

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL)

TIAGO AMARAL

**OTIMIZAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DO ARMAZENAMENTO
DE ÁGUA NO SOLO EM CULTIVO DE FEIJÃO IRRIGADO**

Rio Largo – Alagoas

2022

TIAGO AMARAL

**OTIMIZAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DO ARMAZENAMENTO
DE ÁGUA NO SOLO EM CULTIVO DE FEIJÃO IRRIGADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração Irrigação e drenagem. Linha de Pesquisa: Ecofisiologia de culturas tropicais

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme Bastos Lyra

Coorientador: Prof. D.Sc. Gustavo Bastos Lyra

Rio Largo – Alagoas

2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana

A485o Amaral, Tiago.

Otimização de modelos para a estimativa do armazenamento de água no solo em cultivo de feijão irrigado./ Tiago Amaral. – 2022.

81 f.: il.

Orientador: Guilherme Bastos Lyra.

Co-orientador: Gustavo Bastos Lyra.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós - graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Área de concentração em Irrigação e Drenagem, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio largo, 2022.

Inclui Bibliografia

1. Modelagem. 2. Phaseolus vulgaris L.. 3. Agricultura irrigada. 4. Balanço hídrico.

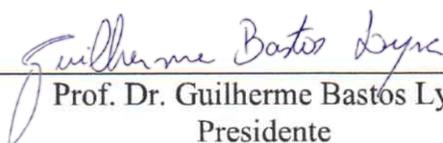
CDU:635.652: 631.67

TERMO DE APROVAÇÃO

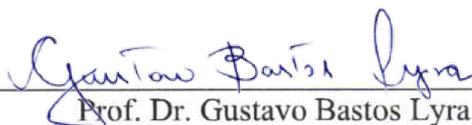
TIAGO AMARAL
(Matrícula 2020101210)

“OTIMIZAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM CULTIVO DE FEIJÃO IRRIGADO”

Dissertação apresentada e avaliada pela banca examinadora em 17 de fevereiro de 2022, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração em Irrigação e Drenagem do Programa de Pós-Graduação em Agronomia “Produção Vegetal” do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.



Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra
Presidente



Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra
Membro



Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães
Membro

A minha mãe Ana Cristina Amaral,
por ser minha principal motivação, pelo
apoio, carinho e incentivo.

Aos meus avós Celina Amaral e
Feliciano Soares da Costa (*in memoriam*),
pelos sacrifícios e pelo amor incondicional
aos seus filhos e netos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), especialmente ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), em nome de todos os professores e funcionários que colaboraram para a minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA), pelo acolhimento e estrutura.

Aos professores do PPGA-CECA/UFAL por todo conhecimento adquirido.

À minha família pelo apoio e amor incondicional.

Ao Professor Guilherme por estar sempre à disposição em me orientar e apoiar nessa jornada.

Ao professor Gustavo por toda a paciência, compreensão e pelo desafio dado, e como professor e coorientador, é exemplo a ser seguido.

Ao amigo Ivomberg, pela confiança e disponibilidade dos dados.

Aos amigos João Pedro e Brenda, pela amizade, ajuda e parceria durante os anos de mestrado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

*“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana,
seja apenas outra alma humana”*
Carl Jung

RESUMO

A produtividade do feijão comum na região Nordeste do Brasil (NEB) é considerada baixa comparada às demais regiões do País. Um dos fatores limitantes para produção agrícola, sobretudo nas regiões geoecológicas inseridas no NEB, é a distribuição sazonal irregular da precipitação pluvial. Para diminuir os efeitos do déficit hídrico, a irrigação é uma prática essencial para um bom desempenho agrônômico da cultura, além de manter a produtividade do feijão competitiva no setor agrícola, pois a agricultura irrigada reduz os riscos e proporciona aumento na produtividade. Assim, faz-se necessário conhecer o armazenamento de água no solo, responsável por suprir a demanda da cultura. Modelos de estimativa do armazenamento de água no solo, baseados em dados meteorológicos e parâmetros do solo e da cultura, destacam-se em relação às medidas diretas, devido a possibilidade de extrapolação e a maior representatividade espacial. Assim, objetivou-se nessa pesquisa otimizar e avaliar o balanço hídrico determinado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) adaptado para cultivos agrícolas e o método da FAO-56 com a abordagem do KcDual, no qual é possível estimar a umidade do solo. Os dados agrometeorológicos e da cultura foram obtidos em experimento de campo conduzido no município de Rio Largo, Alagoas (09°28'02" S; 35°49'43" W; 127 m) no período de 17 de novembro de 2015 a 1 de fevereiro de 2016, com a cultura do feijão, variedade rosinha. O experimento contou com um sistema de irrigação por aspersão no qual foram aplicadas lâminas referentes à 25%, 50%, 75%, 100%, 125% e 150% da evapotranspiração da cultura (ETc). Os modelos foram implementados em ambiente de modelagem do software *OpenModel*®, onde também foi realizada a análise estatística de desempenho dos modelos e a otimização. Os parâmetros da cultura (K_c , K_{cb} e f) e do solo (PMP) foram otimizados pelo método de Levenberg-Marquardt (LM) para o tratamento de 125%. A análise estatística foi baseada no coeficiente de determinação (r^2) entre o armazenamento de água estimado e observado, no índice de concordância de Willmott (d) modificado, no índice de NashSutcliffe (IN) e na raiz do quadrado médio do erro (RQME). Concluiu-se que os métodos podem ser utilizados para estimar o ARM, pois apresentaram boa precisão para as estimativas realizadas em cultivo de feijão em Rio Largo, AL. Entretanto, se faz necessário, ajustes considerando características da cultura, solo e clima da região. A otimização por modelagem inversa LM retornou valores de K_c médio (0,95), K_{cb} inicial (0,20) e médio (1,08), f (0,23) e PMP (0,06 – 0,16) dentro da literatura encontrada, entretanto K_c inicial apresentou valores elevados (1,65). Diante disso, recomenda-se testar outros métodos de modelagem inversa. Depois de um período de estresse hídrico e com a volta da infiltração de água no solo, os dois métodos apresentam estimativas de ARM subestimadas e quando o sistema apresentou um novo período seco, os métodos retornaram valores superestimados. Considera-se avaliar restrições presentes no modelo utilizado, que não considera alguns processos envolvidos no sistema. Os métodos apresentaram maiores erros na estimativa de ARM nos tratamentos em déficit hídrico e excesso de água pela irrigação. O BH pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) apresentou maior precisão, exatidão e menores erros de estimativa e, por isso pode ser indicado para análises do armazenamento de água para a cultura do feijão em condições edafoclimáticas similares.

Palavras-chave: Modelagem, *Phaseolus vulgaris* L., agricultura irrigada, balanço hídrico.

ABSTRACT

Common bean productivity in the Northeast region of Brazil (NEB) is considered low compared to other regions. One of the limiting factors for agricultural production, especially in the agroecological regions included in the NEB, is the irregular seasonal distribution of rainfall. To reduce the effects of water deficit, irrigation is an essential practice for a good agronomic performance of the crop, in addition to maintaining competitive bean productivity in the agricultural sector, as irrigated agriculture reduces risks and provides an increase in productivity. Thus, it is necessary to know the storage of water in the soil, responsible for supplying the demand of the crop. Models for estimating soil water storage, based on meteorological data and soil and crop parameters, stand out in relation to direct measurements, due to the possibility of extrapolation and greater spatial representation. Thus, the objective of this research was to optimize and evaluate the water balance determined by the Thornthwaite and Mather (1955) method adapted for agricultural crops and the FAO-56 method with the KcDual approach, in which it is possible to estimate soil moisture. Agrometeorological and crop data were obtained in a field experiment conducted in the municipality of Rio Largo, Alagoas (09°28'02" S; 35°49'43" W; 127 m) from 17th November 2015 to 1st February 2016, with the bean crop, *rosinha* variety. The experiment had a sprinkler irrigation system in which 25%, 50%, 75%, 100%, 125% and 150% of crop evapotranspiration (CET) were applied. The models were implemented in a software modeling environment, *OpenModel*®, where the statistical analysis of the performance of the models and the optimization of parameters of the culture (K_c , K_{cb} and f) and of the soil were also carried out (PMP) by the Levenberg-Marquardt method (LM). Statistical analysis was based on the coefficient of determination (r^2) between estimated and observed water storage, the Willmott concordance index (d) modified by the NashSutcliffe index (NI) and the root mean square error (RMSE). It was concluded that the methods can be used to estimate the ARM, as they presented good precision for the estimates made in bean cultivation in Rio Largo, AL. However, adjustments are necessary considering the characteristics of the culture, soil and climate of the region. LM inverse modeling optimization returned average K_c (0,95), initial (0,20) and average (1,08) K_{cb} values, f (0,23) and PMP (0,06 – 0,16) within the from literature found, however initial K_c showed high values (1,65). Therefore, it is recommended to test other inverse modeling methods. After a period of water stress and with the return of water infiltration into the soil, both methods present underestimated ARM estimates and when the system presented a new dry period, the methods returned overestimated values. It is considered to evaluate restrictions present in the model used, which does not consider some processes involved in the system. The methods presented greater errors in the estimation of ARM in the treatments in water deficit and excess of water by irrigation. The BH by the method of Thornthwaite and Mather (1955) presented smaller estimation errors and, therefore, it can be indicated for analyzes of the water storage for the bean crop in similar soil and climatic conditions. flow of water for agricultural cultures.

Key words: Modeling, *Phaseolus vulgaris* L., irrigated agriculture, water balance.

SUMÁRIO

RESUMO	7
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO.	18
3.1 Cultura do feijão	18
3.2 Armazenamento de água no solo.....	22
3.3 Balanço hídrico.....	23
3.4 Modelo de Thornthwaite e Mather	25
3.5 Modelo FAO-56	28
4. MATERIAL E MÉTODOS.	30
4.1 Descrição da área e manejo da cultura	30
4.2 Medidas biométricas e agrometeorológicas	32
4.3 Caracterização físico-hídrica	33
4.4 Modelo de Thornthwaite e Mather adaptado.....	33
4.5 Modelo FAO-56 adaptado.....	37
4.6 Evapotranspiração de referência	43
4.7 Análise estatística	46
4.8 Otimização dos modelos	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	49
5.1 Caracterização do período experimental	49
5.2 Otimização dos modelos	51
5.3 Avaliação dos modelos.....	54
6. CONCLUSÕES.....	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	67

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Fluxograma do balanço hídrico climatológico 27
- Figura 2 - Variação da precipitação, irrigação e evapotranspiração de referência (ET_o) para o plantio de feijão, em função de diferentes lâminas de irrigação em Rio Largo, Alagoas. A – 25%, B – 50%, C – 75%, D – 100%, E – 125% e F – 150% ET_c..... 50
- Figura 3 - Variação diária do armazenamento de água no solo (mm d⁻¹), estimado pelo modelo de Thornthwaite e Mather (ARM_{ThM}), pelo modelo da FAO-56 (ARM_{FAO56}) e observado (ARM), capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) e água facilmente disponível (AFD), para os tratamentos L1 (A), L2 (B), L3 (C), L4 (D), L5 (E) e L6 (F). 54
- Figura 4 - Variação diária do armazenamento de água no solo (mm d⁻¹), estimado pelo modelo de Thornthwaite e Mather após otimização (ARM_{ThM}), pelo modelo da FAO-56 após otimização (ARM_{FAO56}) e observado (ARM), capacidade de armazenamento de água disponível em ThM (CAD_{ThM}) e FAO-56 (CAD_{FAO56}); e água facilmente disponível em ThM (AFD_{ThM}) e FAO-56 (AFD_{FAO56}), para os tratamentos L1 (A), L2 (B), L3 (C), L4 (D), L5 (E) e L6 (F). 58
- Figura 5 - Análise de regressão linear entre os valores do armazenamento de água no solo observado e estimado para o plantio de feijão pelo método de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 (FAO56). A – L1 (25%), B – L2 (50%), C – L3 (75%), D – L4 (100%), E – L5 (125%) e F – L6 (150%) da ET_c. d – índice de concordância WILLMOTT (1981); r² - quadrado do coeficiente de correlação; a – coeficiente linear da reta, intercepto; b – coeficiente angular da reta, inclinação. 61
- Figura 6 - Análise de regressão linear entre os valores do armazenamento de água no solo observado e estimado após otimização para o plantio de feijão pelo método de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 (FAO56). A – L1 (25%), B – L2 (50%), C – L3 (75%), D – L4 (100%), E – L5 (125%) e F – L6 (150%) da ET_c. d – índice de concordância WILLMOTT (1981); r² - quadrado do coeficiente de correlação; a – coeficiente linear da reta, intercepto; b – coeficiente angular da reta, inclinação. 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estádios de desenvolvimento da planta de feijoeiro	21
Tabela 2 - Atributos químicos do solo da área experimental.	31
Tabela 3 - Umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) para os tratamentos de lâmina de irrigação	33
Tabela 4 - Coeficiente da cultura (K_c) do feijoeiro de acordo com a FAO-56 e corrigidos.	36
Tabela 5 - Coeficientes da cultura, coeficientes da cultura basal e fator de disponibilidade de água (f), valores de entrada nos modelos e otimizados no tratamento L5.....	52
Tabela 6 - Valores de ponto de murcha permanente (PMP) de entrada nos modelos e otimizados em cada tratamento	54
Tabela 7 - Índices de desempenho estatístico para ajuste dos métodos de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 para estimativa do armazenamento de água no solo antes e depois da otimização. TRT – tratamento; RMSE - raiz quadrada do erro médio; MSEa – erro sistemático aditivo; MSEp – erro sistemático proporcional e MSEi – erro sistemático interdependente.....	64
Tabela 8 - Índices de desempenho estatístico para ajuste dos métodos de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 para estimativa do armazenamento de água no solo antes e depois da otimização. TRT – tratamento; MSEs – erro sistemático total; MSEu – erro não sistemático; MSE – erro médio.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AFD – Água facilmente disponível (mm);
- AFE – Água facilmente evaporável (mm);
- ARM – Armazenamento de água no solo (mm);
- BH – Balanço Hídrico;
- BHC – Balanço Hídrico Climatológico;
- CAD – Capacidade de armazenamento de água disponível (mm);
- CAE – Capacidade de água evaporável (mm);
- CC – Capacidade de campo (mm);
- CRA – Fator de disponibilidade de água no solo (mm);
- CTA – Capacidade total de água na zona radicular (mm);
- DAS – Dias após semeadura;
- DEF – Deficiência hídrica (mm);
- Dr – Depleção na zona radicular (mm);
- De – Depleção na camada subsuperficial (mm);
- E – Evaporação (mm);
- ETc – Evapotranspiração da cultura (mm d^{-1});
- ETo – Evapotranspiração de referência (mm d^{-1});
- ETP – Evapotranspiração potencial (mm d^{-1});
- ETR – Evapotranspiração real (mm d^{-1});
- EXC – Excedente hídrico (mm);
- FAO56 – Food and Agriculture Organization of the United Nations - Boletim 56;
- f – Fração da água disponível na zona radicular [0-1];
- I – Irrigação (mm);
- IAF – Índice de área foliar;
- J – Dia Juliano;
- K_c – Coeficiente da cultura;
- K_{cb} – Coeficiente da cultura basal;
- K_e – Coeficiente de evaporação;
- K_r – Coeficiente de redução da evaporação do solo;
- K_s – Fator de redução da transpiração;

LM – Levenberg-Marquardt;

L_{ini} – Comprimento do estágio inicial (dia);

L_{cres} – Comprimento do estágio de crescimento (dia);

L_{int} – Comprimento do estágio intermediário (dia);

L_{fim} – Comprimento do estágio final (dia);

NEG.ACU – Negativo acumulado (m^3m^{-3});

P – Precipitação pluvial (mm);

PMP – Ponto de murcha permanente (mm);

t – Tempo;

TDR – Técnica da Reflectometria de Domínio de Tempo;

ThM – Thornthwaite e Mather;

T_m – Temperatura do ar média diária ($^{\circ}C$);

TRT – Tratamentos;

u^2 - Velocidade do vento a 2 m de altura ($m s^{-1}$);

UR – Umidade relativa do ar (%);

z – Altitude (m);

Z_e – Profundidade da camada superficial do solo (m);

Z_r – Profundidade efetiva do sistema radicular (m);

θ – Conteúdo volumétrico de água do solo (m^3 de água/ m^3 de solo).

1. INTRODUÇÃO

O constante aumento da população mundial desperta uma série de preocupações, no que diz respeito à qualidade de vida do ser humano. A segurança alimentar é um fator extremamente importante e a capacidade mundial de assegurar boa alimentação está diretamente ligada à aplicação tecnológica e manejo ideal no campo, o que proporciona aumento da produtividade na limitada área agricultável. O acelerado processo de urbanização, melhoria da renda, aumento da longevidade e padrão de consumo, produzirá elevação na demanda por alimentos, energia e água (MORETTI, 2019; BALLERO, 2020). Em grande parte formada, por produtos provenientes do agronegócio, a segurança alimentar da população se baseia, de modo geral, no consumo de grãos e outros alimentos provenientes da atividade agrícola, como o feijão comum, por exemplo.

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) tem grande importância na alimentação da população brasileira, consumido por diversas classes sociais, o grão é considerado componente essencial na alimentação das classes mais baixas (SANTOS e GAVILANES, 2006). Essa leguminosa gera receita para o pequeno produtor, principalmente por ser considerada uma cultura de ciclo curto, tornando-se atrativa, para o mesmo, já que consegue adequar o seu plantio dentro de uma janela menor, sem ter que abrir mão da produção de outros grãos ainda no mesmo ano-safra (CONAB, 2021a).

Apesar da sua importância para o país, a área plantada de feijão no Brasil caiu nos últimos dez anos, devido principalmente a falta de água (MORAES e MENELAU, 2017). Dados de 2017 da FAO, evidenciam que o ano de 2009 foi o último ano em que o Brasil esteve como maior produtor mundial. No entanto, o país se mantém entre os seis países que representam cerca de 61% da produção mundial e, está atrás apenas de países como a Índia e o Myanmar. Se tratando da produção do Mercosul, a média de produção dos últimos quatro anos foi de 3,6 milhões de toneladas, sendo o Brasil o principal produtor, com cerca de 3,1 milhões de toneladas anuais (CONAB, 2019).

A região Nordeste do Brasil é uma das principais produtoras de feijão comum do país (BRITO et al., 2016). No ano de 2019 a região representou cerca de 21% da produção

nacional, produzindo 633,7 mil toneladas e com uma produtividade de 431 kg ha⁻¹. No estado de Alagoas, a produção foi de 16,6 mil toneladas e produtividade de 484 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021b). A produtividade da região Nordeste ainda é considerada baixa quando comparada às demais regiões, devido principalmente ao baixo nível tecnológico empregado no seu cultivo (CONAB, 2016). Além disso, a leguminosa é cultivada em regime de sequeiro e depende diretamente das condições climáticas (CONAB, 2019).

Dentre os principais problemas climáticos que acometem a produção no estado de Alagoas está o regime irregular de chuva. Um fator limitante para produção agrícola, sobretudo nos ecossistemas inseridos na região Nordeste do Brasil, é a irregular distribuição sazonal da precipitação pluvial (FURTADO, 2017). Para evitar efeitos de estresse hídrico, a irrigação racional é um fator essencial para um bom desempenho da cultura no campo (MAGALHÃES et al., 2019), e além manter a produção do feijão competitiva no setor agrícola, pois a agricultura irrigada reduz os riscos e proporciona incremento na produção agrícola (SILVA JUNIOR, 2017). Assim, a gestão adequada da água, especialmente irrigação, é necessária para obter rendimento máximo da safra (TAMAGI et al., 2016; AAMAAS e PETERS, 2017).

Um elemento essencial para o manejo adequado da irrigação é a evapotranspiração da cultura (ET_c), no que lhe concerne, possibilita esquemas de manejo de irrigação baseados em valores médios mensais e o seu conhecimento é fundamental para que sistemas de irrigação sejam adequadamente projetados, atendendo às necessidades de água da cultura sem superdimensionar o sistema (UNESP, 2016; SILVA JUNIOR, 2017). A evapotranspiração (ET) representa a perda natural de água do solo vegetado para a atmosfera através da evaporação e da transpiração. ET pode ser estimada por diferentes métodos, ou determinada em condições locais por meio de lisímetros, sendo este o mais indicado, devido às características intrínsecas de cada local (FENNER et al., 2019).

A dinâmica da água no solo deve ser considerada, principalmente quando falamos no manejo de recursos hídricos. Para se manejar adequadamente a irrigação das culturas, é necessário que se estabeleça limites mínimos de armazenamento de água no solo (ARM), de modo que este forneça água às plantas satisfatoriamente (VIEIRA et al., 2015). Que estão entre 250 e 300 mm para a cultura do feijão (EMBRAPA, 2018). Diante disso, faz-se necessário estimar o conteúdo de água no solo e a parcela disponível para suprir a demanda

da cultura durante o seu ciclo, em todo planejamento de manejo e projetos agrícolas.

O solo, por sua vez, possui grande importância para o sistema água-solo-planta-atmosfera. O solo é o reservatório natural de água para a vegetação, a entrada de água é representada pela precipitação e irrigação enquanto a saída é a evapotranspiração (FERREIRA, 2014).

Estudar a distribuição e disponibilidade espacial e temporal dos recursos hídricos, permite que se estabeleçam diretrizes e políticas de planejamento e execução para o uso racional da água (BALLERO, 2020). O balanço hídrico (BH) é uma ferramenta importante para o cálculo da disponibilidade de água no solo para as culturas agrícolas. Buscar soluções viáveis para essa realidade passa pelo uso de métodos eficazes para estimar o armazenamento de água no solo por meio do balanço hídrico (FURTADO, 2017).

Para o monitoramento do armazenamento de água no solo, o BH baseia-se nos fluxos de entrada e saída de água. Sendo que, para os fluxos de entrada, são consideradas: precipitação pluviométrica, irrigação, ascensão capilar, escoamento superficial, orvalho e drenagem lateral. Para o fluxo de saída: evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e drenagem lateral, desse modo, é possível estabelecer a quantidade de água disponível para absorção das plantas pelo sistema radicular (FURTADO, 2017). Este é um instrumento pertinente à produção, visto que, os fluxos de entrada e saída de água no solo permitem a planta absorvê-la pelo sistema radicular (BALLERO, 2020). Mesmo com todos esses elementos enquadrados nos fluxos de entrada e saída, o BH contabiliza e compara basicamente a precipitação + irrigação com a evapotranspiração em uma área com dimensões conhecidas, e permite estimar as condições hídricas do solo.

Tucci (1997) classifica o balanço hídrico em superficial, energético, aerológico, isotópico, balanço hídrico agrícola e climatológico, de acordo com a sua aplicação. Entretanto, a disponibilidade de elementos climatológicos vai influenciar diretamente na escolha do método a ser utilizado, e em algumas situações aqueles mais exigentes e complexos acabam sendo inviáveis. Por isso, os métodos indiretos de estimativa do balanço hídrico simulado por modelos matemáticos tornam-se uma opção, comparado aos diversos fatores necessários na utilização de métodos diretos (FURTADO, 2017). Tais estimativas buscam definir parâmetros climatológicos que se padronizem em localidades distintas dentro de uma mesma região, a fim de se comparar os resultados obtidos (VAREJÃO, 2006).

Entre os métodos indiretos utilizados para estimar o balanço hídrico climatológico estão o método de Thornthwaite e Mather (1955) (ThM), que a princípio foi proposto por Thornthwaite (1948) com a utilização da temperatura do ar, precipitação e a capacidade de armazenamento de água no solo, fixada em 100 mm, como dados de entrada. Este método foi aperfeiçoado por Mather (1955) ao considerar outras características sobre a capacidade do armazenamento do solo e a demanda evapotranspiratória. O método é considerado simplificado pelo baixo número de variáveis meteorológicas e do solo requeridos e hipóteses restritivas, entretanto, a adaptação do método com características da cultura, tais como, estádios de desenvolvimento, altura da planta, coeficiente da cultura e profundidade efetiva do sistema radicular, é possível obter uma estimativa do ARM mais precisa para cultivos agrícolas (LYRA et al., 2010).

Allen et al. (1998) também propuseram um método para o cálculo do balanço hídrico, na *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO-56, por meio do boletim técnico nº 56. O método utiliza a abordagem do K_c Dual, que fornece estimativas diárias da evaporação do solo e da transpiração da cultura separadamente, tornando-o mais sensível as variações agrometeorológicas. Além disso, é possível definir a fração de solo que é umedecido por precipitação ou irrigação e exposto aos efeitos climáticos (FURTADO, 2017).

Para a aplicação do método escolhido é necessário considerar a variabilidade dos elementos, verificar as medidas diretas das funções hidráulicas do solo, fatores delimitantes da cultura e avaliar se são aplicáveis. Isso se torna um dos maiores problemas porque a avaliação do método também envolve adaptação de parâmetros para a cultura e local de estudo. Furtado (2017) levantou como solução, a utilização do conteúdo de água no solo como critério para ajuste dos parâmetros por meio de modelagem inversa, adaptando o método para que ele seja otimizado por meio dos parâmetros ajustados, resultando em estimativas do conteúdo volumétrico do solo (θ) mais próximos dos valores observados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a estimativa do armazenamento de água no solo pelo modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955) adaptado para cultivos agrícolas e o modelo proposto no boletim FAO-56 por Allen et al. (1998) em cultivo de feijão comum no município de Rio Largo, Alagoas.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar o desempenho das simulações pelo modelo de Thornthwaite e Mather e do modelo do Kc Dual;

Utilizar a modelagem inversa para otimizar os parâmetros da cultura e do solo usados nos modelos;

Comparar as estimativas entre os modelos e para diferentes lâminas de irrigação, por meio da análise estatística.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cultura do feijão

O feijão comum pertence à família Fabaceae (Leguminosae), gênero *Phaseolus*, espécie *Phaseolus vulgaris* L. A leguminosa é considerada um dos mais importantes componentes da alimentação da população do Brasil. Para a Embrapa Arroz e Feijão (2018), o consumo médio per capita de feijão-comum foi estimado em 2017 para 15,0 kg/hab./ano. Considerando as últimas décadas, percebe-se uma tendência de queda no consumo, depois de ter chegado a 18,8 kg/hab., em 1996. A importância do feijão para a alimentação humana e animal deve-se às suas características organolépticas, já que é fonte de proteínas, minerais e vitaminas, além de possuir alto conteúdo de ácidos graxos poli-insaturados e carboidratos (MORAES e MENELAU, 2017).

O feijoeiro por ser uma planta versátil pode ser cultivado nos mais variados tipos de solo, clima e sistemas de produção, tais como o cultivo solteiro, consorciado ou intercalado com uma ou mais espécies (SILVA et al., 2007). Além disso, o feijoeiro também pode ser utilizado em diversos arranjos, como, por exemplo, na adubação verde, pois produz grande quantidade de biomassa, fornece nutrientes e melhora a qualidade do solo, pela sua capacidade de simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, facilitando a fixação biológica do nitrogênio atmosférico ao solo, o que pode reduzir gastos com fertilizantes (CARNEIRO, 2010; COÊLHO, 2018). Nas regiões onde predominam áreas de cultivo menores, parte da produção é destinada ao autoconsumo das famílias. Contudo, mesmo os pequenos produtores de feijão destinam parte da sua produção ao mercado (SILVA e WANDER, 2013).

Considerado uma cultura de ciclo relativamente curto, o feijoeiro pode ser cultivado em três épocas distintas, chamadas de safras anuais. O cultivo de feijão das águas e da seca no Brasil geralmente é feito por pequenos produtores, que dispõem de baixo nível tecnológico, enquanto que o cultivo de inverno é feito com irrigação (HEINEMANN; STONE, 2015). A semeadura da 1ª safra, conhecida como safra das águas, ocorre entre outubro e dezembro, e tem como característica o plantio e a colheita, beneficiados pelo alto índice de chuvas. A 2ª safra, ou safra da seca, é plantada em período com menor índice de chuva, normalmente em fevereiro ou março. Esta safra, apresenta produtividade potencial mais baixa do que a 1ª safra, devido à diminuição na radiação acumulada e maior frequência de temperaturas mínimas inferiores à ótima, durante o ciclo da cultura (HEINEMANN e STONE, 2015). A 3ª safra, safra de outono-inverno, ocorre no inverno, referindo-se à colheita de feijão irrigado plantado entre maio e julho (LANDAU e MOURA, 2018).

Além da classificação em feijão-comum cores e feijão-comum preto, em razão da preferência dos consumidores e dos agricultores, há no Brasil, ampla variabilidade de cultivares: carioca, preto, roxo, rosinha e também os feijões de sementes graúdas e as cultivares do grupo manteigão (PEREIRA et al., 2012). Oriundo de feijão crioulo, o grupo Rosinha destaca-se por apresentar boa produtividade e pouca incidência de pragas e doenças (SILVA et al., 2007). Dentre suas características gerais, ele faz parte do grupo II que corresponde ao hábito de crescimento ereto indeterminado, possui massa de 100 grãos de 21,3 gramas, período médio de 34 dias para a floração e 78 dias para a sua maturação (ciclo) (ARAÚJO e TEIXEIRA, 2012).

A escolha de cultivar de boa procedência deve ser considerada para o dimensionamento não só na produção do feijoeiro, mas sim para toda e qualquer cultura agrícola. Não obstante há diversos outros fatores na cadeia da cultura que precisam da total atenção do produtor, como por exemplo, o fato da cultura ser pouco tolerante às condições meteorológicas extremas, sobretudo durante o florescimento com relação à temperatura do ar e deficiência hídrica (GONZAGA, 2014). A deficiência hídrica pode causar limitações fisiológicas e anatômicas, visto que o feijoeiro possui baixa capacidade de se recuperar, principalmente devido ao limitado crescimento radicular (SILVA et al., 2011).

De modo geral, sabendo que a disponibilidade de água é um fator de suma importância, tem sido relatada a sensibilidade do feijão ao estresse hídrico, principalmente em virtude da baixa capacidade de recuperação após a deficiência hídrica e sistema radicular pouco desenvolvido (FRANCISCO et al., 2016).

A cultura apresenta sensibilidade tanto à deficiência quanto ao excesso de água no solo, ou seja, a necessidade de água pela cultura precisa ser avaliada de acordo com seu estágio de desenvolvimento e condições locais (NÓBREGA et al., 2001; JERSZURKI et al., 2018). O consumo de água pelo feijoeiro depende do estágio de desenvolvimento, das condições do solo, época de cultivo e das condições climáticas durante todo o ciclo (MOREIRA et al., 1988).

Alem da otimização no manejo adequado da irrigação, o conhecimento dos diferentes estádios de desenvolvimento do feijoeiro facilita na escolha da melhor época de plantio, nutrição e outras práticas culturais que são demandadas em diferentes fases da cultura. Na Tabela 1 é apresentada a descrição de cada estágio de desenvolvimento do feijão nas fases vegetativa e reprodutiva.

Tabela 1 - Estádios de desenvolvimento da planta de feijoeiro.

FASE	ESTÁDIO	DESCRIÇÃO
Vegetativa (V)	V0	Germinação: Dia da sementeira
	V1	Emergência da planta: Cotilédones visíveis e as primeiras folhas simples iniciam seu desenvolvimento.
	V2	Folhas primárias: Abertura e crescimento das folhas primárias.
	V3	Primeira folha composta aberta: Formada por três menores (trifoliolada) que se exibem completamente.
	V4	Terceira folha trifoliolada aberta: Completamente aberta e plana, ocorrendo o desenvolvimento dos primeiros ramos secundários.
Reprodutiva (R)	R5	Pré-floração: Desenvolvimento dos primeiros ramos secundários e o surgimento dos primeiros botões florais.
	R6	Floração: A planta apresenta 50% de flores abertas.
	R7	Formação de vagens: As flores, já fecundadas, murcham as pétalas e ocorre a formação das primeiras vagens (canivetes).
	R8	Enchimento das vagens: Enchimento dos grãos e o consequente aumento do volume das vagens.
	R9	Maturação: As vagens perdem a cor e começam a secar. As sementes adquirem a cor e o brilho característicos da cultivar.

Fonte: Oliveira et al. (2018). Adaptado pelo autor.

Se o déficit hídrico ocorrer durante a fase vegetativa, ocorrerá redução da área foliar das plantas, enquanto que na fase reprodutiva provoca abortamento e queda de flores e, conseqüentemente, redução no número de vagens por planta e no enchimento de grãos (GUIMARÃES, 1988; PEIXOTO, 2020). Essas conseqüências se dão devido à diminuição da taxa fotossintética, reduzindo a condutância estomática com implicações diretas na transpiração, fotossíntese e temperatura das folhas, o que resulta na perda de produtividade, podendo ser bastante significativo dependendo da fase fenológica em que esse estresse acontece (MAGALHÃES, 2017).

3.2 Armazenamento de água no solo

O solo é um reservatório natural de água para a vegetação, onde as chuvas e irrigação são as principais formas de entrada de água, enquanto que, a evapotranspiração é a principal forma de saída, e essa dinâmica de entrada e saída pode gerar excedente ou déficit hídrico (FERREIRA, 2014; BALLERO, 2020). A disponibilidade de água é um dos principais fatores físicos que influenciam diretamente o desenvolvimento e a produção das culturas agrícolas (CARDUCCI et al., 2017).

De forma mais específica, a retenção de água no solo ocorre devido a fenômenos de capilaridade e adsorção, sendo que a capilaridade atua na retenção da água quando os poros estão cheios (solo úmido) e a adsorção passa a predominar na retenção à medida que os poros vão se esvaziando (TIMM et al., 2004). Simplificando, solos com poros menores retêm mais água que maiores, denominados, respectivamente micro e macroporos (FURTADO, 2017).

O fornecimento de água do solo para a planta só acontece se houver a combinação de fatores físicos e químicos, como a estrutura do solo, mineralogia, granulometria, presença e composição de matéria orgânica e a cobertura vegetal (CARDUCCI et al., 2017). Só assim há possibilidade do armazenamento, retenção e disponibilidade de água, oriundas das precipitações e que variam em intensidade e distribuição.

As culturas agrícolas fazem o processo de retenção de água nas suas zonas radiculares e a capacidade de retenção depende, basicamente, da textura e da estrutura do solo, da profundidade efetiva deste sistema radicular e da profundidade da camada de solo (BERNARDO et al., 2006).

Para o melhor entendimento do armazenamento de água no solo, alguns elementos são de extrema importância, como a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD), que é a característica física de retenção de água no solo, que representa a quantidade de água que o solo pode armazenar contra a força gravitacional sem afetar a extração da água pelas raízes das plantas (FURTADO, 2017). Este armazenamento de água permite avaliar a dinâmica de crescimento e produção; bem como o planejamento e gestão de sistemas de irrigação (JERSZURKI et al., 2018).

O limite máximo de água disponível no solo é a capacidade de campo (CC) e o limite mínimo é o ponto de murcha permanente (PMP). A partir desses limites, pode-se determinar

a capacidade de armazenamento de água disponível no solo, considerando a profundidade do sistema radicular (BERGAMASCHI et al., 1992; BARBIERI et al., 2017).

Considerando que o acesso a água pelo sistema radicular em alguns compartimentos é dificultado, o armazenamento de água disponível é o compartimento de água no solo mais importante para as plantas (VAN LIER, 2010). Dada sua importância também para o estudo da resposta ecofisiológica das plantas sob condições de deficiência hídrica, bem como para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de um sistema de irrigação (FRIZZONE et al., 2005; JERSZURKI et al., 2018).

3.3 Balanço hídrico

A distribuição e o estado físico em que a água se apresenta varia em diferentes regiões do globo, devido à variação da energia, que promove o processo de evaporação da água para a atmosfera (DAMIÃO et al., 2010). A água precipitada é proveniente da evaporação de rios, lagos e oceanos, e quando chega ao solo é transpirada pelas plantas através da evapotranspiração (MATOS et al., 2015; MARTINS, 2019). Todos esses processos no qual envolvem a dinâmica da água fazem parte do ciclo hidrológico.

Os vários processos que envolvem fluxos de água, como infiltração, redistribuição, evaporação e absorção pelas plantas, são interdependentes e ocorrem simultaneamente (MONTEIRO, 2009). Para estudar ciclo hidrológico é necessário considerar o balanço hídrico (BH).

Através do balanço hídrico climatológico é possível verificar a disponibilidade hídrica de uma região, através do estudo da precipitação pluvial, assim obtendo as suas variações sazonais de excedentes e de deficiências hídricas (FARIAS et al., 2012). Por meio da relação de entrada e saída de água de uma condição de controle (BALLERO, 2020).

Furtado (2017) divide os fluxos de água em positivo (entrada) e negativo (saída) e são representados por fatores que abasteçam ou removam a água do volume de controle analisado. Especificamente é a precipitação, orvalho, irrigação, ascensão capilar, evaporação, transpiração, drenagem lateral e profunda, escoamento superficial e lateral. De forma simplificada compreende a relação entre entradas e saídas de água em condições conhecidas, as quais são designadas principalmente pela precipitação pluvial (P) e por evapotranspiração potencial (ETP), respectivamente (CASTRO et al., 2010; LOPES et al., 2017).

Vários estudos já foram feitos e o balanço hídrico é definido como sendo a contabilidade hídrica do solo, ou seja, o cálculo de todos os ganhos e perdas de água, juntamente com o seu armazenamento, que se verificam no solo ou bacia considerada. Com isso é fundamental o conhecimento de como cada característica de solo se comporta com relação à entrada e saída de água, resultando desse processo as características edafoclimáticas (BARBIERI et al., 2017).

Na prática, a água que pode ficar retida no solo é representada pela capacidade de armazenamento de água no solo. A água no solo pode variar e atingir o armazenamento máximo, assim ocorre a capacidade de campo (CC); e quando falta água nos cultivos é o ponto de murcha permanente (PMP). A CC e o PMP são dois limites práticos estabelecidos pela capacidade de água disponível (CAD) para fins agronômicos (FERREIRA, 2014; PEREIRA, 2013; BALLERO, 2020).

Quando envolve cultivos agrícolas, o BH avalia a intensidade das saídas e entradas de água através de parâmetros meteorológicos (precipitação e evapotranspiração), fenológicos (estádios de desenvolvimento da cultura) e físicos do solo (CAD) (CARDUCCI et al., 2017). Permite definir com melhor precisão os períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura e, assim, estabelecer um manejo agrícola adequado que visa à conservação do solo e da água (CASA et al., 1999; SILVA, 2014).

As culturas, normalmente, exploram diferentes profundidades de solo, e a capacidade de água disponível pode estar sujeita a uma variação contínua (OMETTO, 1981; PEREIRA et al., 1997). Nesse sentido, estimativas de armazenamento e irrigações para um determinado período (diário, semana, quinzena, mês entre outros), devem estar dentro do limite para a região e cultura, permitindo assim coerência nos resultados obtidos (SOUZA e GOMES, 2008).

O monitoramento hídrico do solo e da cultura é de grande importância, devido a relação direta nas interfaces solo-água-planta, demanda que seja feito o monitoramento hídrico do solo e da cultura (CARDUCCI et al., 2017). Com as variáveis que compõem o BHC, é possível realizar o planejamento agropecuário e as práticas de controle de produção das propriedades rurais, disponibilizando informações que permitam os produtores identificar as fragilidades do clima e as melhores épocas de produção (AQUINO e OLIVEIRA, 2013; PASSOS et al., 2019; SILVA e NASCIMENTO, 2020).

O acesso a dados climáticos, cálculos complexos e aquisição de equipamentos de alto custo que em raríssimas exceções encontram-se disponíveis aos pequenos produtores rurais ou técnicos agrícolas acabam inviabilizando o BH (SOUZA et al., 2017).

A utilização de instrumentos e métodos alternativos de baixo custo para medir ou estimar parâmetros climáticos, fáceis de empregar e calcular, caracteriza-se como uma possibilidade de superação da falta ou imprecisão dos dados, sem comprometer a precisão das medidas efetuadas dos fenômenos observados (SOUZA et al., 2017).

Ainda sim, muitos sistemas agrícolas no mundo, especialmente nas regiões tropicais, apresentam limitações técnicas para ajustar o uso dos recursos hídricos de acordo com as demandas das safras e a variabilidade do clima (GÉRARDEAUX et al., 2016; TORQUEBIAU et al., 2016; JERSZURKI et al., 2018).

O desenvolvimento e aprimoramento de modelos de simulação do balanço hídrico vêm sendo mostrado pela literatura e têm resultado em ferramentas interessantes para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação (SOUZA e GOMES, 2008; SOUZA et al., 2017).

A FAO-56 teve grande influência no desenvolvimento de materiais transferíveis modelos de simulação de computador, como os modelos da FAO CROPWAT (SMITH, 1992) e AQUACROP (RAES et al., 2009) que permitem a simulação do crescimento da cultura e da resposta à água da cultura sob uma ampla gama de condições e práticas (FARAHANI et al., 2007; SEIDEL et al., 2019).

Gomes (2005) reporta em sua pesquisa uma relação de pelo menos 24 trabalhos que envolveram direta ou indiretamente a realização de balanços hídricos para auxiliar na composição de modelos computacionais, voltados à agricultura irrigada (SOUZA e GOMES, 2008). Souza et al. (2013) estimaram o BHC e efetuaram a classificação climática para doze municípios do Mato Grosso. Medeiros et al. (2015) realizaram a caracterização agroclimática e a aptidão de culturas para diversos municípios da Paraíba.

3.4 Modelos de Thornthwaite e Mather

Os sistemas de aquisição de dados climáticos em estações meteorológicas apresentaram uma melhoria significativa nas últimas décadas (PEREIRA et al., 2008). Entretanto quando se trata de algumas regiões brasileiras, series de dados físico-hídricos de

longo prazo ainda são inacessíveis. Assim, a utilização de modelos de balanços hídricos agrícolas a partir de series históricas de dados climáticos faz parte da popularização científica para o monitoramento do armazenamento de água no solo (JERSZURKI et al., 2018).

O modelo mais aceito para a estimativa do balanço hídrico para fins agrícolas é o descrito por Thornthwaite e Mather (1955), o qual vem sendo adaptado e utilizado por inúmeros autores ao longo do tempo (LEIVAS et al., 2006; ANDRADE JUNIOR et al., 2006; SOUZA et al., 2017; SOUZA FILHO e GOMES, 2007; SPAROVEK et al., 2007; BRUNO et al., 2007; SOUZA e GOMES, 2008; ARAÚJO et al., 2009; DOURADO-NETO et al., 2010; CAMPOS et al., 2016; SOUZA et al., 2017; JERSZURKI et al., 2018).

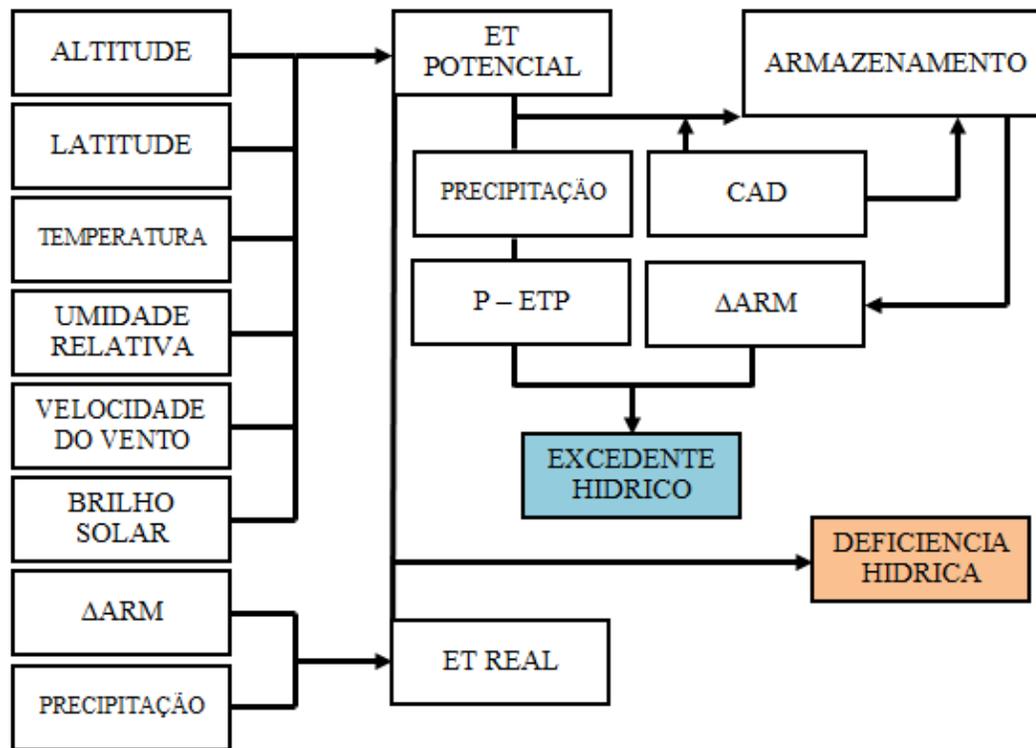
Thornthwaite (1948) inicialmente propôs um método de estimativa do BHC com a utilização de alguns dados de entrada, que são: temperatura do ar, precipitação pluviométrica e a capacidade do solo de armazenar água, fixada em 100 mm. O suprimento da água disposta no solo acontece de forma linear, pela demanda da evapotranspiração e o restante é incorporado ao solo, até a ponto de murcha da cultura.

Posteriormente o método foi aperfeiçoado por Mather (1955), com a definição da capacidade de armazenamento do solo variável, considerando suas propriedades físicas próximas da zona radicular. Além disso, a demanda evapotranspiratória é revista e torna-se exponencial, devido à força de retenção ser contrária a distância entre as moléculas de água e partícula do solo (FURTADO, 2017). Então o método proposto ficou conhecido como balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) (ThM).

Considerado um método simplificado pelo baixo número de variáveis e sem necessitar de medidas diretas (PARREIRA et al., 2019), ele apresenta resultados satisfatórios quando comparados a dados obtidos por medidas diretas para uma mesma localidade. Possibilita a identificação das épocas de deficiência e excedente hídrico, a contabilização da entrada e saída de água para determinada região e também a classificação climática (JESUS, 2015; OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2019).

Basicamente, com a estimativa da evapotranspiração potencial (ETP), determinada com dados de temperatura e latitude, e da precipitação de dado local e período é possível estimar o armazenamento de água no solo (ARM), a evapotranspiração real (ETR), o excedente hídrico (EXC) e o deficit hídrico (DEF) (ANDRADE, 2019).

Figura 1: Fluxograma do balanço hídrico climatológico.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Pereira et al. (2019). ET – evapotranspiração.

O monitoramento climático através do BHC de Thornthwaite e Mather (1955) é importante para o planejamento da agricultura, pois é a base para o sucesso produtivo das culturas agrícolas, uma vez que determina a melhor época e as áreas mais promissoras ao plantio (BLAIN, 2009; PASSOS et al., 2017). Algumas das atividades que são influenciadas diretamente pela disponibilidade de água, são eles: o manejo da irrigação, controle de pragas, preparo e adubação dos solos (FURTADO, 2017), entre outros.

Para obtenção de estimativas do ARM mais precisas para cultivos agrícolas, o método precisa ser adaptado considerando as características da cultura, tais como, estádios de desenvolvimento, altura da planta, coeficiente da cultura e profundidade efetiva do sistema radicular (LYRA et al., 2010).

Os principais componentes a se considerar no BH adaptado para culturas agrícolas são a precipitação e irrigação (entrada), evapotranspiração e excedente, que corresponde principalmente à drenagem profunda, (saída). O orvalho, escoamento superficial e a drenagem lateral são desconsiderados, pois representam baixo grau de impacto na quantidade final de água (FURTADO, 2017).

O maior diferencial do método ThM adaptado é que o armazenamento de água no solo é limitado pela CAD e valores acima são considerados excedente hídrico. Isso acontece devido a CAD ser adaptada de acordo com a profundidade do sistema radicular da cultura e das propriedades físico-hídricas (CC e PMP) e ela varia de acordo com crescimento da cultura (LYRA et al., 2010). Com estimativas sequenciais, diárias ou mensais (PEREIRA et al., 1997).

A baixa exigência de dados de entrada e estimativas que acompanham dados observados de cultivos em regiões variadas acaba sendo um atrativo para a utilização do modelo. Sendo fácil encontrar na literatura trabalhos como o de Lima et al. (2020), que aplicou o método de ThM para determinar o BH de uma área piloto sob cultivo convencional de pastagem Mombaça no cerrado maranhense.

França et al., (2021), por sua vez, computou o balanço hídrico de acordo com a metodologia de ThM com dados atuais e futuros para a cultura do algodão em Amparo de São Francisco/Sergipe. Araújo et al. (2009) elaboraram balanços de água no solo, adaptando o modelo de Thornthwaite e Mather (1955) para o cultivo de milho em regime de sequeiro e irrigado, em diferentes épocas de cultivo na região semiárida do Estado de Alagoas.

Santiago et al. (2017) identificaram e quantificaram períodos com excedentes e déficits de água no solo para o cultivo da melancia pelo método de ThM, em Juazeiro/Bahia. Santos Junior (2018) obteve a variação da disponibilidade de água para o cultivo da soja no município de Foz do Iguaçu/Paraná por meio do balanço hídrico de ThM, para os períodos de 1961-1990 e 1991-2017.

3.5 Modelo FAO-56

O modelo proposto pela FAO-56 (ALLEN et al., 1998) é considerado um método teoricamente completo para estimativas de evapotranspiração de referência (ET_o) independente das condições climáticas e de solo. Com a utilização de uma parametrização de Penman-Monteith é muito utilizado como referência para a análise da eficácia de outros métodos (BALLERO, 2020).

A Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) convidou alguns especialistas, no qual fizeram a indicação do modelo, resultando na elaboração do Boletim de nº 56 (FAO-56) (PEREIRA; SEDIYAMA; NOVA, 2013; COSTA, 2020) que é a revisão

dos métodos apresentados no seu boletim de irrigação e drenagem n° 24 (FAO-24).

Os parâmetros adotados no cálculo da ETo , que é a demanda atmosférica, se mantem constantes devido o método usar cultura de referência hipotética, com características semelhantes a grama (CARVALHO et al., 2011). Através da ETo e o coeficiente da cultura (K_c) durante os estágios fenológicos da planta, temos a estimativa da ETc . Onde o K_c representa características da cultura, sendo possível separar esse coeficiente em coeficiente da cultura basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e) (ALLEN et al., 1998; COSTA, 2020).

A utilização desse coeficiente da cultura duplo é chamada de K_c dual e é a junção da componente evaporação do solo (K_e) e a transpiração da cultura (K_{cb}), visando melhores determinações da quantidade de água necessária para a planta (ALLEN et al., 1998; COUTO et al., 2015). Além disso o método apresenta simplicidade, reprodutibilidade, precisão relativamente boa e transferibilidade entre locais e climas (ALLEN et al., 2020).

É considerada a abordagem mais utilizada em termos de acurácia dos valores de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998; SILVA et al., 2013). A abordagem K_c dual oferece estimativas diárias da transpiração da cultura e da evaporação do solo por meio de um balanço hídrico do solo e determina a fração de solo umedecida por precipitação ou irrigação, exposta as ações climáticas (FURTADO, 2017; COSTA, 2020).

A obtenção do K_e feita pelo cálculo do balanço hídrico diário do solo necessita da entrada de variáveis de parâmetros físicos do solo no modelo, que são a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a água facilmente evaporável (AFE) (SILVA et al., 2013; FURTADO, 2017; COSTA, 2020; BALLERO, 2020).

O K_{cb} que representa a transpiração da cultura é penalizado pelo coeficiente de redução por estresse hídrico (K_s) quando a água disponível no sistema radicular não supre a taxa de transpiração potencial. Já o K_e , reduz o K_c à medida que a camada superficial do solo seca (ALLEN et al., 2005; FURTADO, 2017).

Quando a cultura se encontra na fase inicial o K_e possui maior influência na determinação do K_c , devido à cobertura vegetal inferior a 10%. O K_{cb} só passa a ter maior influência no K_c , quando há o aumento do índice de área foliar, com potencial transpirométrico da cultura (ALLEN et al., 2005).

A CC e PMP são responsáveis por definir a disponibilidade de água no solo e quando a demanda de transpiração da parte aérea da cultura não é suprida pelo transporte de água da

zona radicular, a planta entra em estresse hídrico. A fração total de água disponível é denominada água prontamente disponível ou fator de disponibilidade de água no solo (CRA) (FURTADO, 2017).

Outra característica é a depleção na zona radicular, que representa a escassez de água relativa à capacidade de campo (Dr). Ao atingir CRA o estresse é induzido e a evapotranspiração é reduzida proporcionalmente a quantidade de água disponível na zona radicular. Essa proporção é determinada pelo K_s que depende da água disponível na zona radicular (ALLEN et al., 1998; FURTADO, 2017).

A evapotranspiração da cultura (ETc), é fundamental para projetos de irrigação e manejo de água das culturas, pois indica a quantidade de água necessária para que a cultura não sofra estresse hídrico e afete seu crescimento, desenvolvimento e produtividade (PEREIRA et al., 2012).

Allen et al. (2020) descreveu as etapas e funções usadas para produzir series temporais completas de ET e necessidade de água de irrigação para culturas no Oeste dos Estados Unidos. Sendo assim uma ótima ferramenta de gestão da irrigação, trabalhar cenários e enfrentar secas e mudanças climáticas (PAÇO et al., 2019).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área e manejo da cultura

Os dados referentes à cultura do feijoeiro e as observações agrometeorológicas foram coletadas em um experimento de campo, conduzido no município de Rio Largo, Alagoas. O clima da região é caracterizado pela classificação de Thornthwaite, como umido e megatérmico, com características hídricas de deficiência moderada na estação do verão, excesso hídrico na estação do inverno. A precipitação pluvial média anual da região é 1.800 mm e a temperatura do ar média de 25,4°C (SOUZA et al., 2020).

O experimento foi conduzido em área do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA, da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, localizado nas coordenadas geográficas: latitude 9° 29' 45" S, longitude 35° 49' 54" O e altitude 127 m. O experimento foi conduzido durante a estação seca, de 17 de novembro de 2015 a 01 de fevereiro de 2016, que totalizou um ciclo de 76 dias. De acordo com análise do departamento de Física do solo

do CECA/UFAL, a classificação do solo é Latossolo Amarelo Coeso Argissólico, de textura média argilosa e com declividade inferior a 2%.

Com base na análise química do solo da área experimental (Tabela 2), foi feita a adubação de fundação, com 45 kg de Ureia, 78 kg de Cloreto de Potássio e 111 kg de Superfosfato Simples, por hectare. Para a adubação de cobertura, utilizou-se 89 kg de Ureia por hectare, aos 20 dias após a semeadura (DAS). O controle de pragas foi feito com inseticidas sintéticos e as plantas daninhas foram controladas por meio de capinas manuais.

Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental.

Cam	pH	*P	Ca	Mg	K	SB	Al	H+Al	T	m	V
Cam	mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³%.....	
0-20	5,8	15,2	2,7	1,3	1,15	4,21	0,08	5,4	9,61	1,5	44,2

Cam – camada do solo, pH – Potencial de hidrogenação, P – fósforo, Mehlich*, Ca – cálcio, Mg – magnésio, K – potássio, SB – soma de bases, Al – alumínio, H+Al – hidrogênio mais alumínio, T – capacidade de troca de bases, m – saturação por alumínio e v – saturação por bases.

A área total do experimento foi de 1.920 m², dividido em 24 parcelas experimentais com dimensões: 8 m de comprimento x 10 m de largura (80 m²). O tipo de semeadura utilizada foi a manual, com a distribuição de três sementes por cova, no espaçamento de 0,50 m entre linhas e com a população de plantas de 250.000 plantas por hectare, com a distribuição de 13 a 15 plantas por metro linear. Aos 15 DAS foi feito o desbaste, reduzindo para uma planta por cova.

No experimento, foi utilizada a variedade de feijão crioula rosinha. O método usado para a irrigação da área experimental foi a localizada por microaspersão, com aspersores no espaçamento de 2 x 2,5 m, pressão de serviço de 14 m.c.a, vazão média de 50 L h⁻¹ por micro, e lâmina bruta aplicada de 8,9 mm h⁻¹.

O delineamento utilizado foi de blocos casualizados com quatro repetições. Para a irrigação dos tratamentos, foram constituídas seis lâminas de irrigação; 25%, 50%, 75%, 100%, 125% e 150% com o estabelecimento de acordo com a evapotranspiração da cultura (ETc), entretanto até 15 DAS, ou seja, período inicial, todos os tratamentos receberam as mesmas lâminas de irrigação (100% ETc).

3.2 Medidas biométricas e agrometeorológicas

Foi feita a coleta dos dados meteorológicos durante o período do experimento, sendo as variáveis medidas: temperatura ($T, ^\circ\text{C}$) e umidade relativa do ar (UR, %), velocidade do vento a 2 m de altura ($u^2, \text{m s}^{-1}$), precipitação pluvial (P, mm) em intervalos de 10 minutos. As variáveis foram medidas na estação agrometeorológica automática do Centro de Ciências Agrárias, do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA), cujos dados técnicos são: Micrologger – 21 CR1000, Campbell Scientific, Logan, Utah; com distância de 30 metros do experimento.

Foi aplicada a técnica da Reflectometria de Domínio de Tempo (TDR), para a obtenção do conteúdo de água do solo na zona das raízes (W, mm), medidas a cada 30 minutos do conteúdo volumétrico de água no solo por sensores. O TDR (CS616, *Campbell Scientific*, Logan, Utah) foi conectado a um sistema automático de aquisição de dados (CR1000, *Campbell Scientific*, Logan, Utah). As hastes do TDR foram posicionadas no solo verticalmente, dentro das fileiras centrais e com uma distância de 0,15 m das plantas. A profundidade da haste foi de 0,30 m (ROCHA et al., 2014).

Os índices biométricos foram obtidos por meio da separação dos trifólios e pecíolos para o estabelecimento dos resultados da área foliar com o auxílio de um medidor Li-Cor, modelo LI-3100, com os resultados expressos em m^2 . A determinação do índice de área foliar (IAF) foi feito pela relação AFP/AOP, em que AFP = área foliar por planta (m^2) e AOP = área ocupada pela planta (m^2) (FLOSS, 2004). As medidas de altura da planta e IAF foram realizadas aos 35 DAS, em uma amostragem de cinco plantas das parcelas úteis, entre a pré-floração e a formação de vagens, no estágio R5 (FERNANDEZ et al., 1982).

As observações e medidas de campo foram baseadas nas datas de cada estágio de desenvolvimento da cultura, dividindo-se da seguinte maneira: período inicial (17/11/2015 – 15 dias); período de desenvolvimento (02/12/2015 – 25 dias); período intermediário (27/12/2015 – 25 dias) e período final (21/01/2015 – 11 dias, totalizando 76 dias). Essa classificação é indicada pelo boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

3.3 Caracterização físico-hídrica

A umidade volumétrica (θ , m^3/m^3) foi estimada na profundidade efetiva do sistema radicular (Zr 0,10 – 0,30 m), pela determinação da umidade volumétrica do solo para todos os sistemas.

O conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc} 0,2445 m^3/m^3) e o ponto de murcha permanente (θ_{pmp} 0,1475 m^3/m^3) foram determinados em laboratório, por meio da curva de retenção de água no solo (CARVALHO, 2003). Para os tratamentos onde θ apresentou valores menores que o θ_{pmp} determinado em laboratório, foi considerado o θ mínimo como θ_{pmp} para os cálculos do conteúdo de água no solo (Tabela 3).

Tabela 3 – Umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) para os tratamentos de lâmina de irrigação.

Umidade do solo (m^3/m^3)	Tratamentos					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
θ_{cc}	0,2445	0,2445	0,2445	0,2445	0,2445	0,2445
θ_{pmp}	0,1360	0,0440	0,1330	0,1475	0,1475	0,1475

3.4 Modelo de Thornthwaite e Mather adaptado para cultivos agrícolas

A equação da continuidade constitui o balanço de água no solo de ThM e considera a água um fluido incompressível (FURTADO, 2017). A variação do armazenamento de água no sistema é determinada pela diferença entre a quantidade de água que entra no sistema e a que sai. Lyra et al. (2010) apresenta o modelo de ThM da seguinte forma:

$$ALT_i = (ARM_i - ARM_{i-1}) = (P_i + I_i) - ETR_i - EXC_i \quad (01)$$

em que, ALT – alteração do armazenamento de água no solo (ARM), mm; P – precipitação pluvial, mm; I – irrigação, mm; ETR – evapotranspiração real, mm; EXC – excedente hídrico, mm.

É necessário o cálculo do teor de umidade que o solo teria caso não houvesse

resistência a remoção de água, conhecido como negativo acumulado (NEG.ACUC), pois o aumento da resistência penaliza o ARM. Quando ARM se encontra abaixo da CAD, ele é definido pela disponibilidade de água no solo. Considerando a observações, o ARM é determinado pela seguinte equação:

$$ARM_i = \begin{cases} CAD_i \exp\left(\frac{NEG.ACUC_i}{CAD_i}\right); & \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i < 0 \\ ARM_{i-1} + (P_i + I_i - ETc_i) & \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i \geq 0 \end{cases} \quad (02)$$

em que, CAD – capacidade de água disponível, m^3m^{-3} ; NEG.ACUC – negativo acumulado, m^3m^{-3} ; ETc – evapotranspiração da cultura, $mm\ d^{-1}$.

A determinação do negativo acumulado é feita pela equação:

$$NEG.ACUC = \begin{cases} NEG.ACUC_{i-1} - (P_i + I_i - ETc_i); & \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i < 0 \\ CAD_i \ln\left(\frac{ARM_i}{CAD_i}\right) & \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i \geq 0 \end{cases} \quad (03)$$

A CAD constitui a retenção máxima de água no solo além da força gravitacional. Pereira et al. (2012) recomenda a determinação considerando a profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r) para fins de balanço hídrico. Segue a equação da CAD:

$$CAD = 1000 (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) Z_r \quad (04)$$

em que, θ_{cc} – umidade do solo a capacidade de campo, m^3m^{-3} ; θ_{pmp} – umidade do solo ao ponto de murcha permanente, m^3m^{-3} ; Z_r – profundidade efetiva do sistema radicular, m.

Allen et al. (1998) no boletim FAO-56 afirma que a profundidade do sistema radicular da cultura (Z_r) pode ser estimada em função do K_c compreendido entre L_{ini} e L_{mid} , entretanto após esse período Z_r assume a medida máxima, que varia de 0,10 a 0,30 m. Para fins de cálculo nesta pesquisa, foi considerado justamente esse valor de Z_r mínima 0,10 m e máxima 0,30 m, pois os dados de umidade no solo foram medidos até a profundidade 0,30 m.

$$Z_r = \left[\frac{K_c - K_{c,ini}}{K_{c,int} - K_{c,ini}} \right] (Z_{r,x} - Z_{r,n}) + Z_{r,n} \quad (05)$$

em que, K_c – coeficiente da cultura corrigido; $K_{c,ini}$ – coeficiente da cultura inicial; $K_{c,int}$ – coeficiente da cultura intermediário; $Z_{r,x}$ – profundidade máxima efetiva do sistema radicular da cultura, m; $Z_{r,n}$ – profundidade inicial efetiva do sistema radicular, m.

O K_c simples proposto pela FAO-56 é determinado para os estágios fenológicos da cultura de acordo com a equação 6, o mesmo foi utilizado para estimar a ET_c diária.

$$K_c = \begin{cases} K_{c,ini} & \text{para } t < L_{ini} \\ \frac{K_{c,ini} + (t - L_{ini})}{L_{cres}(K_{c,int} - K_{c,ini})} & \text{para } t > (L_{ini} + L_{cres}) \\ K_{c,int} & \text{para } t < (L_{cres} + L_{ini}L_{cres} + L_{fim}) \\ K_{c,int} + \frac{t - (L_{ini} + L_{cres} + L_{mid})}{L_{fim}(K_{c,fim} + K_{c,int})} & \text{para } t < (L_{ini} + L_{cres} + L_{fim}) \end{cases} \quad (06)$$

em que, L_{ini} – comprimento do estágio inicial, dia; L_{cres} – comprimento do estágio de crescimento, dia; L_{int} – comprimento do estágio intermediário, dia; L_{fim} – comprimento do estágio final, dia; t – tempo.

Os estágios de desenvolvimento foram determinados por Magalhães et al. (2019) de acordo com o comprimento do ciclo da cultura. Com 15 dias para o estágio inicial, 25 dias para a fase de crescimento, 25 dias para o intermediário e 11 dias para o estágio final.

Estimativas mais precisas de $K_{c,ini}$ podem ser obtidas considerando intervalo de tempo entre os eventos de molhamento, poder de evaporação da atmosfera e a magnitude do evento de molhamento (ALLEN et al., 1998). Entretanto o ciclo da cultura contou com irrigação para todos os tratamentos no período inicial e dependendo do intervalo de tempo entre a irrigação, a quantidade de água disponibilizada e a taxa de evaporação da atmosfera, $K_{c,ini}$ pode variar de 0,1 a 1,15; neste trabalho foi adotado o valor máximo de $K_{c,ini}$ 1,15.

O valor de $K_{c,int}$ e $K_{c,fim}$ foram corrigidos de acordo com a FAO-56, por meio da equação 7, considerando características da cultura do feijão em Rio Largo/AL e dos

elementos climáticos locais, como a umidade relativa mínima e a velocidade do vento a 2 m (Tabela 4).

$$K_{cx} = K_{cx(tab)} + [0,04 (U_2 - 2)] - 0,004 (RH_{min} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (07)$$

em que, $K_{cx} = K_{c_{int}}$ ou $K_{c_{fim}}$

Tabela 4 - Coeficiente da cultura (Kc) do feijoeiro de acordo com a FAO-56 e corrigidos.

Coeficientes	FAO – 56	Corrigidos
$K_{c_{ini}}$	0,40	1,15*
$K_{c_{int}}$	1,15	1,14
$K_{c_{fim}}$	0,35	0,34

Fonte: Elaborada pelo autor de acordo com informações de Allen et al. (1998). *Considerado de acordo com observações da FAO-56.

A determinação da quantidade excedente de água no solo acima da CC foi feita pelas seguintes condições:

$$\begin{aligned} EXC_i &= 0 && \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i < 0 && (08) \\ EXC_i &= (P_i + I_i) - ETc_i - ALT_i && \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i \geq 0 \end{aligned}$$

A evapotranspiração em condições de qualquer possibilidade hídrica do solo constitui a ETR, que por sua vez é determinada pela equação:

$$\begin{aligned} ETR_i &= (P_i + I_i) - ALT_i - EXC_i && \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i < 0 && (09) \\ ETR_i &= ETc_i && \text{para } (P_i + I_i) - ETc_i \geq 0 \end{aligned}$$

em que, ETR – evapotranspiração real, mm.

Quando a água disponível no solo não prover a demanda de evapotranspiração da cultura, temos a deficiência hídrica, que foi considerado não nulo nesta situação. Seu cálculo foi feito por:

$$DEF = ETC_i - ETR_i \quad (10)$$

em que, DEF – deficiência hídrica, mm.

O cálculo da água facilmente disponível (AFD) também foi feito, para facilitar a identificação do deficit hídrico no sistema. A AFD é definida pela fração da CAD multiplicado por um fator de depleção de água no solo (f), o qual determina a quantidade de água que a planta pode extrair sem sofrer estresse (FURTADO, 2017). O f é tabelado no boletim FAO-56 e seu valor para o feijão é de 0,45.

Segue a equação 11 para a determinação da AFD. Destaca-se que a AFD não está presente no método de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955).

$$AFD = (1 - f)CAD \quad (11)$$

em que, f – fração da água disponível na zona radicular [0-1].

Para garantir os resultados em outra unidade de medida, o ARM foi convertido em umidade volumétrica expresso em m^3 de água/ m^3 de solo pela seguinte equação:

$$\theta = \left(\frac{ARM}{1000 * Z_r} \right) + \theta_{pmp} \quad (12)$$

3.5 Modelo do FAO-56 – Kc Dual

O modelo proposto pelo boletim FAO-56 tem como principal característica a abordagem dual, nesse sentido, a evapotranspiração no cultivo de feijão é contabilizada separadamente, em efeitos da evaporação do solo e transpiração da cultura. Equação a seguir:

$$ETc = K_c ET_o = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (13)$$

em que, K_{cb} – coeficiente basal da cultura; K_e – coeficiente de evaporação da água no solo.

A evapotranspiração da cultura no cálculo da ETR é ajustada em função do fator de depleção da transpiração dependente do conteúdo de água no solo, esse ajuste é feito quando a cultura se encontra em deficit hídrico.

$$ETR = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (14)$$

em que, K_s – fator de redução da transpiração, K_e – coeficiente de evaporação, K_{cb} – coeficiente da cultura basal.

Na ET_o existe uma parcela que determina somente a transpiração potencial da cultura, e é definida pelo K_{cb} , que por sua vez representa a razão entre ET_c e ET_o , quando a camada subsuperficial do solo encontra-se seca, contudo com disponibilidade hídrica suficiente no perfil da profundidade efetiva do sistema radicular para sustentar a taxa potencial da transpiração (ALLEN et al., 1998; LYRA et al., 2007; FURTADO, 2017).

Valores de $K_{cb_{ini}}$ (0,15), $K_{cb_{mid}}$ (1,10) e $K_{cb_{fim}}$ (0,25) para entrada no modelo foram considerados de acordo com a tabela de coeficientes de cultura basais para culturas não estressadas e bem manejadas em clima subúmidos e ventos moderados da FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Esses valores de K_{cb} podem ser modificados para refletir as condições locais, tratos culturais ou variedades da cultura. No entanto, valores locais não devem desviar em mais de 0,2 nos valores tabelados. Ajustes pode ser feito também pela equação 7.

Os valores de K_{cb} para qualquer dia do ciclo da cultura foram calculados pela equação:

$$K_{cb,i} = K_{cb} + \left[\frac{i - \sum L_{ant}}{L_{periodo}} \right] (K_{cb,prox} - K_{cb,ant}) \quad (15)$$

em que, $K_{cb,i}$ – coeficiente basal do dia; i – número do dia do período de crescimento; $L_{periodo}$ – duração do período; $\sum L_{int}$ – somatório das durações dos períodos anteriores; $K_{cb,ant}$ – coeficiente da cultura basal do período anterior; $K_{cb,prox}$ – coeficiente da cultura basal do próximo período.

A evaporação do solo é estimada pelo coeficiente K_e na parcela da ET_o , no qual vai variar de acordo com quantidade de água na camada subsuperficial do solo. Quando houver umidade na camada K_e será máximo e quando não houver água disponível para a evaporação K_e será zero. A determinação é feita pela equação:

$$K_e = K_r (K_{c,max} - K_{cb}) \leq f_{umd} K_{c,max} \quad (16)$$

em que, K_r – coeficiente de redução da evaporação do solo; $K_{c,max}$ – limite superior diário da evaporação e da transpiração de uma superfície cultivada; f_{umd} – fração do solo exposto e umedecido.

O coeficiente K_c máximo ($K_{c,máx}$) é introduzido para refletir as restrições naturais impostas pela energia disponível, representando o limite superior diário na evaporação e transpiração da cultura. Definido por:

$$K_{c,max} = \max \left\{ (1,2 + [0,04(U_2 - 2)] - 0,004 (RH_{min} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}), (K_{cb} + 0,05) \right\} \quad (17)$$

em que, h – altura média das plantas.

K_r possui duas características para sua definição, estágio 1 e 2. No estágio 1, em um sistema, quando a superfície do solo está na CC, espera-se que a evaporação da água do solo será máxima e K_r será igual a 1, sem penalização na evaporação.

Quando a água no solo se encontra abaixo da AFE, essa taxa de evaporação é reduzida e o valor de K_r vai diminuir variando de 1 a 0, essa situação ocorre no estágio 2. A proporção da água residual na camada superficial diminui a evaporação do solo exposto. K_r é determinado por:

$$\begin{aligned} K_r &= 1 && De < AFE \\ K_r &= \max \left\{ \left(\frac{CAE - De_{i-1}}{CAE - AFE} \right), 0 \right\} && De > AFE \end{aligned} \quad (18)$$

em que, CAE – capacidade de água evaporável, mm; AFE – água facilmente evaporável, mm; De_{i-1} – depleção da camada superficial do solo no final do dia anterior (i-1).

A AFE varia de acordo com a classe textural do solo, de 2 mm para solos arenosos a 12 mm para solos argilosos, sendo tabelado pelo boletim FAO-56. O experimento foi conduzido em solo de textura média argilosa e o AFE foi considerado igual a 8 mm para o cálculo de K_r .

Ademais é necessário a determinação da profundidade da camada superficial do solo, pois ela vai influenciar diretamente na quantidade máxima de água evaporável durante o ciclo de secagem do solo entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Equação a seguir:

$$CAE = 1000 (\theta_{cc} - 0,50 \text{ pmp}) Z_e \quad (19)$$

em que, Z_e – profundidade da camada superficial do solo, m.

A fração do solo exposto e úmida (f_{umd}) são consideradas nos cálculos quando a cultura possui uma cobertura incompleta no qual não cobre toda superfície do solo, e consequentemente a evaporação não acontece de maneira uniforme em toda superfície.

$$f_{umd} = \min\{1 - f_c, f_w\} \quad (20)$$

em que, f_c – fração média exposta da superfície do solo; f_w – fração média da superfície do solo molhada pela precipitação.

Essa limitação apresentada na equação 20 presume que a fração do solo molhada pela irrigação ocorre no interior da fração do solo exposto a radiação solar e ventilação. Quando há uma mistura de irrigação e precipitação dentro do mesmo período de secagem ou no mesmo dia, f_w deve ser ponderado entre ambos e o valor tabelado é $f_w = 1$ (ALLEN et al., 1998). A média exposta da fração do solo não coberta (ou sombreado) pela da vegetação (f_c) variando [0,01 - 1] é estimada por:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c,\min}}{K_{c,\max} - K_{c,\min}} \right)^{1+0,5h} \quad (21)$$

O cálculo da depleção acumulada de água no solo (D_e) é necessário para estimar o valor de K_e , pois o coeficiente precisa do cálculo do balanço hídrico diário da fração úmida de solo da camada superficial exposta. Essa depleção é definida por:

$$D_{e,i} = D_{e,i-1}(P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{umd}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (22)$$

em que, P_i – precipitação no dia, mm; RO_i – escoamento superficial no dia, mm; I_i – altura da lâmina de irrigação no dia, mm; E_i – evaporação no dia, mm; $T_{ew,i}$ – transpiração da camada superficial do solo exposta e molhada, mm; $DP_{e,i}$ – percolação da superfície do solo.

O escoamento superficial foi desconsiderado, visto que a declividade do terreno era menor que 2%. A quantidade de transpiração da camada de solo evaporante é pequena e por isso pode ser ignorada em casos de raízes mais profundas (< 0,5 a 0,6 m) (ALLEN et al., 1998). Quando o conteúdo de água excede a capacidade de campo é definida a percolação da camada superficial do solo:

$$D_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \geq 0 \quad (23)$$

A cultura entra em estresse por deficit hídrico quando a energia potencial do solo está abaixo de um valor crítico, e os produtos do K_{cb} através do K_s descrevem esses efeitos de estresse de água no solo. Uma característica do K_s é que ele tem maior influência na transpiração do que na evaporação, pode ser definido por:

$$K_s = \frac{CTA - Dr}{CTA - CRA} = \frac{CTA - Dr_z}{(1 - p)CTA} \quad (24)$$

em que, CTA – capacidade total de água na zona radicular, mm; CRA – fator de disponibilidade de água no solo, mm; Dr_z – depleção na zona radicular, mm; p = fração de CTA .

O total de água disponível na zona radicular é definido pela diferença do conteúdo de água entre a CC e o PMP na profundidade efetiva da zona radicular:

$$CTA = 1000 (\theta_{cc} - \theta_{pmp})Z_r \quad (25)$$

O limite da fração média do total de água disponível pelo solo, definido pela equação 26, refere-se à quantidade de água que pode ser extraída do solo pelas raízes sem que o transporte de água da zona radicular para parte aérea da planta seja prejudicado, fazendo com que a planta entre em estresse hídrico.

$$CRA = f * CTA \quad (26)$$

Para expressar o balanço hídrico na zona radicular é necessário definir o esgotamento da água no solo por meio da depleção de água na zona radicular:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ETc_i + DP_i \quad 0 \leq D_{r,i} \leq CRA \quad (27)$$

Em que, $D_{r,i}$ – depleção na zona radicular ao fim do dia i , mm; $D_{r,i-1}$ – conteúdo de água na zona radicular ao fim do dia $i-1$, mm; CR_i – ascensão capilar do lençol freático no dia i , mm; DP_i – perda de água por percolação profunda, mm.

A depleção inicial é utilizada para dar início ao balanço na zona radicular e pode ser derivada do teor de água do solo medido por:

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{fc} - \theta_{i-1})Z_r \quad (28)$$

em que, θ_{i-1} – conteúdo médio de água do solo na zona radicular efetiva.

Para o cálculo da percolação profunda é utilizada a seguinte equação:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ETc_i - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (29)$$

O armazenamento de água no solo assimilado entre o total de água disponível na zona radicular e a depleção estimada ao final do dia é calculado por:

$$ARM = \max(CTA - D_z, 0) \quad (30)$$

Para garantir os dados de ARM em mais uma unidade, o mesmo também foi convertido em umidade volumétrica expresso em cm^3 de água/ cm^3 de solo pela equação 11.

3.6 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (31)$$

em que, ET_o – evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; R_n – saldo de radiação a superfície, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; G – densidade do fluxo de calor do solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; T_m – temperatura do ar média diária a 2 metros de altura, $^{\circ}\text{C}$; u_2 – velocidade média do vento a 2 metros de altura, m s^{-1} ; e_s – pressão de saturação do vapor de água do ar, kPa; $e_s - e_a$ – deficit de pressão de saturação do vapor de água do ar, kPa; Δ - declividade da curva de pressão de vapor, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ – coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

O cálculo da temperatura do ar é feito em função da média entre a temperatura diária máxima e mínima.

$$T_m = \frac{t_x + t_n}{2} \quad (32)$$

em que, T_m – temperatura do ar média diária, $^{\circ}\text{C}$; t_x – temperatura do ar máxima diária, $^{\circ}\text{C}$; t_n – temperatura do ar mínima diária, $^{\circ}\text{C}$.

A pressão de vapor de saturação é necessária, pois representa a máxima capacidade do ar em reter vapor de água. Segue a equação:

$$e_s = \frac{\left(0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t_x}{237,3 + t_x}\right)\right) + \left(0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t_n}{237,3 + t_n}\right)\right)}{2} \quad (33)$$

em que, e_s – pressão de vapor de saturação, kPa.

A pressão parcial de vapor é necessário para a representação do teor de umidade do ar. Segue a equação:

$$e_a = \frac{\frac{UR_n}{100} \left(0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t_x}{237,3+t_x}\right) \right) + \frac{UR_x}{100} \left(0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t_n}{237,3+t_n}\right) \right)}{2} \quad (34)$$

em que, e_a – pressão parcial de vapor, kPa; UR_n – umidade relativa mínima, %; UR_x – umidade relativa máxima, %.

A declividade da relação entre a pressão de saturação do vapor d'água e temperatura do ar é calculada pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_m}{T_m+237,3}\right) \right]}{(T_m+237,3)^2} \quad (35)$$

em que, Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, kPa °C⁻¹.

O coeficiente psicrométrico vai variar de acordo com a pressão atmosférica, é definido por:

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P_{atm} \quad (36)$$

em que, γ – coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹; P_{atm} – pressão atmosférica, kPa.

A estimativa da pressão atmosférica considera a altitude local e a formulação dos gases ideais, pela equação a seguir:

$$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293-0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (37)$$

em que, z – altitude, m.

O somatório entre o balanço de ondas curtas com o balanço de ondas longas resulta no saldo de radiação.

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (38)$$

em que, R_n – saldo de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; R_{ns} – balanço de ondas curtas, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; R_{nl} – balanço de ondas longas, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

O balanço de ondas curtas é a fração da radiação solar que não é refletida pela superfície terrestre.

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (39)$$

em que, R_s – radiação solar global, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; α – albedo, 0,23 (cobertura de referência).

O balanço de ondas longas é a radiação solar que é absorvida pela terra e convertida em energia calorífica.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_x^4 + T_n^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{ea}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (40)$$

em que, σ – constante de Stefan-Boltzmann, $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; T_x – temperatura do ar máxima, K; T_n – temperatura do ar mínima, K; R_{so} – radiação solar para o céu claro, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

A quantidade de radiação solar que seria recebida no local de medição em condições de céu sem nebulosidade, é definida por:

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} z) R_a \quad (41)$$

em que, R_a – radiação solar extraterrestre, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

A radiação solar extraterrestre é a radiação solar no topo da atmosfera em uma superfície horizontal, é calculada por:

$$R_a = 37,568 \text{ dr} [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (42)$$

em que, dr – distância relativa média Terra-Sol, km; ω_s – ângulo horário, rad; φ – latitude, rad; δ – declinação solar, rad.

A distância relativa Terra-Sol é determinada por:

$$\text{dr} = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (43)$$

em que, J – dia de ordem do ano, dia.

A declinação solar é necessária para aplicações agronômicas e meteorológicas:

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (44)$$

Representação do ângulo que a Terra deve girar do nascer até a culminação do Sol

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (45)$$

3.7 Análise estatística

Os dados de armazenamento de água no solo observados e estimados foram comparados entre si por meio de regressão linear simples, para avaliação do grau de precisão e exatidão das estimativas obtidas. Trata-se de um índice de desempenho estatístico proposto por Willmott (1981).

$$P_i = a + b O_i \quad (46)$$

em que, P – valores estimados, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; O – valores observados, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; a – coeficiente linear da reta, intercepto; b – coeficiente angular da reta, inclinação.

O ajustamento da linha de regressão entre a variável dependente e independente é medido pelo coeficiente de determinação r, que é obtido pelo quadrado do coeficiente de correlação, em percentagem. A equação segue:

$$r^2 = \left(\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(\sum (O_i - \bar{O})^2)(\sum (P_i - \bar{P})^2)}} \right)^2 \quad (47)$$

em que, \bar{P} – média dos valores estimados e \bar{O} – média dos valores observados, em $m^3 m^{-3}$.

O software utilizado possui um coeficiente de eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (HASTINGS, 1970) (IN), localizado na ferramenta *Merit* do *OpenModel*. Foi avaliado o poder preditivo dos modelos de estimativa de armazenamento de água no solo com base na correspondência entre os dados observados e estimados. A equação é apresentada a seguir:

$$IN = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \quad (48)$$

em que, E_m – evento observado; E_s – evento simulado pelo modelo; \bar{E}_s – média do evento.

A raiz quadrada do erro quadrado médio (MSE) foi utilizada para estimar o erro inerente aos modelos:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

em que, RMSE – raiz quadrada do erro quadrado médio; N – número de pares de valores.

Foi feita a determinação isolada de cada tipo de erro, sistemáticos e não sistemático, devido o RMSE não diferenciar os tipos de erros, e assim identificar os erros referentes ao modelo utilizado.

O erro sistemático MSE_s é causado por fontes identificáveis, que fazem com que as medidas estimadas estejam consistentemente acima ou abaixo do valor real, o que prejudica a exatidão ou acurácia dos dados, enquanto o erro não sistemático MSE_u é aleatório e representado por flutuações nas medidas, o que afeta a precisão dos resultados (ANDRADE JÚNIOR et al., 2003; FURTADO, 2017). A equação abaixo se refere ao erro sistemático:

$$MSE_s = MSE_a = MSE_p = MSE_i \quad (50)$$

em que, MSE_a – erro sistemático aditivo; MSE_p – erro sistemático proporcional; MSE_i – erro sistemático interdependente.

A determinação do erro sistemático aditivo foi feita por:

$$MSE_a = a^2 \quad (51)$$

O erro proporcional foi obtido pela equação:

$$MSE_p = (b - 1)^2 \frac{\sum_{i=1}^n O_i^2}{N} \quad (52)$$

em que, b – coeficiente angular da reta.

O cálculo do erro sistemático da interdependência entre MSE_a e MSE_p foi:

$$MSE_i = 2a (b - 1) \bar{O} \quad (53)$$

O erro não sistemático foi obtido através da seguinte equação:

$$MSE_u = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{N} \quad (54)$$

3.8 Otimização dos modelos

A análise estatística entre o armazenamento de água no solo observado e estimado foi feita no período de 25 dias do ciclo da cultura, do estágio de crescimento ao intermediário, pela falta de dados de umidade no período final. O ARM também foi utilizado com indicador para a otimização dos modelos pela prática da modelagem inversa. Para isso foram escolhidos coeficientes determinados em função da cultura e do solo.

Para a otimização dos coeficientes referentes à cultura foi considerado apenas o tratamento L5 (125% ETc), devido ser o tratamento que retornou melhor resultado de produtividade (2.230,31 kg/ha). Posteriormente os coeficientes otimizados foram aplicados nos outros tratamentos.

No modelo de ThM, foram otimizados os coeficientes da cultura K_c inicial e K_c intermediário, pois são elementos que incluem os efeitos de transpiração da cultura e a taxa de evaporação do solo em uma só abordagem. O K_c final não foi otimizado, pois não havia dados observados de umidade do solo para o presente período.

No balanço de água no solo estimado pelo método FAO-56 foram otimizados os coeficientes da cultura K_{cb} inicial, K_{cb} intermediário e f . K_{cb} refere-se à abordagem do K_c dual, que determina os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo separadamente e o f representa a percentagem que limita a fração média do total de água disponível solo na zona radicular.

O coeficiente otimizado característico do solo foi o ponto de murcha permanente (PMP) que é o teor de umidade do solo no qual a planta murcha e não recupera mais a turgidez. O PMP foi otimizado em cada tratamento, devido à variação da lâmina de irrigação aplicada.

As otimizações foram feitas pela ferramenta *Estimate* do software *OpenModel*. (TTARSITANO e CROUT, 2011). Seguindo o método de amostragem de Monte Carlo usando cadeias de Markov pelo algoritmo iterativo de Levenberg-Marquardt (LM). Nesse método, um valor é gerado a partir de uma sequência de amostras aleatórias por uma distribuição auxiliar e aceito com uma dada probabilidade.

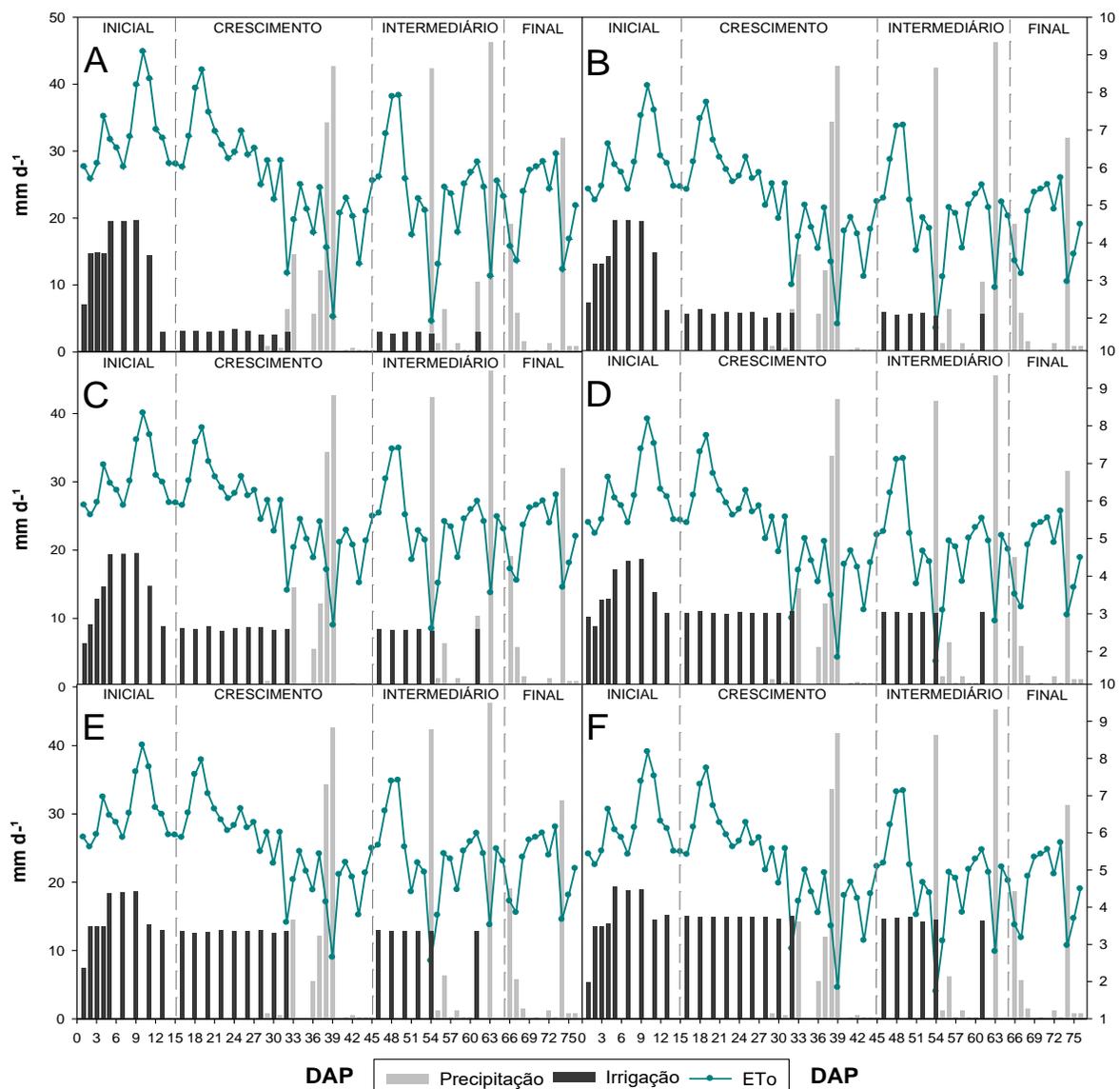
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do período experimental

Antes das otimizações, o cultivo da cultura do feijão possui algumas informações relevantes do armazenamento de água durante todo o período experimental, como a presença da precipitação e a intervenção humana através da irrigação.

A Figura 2 apresenta a variação da precipitação (chuva), irrigação para cada tratamento e a evapotranspiração de referência para todo ciclo da cultura e nas respectivas fases fenológicas da cultura.

Figura 2: Variação da precipitação, irrigação e evapotranspiração de referência (ET_0) para o plantio de feijão, em função de diferentes lâminas de irrigação em Rio Largo, Alagoas. A – 25%, B – 50%, C – 75%, D – 100%, E – 125% e F – 150% da ET_c .



A precipitação registrada durante o experimento foi de 291,60 mm, com distribuição irregular e concentração a partir da fase de crescimento da cultura, estendendo-se até a fase final, visto a importância da irrigação na fase inicial do ciclo, garantindo água para suprir as demandas hídricas da planta e minimizar o estresse hídrico.

Todos os tratamentos receberam a mesma quantidade de água através da irrigação nos primeiros 15 DAS e as lâminas totais variaram de 170,87 mm para o tratamento de 25% da ETc a 362,56 mm para o tratamento de 150% da ETc. O volume de chuvas e irrigação são suficientes para a obtenção de bons rendimentos, visto que o feijoeiro necessita de 300 a 500 mm (DOORENBOS e KASSAN, 1979; SILVA et al., 2011; BRITO et al., 2016) e 300 a 600 mm (CUNHA et al., 2013; MAGALHÃES et al., 2017).

Para o experimento foi registrado média por evento de chuva de 3,8 mm d⁻¹ e frequência de aproximadamente 1 evento a cada 2,2 dias, o que representa 45,4% dos dias do ciclo com precipitação. Entretanto identificou-se um grande volume de 135,1 mm concentrado de 54 a 68 DAS, no final do período intermediário.

A evapotranspiração de referência (ET_o) que também é mostrada na Figura 2 ao longo do cultivo e dos estádios de desenvolvimento, mostrou-se elevada no início do ciclo, por influência da lâmina de irrigação aplicada no sistema. Na fase inicial a ET_o possui maior influência da evaporação, que por sua vez é afetada por fatores como estrutura, densidade, porosidade e condutividade hidráulica não saturada (YANG e YANFUL, 2002).

5.2. Otimização dos modelos

Na Tabela 5 encontra-se o coeficiente da cultura simples inicial ($K_{c,ini}$) e intermediário ($K_{c,int}$) tabelado no FAO56 e usado no modelo ThM, o coeficiente da cultura basal inicial ($K_{cb,ini}$) e intermediário ($K_{cb,int}$) e o fator de disponibilidade de água (f) tabelados do Boletim FAO-56, utilizados como valores de entrada no modelo Kc-Dual, e os valores otimizados no software *OpenModel* para o tratamento L5 em cada modelo.

Observou-se que o $K_{c,ini}$ otimizado foi 43,5% maior que o valor tabelado no FAO-56, enquanto o $K_{c,int}$ otimizado foi 16,7% menor. O $K_{cb,ini}$ obteve um incremento de 33,3% e o $K_{cb,int}$ apresentou uma pequena diminuição de 1,8%, em seus valores otimizados. No mesmo modelo foi otimizado o fator de disponibilidade de água (f), que obteve uma diminuição de 49% em seu valor de entrada.

Tabela 5 – Coeficientes da cultura, coeficientes da cultura basal e fator de disponibilidade de água (f), valores de entrada nos modelos e otimizados no tratamento L5.

Modelos	Coeficientes	L5	
		Entrada	Otimizado
Thornthwaite e Mather	K_c inicial	1,15	1,65
	K_c intermediário	1,14	0,95
	K_{cb} inicial	0,15	0,20
FAO-56	K_{cb} intermediário	1,10	1,08
	f	0,45	0,23

L5 – Tratamento com lâmina 125% da ETc.

O valor do $K_{c,ini}$ retornou um valor elevado (1,65) após a otimização, e o maior valor encontrado na literatura foi 0,9 por Seidel et al. (2019), através do ajuste do $K_{c,ini}$ para obter curvas de K_c para o feijão comum com duas épocas de semeadura diferentes no Leste da Alemanha. O mesmo autor destaca que fatores como o tipo de cultura, estágio de crescimento, clima e a evaporação do solo são os principais determinantes de K_c .

Para obter estimativas mais precisas de $K_{c,ini}$ na otimização, o valor de entrada foi ajustado para 1,15 de acordo com a frequência de molhamento, clima e período inicial (L_{ini}), e ainda assim, o resultado não foi o esperado. Suspeita-se das restrições presentes no modelo utilizado, que não considera alguns processos envolvidos no sistema, como a frequência e magnitude dos eventos de molhamento no início do ciclo, pois os tratamentos receberam 127,63 mm de irrigação nos 13 primeiros dias. Outro fator que merece atenção é a falta de medidas na fase inicial, no qual favorece a extrapolação dos resultados.

Valores de K_c inicial próximos do que era esperado nesta otimização foi encontrado por Amayreh e Al-abed (2003), ao determinar o K_c em diferentes estágios de crescimento do feijão-fava de 0,37, para a Jordânia, que é um país árido. Bastos et al. (2010) no estado do Piauí encontrou valores de K_c na fase inicial entre 0,6 e 0,7 para feijão-caupi.

O resultado do $K_{c,int}$ otimizado apresentou-se dentro do esperado, mesmo com a redução em relação ao K_c da FAO-56. No período médio do ciclo da cultura, a cultura se encontra em pleno desenvolvimento e a maior influência no K_c é da transpiração. O valor de $K_{c,int}$ tabelado no Boletim FAO-56 é 1,15 (ALLEN et al, 1998). El-noemani et al. (2015) encontrou valores de $K_{c,int}$ variando de 0,91 a 1,01 e 1,11 a 1,19 para duas cultivares de feijão em região árida do Egito.

Os valores de K_{cb} otimizados tiveram variação pequena em relação aos valores de entrada, entretanto a otimização foi necessária devido o manejo utilizado e a irrigação em diferentes lâminas, além de características do solo e do microclima que varia dentro de uma mesma região, evitando assim divergência no estudo realizado (FURTADO, 2017).

Nesta pesquisa o K_{cb} faz parte da abordagem K_c dual proposto no método da FAO-56 e ele representa a perda de água pela cultura especificamente pela transpiração. Allen et al. (1998) no boletim FAO-56 indicaram para a cultura do feijão o valor de 0,15 para a fase inicial e 1,10 para o período médio, e a otimização foi feita considerando esses valores.

O $K_{cb,ini}$ otimizado foi 0,20; 33,3% maior que o valor de entrada, devido índice de área foliar na fase inicial ainda ser baixo, com cobertura do dossel inferior a 10%. Ballero (2020) ao otimizar o K_{cb} para fase inicial do feijão chegou ao valor de 0,40 na maioria das rodadas usando um método estocástico (Luus-Jaakola). Fenner et al. (2016) em sua pesquisa com a cultivar BRS Estilo, observou um valor de 0,32 e estimou 0,35 para o $K_{cb,ini}$.

O período de pleno desenvolvimento do feijão apresenta elevada cobertura vegetal e por isso esperam-se valores de K_{cb} acima de 1, com elevada transpiração e total influência na evapotranspiração. Medeiros et al. (2005) determinou $K_{cb,int}$ variando de 1,10 a 1,20 para o feijoeiro em Campinas SP, que coincidiu com o encontrado por Fenner et al. (2016), de 1,10.

A fração de água disponível na zona radicular representada pelo fator f , após otimização retornou um valor abaixo do proposto pela FAO56, o que era esperado, pois varia entre as culturas, e a profundidade do sistema radicular tem total relação com o tipo de solo.

O valor do ponto de murcha permanente (PMP) de entrada nos modelos ThM e FAO-56, e os valores otimizados com a ajuda do software *OpenModel* para cada tratamento de lâmina de irrigação são apresentados na Tabela 6.

Nas otimizações feitas no método de Thornthwaite e Mather a maior variação ocorreu no tratamento L2, no qual aumentou 175% no valor de PMP, vale ressaltar que esse tratamento apresentou o menor valor de PMP de entrada (0,04), comparado aos outros. Os tratamentos L1 e L3 também apresentaram pequeno aumento após otimização, 7% e 20%, respectivamente.

Tabela 6: Valores de ponto de murcha permanente (PMP) de entrada nos modelos e otimizados em cada tratamento.

Tratamentos	ThM		FAO-56	
	PMP			
	Entrada	Otimizado	Entrada	Otimizado
L1	0,14	0,15	0,14	0,15
L2	0,04	0,11	0,04	0,06
L3	0,13	0,16	0,13	0,10
L4	0,15	0,14	0,15	0,14
L5	0,15	0,15	0,15	0,14
L6	0,15	0,13	0,15	0,13

L1 - 25%, L2 - 50%, L3 - 75%, L4 - 100%, L5 - 125% e L6 - 150% da ETc.

Os tratamentos que não foram submetidos à deficiência hídrica possuem o valor de entrada de PMP determinados pela curva de retenção de água no solo iguais (0,1475), entretanto o tratamento L5 não apresentou variação de PMP. Os tratamentos L4 e L6 retornaram valores de ponto de murcha permanente reduzidos, 7% e 12% menor que o valor de entrada, respectivamente.

Os tratamentos simulados pelo método FAO-56 também tiveram seus valores de PMP otimizados e a maior variação foi encontrada no L2, similar ao método ThM, com o aumento de 48%. O tratamento L1 também apresentou aumento, só que menos acentuado, de 9,5%. Todos os outros tratamentos apresentaram diminuição nos valores de PMP, sendo que a maior foi no L3, 25% de redução do valor de entrada. L4, L5 e L6 tiveram uma diminuição de 7%, 6% e 14%, respectivamente.

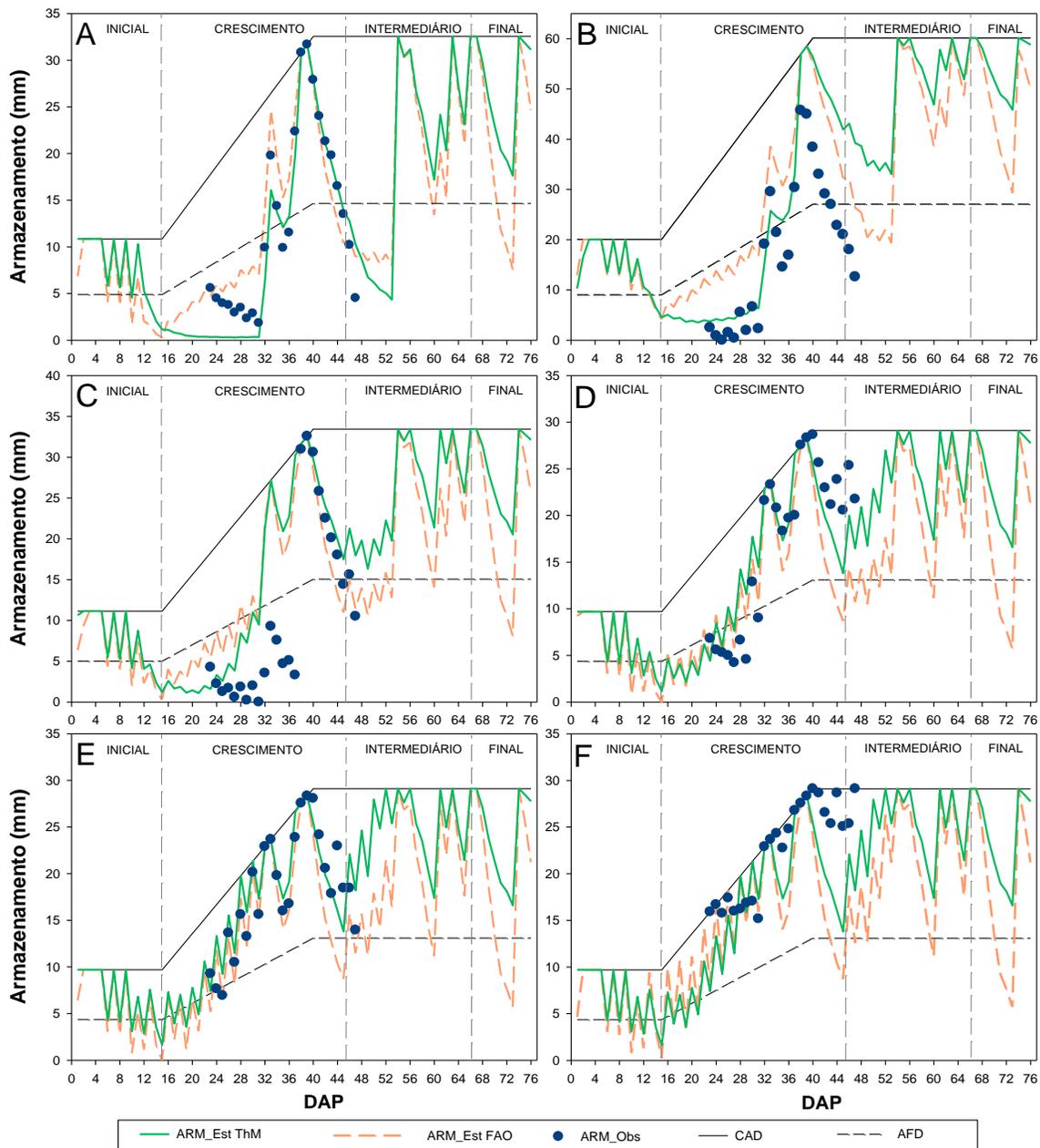
Coincidentemente o tratamento L2 apresentou maior variação na otimização nos dois modelos, e possivelmente aconteceu pelo valor de PMP de entrada estar abaixo dos outros tratamentos, entretanto o valor de 0,044 utilizado foi à umidade mínima observada nesse tratamento visto que o valor de PMP determinado pela curva de retenção estaria acima dessa umidade e a cultura entraria em murcha, mas isso não aconteceu.

5.3. Avaliação dos modelos

Na Figura 3 é apresentada a variação diária do armazenamento de água no solo estimado pelo método de Thornthwaite e Mather (ARM_{ThM}) e pelo método do FAO-56 (ARM_{FAO56}) e observado pelo TDR (ARM), ambos simulados no software *OpenModel* para

cada tratamento de lâmina de irrigação, além da capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) e água facilmente disponível (AFD).

Figura 3: Variação diária do armazenamento de água no solo (mm d^{-1}), estimado pelo modelo de Thornthwaite e Mather (ARM_{ThM}), pelo modelo da FAO-56 ($\text{ARM}_{\text{FAO56}}$) e observado (ARM), capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) e água facilmente disponível (AFD), para os tratamentos L1 (A), L2 (B), L3 (C), L4 (D), L5 (E) e L6 (F).



Como pode-se observar na Figura 3A o armazenamento observado no tratamento L1 coincide com CAD nos dias 33 e 44 e depois do dia 37 a 44 do ciclo da cultura. Entre os dias 23 a 32; 35 a 36 e 45 a 47 o armazenamento observado foi inferior a água facilmente disponível AFD. O armazenamento estimado pelo ThM iniciou o cultivo acima da AFD até o 5 DAS, oscilou até o dia 12 e ficou abaixo do dia 13 a 32 e 45 a 53, o que indicou déficit hídrico.

No método FAO-56 o armazenamento apresentou tendência similar. No início do ciclo se manteve acima da CAD até o dia 5 e variando até o dia 12, com valores abaixo da AFD do dia 12 ao 31, de 44 a 53 e de 71 a 73 DAS. Esse comportamento do armazenamento observado e estimado pelos modelos é justificado pela quantidade de água que foi disponibilizado no tratamento, que foi de apenas 25% de ETc, um total de 170,87 mm, o que garantiu quantidade maior de água para a cultura em relação a precipitação (291,63 mm) observada durante o ciclo.

O tratamento L2 (Figura 3B) apresentou o armazenamento observado abaixo da AFD do dia 23 ao 32; 34 a 36 e 43 a 47 do ciclo. No dia 33 e de 37 a 42 se manteve em CAD. A estimativa de ThM retornou o armazenamento superestimado e se mantém na CAD em quase todo o ciclo, estando abaixo da AFD apenas no período do dia 14 a 32. No que concerne ao método FAO-56 o armazenamento estimado apresenta valores abaixo da AFD em dois momentos do ciclo, de 14 a 31 e de 47 a 53 DAS, configurando déficit hídrico.

Ainda se tratando de um tratamento com déficit hídrico, o L3 na Figura 3C apresentou variação em comparação aos dois tratamentos anteriores, com o armazenamento observado abaixo da AFD em grande parte do ciclo, e coincidiu com a CAD apenas entre 38 a 44 DAS. O armazenamento estimado por ThM esteve abaixo da AFD em 10 e de 12 a 31 DAS.

O restante do ciclo seguiu com a umidade na CAD, com algumas oscilações em dias pós-precipitação. O K_c dual FAO-56 estimou o armazenamento com variações, entretanto na maioria do ciclo permaneceu em CAD. Apresentou armazenamento abaixo da AFD no final estágio inicial e início do crescimento de 12 a 23 DAS; intermediário de 44 a 51; final de 71 a 73 e alguns dias isolados.

O tratamento L4 refere-se a lâmina de 100% da ETc, e os seus valores de armazenamento estão presentes na Figura 3D. Armazenamento observado abaixo da AFD do dia 23 a 29 e no dia 31, e em CAD em todo o restante do ciclo. A estimativa de ThM coincide

com a CAD até o 5 DAS, e a partir daí oscilou até o dia 13 e se manteve abaixo da AFD de 14 a 23, 25 e 27. O restante do ciclo o ARM variou bastante com a entrada de água no sistema, mas esteve em CAD.

A quantidade de água no solo estimado no FAO-56 apresentou o mesmo comportamento no início do ciclo, porém oscilou expressivamente penalizando o armazenamento nos dias pós-precipitação. Em vários dias isolados e no período de 17 a 21; 43 a 45 e 71 a 73 apresentou armazenamento abaixo da AFD.

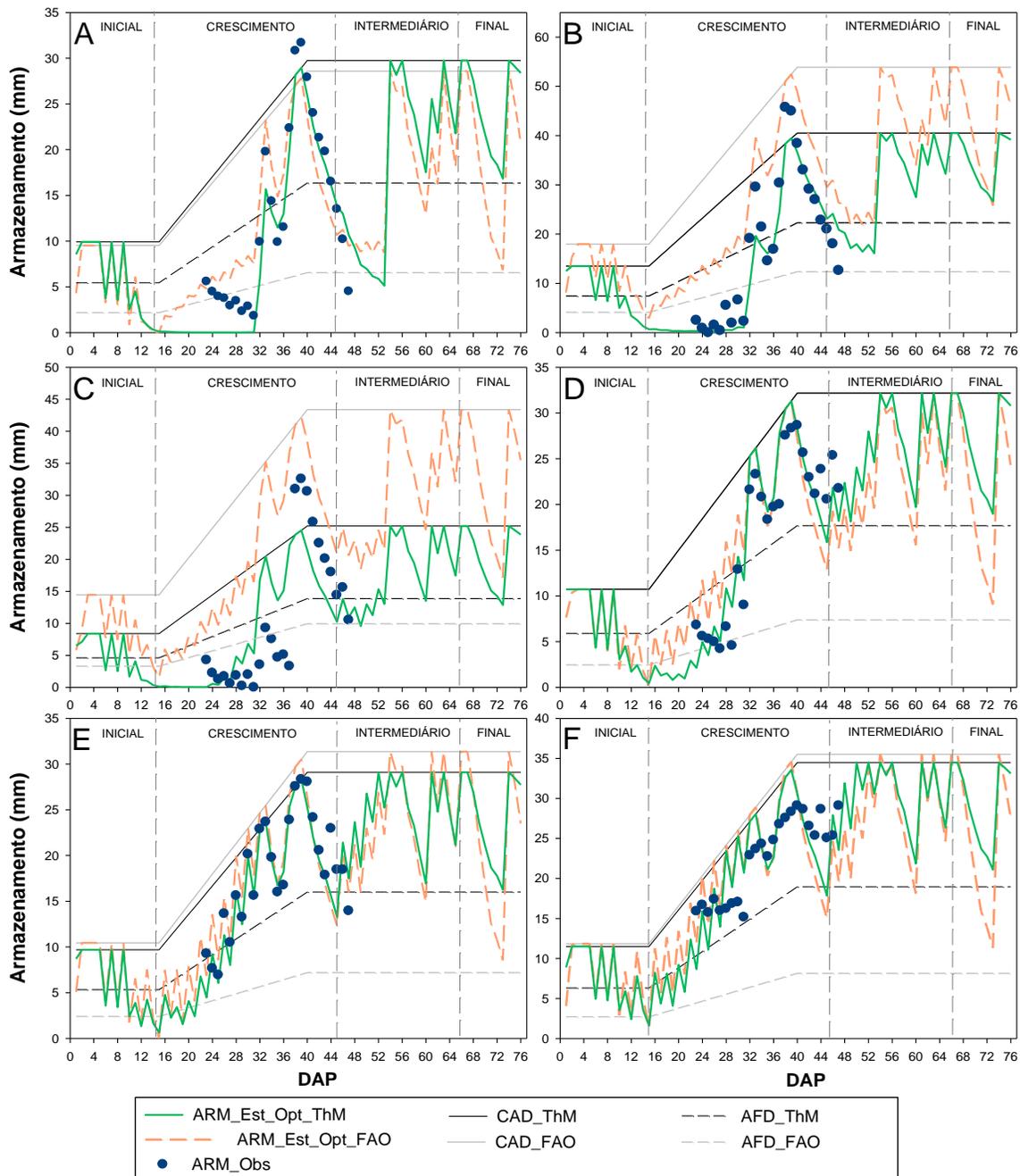
A lâmina de irrigação com 125% de ET_c , que totalizou 322,89 mm de irrigação e 127,63 mm de chuva apresentou armazenamento observado em quase todo os dias analisados do ciclo do feijoeiro, apenas o dia 25 ficou abaixo da AFD. O modelo de ThM retornou valores de armazenamento com variação dos 6 a 21 e ficou abaixo da AFD em alguns dias isolados, mas o restante do ciclo se manteve acima. Para FAO-56 foi diferente, subestimando o armazenamento em alguns períodos, do dia 6 a 25; 43 a 50 e 71 a 73. É possível observar na Figura 3E.

O tratamento L6 na Figura 2F, no qual foi disponibilizada a quantidade de água 50% acima do que era necessário apresentou o armazenamento observado coincidindo com a CAD em alguns períodos e em outros acima da AFD. A simulação pelo método de ThM retornou valores oscilando no período de 6 a 21 e acabou ficando abaixo da AFD em alguns dias.

As simulações pela FAO-56 mostraram armazenamento de água acima de AFD na maioria do ciclo, porém foi penalizado em alguns dias também, de 6 a 21, e principalmente nos períodos seguintes a eventos de precipitação. Esse resultado indicou sensibilidade do modelo a esse tipo de situação no sistema apresentado, que pode ser confirmado, devido todos os tratamentos apresentarem o mesmo comportamento à simulação do ARM.

Após a otimização dos coeficientes, os modelos foram simulados novamente no software *OpenModel* e os resultados estão presentes na Figura 4, no qual temos a variação diária do armazenamento de água no solo estimado após a otimização pelo modelo de Thornthwaite e Mather (ARM_{ThM}), estimado após otimização pelo modelo da FAO-56 (ARM_{FAO56}), observado (ARM), capacidades de armazenamento de água disponível em ThM (CAD_{ThM}), capacidade de armazenamento de água disponível em FAO-56 (CAD_{FAO56}), água facilmente disponível em ThM (AFD_{ThM}) e água facilmente disponível (AFD_{FAO56}) para cada tratamento de lâminas de irrigação.

Figura 4: Variação diária do armazenamento de água no solo (mm d^{-1}), estimado pelo modelo de Thornthwaite e Mather após otimização (ARM_{ThM}), estimado pelo modelo da FAO-56 após otimização ($\text{ARM}_{\text{FAO56}}$) e observado (ARM), capacidade de armazenamento de água disponível em ThM (CAD_{ThM}) e FAO-56 ($\text{CAD}_{\text{FAO56}}$); e água facilmente disponível em ThM (AFD_{ThM}) e FAO-56 ($\text{AFD}_{\text{FAO56}}$), para os tratamentos L1 (A), L2 (B), L3 (C), L4 (D), L5 (E) e L6 (F).



O comportamento do armazenamento observado é o mesmo discutido nas simulações sem otimização, nesse sentido, a análise foi direcionada ao armazenamento estimado pelos dois modelos, além do fato de que após a otimização cada modelo retornou valores de capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) e água facilmente disponível (AFD) diferentes.

Com valores de AFD maiores o método ThM do L1 (Figura 4A), se projetou um período maior abaixo da AFD, de 10 a 32; e de 34 a 36 DAS e depois de 44 a 53, que indicou déficit hídrico. No sentido contrário FAO-56 retornou valores mais baixos de água facilmente disponível e o armazenamento esteve em quase todo ciclo dentro, exceto de 12 a 17 DAS.

Em L2 (Figura 4B), ThM penalizou a CAD em 34% nos períodos intermediário e final; e superestimou a AFD. Devido esse comportamento, o armazenamento esteve abaixo da AFD de 47 a 53 dias do ciclo. O método FAO-56 penalizou de forma mais expressiva a AFD e com essa nova configuração do balanço o ARM esteve em déficit hídrico apenas no dia 15.

No tratamento seguinte, L3 (Figura 4C), CAD também foi penalizada pelo modelo de ThM, dessa vez com 23% nos períodos intermediário e final, deixando o intervalo entre o componente e a AFD ainda menor, comparada ao tratamento anterior. Valores de ARM ficaram abaixo da água facilmente disponível de 10 a 31 e de 44 a 51 novamente. FAO-56 superestimou a CAD em 29% e penalizou a AFD, deixando o ARM abaixo da AFD apenas em 15 DAS.

Com 100% da ETc, L4 retornou valores distintos dos tratamentos anteriores, Na Figura 4D podemos observar que o método de ThM apresentou estimativas próximas das simulações não otimizadas para a CAD, entretanto superestimou AFD em 38% no período intermediário e final, ARM do dia 10 a 29 esteve abaixo da água facilmente disponível e no sentido contrário, o método FAO-56 penalizou a AFD.

O tratamento L5 (Figura 4E), elevou a AFD para 16,01 mm no período de referência, deixando o armazenamento abaixo entre 10 a 23 DAS e em dias isolados no método ThM. FAO deixou a janela entre a CAD e AFD mais aberta, porém ainda sim apresentou ARM abaixo da AFD em alguns dias do ciclo. L6 (Figura 3F) também apresentou o mesmo comportamento dos outros tratamentos e deixou o ARM abaixo da AFD 13 dias de todo o ciclo no modelo de ThM.

As variações de CAD e AFD nas simulações após otimização, tem relação com a otimização do ponto de murcha permanente (PMP), pois foi o único dos coeficientes otimizados, com características referentes ao solo. As estimativas de armazenamento pelo modelo representaram o padrão de variação em grande parte dos tratamentos, ou seja, conseguiram acompanhar o armazenamento observado.

No processo de molhamento e secamento de amostras de solo em Arapiraca/AL, Souza et al. (2015) identificaram esse efeito da histerese na sua curva de retenção. Esse fato ocorreu devido a fatores como ar aprisionado entre os microporos na entrada de água, desuniformidade dos poros do solo, entre outros (FURTADO, 2017).

A Figura 5 apresenta a avaliação da estimativa do armazenamento de água no solo pela análise estatística. Foi analisado o ARM estimados pelos dois modelos, ThM e FAO-56 relacionado com o armazenamento observado antes da otimização para o plantio de feijão no município de Rio Largo/AL, em cada tratamento de lâminas de irrigação.

A precisão dos modelos antes do ajuste retornou resultados melhores em ThM, no qual obteve r^2 entre 0,43 no tratamento L6 (Figura 5F) a 0,94 para o tratamento L1 (Figura 5A). O método da FAO-56 apresentou r^2 baixo no tratamento L6 (Figura 5F) e o seu máximo foi 0,97 em L2 (Figura 5B). Os tratamentos L1 e L5 (Figuras 5A e 5E) apresentaram precisão de muito boa a excelente e L3 e L4 (Figuras 5C e 5D) mostraram-se muito dispersos, com precisão regular.

A exatidão entre os valores de armazenamento preditos em relação aos valores observados é expressa pelo índice de concordância de Willmott (d) modificado. O índice não mostrou variação acentuada, para ThM variou de 0,40 a 0,60 e para FAO-53 variou de 0,36 a 0,47.

O coeficiente angular (b) das regressões apresentou valor igual a 1 apenas no tratamento L5 (Figura 5E) do método ThM e abaixo em quase todos os outros tratamentos, tanto no modelo ThM quanto FAO-56, subestimando os valores medidos. O tratamento L4 de ThM (Figura 5D) e o L1 de FAO-56 (Figuras 5A) apresentaram superestimação de 13 e 10% respectivamente nas estimativas dos métodos.

Figura 5 – Análise de regressão linear entre os valores do armazenamento de água no solo observado e estimado para o cultivo de feijão pelos modelos de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 (FAO56) com os parâmetros tabelados. A – L1 (25%), B – L2 (50%), C – L3 (75%), D – L4 (100%), E – L5 (125%) e F – L6 (150%) da ETc. d – índice de concordância Willmott (1981); r^2 - quadrado do coeficiente de correlação; a – coeficiente linear da reta, intercepto; b – coeficiente angular da reta, inclinação.

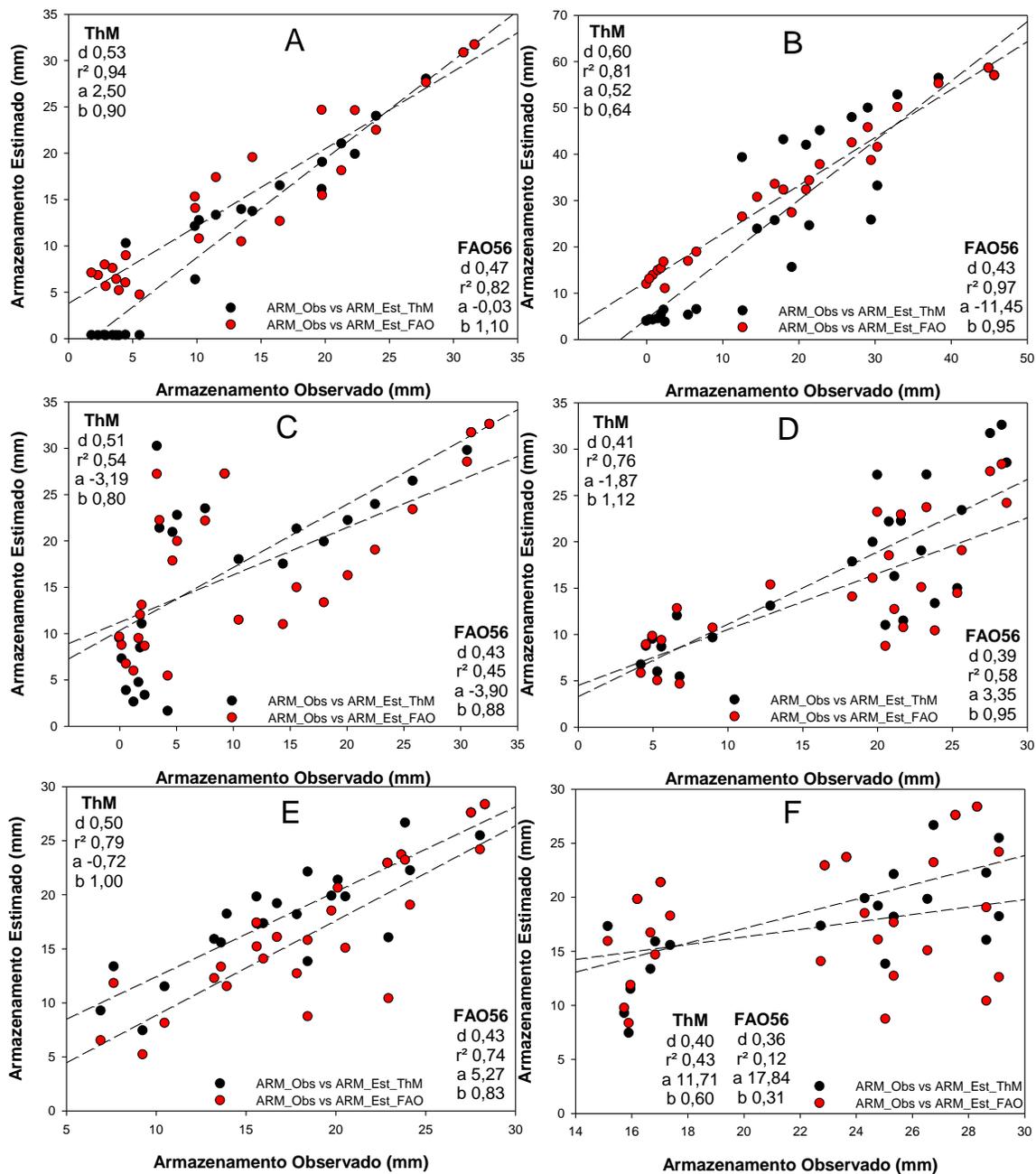
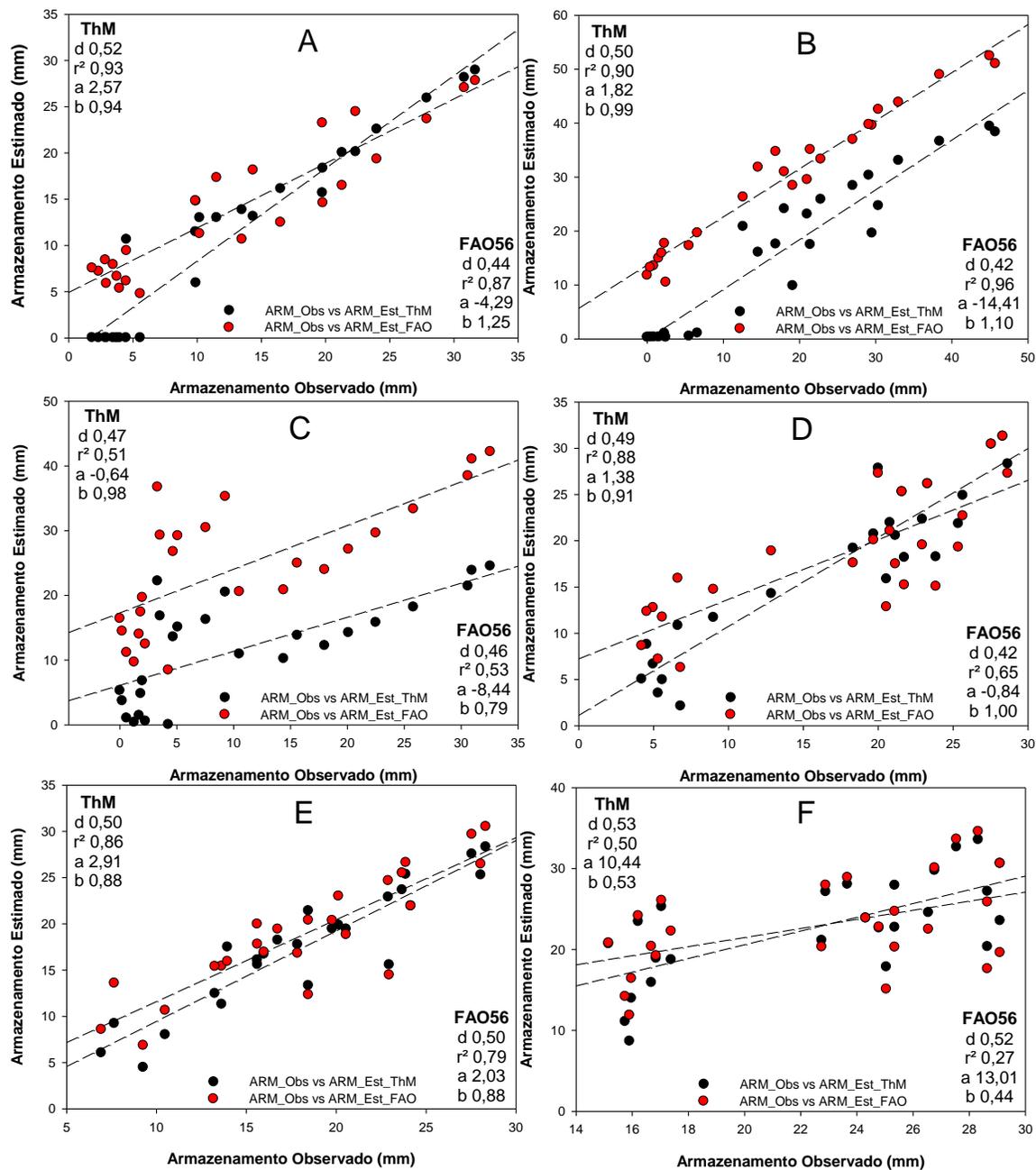


Figura 6 – Análise de regressão linear entre os valores do armazenamento de água no solo observado e estimado após otimização para o cultivo de feijão pelos modelos de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 (FAO56) com os parâmetros tabelados. A – L1 (25%), B – L2 (50%), C – L3 (75%), D – L4 (100%), E – L5 (125%) e F – L6 (150%) da ETC. d – índice de concordância Willmott (1981); r^2 - quadrado do coeficiente de correlação; a – coeficiente linear da reta, intercepto; b – coeficiente angular da reta, inclinação.



Após a otimização dos coeficientes e a nova simulação dos modelos para a estimativa do armazenamento de água no solo foram feitas as análises estatísticas novamente, no qual é apresentada na Figura 6.

A precisão dos modelos após a otimização retornou resultados melhores em ThM comparado ao não otimizado, exceto para L3 (Figura 6C) e L6 (Figura 6E) que mesmo com essa melhora o r^2 ficou 0,51 e 0,50; respectivamente, entretanto para o L6 esse valor de r^2 apresentou melhora quando comparado à estimativa não otimizada. A precisão do modelo FAO-56 também seguiu o mesmo comportamento, apresentado melhor precisão para todos os tratamentos, mas com a mesma exceção do outro método.

O índice de concordância de Willmott (d) modificado variou de 0,47 a 0,53 para o método de ThM de 0,42 a 0,52 para FAO-56. Ambos os métodos apresentaram melhora no índice d para os tratamentos sem déficit hídrico.

O coeficiente angular (b) das regressões apresentou valores abaixo de 1 (0,56 a 0,99) para o modelo ThM igual a 1 apenas no tratamento L5 (Figura 6E) do método ThM, subestimando os valores medidos. O tratamento L4 do FAO-56 (Figura 6D) retornou coeficiente angular igual a 1 e superestimou em L1 (Figura 6A) e L2 (Figura 6B), com 25 e 10% respectivamente nas estimativas do método.

A Tabela 7 apresentam os detalhamentos dos erros encontrados na estimativa do armazenamento de água no solo para os métodos antes e depois da otimização dos coeficientes. ThM antes da otimização apresentou uma média de erro variando de 15 a 57,3% e o FAO-56 variou de 8,4 a 59%. Após a otimização não foi observado melhora no erro, o método ThM variou de 14,4 a 63,7% e FAO-56 de 15,3 a 63,7%.

Ao analisar os valores de erro na Tabela 8 pode-se observar que grande parte dos tratamentos apresentou diminuição de erro, mesmo sendo uma diferença pequena, exceto os tratamentos L1 e L3 que apresentaram a média de erro maior após a otimização. O que indicou a sensibilidade dos modelos a sistemas em déficit hídrico, visto que esses tratamentos são caracterizados por quantidade menor de água durante o ciclo.

Com variação de 5,3 a 98,6% o erro não sistemático (MSEu) teve influência direta no erro total obtido para o armazenamento de água no solo para os dois modelos. Ao avaliar o erro sistemático (MSEs), os tratamentos L3 e L4 de ThM apresentaram os melhores ajustes e para o FAO-56 L4 e L5 (Tabela 8).

Tabela 7: Índices de desempenho estatístico para ajuste dos métodos de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 para estimativa do armazenamento de água no solo antes e depois da otimização. TRT – tratamento; RMSE - raiz quadrada do erro médio; MSEa – erro sistemático aditivo; MSEp – erro sistemático proporcional e MSEi – erro sistemático interdependente.

	METODO	TRT	RMSE	RMSE%	MSEa	MSEp	MSEi
Antes da otimização	Thornthwaite e Mather	L1	2,84	24,29	6,25	2,48	-5,92
		L2	13,24	48,38	0,27	145,28	-10,14
		L3	10,11	57,30	10,21	16,74	22,85
		L4	4,22	24,10	3,49	4,98	-7,79
		L5	2,84	15,00	0,52	0,00	-0,09
		L6	5,98	31,60	137,09	60,39	-175,17
	FAO-56	L1	0,02	8,37	0,00	0,00	0,00
		L2	13,16	42,41	131,18	2,51	32,80
		L3	9,86	58,95	15,24	4,62	15,10
		L4	6,07	40,82	11,24	0,63	-4,82
		L5	4,14	25,79	27,77	8,43	-28,52
		L6	8,38	48,64	318,25	157,63	-426,46
Após a otimização	Thornthwaite e Mather	L1	3,25	29,28	6,61	0,77	-3,39
		L2	4,90	29,82	3,31	0,02	-0,35
		L3	7,50	63,70	0,41	0,08	0,31
		L4	3,01	17,20	1,89	3,05	-4,40
		L5	2,52	14,40	8,45	5,36	-12,65
		L6	4,42	19,40	109,08	110,28	-211,70
	FAO-56	L1	4,00	28,95	18,37	15,12	-29,67
		L2	11,85	40,03	207,72	10,32	-85,04
		L3	15,65	63,73	71,30	31,75	88,33
		L4	5,04	27,53	0,71	0,00	-0,07
		L5	2,90	15,36	4,13	5,79	-9,30
		L6	5,26	22,92	169,16	175,06	-333,84

Tabela 8: Índices de desempenho estatístico para ajuste dos métodos de Thornthwaite e Mather (ThM) e FAO-56 para estimativa do armazenamento de água no solo antes e depois da otimização. TRT – tratamento; MSEs – erro sistemático total; MSEu – erro não sistemático; MSE – erro médio.

	METODO	TRT	MSEs	MSEs%	MSEu	MSEu%	MSE
Antes da otimização	Thornthwaite e Mather	L1	2,81	34,90	5,24	65,10	8,06
		L2	135,41	77,30	39,78	22,70	175,19
		L3	49,80	48,80	52,34	51,20	102,14
		L4	0,68	3,80	17,13	96,20	17,81
		L5	0,44	5,40	7,62	94,60	8,06
		L6	22,31	62,50	13,41	37,50	35,72
	FAO-56	L1	0,00	28,60	0,00	71,40	0,00
		L2	166,50	96,20	6,58	3,80	173,08
		L3	34,97	36,00	62,16	64,00	97,13
		L4	7,04	19,14	29,75	80,86	36,80
		L5	7,68	44,76	9,48	55,24	17,17
		L6	49,42	70,33	20,85	29,67	70,27
Após a otimização	Thornthwaite e Mather	L1	3,99	37,80	6,56	62,20	10,54
		L2	2,98	12,40	20,98	87,60	23,96
		L3	0,80	1,40	55,38	98,60	56,18
		L4	0,55	6,00	8,51	94,00	9,05
		L5	1,16	18,20	5,22	81,80	6,37
		L6	7,66	39,20	11,90	60,80	19,56
	FAO-56	L1	3,82	23,85	12,19	76,15	16,01
		L2	133,01	94,74	7,38	5,26	140,39
		L3	191,37	78,15	53,50	21,85	244,87
		L4	0,64	2,51	24,73	97,49	25,37
		L5	0,61	7,29	7,80	92,71	8,42
		L6	10,37	37,47	17,31	62,53	27,68

6. CONCLUSÕES

Os métodos podem ser utilizados para estimar o armazenamento de água no solo, pois apresentaram bom desempenho para as estimativas realizadas em cultivo de feijão comum em Rio Largo, Alagoas. Entretanto se faz necessário ajuste considerando características da cultura, solo e clima da região.

A otimização de parâmetros por modelagem inversa (Levenberg-Marquardt) retorna valores de K_c intermediário, K_{cb} inicial, K_{cb} intermediário, f e PMP dentro da literatura encontrada, entretanto K_c inicial apresenta valor elevado, estando fora dos valores encontrados na literatura. Diante disso, recomenda-se testar outros métodos de modelagem inversa, além de verificar as restrições presentes nos modelos, frequência e magnitude dos eventos de molhamento e garantir medidas de umidade para todo o ciclo da cultura.

Depois de um período de estresse hídrico e com a volta da infiltração de água no solo, os dois métodos apresentaram estimativas de ARM subestimadas e quando o sistema apresentou um novo período seco, os métodos retornaram valores superestimados de ARM.

Ao comparar com os dados de ARM observado, os métodos apresentaram maiores erros na estimativa de ARM nos tratamentos no qual a cultura foi submetida ao déficit hídrico e quando em excesso de água pela irrigação.

Entre os dois modelos testados, o balanço hídrico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) apresentou maior precisão, exatidão e menores erros em seus resultados, por isso pode ser indicado para análises do fluxo de água para culturas agrícolas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMAAS, B.; PETERS, G. P. The climate impact of Norwegians' travel behavior. **Travel Behaviour and Society**, v. 6, n. 2017, p. 10–18, 2017.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements**. In: United Nations FAO, Irrigation and Drainage paper 56. Rome, Italy: Ed. FAO, 1998.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 2–13, 2005.

ALLEN, R. G. ROBISON, C. W.; HUNTINGTON, J.; WRIGHT, J. L.; KILIC, A. FAO-56 d. v. 63, n. 6, p. 2059–2081, 2020.

AMAYREH, J.; AL-ABED, N. Determination of actual evapotranspiration and crop coefficients of broad bean (*Vicia faba* L.) grown under field conditions in the Jordan valley, Jordan: Bestimmung der aktuellen evapotranspiration und pflanzenbestandskoeffizienten von bohnen (*Vicia faba* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 49, n. 6, p. 655–662, 2003.

ANDRADE, J. A. **Balanço hídrico do solo pelo método de Thornthwaite-Mather e classificação racional dos climas de Thornthwaite**. Evorá: Universidade de Evorá, Departamento de Geociências, p. 1–31, 2019.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA, F. A. M.; RIBEIRO, J. L.; LIMA, M. G.; AMARAL, J. A. B. Zoneamento de risco climático para a cultura do algodão no Estado do Piauí. Embrapa, Teresina, Brasil, 2006. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. A. G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, p. 63–68, 2003.

AQUINO, C. M. S. DE; OLIVEIRA, J. G. B. DE. Emprego do método de Thornthwaite & Mather (1955) para cálculo do balanço hídrico climatológico do núcleo de degradação de São Raimundo Nonato-Piauí. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 01, p. 79–90, 2013.

ARAÚJO, A. P.; TEIXEIRA, M. G. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a produção de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 137–146, 2012.

ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M. DE; BRONDANI, G. E.; PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa - Paraná. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 5, p. 403–412, 2009.

BALLERO, M. DOS S. Problemas inversos aplicados a otimização do modelo kcdual para estimativa do armazenamento de água no solo em cultivo de feijão. 70 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, UFF, Niterói, 2020.

BARBIERI, J. D.; DALLACORT, R.; OLIVEIRA, T.; TIEPPO, R. C.; ARAÚJO, D. V. Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo para a microrregião da BAP (MT). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 21–28, 2017.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; FERREIRA, V. M.; SILVA, C. R.; AGUIAR NETTO, A. O. Crop coefficient of cowpea bean in Piauí state, Brazil. **XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)**, p. 1–10, 2010.

BERGAMASCHI, H.; BERLATTO, M. A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C.; CUNHA, G. R.; SANTOS, M. L. V.; FARIAS, J. R. B.; BARNI, A. N. 1992. Agrometeorologia Aplicada à Irrigação. **Ed. da Universidade do Rio Grande do Sul**. Departamento de Física e Meteorologia. 1997.

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

BLAIN, G. C. Considerações estatísticas relativas à oito séries de precipitação pluvial da Secretaria de Agricultura e abastecimento do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 12–23, 2009.

BRITO, J. E. D. DE; ALMEIDA, A. C. DOS S. LYRA, G. B.; JUNIOR, R. A. F.; TEODORO, I. SOUZA, J. L. DE. Produtividade e eficiência de uso da água em cultivo de feijão sob diferentes coberturas do solo submetido à restrição hídrica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 565–575, 2016.

BRUNO, I. P.; SILVA, A. L. DA; REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O. O. S.; VOLPE, C. A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 3, p. 215–220, 2007.

CAMPOS, I.; BALBONTÍN, C.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; GONZÁLEZ-DUGO, M. P.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A. Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. **Agricultural Water Management**, v. 165, n. 2016, p. 141–152, 2016.

CARDUCCI, C. E.; BOSCO, L. C.; KOHN, L. S.; SANTOS BARBOSA, J. DOS; BENEVENUTE, P. A. N.; REGAZOLLI, G. H. M. Water dynamics in Humic Cambisol under linseed tillage in the Santa Catarina Plateau. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 1–11, 2017.

CARNEIRO, W. M. A. **Análise setorial – Feijão: Produção e Mercados**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2010.

CARVALHO, L. G. DE; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

CARVALHO, O. M. Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar. p.74, **Dissertação** (Mestrado em agronomia – Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003.

CASTRO, F. DA S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 871–880, 2010.

COÊLHO, J. D. Produção de grãos: feijão, milho e soja. **Caderno Setorial ETENE**, v. 3, n. 51, p. 1–13, 2018.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: Grãos**. Décimo segundo levantamento, setembro 2016. Brasília: CONAB, 2016. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_09_15_18_32_boletim_12_setembro.pdf >. Acesso em: 29 de outubro de 2021.

CONAB. Volume 7 – Safra 2019 / 2020 Brasília, 2019. **Perspectivas para a agropecuária**, v. 7, p. 102, 2019.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Café Boletim da Safra 2021 de café**. p. 59, s. 8, 2021a. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira: Café. **Boletim da Safra 2021 de café**, v. 8, n. Terceiro levantamento, p. 59, 2021b.

COSTA, N. G. DA. Modelo de feddes acoplado ao modelo kc dual para simulação da dinâmica de água no solo em cultivos agrícolas. p. 71. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, UFF, Niterói, 2020.

CUNHA, P. C. R.; SILVEIRA, P. M.; NASCIMENTO, J. L.; ALVES JÚNIOR, J. Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.7, p.735–742, 2013.

DAMIÃO, J. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; SANTOS, G. O.; ZOCOLER, J. L. Balanço Hídrico da Região de Ilha Solteira, Noroeste Paulista. **CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, XX. Uberaba – MG**, v. XII, p. 2–8, 2010.

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. H. Field response to water. Rome: **FAO**, 193 p. 1979. (FAO. Irrigation and drainage Paper, 33).

DOURADO-NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. DE; METSELAAR, K. REICHARDT, K. NIELSEN, D. R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 87–95, 2010.

EL-NOEMANI, A. A.; ABOAMERA, M. A. H.; DEWEDAR, O. M. Determination of crop coefficient for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under drip irrigation system. **International Journal of ChemTech Research**, v. 8, n. 12, p. 203–214, 2015.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Feijão: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2ª Edição. Brasília. EMBRAPA. p. 247, 2014.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Conhecendo a Fenologia do Feijoeiro e Seus Aspectos Fitotécnicos**. 1ª Edição. Brasília. EMBRAPA. p. 59, 2018.

FARAHANI, H. J.; HOWELL, T. A.; SHUTTLEWORTH, W. J.; BAUSCH, W. C. Evapotranspiration: progress in measurement and modeling in agriculture. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. v. 50, n. 5, p. 1627–1638, 2007.

FARIAS, R. F. DE L.; ALENCAR, K.; SILVA, N. Climatologia de ocorrência de eventos extremos de precipitação na mesorregião do sertão pernambucano. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 5, p. 930–941, 2012.

FENNER, W.; DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. DE; FARIA JUNIOR, C. A. DE C.; MARCO, A. C.; BARIVIERA, G. Dual crop coefficient of common bean in Tangará da Serra, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 5, p. 455–460, 2016.

FENNER, W.; DALLACORT, R.; FARIA JUNIOR, C. A.; FREITAS, P. S. L. DE; QUEIROZ, T. M. DE; SANTI, A. Development, calibration and validation of weighing lysimeters for measurement of evapotranspiration of crops. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 297–302, 2019.

FERNANDEZ, F.; GEPTS, P.; LOPES, M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum. Cali: **Centro Nacional de Agricultura Tropical**. p. 26, 1982.

FERREIRA, A. G. Balanço hídrico para cultura do café arábica no município de São Domingos das Dores – MG. p. 97. **Monografia** (pós-graduação em Gerenciamento de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas, UFMG. Belo Horizonte, 2014.

FILHO, J. L. M. DE S.; GOMES, S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decedial irrigacionista. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 4, p. 433–443, 2007.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: Ed. da UPF, 2004.

FRANCA, M. V.; MEDEIROS, R. M. DE; HOLANDA, R. M. DE; SABOYA, L. M. F.; NETO, F. C. R.; PEREIRA, M. L. F.; ARAÚJO, W. R. DE. Balanço hídrico atual e futuro para a cultura do algodão em Amparo de São Francisco-SE. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 2, n. 5, p. e25311-e25311, 2021.

FRANCISCO, P. R. M.; BANDEIRA, M. M.; SANTOS, D.; PEREIRA, F. C.; GONÇALVES, J. L. G. Aptidão climática da cultura do feijão comum (*phaseolus vulgaris*) para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, p. 366–378, 2016.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L.; **Planejamento da Irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília: Embrapa, 2005.

FURTADO, T. F. Comparação de modelos para estimativa do conteúdo de água no solo em cultivo de milho no município de Arapiraca, AL. p. 74. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, UFF, Niterói, 2017.

GÉRARDEAUX E.; AFFHOLDER F.; BERNOUX M.; MULLER B. Relationships between tropical annual cropping systems and climate change. 2016, In: TORQUEBIAU E. (eds) Climate change and agriculture worldwide. **Springer, Dordrecht**. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7462-8_9

GOMES, S. Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no estado do Paraná. p. 120. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) - Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2005.

GUIMARÃES, C. M. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 157-174, 1988.

HASTINGS, W. K. Monte carlo sampling methods using Markov chains and their applications. **Biometrika**, v. 57, n. 1, p. 97–109, 1970.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F. Requirement of supplemental irrigation for dry season common bean in Goiás. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 57–66, 2015.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; ADAMUCHIO, J. G. Soil water storage functions under different levels of total available water. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 3, p. 1–9, 2018.

JESUS, J. B. DE. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática pelo método de Thornthwaite e Mather para o município de Aracaju-SE. **Scientia Plena** 2015, v. 11, Num. 0, p. 1–6, 2015.

LANDAU, E. C. DA SILVA, G. A., MOURA, L., HIRSCH, A., GUIMARAES, D. Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: cenário histórico, divisão política, características demográficas, socioeconômicas e ambientais: Evolução da Produção de Feijão. **Embrapa Milho e Sorgo-Livro científico (ALICE)**, 2020.

LEIVAS, J. F.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Risco de deficiência hídrica decendial na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 397–407, 2006.

LIMA, T. V.; MACHADO, N. A. F.; ANDRADE, H. A. F. DE; NUNES, R. L. S.; COSTA, G. B. R.; MATOS, R. R. S. DA S. Balanço hídrico de uma área piloto sob cultivo de pastagem *megathyrus maximus* no Cerrado Maranhense. **Revista Brasileira de Agricultura**

Irrigada, v. 14, n. 3, p. 4097–4105, 2020.

LOPES, I.; GUIMARÃES, M. J. M.; MARIA, J.; CLOVIS, M. DE M. E.; CARVALHO, M. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 443–457, 2017.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; MAIA, S. M. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de tabuleiros costeiros do estado de Alagoas: Coeficiente da Cultura" único" padrão boletim FAO-56. **STAB. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, n. January 2007, 2007.

LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. DE; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; FILHO, G. M.; JÚNIOR, R. F. A. Conteúdo De Água No Solo Em Cultivo De Milho Sem E Com Cobertura Morta Na Entrelinha Na Região De Arapiraca-Al. **Irriga**, v. 15, n. 2, p. 173–183, 2010.

MAGALHÃES, I. D. Cultivo do feijão irrigado e uso do aquacrop em alagoas. p. 119, **Tese** (Doutorado em Agronomia) Centro de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2017.

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. DE; TEODORO, I.; ROCHA, A. E. Q. DE; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; CARVALHO, A. L. DE; FERRAZ, R. L. DE S. Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1188–1196, 2019.

MANATSA, D.; CHINGOMBE, W.; MATARIRA, C. H. The impact of the positive Indian Ocean dipole on Zimbabwe droughts Tropical climate is understood to be dominated by. **International Journal of Climatology**, v. 2029, n. March 2008, p. 2011–2029, 2008.

MARTINS, P. A. DA S. Normais climatológicas, balanço hídrico e classificação climática para a mesorregião sul do Amazonas. p. 87. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Ambientais) Instituto de Agricultura, Educação e Ambiente, Universidade Federal do Amazonas. Humaitá, 2019.

MEDEIROS, R. M. DE; FRANCISCO, R. P. M.; MATOS, R. M. DE; SANTOS, S. DE;

SOUSA, T. P. DE. Caracterização agroclimática e aptidão de culturas para diferentes municípios e regiões da Paraíba. **Agropecuária Científica no Semiárido**. v. 11, n. 2, p. 99–110, 2015.

MEDEIROS, G. A. DE; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Crop coefficient for irrigated beans derived using three reference evaporation methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, n. 1–4, p. 135–143, 2005.

MORAES, E. DA S.; MENELAU, A. S. Análise do mercado de feijão comum. **Revista de Política Agrícola** p. 81–92, 2017.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1ª Edição, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Brasília, DF. p. 546, 2009.

MOREIRA, J.A.A.; AZEVEDO, J.A.; STONE, L.F.; CAIXETA, T.J. Irrigação. In: ZIMMERMANN, M.I.O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p.317-340.

MORETTI, C. L. **Alimentos para o mundo**. Avicultura Industrial, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, v. 1303, n. 09/2020, 2019.

NÓBREGA, J. Q.; RAO, T. V. R.; BELTRÃO, N. E. DE M.; FIDELES FILHO, J. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 437–443, 2001.

OLIVEIRA, J. Â. M. DE; OLIVEIRA, C. M. M. DE. Balanço Hídrico Climatológico E Classificação Climática Para O Município De Arinos – Mg. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 6, p. 3021–3027, 2019.

OLIVEIRA, L. F. C. DE et al. **Conhecendo a Fenologia do Feijoeiro e Seus Aspectos Fitotécnicos**. 2ª edição revista e ampliada. 1. ed. Brasília - DF: EMBRAPA, 2018.

OLIVEIRA, G. M.; GONÇALVES, I. S.; OLIVEIRA, V. E. A.; SANTOS JÚNIOR, P. P.; SILVA, R. R.; SANTIAGO, E. J. P. Balanço hídrico sequencial para a cultura da melancia

produzida no verão na região de Juazeiro, Bahia. **IV Encontro Internacional INOVAGRI**, n. July 2018, 2017.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1981. 440p.

PAÇO, T. A. PAREDES, P.; PEREIRA, L. S.; SILVESTRE, J. SANTOS, F. L. Crop coefficients and transpiration of a super intensive Arbequina olive orchard using the dual Kc approach and the Kcb computation with the fraction of ground cover and height. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 2, 2019.

PARREIRA, A. G. B.; MARASCA, I.; SOLINO, A. J. DA S.; SANTOS, G. O. Balanço hídrico climatológico para o município de Rio Verde, Goiás. **Científica - Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 26–33, 2019.

PASSOS, M. L. V.; SOUZA, J. B. C.; MENDES, T. J. Balanço hídrico e classificação climática para o município de Turiaçu-MA. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 2, p. 149, 2019.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 83, 2017.

PEIXOTO, C. P. **Curso de Fisiologia vegetal**. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, v. 1, p. 218, 2020.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; NOVA, N. A. V. Evapotranspiração. 1ª Edição. Campinas, SP, Fundag, p. 323, 2013.

PEREIRA, H. S.; ALMEIDA, V. M. DE; MELO, L. C.; WENDLAND, A.; FARIA, L. C. DE; DEL PELOSO, M. J.; MAGALDI, M. C. DE S. Influência do ambiente em cultivares de feijoeiro-comum em cerrado com baixa altitude. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 165–172, 2012.

PEREIRA, L. M. P.; PAULO, H. C.; SILVA RICCE, W. DA; CAVIGLIONE, J. H. Comparative analysis of meteorological data obtained by conventional and automatic stations in Londrina - PR. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 2, p. 299–306, 2008.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; NOVA, N. A. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

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.

ROCHA, A. E. Q. DA; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. DE; LYRA, G. B.; MEDEIROS, R. P.; TEODORO, I. Conteúdo de água no solo por reflectometria no domínio do tempo e balanço de água no solo em cultivo de milho. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 267–278, 2014.

SANTIAGO, E. J. P.; DE OLIVEIRA, G. M.; GONÇALVES, I. S.; DA SILVA, R. R.; OLIVEIRA, V. E. A.; JÚNIOR, P. S. Balanço hídrico sequencial para a cultura da melancia produzida no verão na região de Juazeiro, Bahia. **IV INOVAGRI International Meeting**, 2017.

SANTOS JUNIOR, E. P. DOS. Variação da disponibilidade de água para o cultivo da soja (*glycine max*) no município de Foz do Iguaçu (pr) por meio do balanço hídrico, para os períodos de 1961-1990 e 1991-2017. p. 64. **TCC (Graduação) - Bacharelado em Geografia**. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2018. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/4965/TCC_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SANTOS, J. B.; GAVILANES, M. L. Botânica. In: VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão**. 2ª edição, p. 41-65. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

SEIDEL, S. J.; BARFUS, K.; GAISER, T.; NGUYEN, T. H.; LAZAROVITCH, N. The influence of climate variability, soil and sowing date on simulation-based crop coefficient curves and irrigation water demand. **Agricultural Water Management**, v. 221, n. May, p. 73–83, 2019.

SILVA JUNIOR, J. F. Evapotranspiração de referência em zonas homogêneas como base para o manejo da irrigação no noroeste paulista. p. 85, **Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem)** Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2017.

SILVA, B. M. Disponibilidade de água no solo : Métodos de estimativa e implicações de manejo em cafeeiros na região do cerrado Lavras – MG. p. 135. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SILVA, J. C. DA; HELDWEIN, A. B.; MARTINS, F. B.; STRECK, N. A.; GUSE, F. I. Risco de estresse térmico para o feijoeiro em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v. 37, n. 3, p. 643–648, 2007.

SILVA, J. C. DA; HELDWEIN, A. B.; RADONS, S. Z.; MALDANER, I. C. TRENTIN, G.; GRIMM, E. L. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1030–1036, 2011.

SILVA, O. F. DA; WANDER, A. E. O feijão-comum no Brasil: passado, presente e futuro. **Embrapa Arroz e Feijão**, v. 287, p. 1–63, 2013.

SILVA, V. DE P. R. DA; TAVARES, A. L.; SOUSA, I. F. DE. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e dual do coentro. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 2, p. 255–259, 2013.

SILVA, P. L. F. DA; NASCIMENTO, R. DE S. Balanço hídrico climatológico e índice de aridez para municípios da microrregião de Guarabira, Paraíba. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14, n. 7, p. 125–139, 2020.

SILVA, M. A. V. Umidade do ar. **Meteorologia e Climatologia**, v. 2, p. 449, 2006.

SPAROVEK, G.; DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D. Classificação climática de Koeppen assistida por computador: um estudo de caso para o Brasil. **Jornal Internacional de Climatologia: Um Jornal da Royal Meteorological Society**, v. 27, n. 2, pág. 257-266, 2007.

SMITH, M. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management: **FAO Irrigation and Drainage Paper 46**. Rome. Italy, 1992.

SOARES, M. A. D. S.; TEODORO, I.; SILVA, S.; CANTARELLI, L. A. D.; JÚNIOR, R.

A. F.; MOURA, A. H. DE. Fenologia, componentes de produção e rendimento agrícola do milho sob lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 279-295, 2020.

SOUZA, J. L. M. DE; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decedial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153–163, 2008.

SOUZA, L. S. B. DE; MOURA, M. S. B. DE; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Water requirement and crop coefficient of maize and cowpea in sole and intercropping systems. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, p. 151–160, 2015.

SOUZA, A. P. DE; LIMA, L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T. DE; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso, Brasil. **Nativa**, n. 1948, p. 34–43, 2013.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; SCHAFFER, R.; GURSKI, B. C.; SCHAFFER, H. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 284–298, 2017.

TAMAGI, J. T.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; BOAS, M. A. V. Uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes em diferentes alturas. **Irriga**, v. 21, n. 4, p. 631–647, 2016.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The Water Budget and Its Use in Irrigation. **Yearbook of Agriculture**, p. 346–358, 1955.

TIMM, L. C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; CASSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R. Abordagem do espaço de estados para avaliar a relação entre propriedades físicas e químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 49-58, 2004.

TORQUEBIAU, E. **Climate Change and Agriculture**. 2ª Edição. Springer Dordrecht Heidelberg New York London. p. 355, 2016.

TTARSITANO, D.; CROUT, N. OpenModel 2.3.0. Bespoke Software. Mathematical compilation using free Pascal. UK: University of Nottingham, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano**. Rio Grande: IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 40 p.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Canal Clima da UNESP Ilha Solteira. SP, 2016. Disponível em: < <http://clima.feis.unesp.br/> >. Acesso em: 20 de outubro de 2021.

VAN LIER, L. The ecology of language learning: Practice to theory, theory to practice. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 3, p. 2–6, 2010.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; LO MONACO, P. A. V. Lâminas De Irrigação Em Cana-De-Açúcar Para Diferentes Condições De Disponibilidade Hídrica. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 137–148, 2015.

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

YANG, M.; YANFUL, E. K. Balanço hídrico durante a evaporação e drenagem em solos de cobertura sob diferentes condições de lençol freático. **Avanços na Pesquisa Ambiental**, v. 6, n. 4, pág. 505-521, 2002.