86,51	14,93	250,16
MAR	25,64	30,45	18,00	87,11	89,29	84,76	1,64	87,57	14,94	330,35
ABR	25,64	30,78	18,54	87,54	89,65	85,18	1,48	126,73	15,88	245,00
MAI	25,92	31,20	19,15	85,76	88,08	83,25	1,58	123,80	16,38	192,00
JUN	26,13	31,35	19,35	82,37	84,93	79,51	1,83	86,14	17,68	143,13
JUL	26,22	31,69	19,38	81,04	83,78	78,16	2,00	96,16	18,07	133,08
AGO	26,58	32,43	20,00	79,60	82,32	76,70	2,27	78,39	18,96	81,55
SET	26,95	32,89	20,15	76,94	79,52	74,20	2,56	63,36	19,23	36,63
OUT	27,13	33,19	20,37	75,34	78,00	72,55	2,51	68,66	18,62	45,00
NOV	27,33	34,02	20,53	74,63	77,14	71,84	2,49	72,18	18,07	32,97
DEZ	26,71	32,17	19,15	78,75	81,37	75,92	2,07	94,31	15,92	80,73
MÉDIA	26,33	31,84	19,36	81,55	83,96	78,88	2,01	89,01	16,98	1781,15

Fonte: Autor (2018).