



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VIVIAN DIELLY DA SILVA FARIAS

**DEMANDA HÍDRICA DO FEIJÃO CAUPI NO ESTADO DO PARÁ, ASPECTOS
OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM.**

BELÉM – PA

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VIVIAN DIELLY DA SILVA FARIAS

**DEMANDA HÍDRICA DO FEIJÃO CAUPI NO ESTADO DO PARÁ, ASPECTOS
OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM.**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: área de concentração agrometeorologia, para obtenção do título de Doutora. Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

BELÉM – PA

2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VIVIAN DIELLY DA SILVA FARIAS

**DEMANDA HÍDRICA DO FEIJÃO CAUPI NO ESTADO DO PARÁ, ASPECTOS
OBSERVACIONAIS E MODELAGEM.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências deste para o título de Doutora.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza – Presidente
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

Prof. Dr. Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

Dr. Alessandro Carioca de Araújo
EMBRAPA AMAZONIA ORIENTAL

Dr. Alailson Venceslau Santiago
EMBRAPA AMAZONIA ORIENTAL

Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

AGRADECIMENTOS

Ao Dono de toda ciência, sabedoria e poder, Deus, Jesus e ao Espírito Santo por serem fonte da verdadeira felicidade, paz, paciência, autocontrole...em fim sem eles eu não teria valor algum.

A minha família, que eu amo tanto, pelo apoio, dedicação e carinho.

Aos meus sogros que me deram todo suporte no decorrer do curso.

A Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia, pela formação acadêmica e oportunidade de realização do curso de Doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, professor Dr. Paulo Jorge Souza, pela orientação, ensinamento, respeito, amizade, competência e profissionalismo.

Aos colegas do Laboratório de Agrometeorologia Marcus Lima, Hildo Garcia, Denis Pinho, Denilson, João Vitor, Thaynara Ramos e os demais bolsistas pela amizade e auxílio nas coletas de campo.

Ao professor Dr. Adriano Sousa e ao Programa LBA pelo apoio logístico oferecido durante a condução do experimento e aos colegas do Programa pela amizade e pela ajuda.

Ao Eng. Agr. Raimundo Nonato, pela amizade, convivência e grande apoio nas atividades de campo em todos os momentos que necessitei.

Aos funcionários do Campus de Castanhal em especial ao Gilson, pela amizade e auxílio nas atividades de campo.

A banca examinadora pelas sugestões de correção que muito contribuíram para meu trabalho.

Finalmente, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Muito obrigada!!!

Dedico,

Aos meus pais,

*Janice da Silva Farias e Reuben Judá da Silva Farias,
pelos ensinamentos, dedicação, carinho e amor durante todos os anos de minha vida.*

Ao meu marido e meu filho,

*Jonathas de Jesus Navegantes Pereira, Samuel Vitor Farias Pereira
pelo amor, companheirismo, incentivo, paciência e por dispensar os momentos de convívio
para a conquista deste curso.*

*As minhas irmãs Rianny Suzan Farias, Janny Suellen dos Reis
pelo companheirismo, amor, carinho e amizade.*

Ofereço,

Ao meu avô, e minha avó

Waldemar Farias e Berenice Farias (in memoriam)

RESUMO

O conhecimento das necessidades hídricas das culturas é de grande importância para o estudo do manejo da água de irrigação e ainda a evapotranspiração é uma das principais variáveis do ciclo hidrológico. A evapotranspiração pode ser medida através de lisímetros, ou ainda estimada através de equações empíricas. A utilização de modelos relacionados a evapotranspiração permite estabelecer relação entre os conhecimentos sobre os processos fisiológicos, que determinam o rendimento, e a irrigação. Os principais objetivos são estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) para municípios produtores de feijão caupi, determinar e estimar a evapotranspiração da cultura (ETC), os coeficientes de cultura (K_c) para os diferentes estádios do feijão caupi, Para isso utilizou-se série de dados coletados em estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi comparado métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) com o método de Penman-Monteith FAO 56 para municípios produtores de caupi. A ETC do feijão caupi foi determinada através de lisímetros de drenagem e pelo método de razão de Bowen e estimada pelo método indireto de Penman-Monteith. Para os municípios de Tracuateua, Bragança, Capitão Poço e Castanhal o método Turc, Blaney-Criddle-FAO24 e a Regressão apresentaram as melhores avaliações para todos os critérios estatísticos, não necessitando de ajustes; os métodos Priestley-Taylor, Makking e Radiação FAO 24, apresentaram ótimos resultados após os ajustes, portanto as equações ajustadas podem ser utilizadas na região de estudo. O método de Camargo e Hargreaves-Samani obteve a pior avaliação para todos os municípios e para todos os critérios de comparação com relação aos demais métodos. O consumo hídrico total do feijão caupi foi em média 267,73 mm dia⁻¹. Em média durante o ciclo do feijão caupi o Ω foi de 0,66, indicando que a cultura do feijão caupi não desacopla totalmente da atmosfera nas condições climáticas de Castanhal Pará. O K_c do feijão caupi apresentou valor médio de 0,8 na fase vegetativa, 1,4 durante a fase reprodutiva, chegando ao estágio final com valor médio de 0,5. O modelo de Penman-Monteith, com uma resistência do dossel proposta por Ortega-Farias (1993) (rc_o), pode ser usado para se estimar a evapotranspiração do feijão caupi, cultivado nas condições edafoclimáticas de Castanhal Pará. Em escala diária, o modelo apresentou maior precisão e exatidão para condições de IAF ≥ 3 . Contudo, o modelo de Penman Monteith estimou melhor a evapotranspiração do feijão caupi com a resistência do dossel (rc_L) estimada a partir da condutância (gf) proposta por Lima et al. (2016, p. 547).

Palavra chave: *Vigna unguiculata* (L.)Walp, BR3 Tracuateua, modelagem, evapotranspiração, Penman-MonteithFAO56.

ABSTRACT

The knowledge about water needs of crops of great importance for the study of irrigation water management and evapotranspiration are the top main variables of the hydrological cycle. The evapotranspiration of a crop can be measured by lysimeters, or estimated through empirical equations. The use of models related to evapotranspiration allows the establishment of a relationship between the knowledge about the physiological processes that determine yield and irrigation. The main objectives involve the estimation of the reference evapotranspiration (ET_o) for municipalities that produce cowpea, the determination and estimation of the crop evapotranspiration (ET_c) and the crop coefficients (K_c) for the different stages of cowpea. Thereby, a series of data was collected from an automatic meteorological station that belongs to the National Institute of Meteorology (INMET). Then, methods of estimation of reference evapotranspiration (ET_o) were compared with the Penman-Monteith method FAO 56 for cowpea producers municipalities. The ET_c of the cowpea was determined through drainage lysimeters and by the Bowen ratio method. After, it was estimated by the Penman-Monteith indirect method. For the municipalities of Tracuateua, Bragança, Capitão Poço e Castanhal, the Turc method, Blaney-Criddle-FAO24 and the Multiple Regression function presented the best evaluations for all the statistical criteria, requiring no further adjustments; The Priestley-Taylor, Makking and FAO 24 methods presented excellent results after adjustments. Thus, adjusted equations can be used in the study region. The Camargo and Hargreaves-Samani method obtained the worst evaluation for all municipalities and for all criteria comparison with the other methods. The total water consumption of cowpea was, on average, 267.73 mm day⁻¹. On average during the cowpea cycle, the Ω was 0.66, indicating that the cowpea crop does not decouple completely from the atmosphere under the climatic conditions of Castanhal Pará. The K_c of the cowpea presented an average value of 0.8 in the vegetative phase, 1.4 during the reproductive phase, reaching the final stage with an average value of 0.5. The Penman-Monteith model, with a canopy resistance proposed by Ortega-Farias (1993) (rcO), can be used to estimate the evapotranspiration of cowpea cultivated under the edaphoclimatic conditions of Castanhal Pará. On a daily scale, the model presented greater precision and accuracy for LAI conditions ≥ 3 . However, the Penman Monteith model achieved a better estimation for the evapotranspiration of cowpea with the canopy resistance (rcL) estimated from the conductance (*g_f*) proposed by Lima et al. (2016, p.547).

Key words: *Vigna unguiculata* (L.)Walp, BR3 Tracuateua, Modelling, evapotranspiration, Penman-Monteith FAO 56.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| RESUMO..... | 13 |
| ABSTRACT | 14 |
| 1 CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 9 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 13 |
| 2 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA MUNICIPIOS PRODUTORES DE FEIJÃO CAUPI NO ESTADO DO PARÁ..... | 15 |
| RESUMO..... | 15 |
| ABSTRACT | 16 |
| 2.1 Introdução | 17 |
| 2.2 Material e métodos..... | 18 |
| 2.2.1 Área de estudo | 18 |
| 2.2.2 Variáveis meteorológicas | 19 |
| 2.2.3 Estimativa da Evapotranspiração de referencia (ETo) | 20 |
| 2.2.4 Comparação entre os métodos..... | 23 |
| 2.3 Resultados discussão..... | 24 |
| 2.4 Conclusão..... | 37 |
| REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | 38 |
| 3 DEMANDA HÍDRICA, COEFICIENTE DE CULTIVO E FATOR DE DESACOPLAMENTO DO FEIJÃO CAUPI NO PARÁ | 41 |
| RESUMO..... | 41 |
| ABSTRACT | 42 |
| 3.1 Introdução | 43 |
| 3.2 Material e métodos..... | 44 |
| 3.2.1 Área experimental..... | 44 |
| 3.2.2 Caracterização físico-química e hídrica do solo..... | 45 |
| 3.2.3 Instrumentação e coleta de dados agrometeorológicos. | 46 |
| 3.2.4 Desenvolvimento fenológico | 47 |
| 3.2.5 Condução e coleta de dados..... | 48 |
| 3.2.6 Necessidade térmica | 49 |
| 3.2.7 Evapotranspiração de referência (ETo). | 49 |
| 3.2.8 Evapotranspiração da cultura (ETc) | 50 |
| 3.2.9 Coeficiente da cultura (Kc) | 52 |
| 3.2.10 Irrigação..... | 53 |
| 3.2.11 Fator de desacoplamento | 53 |
| 3.2.12 Análise estatística | 55 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.3 | Resultados e discussão | 56 |
| 3.4 | Conclusão..... | 66 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 67 |
| 4 | AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJÃO CAUPI PELO MODELO DE PENMAN MONTEITH..... | 70 |
| RESUMO..... | | 70 |
| ABSTRACT | | 71 |
| 4.1 | Introdução | 72 |
| 4.2 | Material e métodos..... | 73 |
| 4.2.1 | Área experimental..... | 73 |
| 4.2.2 | Condução e coleta de dados..... | 74 |
| 4.2.3 | Variáveis meteorológicas | 74 |
| 4.2.4 | Irrigação..... | 75 |
| 4.2.5 | Evapotranspiração pelo método balanço de energia - razão de Bowen (ETC _B) | 75 |
| 4.2.6 | Evapotranspiração pelos Lisímetros de drenagem (ETC _{Lis})..... | 77 |
| 4.2.7 | Estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (ETC _{PM}).. | 77 |
| 4.2.8 | Estimativa de r_c por Ortega-Farias (1993) (rc_O) e por Lima et al (2016) (rc_L).. | 79 |
| 4.2.9 | Análises estatísticas e validação do modelo. | 80 |
| 4.3 | Resultado e discussão..... | 82 |
| 4.4 | Conclusão..... | 92 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | | 93 |

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de feijão caupi, onde é cultivado praticamente em todas as regiões do Brasil, mas a produção se concentra na região Nordeste e região Norte (OLIVEIRA et al., 2013, p. 465). O feijão caupi possui ótimos níveis de proteínas e capacidade de fixação biológica do nitrogênio (N) o que justifica o seu uso na alimentação, tanto de humanos como animais, na rotação de cultura, no enriquecimento do solo (VAN DUIVENBOONDEN et al., 2002). Mesmo com a modernização do processo produtivo, ainda são grandes as áreas onde o sistema produtivo do caupi é feito manualmente, gerando muitos empregos diretos e indiretos, sendo em algumas regiões, considerada, como cultura fixadora do homem no campo (CARDOSO E RIBEIRO, 2006).

Apesar da grande importância socioeconômica, ecológica e nutricional do feijão caupi para a população Brasileira (BORGES et al., 2012, p. 37), a produtividade média brasileira é extremamente baixa (300 kg ha^{-1}) em comparação a outros países como Nigéria ($722,4 \text{ Kg ha}^{-1}$) e até mesmo os EUA ($1.392,6 \text{ kg há}^{-1}$) (ALMEIDA et al., 2014, p. 77) que possui menor área plantada, porém maior rendimento, ou seja, uma das principais causas desse baixo rendimento são as condições de ordem técnica (SABOYA, et al., 2013, p. 40) mas, também podem ser comercial, política e principalmente climática (REBELLO et al., 2011).

Na região Norte a produtividade tem destaque no Estado do Pará, se concentrando na região do nordeste paraense, a atividade do cultivo desta cultura é considerada a principal fonte de emprego e renda nessa região, onde cerca de 90% da produção tem sido comercializada para estados nordestinos (LIMA et al., 2017 p. 547), porém, apesar de toda relevância para esse estado, dados mais atuais da Secretária de Agricultura do Estado do Pará (SAGRI 2015) mostram que no período de 2012 o rendimento oscila de 850 a 650 kg ha^{-1} .

Considerando que a maior parte do Estado do Pará apresenta duas estações climáticas bem definidas, onde prevalecem condições ambientais adversas de deficiência de água e temperaturas do ar elevadas, o plantio do feijão caupi se restringe ao primeiro semestre do ano, durante o período mais chuvoso. O nordeste paraense vem se notabilizando pela forte incorporação de tecnologia ao sistema produtivo, almejando reduzir riscos e planificar a produção (Rebello et al., 2011).

Neste contexto, a adoção de modelos agrometeorológicos capazes de simular o rendimento da cultura, torna-se uma excelente ferramenta de planejamento para adoção de um segundo ou terceiro plantio dessa leguminosa no período de estiagem, utilizando a irrigação de forma a suprir parcial ou totalmente as necessidades d'água, dependendo do município

considerado e das precipitações ocorridas no período, garantindo maior exploração agrícola independentemente do regime das chuvas.

Através de estudos referentes ao consumo hídrico, podem ser feitos planejamentos de épocas de semeadura em função da disponibilidade hídrica média da região considerada, permitindo maior eficiência no aproveitamento das chuvas. Além disso, devido à escassez cada vez mais frequente do recurso natural, o uso da água na agricultura pode ser melhorado, através do conhecimento da evapotranspiração.

A evapotranspiração é um processo simultâneo de passagem da água para a atmosfera, por evaporação de reservatórios, de água do solo, da superfície dos vegetais e por transpiração das plantas. Além disso, é uma das principais variáveis do ciclo hidrológico e para as culturas a evapotranspiração representa a maior parte de toda água absorvida pela planta (PAYERO; IRMAK, 2013, p. 31).

A evapotranspiração de cultura (ET_c) é o produto da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente de cultura (k_c). O K_c é um parâmetro relacionado aos fatores ambientais e representa as características do vegetal, variando em função da arquitetura da planta, em seus distintos estádios de desenvolvimento.

A ET_o pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, sendo os diretos de custo mais elevado e normalmente utilizados para pesquisa. Os métodos indiretos estimam a ET_o baseado em variáveis climáticas, a exemplo do método de Penman Monteith que é considerado padrão pela Food and Agriculture Organization - FAO (ALLEN et al., 1998, p. 297). Justifica-se o interesse por outros métodos indiretos, em função da necessidade de estimativas que necessitem de um menor número de informações meteorológicas, em especial para o uso por produtores, e métodos que se ajustem às diferenças climatológicas de cada região de interesse.

O lisímetro é considerado o método direto mais preciso, além disso, é o método mais antigo (MARQUES et al., 2015, p. 745). Este método permite a contabilização dos termos do balanço hídrico de forma precisa, pois o volume de solo vegetado é devidamente isolado, possibilitando uma estimativa confiável da real necessidade das culturas.

Outro método bastante utilizado para a estimativa de ET_c é o balanço de energia através da razão de Bowen. Este método apresenta estimativas aceitáveis quando se tem os devidos cuidados na instalação dos instrumentos para impedir a influência da advecção de calor entre as superfícies adjacentes e a área de estudo (KANG et al., 2008, p. 1629).

A equação de Penman-Monteith (PM) também pode ser usada para fazer previsões da ET_c, porém a maior dificuldade na aplicação desta equação está relacionada com a estimativa

correta da resistência do dossel (r_s) ou da condutância estomática (g_f) (RANA; KATERJI, 1998, p. 141). Uma alternativa para obtenção dessas variáveis seria a predição, por meio de modelos capazes de descrever sua dependência em função de variáveis ambientais, neste sentido, Damour et al. (2010, p. 1419) apresenta uma revisão detalhada, onde descrevem 35 modelos de g_f , com diferentes graus de complexidade. De acordo com Vialet-Chabrand et al. (2013, p.15) os mais utilizados atualmente são os modelos de Jarvis (1976) e Ball et al. (1987).

Ortega-Farias (1993, p. 137) propôs um modelo para a estimativa da r_s que é muito favorável para os usuários da equação de PM, pois necessita de dados similares (saldo de radiação, déficit de pressão de vapor), sendo de fácil implementação, além de poder incluir os valores do conteúdo de água do solo. Lima et al (2016, p.547) ajustou e validou um modelo empírico de g_f , em função do efeito combinado da temperatura do ar, irradiância solar, déficit de pressão de vapor e o teor de água do solo na forma de fração de água transpirável, para condições do nordeste paraense.

São necessárias informações referentes a evapotranspiração para o estado do Pará, visto que, de acordo com o último censo agropecuário do IBGE, o estado possui cerca de 29.333 ha de área irrigada, sendo que em 41% desta área são utilizados métodos de irrigação não tradicionais (SOUZA et al. 2012, p. 177). Com tudo são poucos os estudos científicos, para essa região, sobre as respostas da planta ao sistema climático de forma geral. Além disso, os trabalhos realizados no estado do Pará avaliam apenas um ciclo da cultura.

Diante do exposto, a hipótese testada neste trabalho é de que existem outros métodos além de Penman-Monteith- FAO 56 que podem ser usados para estimar a ETo com confiabilidade para o local desejado, a ETc e o coeficiente da cultura será determinada com precisão por lisimetria, a ETc do feijão caupi pode ser estimada satisfatoriamente através da equação de Penman-Monteith (PM), porém apresentará melhor ajuste quando for utilizado o modelo empírico de g_f proposto por Lima et al. (2016, p. 547).

Sendo assim o objetivo principal é determinar e estimar a demanda hídrica do feijão caupi no Pará, especificamente objetivou-se:

- a) Comparar métodos de estimativa de Evapotranspiração de referencia (ETo) com o método de Penman-Monteith FAO 56 para os principais municípios produtores de feijão caupi, no período mais chuvoso e menos chuvoso do ano.
- b) Verificar a correlação dos métodos de estimativa de ETo e definir coeficientes de ajuste regional para os municípios produtores de feijão caupi.

- c) Determinar o consumo de água e os coeficientes de cultura para os diferentes estádios do feijão caupi nas condições edafoclimáticas de Castanhal Pará.
- d) Determinar o fator de desacoplamento nos diferentes estádios de desenvolvimento do feijão caupi para o nordeste paraense.
- e) Ajustar modelos para a estimativa dos valores de K_c em função dos graus dias acumulados e IAF.
- f) Determinar a evapotranspiração horária do feijão caupi pelo método Razão de Bowen
- g) Estimar a Evapotranspiração da Cultura do feijão caupi através da equação de Penman-Monteith (PM) com uma r_c proposta por Ortega-Farias (1993, p.137) e uma r_c a partir da g_f proposta por Lima et al. (2016), para se estimar a evapotranspiração horária e diária do feijão caupi nas condições de Castanhal Pará.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO,. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998. 297p.

ALMEIDA, A. Q.; SORATTO, R. P.; BROETTO, F.; CATANEO, A. C. Nodulação, aspectos bioquímicos, crescimento e produtividade do feijoeiro em função da aplicação de bioestimulante. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, p.77-88, 2014.

BALL, J.T., I.E. WOODROW & J.A. BERRY. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: **PROGRESS IN PHOTOSYNTHESIS RESEARCH. Proceeding of the 7th International Congress on Photosynthesis**. Eds. J. Biggins. Martins Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, 1987. p.221–224.

BORGES, P.R.S.; SABOYA, R.C.C.; SABOYA L.M. F; SANTOS E. R.; SOUZA S.E.A. Distribuição de massa seca e rendimento de feijão-caupi inoculadas com rizóbio em gurupi, **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 1, p. 37-44, jan.-mar. 2012.

CARDOSO, M.J. & R. V. “Desempenho agrônomico do feijão-caupi, cv. Rouxinol, em função de espaçamentos entre linhas e densidades de plantas sob regime de sequeiro.” **Revista Ciência Agrônômica**, pp. 102-105. 2006.

DAMOUR, G.; SIMONNEAU, T.; COCHARD, H. & URBAN, L. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. **Plant, Cell and Environment**, v.33, p.1419–1438, 2010.

JARVIS, P. G. Interpretation of Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in Field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences**. V.273(927), p. 593-610. 1976.

LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. S. ; COSTA, D. L. P. ; SAMPAIO, L. S. ; SOUZA, P. J. O. P. O efeito combinado das variáveis ambientais na condutância estomática foliar do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v.34, n. 04, p. 547.out-dez. 2016.

MARQUES, P.A.A; JOSÉ, J. V.; ROCHA, H.S.; JÚNIOR, E. F. F.; SOARES, D. A.; DUARTE, S. N. Consumo hídrico do manjeriço por meio de lisímetro de drenagem **Irriga**, Botucatu, v.20, n. 4, p.745-761. 2015.

OLIVEIRA F.A.; MEDEIROS J.F.; OLIVEIRA M.K.T; SOUZA A.A.T.; FERREIRA J.A; SOUZA, M. S. Interação entre salinidade e bioestimulante na cultura do feijão caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.5. p.465–471, 2013.

ORTEGA-FARIAS, S. **A comparative evaluation of the residual energy balance, Penman, and Penman-Monteith estimates of daytime variation of evapotranspiration**. 1993. 137f. (Tese PhD), Oregon State University, Corvallis, Oregon, 1993.

PAYERO A.J.O.; IRMAKB, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. **Agricultural Water Management**. n. 129, p. 31– 43. 2013.

RANA, G.; KATERJI, N. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. **Theoretical and Applied Climatology**, Hamburgo, v.60, n.1-4, p.141-149, 1998.

REBELLO, F. K. Conjuntura da produção e comercialização do feijão-caupi no nordeste paraense: safra 2010. Disponível em: <<
http://www.bancoamazonia.com.br/bancoamazonia2/includes%5Cinstitucional%5Carquivos%5Cbiblioteca%5Ccontextoamazonico%5Ccontexto_amazonico_18.pdf>>. Acesso em: 14 agosto. 2014.

SABOYA, R.C.C.; BORGES, P.R.S.; SABOYA L.M.I.; MONTEIRO F.P.R.; SOUZA S.E.A.; SANTOS A. F.; SANTOS E. R. Response of cowpea to inoculation with nitrogen-fixing strains in Gurupi-Tocantins State. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 4, n.1, p. 40-48, Feb. 2013.

SAGRI. Secretaria Executiva de Agricultura do Estado do Pará, 2015. Dados Agropecuários. Disponível em: <<http://www.sagri.pa.gov.br/>>. Acesso em: 10 de Junho de 2015.

SILVA, V.P.R.; SILVIA, L. A.; SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, M. F.; ALMEIDA, R. S. R.; Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.5, p.411–417, 2015.

SOUZA, R.O.R.M.; PANTOJA, A.V.; AMARAL, M.A.C.M. ; NETO, J.A.P. Cenário da agricultura irrigada no estado do Pará. **Irriga**, v.17, n.3, p.177-188. 2012.

KANG, S.; ZHANG, B.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural Journal**, v.148, p.1629-1640. 2008.

VAN DUIVENBOODEN, N., ABDOUSSALAM S., and BEN MOHAMED A. “Impact of climate change on agricultural production in the sahel – part 2. Case study for groundnut and cowpea in niger.” **Climatic Change**, pp. 349–368. 2002.

VIALET-CHABRAND, S.; DREYER, E. & BRENDDEL, O. Performance of a new dynamic model for predicting diurnal time courses of stomatal conductance at the leaf level. **Plant, Cell and Environment**. v. 36, n. 8, p. 15-29. Ago. 2013.

2 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA MUNICÍPIOS PRODUTORES DE FEIJÃO CAUPI NO ESTADO DO PARÁ.

RESUMO

Os estudos relativos à evapotranspiração são importantes para subsidiar adequado manejo de água no período de estiagem em municípios produtores de feijão caupi. Uma forma de verificar a adequação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é a comparação com o método de Penman-Monteith FAO 56. O objetivo deste trabalho foi verificar a correlação de métodos de estimativa de ET_o com o método padrão Penman Monteith-FAO 56 e definir coeficientes de ajuste, quando necessário, para municípios produtores de feijão caupi, no período considerado mais chuvoso e menos chuvoso do ano. Para isso comparou-se 8 métodos de estimativa com o método de Penman-Monteith FAO 56 (método padrão de estimativa da ET_o adotado pela FAO) utilizando série de dados coletados em estação meteorológica automática e convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia-INMET. Foram usados os dados de municípios da mesorregião Nordeste Paraense (Tracuateua, Bragança, Capitão Poço) e do município de Castanhal da mesorregião Metropolitana de Belém. A calibração das equações foi realizada por meio dos coeficientes “a” e “b” das respectivas regressões lineares simples. Avaliou-se a precisão e a exatidão dos métodos com base na análise de regressão linear, no coeficiente de correlação (r), determinação (r²), no erro quadrático médio (RMSE), no índice de concordância (d), e índice de confiança (c). Tanto para os municípios da mesorregião Nordeste Paraense como para Castanhal o método Turc, Blaney-Criddle-FAO24 e Regressão apresentaram as melhores avaliações para todos os critérios estatísticos, não necessitando de ajustes; os métodos Priestley-Taylor, Makking e Radiação FAO 24, apresentaram ótimos resultados após os ajustes, portanto as equações ajustadas podem ser utilizadas na região de estudo. O método de Camargo e Hargreaves-Samani obteve a pior avaliação para todos municípios e para todos os critérios de comparação com relação aos demais métodos.

Palavras-chave: Penman-Monteith FAO 56, monitoramento climático, necessidade hídrica.

ABSTRACT

Evapotranspiration studies are important in order to support adequate water management in the dry season in municipalities that produce cowpea. One way of verifying the adequacy of estimation methods for reference evapotranspiration (ET_o) is the comparison with the Penman-Monteith method FAO 56. This work aims to estimate the reference evapotranspiration and to define coefficients of regional adjustment for cowpea producers municipalities during the periods considered wetter and drier in the year. Thereby, 8 estimation methods were compared to the Penman-Monteith method FAO 56 (standard method of ET_o estimation adopted by FAO) using a series of data collected in an automatic and conventional meteorological station that belongs to the National Institute of Meteorology – INMET. Data from municipalities located in the Pará northeastern mesoregion were used (Tracuateua, Bragança, Capitão Poço). In addition, data from Castanhal city, which is a part of the Belem metropolitan mesoregion, was also considered. The calibration of the equations was performed using the coefficients "a" and "b" of the respective simple linear regressions. The precision and accuracy of the methods were evaluated based on the analysis of linear regression, correlation coefficient (r), coefficient of determination (r²), mean square error (MSE), concordance (d) and confidence (c) indices. For both Northeastern of Pará and Castanhal municipalities, the Turc method, Blaney-Criddle-FAO24 and the Regression presented the best evaluations for all the statistical criteria, requiring no adjustments. The Priestley-Taylor, Makking and FAO 24 Radiation methods presented excellent results after the adjustments. Thus, adjusted equations can be used in the study region. The Camargo and Hargreaves-Samani method obtained the worst evaluation for all municipalities and for all the comparison criteria regarding the results from the other methods.

Key words: Penman-Monteith FAO 56, Climate monitoring, Water demand.

2.1 Introdução

Devido à sua localização estratégica, a Amazônia oriental é a região que apresenta um forte apelo para a produção de grãos, por ser considerada uma região agrícola em consolidação. Segundo Souza et al. (2012, p. 177) o estado do Pará possui, de acordo com o último censo agropecuário do IBGE, cerca de 29.333 ha de área irrigada, sendo que em 41% desta área são utilizados métodos de irrigação não tradicionais, o que demonstra a necessidade de assistência técnica especializada e de mais estudos científicos que possam fornecer informações adequadas e confiáveis sobre as respostas da planta ao sistema climático de forma geral.

O plantio de feijão caupi geralmente se restringe ao primeiro semestre do ano, considerado o período mais chuvoso. O município de Tracuateua, por exemplo, localizado no Nordeste Paraense, é um dos principais produtores de feijão caupi da região (SAGRI 2015) e com a adoção de um segundo ou terceiro plantio dessa cultura no período de estiagem, sua produção poderia ser muito maior. Para isso haveria a necessidade de irrigação de forma a suprir parcial ou totalmente as necessidades de água, em função do regime de chuvas da região. Através do conhecimento de evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultivo pode ser encontrado a evapotranspiração da cultura, sendo assim o controle da irrigação pode ser feito de forma racional, de acordo com a real necessidade da cultura.

O método de Penman-Monteith-FAO 56 (método padrão de estimativa da ETo adotado pela FAO) ainda é o mais utilizado para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), por ser o que melhor se ajusta a valores de ETo obtidos em lisímetros (CHAGAS et al., 2013, p. 351), mas devido à complexidade para estimativa da ETo e a urgência de implementação de novas estratégias de busca de informação pelo profissional da área de recursos hídricos e ambiental, justifica-se a demanda do uso de modelos em linguagem computacional simples e acessível aos potenciais usuários e métodos que se ajustem às diferenças climatológicas de cada região de interesse.

A diferença dos valores estimados de ETo pelos métodos empíricos, em função do local de uso, pode diminuir com a adoção de coeficientes de ajuste que aproximam os valores estimados por estes aos estimados pelo Penman-Monteith-FAO 56. Borges e Mendiando (2007, p. 293), estudando vários métodos de estimativa de ETo, concluíram que quando calibradas com coeficientes obtidos através de comparação com o PM-FAO os métodos empíricos apresentaram altos índices de confiabilidade ($c > 0,900$) para sua região de estudo.

Vários estudos foram realizados para avaliar o desempenho de diferentes métodos de estimativa da ETo em comparação com a metodologia de Penman-Monteith FAO, como

Fanaya Júnior et al., (2012, p. 418) para o Mato Grosso do Sul, Moura et al. (2013, p. 181) para Pernambuco. Alguns trabalhos foram realizados em outros estados da Amazônia como em Roraima (ARAÚJO et al., 2012, p. 155) e para região Norte (SANCHES et al. 2015), porém os trabalhos citados acima não levam em consideração a sazonalidade e raros são os trabalhos realizados para a região do estudo, em especial pela particularidade climática da região.

Os trabalhos citados acima demonstram que existem outros métodos além de Penman-Monteith- FAO 56 que podem ser usados com certo grau de confiabilidade. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a correlação de métodos de estimativa de ETo com o método padrão Penman Monteith-FAO e definir coeficientes de ajuste, quando necessário, para municípios produtores de feijão caupi no período considerado mais chuvoso e menos chuvoso do ano.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido para municípios da mesorregião Nordeste Paraense: Tracuateua, segundo maior produtor de feijão caupi do nordeste paraense (2.240 toneladas), Bragança, quarto maior produtor de feijão caupi do nordeste paraense (2.000 toneladas), Capitão Poço, terceiro maior produtor de feijão caupi do nordeste paraense (1.400 toneladas) e Castanhal, mesorregião Metropolitana de Belém, (450 toneladas) (SAGRI 2015).

O clima do município de Tracuateua e Bragança, conforme dados obtidos na Estação Meteorológica de Tracuateua é similar ao da média da região Bragantina: temperatura máxima de 33°C e mínima de 18°C, apresentando média de 27°C e elevada pluviosidade de 2.501 mm/ano, com período chuvoso nos primeiros seis meses do ano.

O município de Capitão Poço apresenta precipitação anual em torno de 2.256 mm, com uma estação seca entre setembro e novembro, temperatura média de 26 °C e umidade relativa do ar entre 75% e 89% nos meses com menor e maior precipitação, respectivamente.

Em Castanhal a temperatura média anual de 26 °C: máximas e mínimas de 35 e 18 °C e umidade relativa máxima de 90% e mínima de 79%. Precipitação média anual em torno de 2.571,6 mm, entretanto, durante os meses de janeiro, fevereiro e março concentra-se cerca de 35% dessa chuva, ou seja, esse trimestre é caracterizado como o mais chuvoso. E o trimestre menos chuvoso compreende os meses de julho, agosto e setembro com 16% do total pluviométrico.

2.2.2 Variáveis meteorológicas

Foi utilizado dados coletados por estação meteorológica automática e convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada em cada município produtor, com intervalos de coleta diferenciados em função da época de instalação ou de funcionamento das estações (Tabela 1). Apesar das séries históricas terem sido pequenas em alguns municípios a indisponibilidade de informações de dados meteorológicos, tem feito com que diversas pesquisas dessa natureza sejam realizadas com series ainda menores (CARVALHO et al., 2015, p. 17; TANAKA et al., 2016, p. 91).

Os dados meteorológicos utilizados na presente pesquisa foram: temperatura média, máxima e mínima (°C); umidade relativa média (%); velocidade do vento ($m s^{-1}$), radiação solar global (kJ/m^2), para municípios com estação automática. Para o município de Tracuateua que possui estação convencional foi incluída a insolação (horas) para estimar a radiação solar global. Os dados foram tabulados em planilha eletrônica, em que se procedeu a uma análise de consistência.

Tabela1. Identificação das estações meteorológicas automáticas e convencional avaliadas nos municípios produtores de feijão caupi no estado do Pará.

| Codigo | Estação | Latitude (S) | Longitude (W) | Altitude (m) | Periodo (mês/Ano) |
|---------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 81685 | Bragança-A226 | -1.047258° | -46.785790° | 41 metros | 03/2008- 12/2015 |
| 81684 | Capitão Poço-A248 | -1.73472° | -47.0575° | 81 metros | 04/2011- 12/2015 |
| 82145 | Tracuateua-PA | -1.066667° | -46.9° | 36 metros | 01/2000- 12/2012 |
| 81682 | Castanhal-PA | -1.300875° | - 47.947967° | 47 metros | 01/2003- 12/2015 |

O preenchimento de falhas nos dados foi realizado através da média climatológica, nos dados de chuva foi utilizado o método de ponderação regional com base em regressão linear (BERTONI; TUCCI, 2007, p. 177). Este método consiste em estabelecer regressões lineares entre os postos com dados a serem preenchidos, P_x , e cada um dos postos vizinhos, P_1, P_2, \dots, P_N . De cada uma das regressões lineares efetuadas obtém-se o coeficiente de correlação, sendo o preenchimento realizado com base na seguinte expressão (Equação 1):

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n r_{P_x P_i} P_i}{\sum_{i=1}^n r_{P_x P_i}} \quad (1)$$

Em que:

$r_{P_x P_i}$ - coeficiente de correlação linear entre os postos vizinhos.

Posteriormente os dados meteorológicos foram organizados e utilizados na escala diária.

2.2.3 Estimativa da Evapotranspiração de referencia (ETo)

Por ser da mesorregião Metropolitana de Belém, os dados de ETo do município de Castanhal foram analisados separadamente dos municípios da mesorregião Nordeste Paraense. A ETo utilizada para avaliação dos modelos simplificados foi obtida com o método de Penman-Monteith-Fao 56 (equação 2), parametrizado pelo Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998, p.82). Onde foram utilizadas as variáveis temperatura e umidade do ar monitoradas e a velocidade do vento. Para aplicação do Método de Penman-Monteith-Fao 56 as demais variáveis foram obtidas de acordo com as recomendações de Allen et al.,(1998, p. 297).

$$ETo = \frac{0,408 \cdot \Delta (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{ar} + 273} \cdot U_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (2)$$

Em que:

ETo – evapotranspiração de referência ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Rn – radiação líquida ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{ar} – temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 – velocidade do vento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (es - ea) – déficit de pressão de vapor (kPa); $\Delta = \frac{(4098 \text{ es})}{(T + 237,3)^2}$ – a declividade da curva de pressão de vapor vs. temperatura ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); sendo $\gamma = \frac{c_p \times P}{0,622 \times \lambda}$ o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); a constante 0,408 corresponde a $1/\lambda$, em que λ é o calor latente de evaporação da água ($2,45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); e a constante 900, a um fator de conversão referente a escala diária de dados.

A ETo foi estimada por outros métodos de maior potencial de aplicação prática utilizando o programa computacional REF-ET (ALLEN, 2000, p. 82) de acordo com as equações descritas abaixo:

- Blaney-Criddle-FAO24 (Equação 3)

$$ETo = a + b[p(0,46T_{ar} + 8,13)] \quad (3)$$

em que:

a – coeficiente linear da relação entre ET_o e f , mm d^{-1} ; b - coeficiente angular da relação entre ET_o e f ; f - fator de uso consuntivo = $(p(0,46T_{ar} + 8,13))$; p – percentagem das horas de luz solar possível em relação ao total anual, para um dado mês e latitude; T_{ar} – temperatura média diária mensal ($^{\circ}\text{C}$).

$$a = 0,0043 \times UR_{min} - \left(\frac{n}{N}\right) - 1,41 \quad (4)$$

$$b = a_0 + a_1 + UR_{min} + a_2 \times \left(\frac{n}{N}\right) + a_3 U_d + a_4 \times UR_{min} \times \left(\frac{n}{N}\right) + a_5 \quad (5)$$

Em que:

a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 correspondem a 0,8197; -0,0040922; 1,0705; 0,065649; -0,0059684; e 0,0005967, respectivamente.; UR_{min} - umidade relativa mínima diária (%); n - duração da insolação diária (h); N - duração máxima possível da insolação diária (h); U_d - velocidade diurna do vento (m s^{-1}).

- Camargo (Equação 6)

$$ET_o = F R_o T_{ar} ND \quad (6)$$

Em que: F fator de ajuste que varia de acordo com a temperatura média anual do local $F = 0,01$ para T até 23°C , $F = 0,0105$ para $T = 24^{\circ}\text{C}$, $F = 0,011$ para $T = 25^{\circ}\text{C}$, $F = 0,0115$ para $T = 26^{\circ}\text{C}$ e $F = 0,012$ para $T > 26^{\circ}\text{C}$; e ND é o número de dias do período; R_o radiação solar no topo da atmosfera (mmdia^{-1})

- Hargreaves-Samani (Equação 7)

$$ET_o = 0,0023R_o(T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot (T_{ar} + 17,8) \quad (7)$$

Em que:

T_{ar} é a temperatura média ($^{\circ}\text{C}$); T_{max} é a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} é a temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$).

- Makkink (Equação 8)

$$ET_o = 0,61 \times \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \times R_g - 0,12 \quad (8)$$

- Priestley-Taylor (Equação 9)

$$ETo = 1,26 \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot (Rn - G) \quad (9)$$

- Radiação-FAO24 (Equação 10)

$$ETo = (a + b) \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot Rg \quad (10)$$

Em que:

a – $-0,3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; b - fator de ajustamento, que depende da umidade relativa média (URm) e da velocidade do vento do período diurno (Ud).

$$b = 1,066 - 0,0013 \cdot URm + 0,045 \cdot Ud - 0,0002 \cdot URm \cdot Ud - 0,0000315 \cdot (URm)^2 - 0,0011 \cdot (Ud)^2 \quad (11)$$

- Turc (Equação 12)

$$ETo = \frac{0,013 \cdot T_{ar}}{T_{ar} + 15} (23,9 \cdot Rg + 50) \quad (12)$$

A ETo também foi estimada por uma função de Regressão múltipla (Equação 13) em função da radiação solar, déficit de pressão de vapor e a velocidade do vento.

$$ETo = 0,15 \cdot Rg + 0,75 \cdot DPV \cdot 0,26 \cdot U_2 \quad (13)$$

Quando necessário, foi estimada a radiação solar global (Rg) a partir da equação proposta por Angstrom e modificado por Prescott, utilizando os coeficientes sugeridos por Glover e McCulloch, semelhante ao realizado por Silva (2014, p. 333).

$$Rg = \left(a + b \frac{n}{N} \right) Ro \quad (14)$$

Onde, Rg é a Radiação solar global diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); n é o número de horas de brilho solar (h d^{-1}); N é o número máximo de horas de brilho solar (h d^{-1}), Ro é a Radiação extraterrestre, os quais foram obtidas de acordo com as recomendações de Allen et al., (1998, p. 297) e “a” e “b” propostos por Glover e McCulloch (1958) ($a=0,29 \cos(\text{latitude})$ e $b=0,52$).

2.2.4 Comparação entre os métodos

Procederam-se às comparações agrupando-se os dados diários em dois semestres que apresentam características climáticas distintas: um semestre mais úmido, abrangendo o período de janeiro a junho, e um semestre mais seco, julho a dezembro, com maior demanda evapotranspirométrica.

Após o cálculo das estimativas de ETo, foi feita análise de regressão utilizando um modelo linear, o qual comparou a equação de Penman-Monteith-FAO56 com os outros métodos a partir das equações geradas pela comparação, sendo dados obtidos por Penman-Monteith-FAO56 a variável dependente (x) e as outras equações a variável independente (y).

As equações que apresentaram um desempenho bom, ou seja, índice de confiança (c) de 0,71 a 0,80 e um erro quadrático bom ou aceitável de 10% a 30%, foram acrescentados coeficientes de ajuste e novamente correlacionados com a equação de Penman-Monteith-FAO56, para verificar a correção através da equação gerada. Metodologia coincidente à utilizada por Oliveira et al., (2015, p. 790) para comparar vários métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56.

A análise de desempenho dos modelos, foi feita comparando os valores de ETo obtidos pelos métodos alternativos com o método de Penman-Monteith-FAO 56 (ALLEN, 2000, p. 82), utilizando o índice de concordância de WILLMOTT et al., (1985, p. 8995) em percentual (**d**) (Equação 15) e o erro quadrático médio (RMSE), (Equação 16), desta forma ambos os indicadores variam de 0 a 100%. O melhor modelo deve apresentar elevados valores de **d** e reduzidos valores de RMSE, pois os mesmos indicam a exatidão e o erro das estimativas.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P-O)^2}{\sum_{i=1}^N [(|P-\bar{O}|) + (|O-\bar{O}|)]^2} \quad (15)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P-O)^2}{N}} * \frac{100}{\bar{O}} \quad (16)$$

Em que: *O* são os dados observados, *P* os dados estimados, \bar{O} média dos dados observados e *N* números de dados.

Tabela 2. Classificação da precisão do modelo de acordo com a raiz do erro quadrado médio (RMSE).

| Quadrado médio do erro % | Precisão do modelo |
|--------------------------|--------------------|
| <10 | Alta precisão |
| 10-20 | Boa precisão |
| 20-30 | Aceitável |
| >30 | Baixa precisão |

Fonte: JAMIESON et al. (1991)

As estimativas também foram classificadas de acordo com o coeficiente de confiança (*c*) descrito por Camargo e Sentelhas (1997, p. 79), o qual é o produto entre *r* (coeficiente de correlação Pearson) e *d*, (Equação 15).

$$c = r \cdot d \quad (17)$$

Tabela 3. Interpretação do desempenho do modelo, por meio, do valor de coeficiente de confiança (*c*).

| Valor de “ <i>c</i> ” | Correlação |
|-----------------------|------------|
| >0,90 | Ótimo |
| 0,81 a 0,90 | Muito bom |
| 0,71 a 0,80 | Bom |
| 0,51 a 0,70 | Mediano |
| 0,41 a 0,50 | Sofrível |
| 0,31 a 0,40 | Mau |
| < 0,30 | Péssimo |

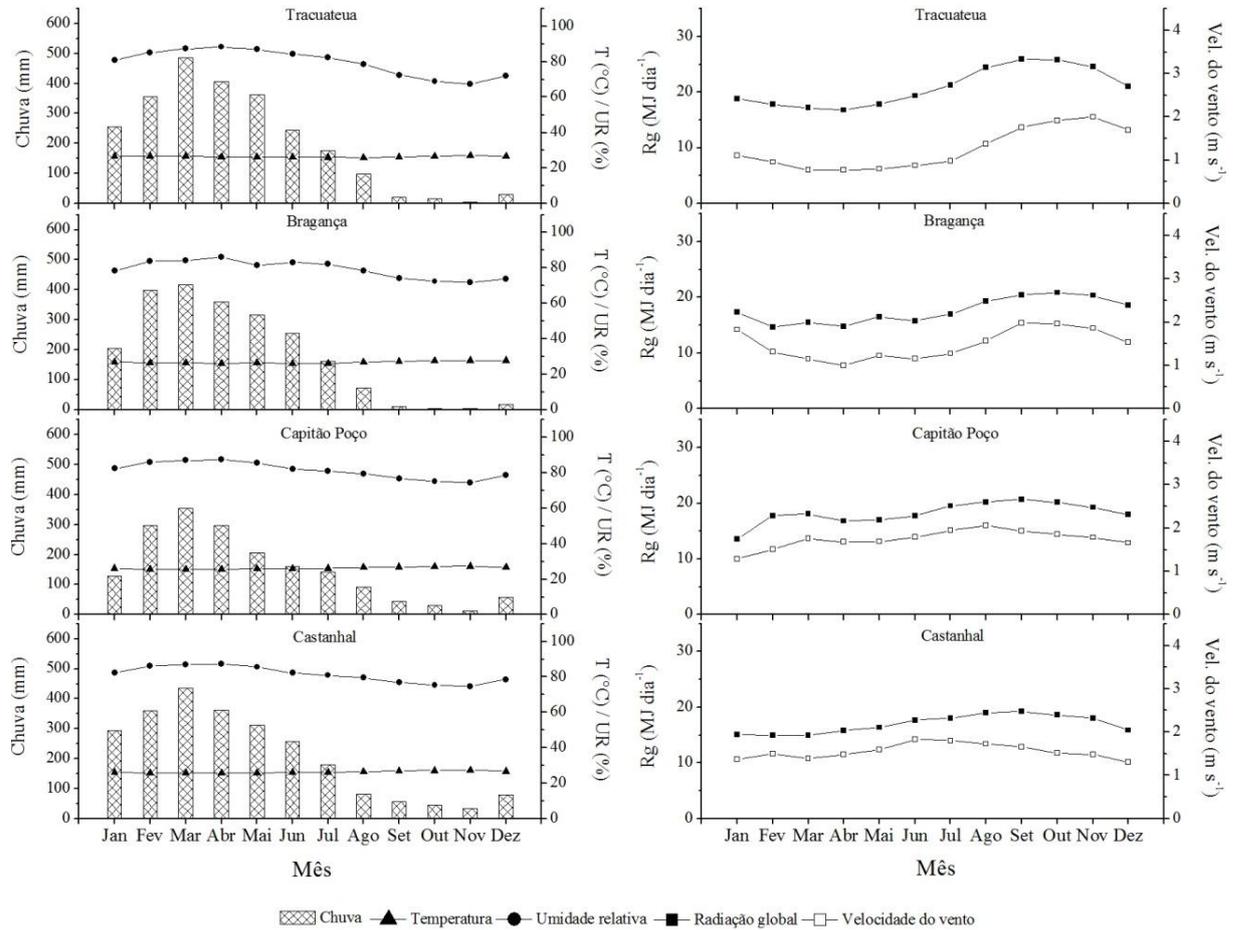
Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

2.3 Resultados discussão

Os elementos meteorológicos apresentados na Figura 1 são os de maior influência na estimativa de evapotranspiração, essenciais para o uso do método de Penman-Monteith-FAO 56. Os resultados demonstram claramente a existência de duas estações distintas em todos os municípios, pois observa-se que os meses de maior índice pluviométrico e os mais elevados valores de umidade relativa ocorrem entre janeiro e junho e que nos meses de julho a dezembro são encontrados valores mais baixos.

O município de Castanhal, por fazer parte da mesorregião Metropolitana de Belém, apresenta maior precipitação anual. Contudo, a maior demanda atmosférica ocorreu no período menos chuvoso em todos os municípios, pois no período mais úmido com baixos saldos de radiação disponível, o processo de evapotranspiração se torna dependente principalmente da interação aerodinâmica entre planta e atmosfera e apresenta redução dos níveis de ETo.

Figura 1. Variação média mensal dos elementos meteorológicos, Umidade Relativa do ar (%), Temperaturas media do ar ($^{\circ}\text{C}$), Radiação Solar ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$), Velocidade do Vento (m s^{-1}) e chuva (mm), da serie de dados dos municipios de Tracuateua, Bragança, Capitão Poço e Castanhal.



Nas figuras 2, 3, 4 e 5 observa-se que os métodos de Regressão, Turc e Blaney-Cridde FAO24 apresentaram os melhores comportamentos 1:1, ou seja, os coeficientes de reta “a” e “b” apresentaram valores muito próximo de zero e da unidade, respectivamente. O bom desempenho do método de Regressão já era esperado, pois a equação foi desenvolvida nas condições climáticas da região em estudo, além disso, inclui os elementos mais importantes no processo de evapotranspiração (CHANG, 1971, p. 129).

O método de Hargreaves-Samani apresentou superestimativa para valores abaixo de 5 mm dia^{-1} , uma justificativa para esse resultado é que em regiões de clima úmido, principalmente na faixa tropical, os métodos que se baseiam apenas na temperatura do ar e na radiação, tendem a superestimar a evapotranspiração de referência, pois apesar da elevada quantidade de energia, a alta umidade relativa reduz a evapotranspiração devido o ar estar sempre próximo da saturação (LEMONS FILHO et al., 2010, p. 24), uma vez que a umidade

relativa do ar é um dos fatores determinantes do déficit de pressão de vapor, que é um indicador da capacidade evaporativa do ar.

Contudo o método subestimou a ETo estimada por Penman-Monteith FAO 56 para valores acima de 5 mm dia^{-1} , quando a evapotranspiração alcança valores altos a umidade relativa está mais baixa e conseqüentemente o déficit de pressão de vapor mais alto, porém, esses elementos não são contabilizados pelo método Hargreaves-Samani, não permitindo que os valores estimados por ele se elevem em tais condições.

Importante ressaltar ainda que o método Hargreaves-Samani possui baixa exatidão e precisão (Tabela 4 e 5) para todos os municípios estudados, e quando analisado de forma sazonal apresenta pequena melhora no r^2 para o período menos chuvoso (Figura 3 e 4). Tal resultado possivelmente está associado ao fato desse método ter sido ajustado para as condições semiáridas da Califórnia (SAMANI, 2000, p. 265) e ainda decorrente das pequenas diferenças observadas entre temperaturas máxima e mínima, que influenciaram as condições de umidade do ar na região (SAMANI, 2000).

O método de Camargo superestimou valores de ETo abaixo de 3 mm dia^{-1} , apresentando um comportamento parecido com o método de Hargreaves-Samani, com desempenho ainda pior. Provavelmente a justificativa é a mesma, já que esse método também se baseia apenas em variáveis de temperatura e radiação e possivelmente apresentou pior desempenho por utilizar a radiação no topo da atmosfera.

Apesar de alguns autores afirmarem que esse modelo tendeu a ser melhor em condições de maior nebulosidade (BORGES JÚNIOR et al., 2012, p. 380 ; SOUZA et al., 2011, p. 1), foi possível observar que houve um péssimo ajuste em todos os períodos e para todos os municípios, sendo esse desempenho mais afetado nos períodos mais chuvosos e para a cidade de Castanhal (Figura 4).

Os métodos da Radiação-FAO24 e de Priestley-Taylor também apresentaram elevados valores de r^2 tanto para os períodos quanto para os municípios avaliados, os quais demonstram a precisão da estimativa, no entanto, a adoção de coeficiente de determinação r^2 como o único critério de definição dos métodos de qualidade não é adequada, pois nota-se que ambos os métodos apresentaram desempenho bom ($c = 0,71-0,80$) e boa ou aceitável precisão (RMSE= 15% a 30%) (Tabela 4,5). Portanto o índice r^2 não estabelece o tipo e a magnitude das diferenças entre o valor estimado pelo método padrão e o valor previsto por métodos de estimação.

Ambos os métodos superestimaram a ETo no período mais e menos chuvoso e para todos os municípios. Araujo et al., (2012, p. 155) observaram superestimativas de ETo para o

método Radiação-FAO 24 em relação à Penman Monteith-FAO 56, em 23,86; 24,02 e 24,02% nos intervalos de 3; 5 e 7 dias, respectivamente.

O método de Priestley-Taylor foi desenvolvido para estimativa da evaporação de superfícies saturadas em uma atmosfera não saturada que é a condição normal da natureza (BARROS et al., 2009, p. 198; CAVALCANTE Jr. et al., 2011, p. 1699). Um padrão similar foi observado por Fanaya Júnior et al., (2012, p. 418) que identificaram uma superestimativa de ETo durante todos os meses do ano para o método de Priestley-Taylor na região de Aquidauana MS, Sanches et. al., (2015, p. 19) também observou superestimativa do método para a região Norte, porém com um desempenho bom da equação original e muito bom com a equação calibrada.

Figura 2. Regressão linear entre valores diários da evapotranspiração de referência (ETo) para o período mais chuvoso, estimados segundo o método de Penman-Monteith FAO 56 em relação aos demais métodos, para os municípios da mesorregião do Nordeste Paraense.

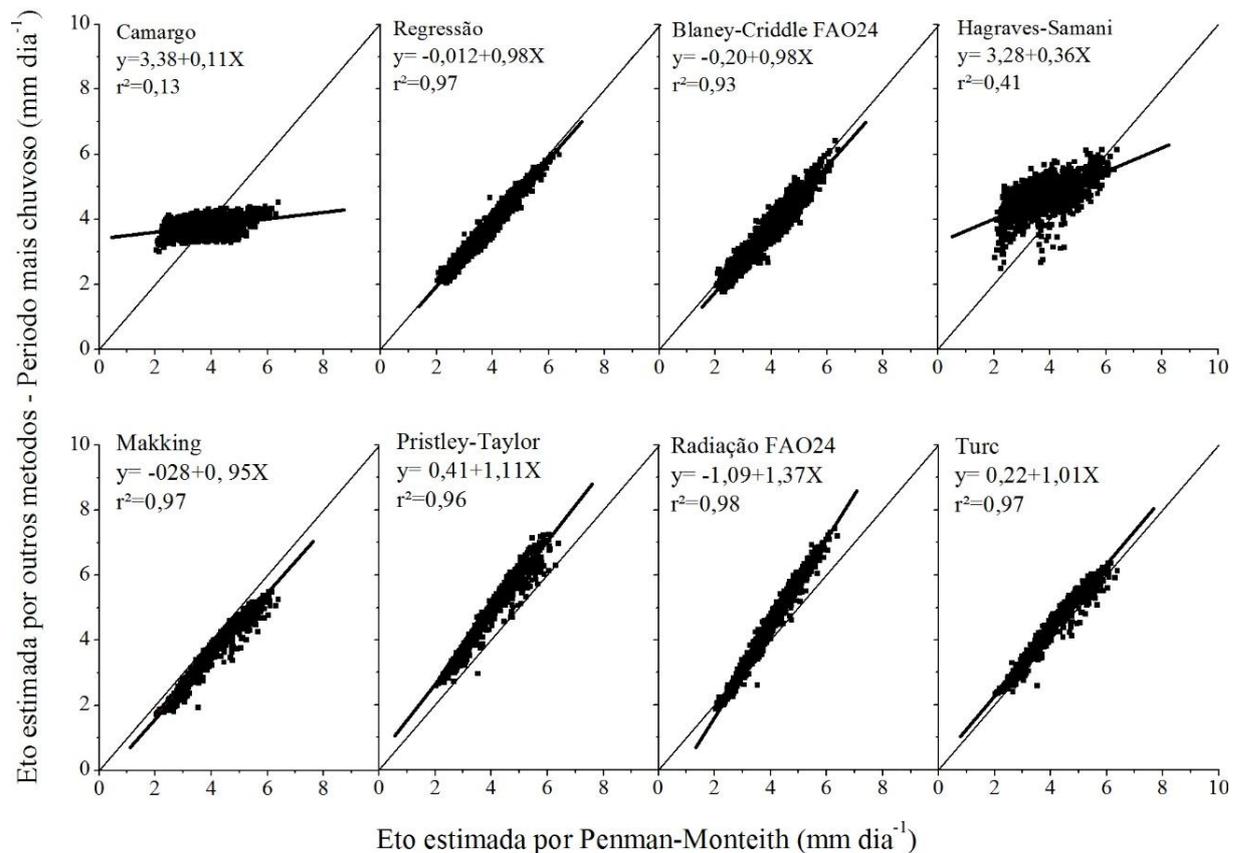
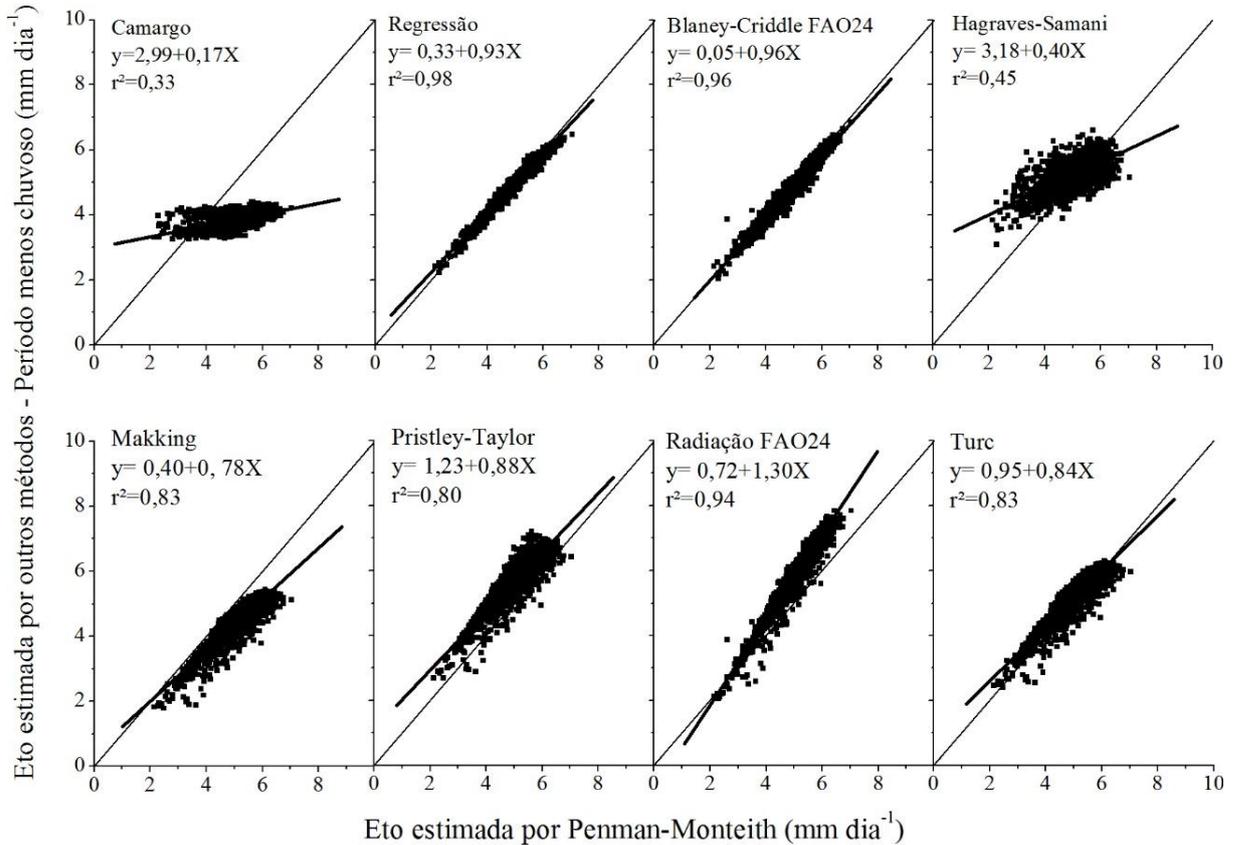


Figura 3. Regressão linear entre valores diários da evapotranspiração de referência (ET₀) para o período menos chuvoso, estimados segundo o método de Penman-Monteith FAO 56 em relação aos demais métodos, para os municípios da mesorregião do Nordeste Paraense.



O método de Makkink reduziu sua precisão do período mais chuvoso para o menos chuvoso nos municípios estudados (Figuras 2 e 3; 4 e 5). Cavalcante JR et al., (2011, p. 1699) obtiveram resultado semelhante ao avaliar o método de Makkink nas condições climáticas do Semiárido Nordestino. Esse comportamento se deve, provavelmente, ao fato dos coeficientes utilizados da equação original serem desenvolvidos nas condições climáticas de Wageningen, na Holanda.

Além disso, o método de Makkink é indicado para estimativa da evapotranspiração em períodos agrupados de 10 ou 30 dias (CAMARGO; CAMARGO, 2000, p. 125). Souza et al. (2011, p. 219) concluiu que métodos desenvolvidos para aplicação em período de dados maiores podem ser aplicados em menores intervalos, quando a cobertura de céu se aproxima das condições climáticas locais de origem do método.

Já o método de Turc que apresentou ótimo ajuste no mais chuvoso, também apresentou uma redução no período menos chuvoso. Além disso, apresentou ótimo desempenho nos

parâmetros estatísticos usados na análise da eficiência para todos os municípios estudados. A justificativa para esse índice positivo possivelmente se deve a comparação de dois métodos energéticos. Normalmente métodos que empregam a radiação solar apresentam desempenhos superiores aos que utilizam apenas valores de temperatura do ar.

Figura 4. Regressão linear entre valores diários da evapotranspiração de referência (ETo) para o período mais chuvoso, estimados segundo o método de Penman-Monteith FAO 56 em relação aos demais métodos, para o município de Castanhal..

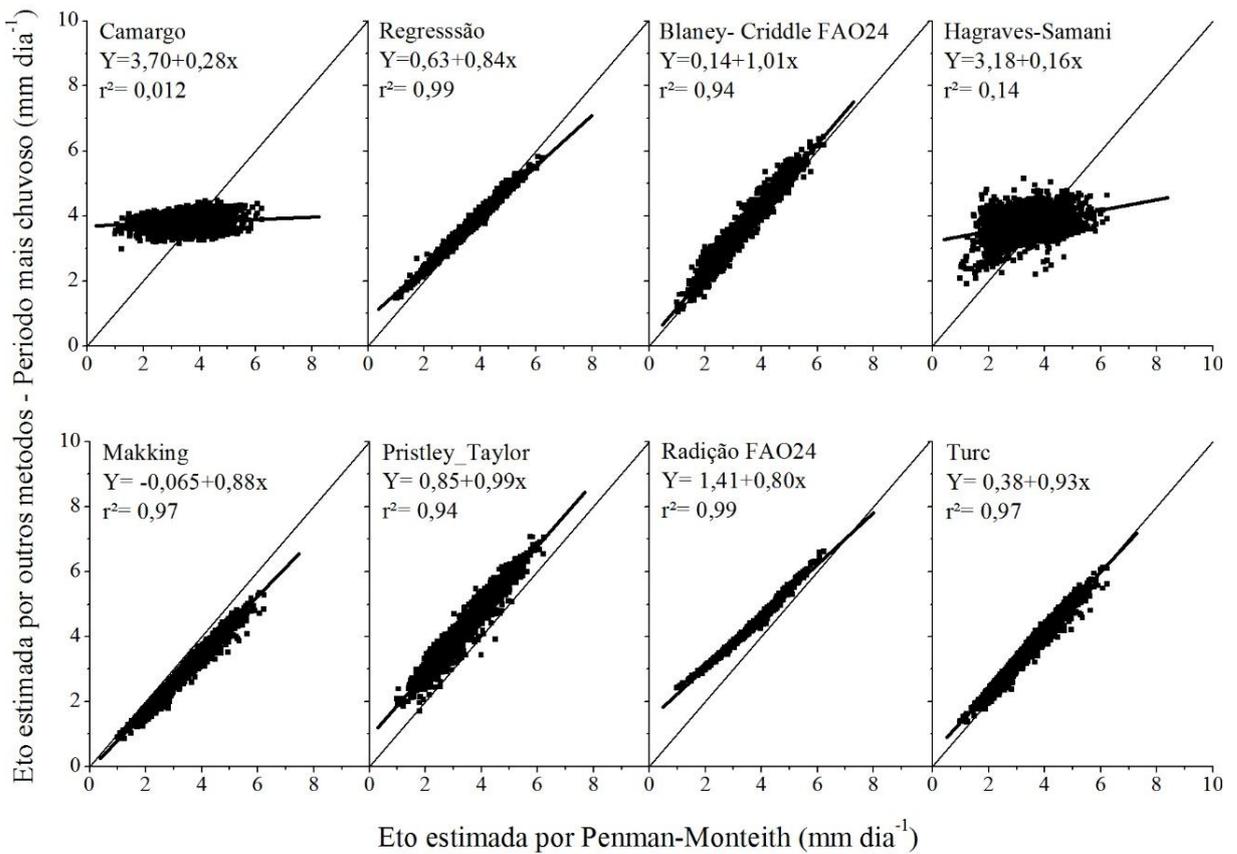
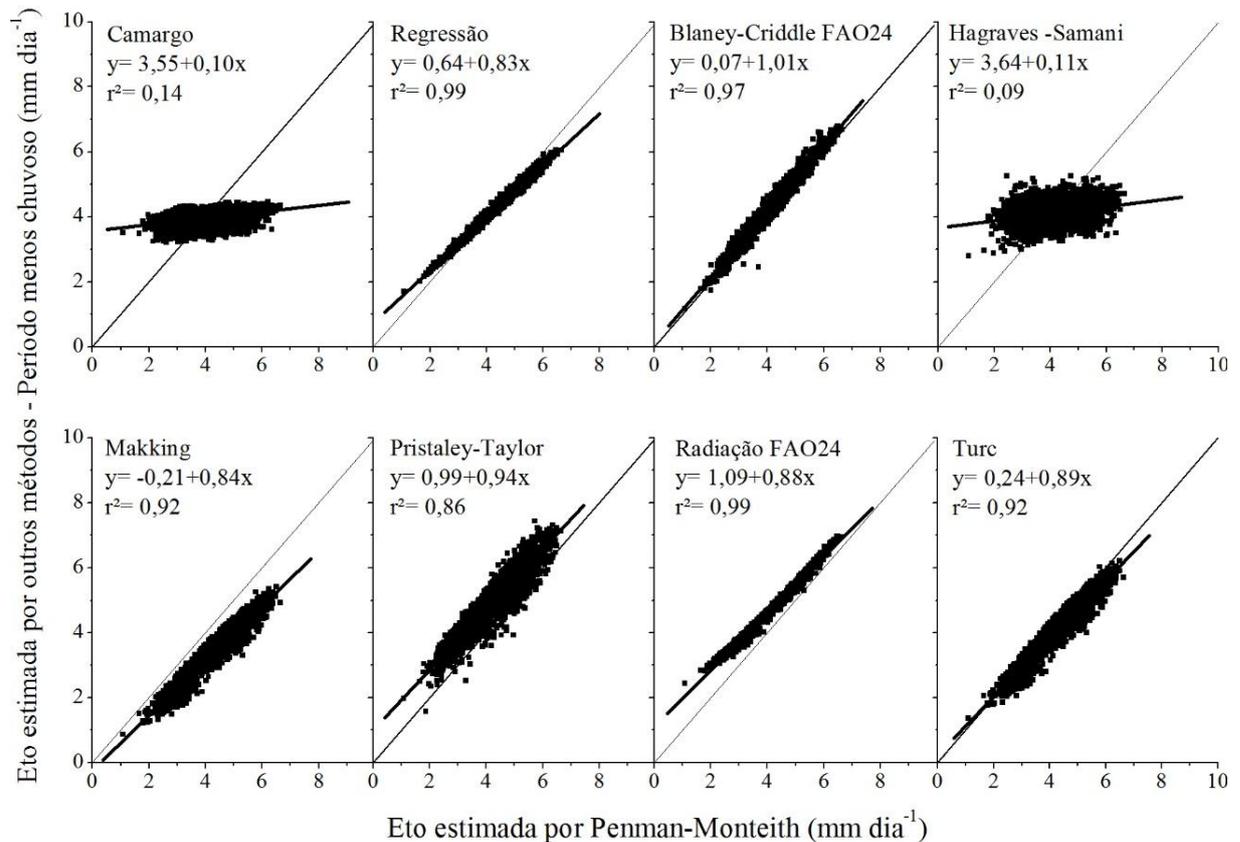


Figura 5. Regressão linear entre valores diários da evapotranspiração de referência (ET_o) para o período menos chuvoso, estimados segundo o método de Penman-Monteith FAO 56 em relação aos demais métodos, para o município de Castanhal.



Na Tabela 4 e 5 encontram-se parâmetros estatísticos do desempenho dos métodos avaliados em relação ao método padrão de Penman-Monteith FAO 56, para o período mais chuvoso e menos chuvoso, nos municípios da mesorregião Nordeste Paraense e no município de Castanhal. Os métodos de Regressão, Turc e Blaney-Criddle-FAO24 apresentaram melhores resultados em todos os parâmetros estatísticos avaliados, para todos os municípios, tanto no período mais chuvoso como no menos chuvoso ao método padrão, com baixos erros tanto no período mais chuvoso quanto no menos chuvoso.

O método Blaney-Criddle FAO 24 apresenta grande praticidade, pois requer somente dados de temperatura do ar e algumas informações médias do clima, sendo adequado para estimativas mensais de ET_o, além de ser a mais laboriosa que a dos outros métodos baseados em temperatura considerados neste trabalho, pois se aproximou dos métodos que utilizam a radiação solar como variável de entrada, com valor de “c” acima de 0,90.

Os demais métodos apresentaram menor precisão e exatidão, sendo os mesmos mais pronunciados nos meses de maior demanda evapotranspirométrica, que na região de estudo coincide com o período menos chuvoso. Os métodos que apresentam maiores erros em períodos de elevadas demandas poderão causar erros mais significativos no manejo da irrigação neste período do ano, uma vez que a evapotranspiração da cultura é estimada em função de E_{To} , sendo portanto interessante a escolha de métodos que não apresentem este tipo de comportamento, ou métodos que apresentem melhores resultados após ajustados.

Além de apresentar baixos valores de r^2 , o método de Hargreaves Samani apresentou um desempenho péssimo e sofrível nos dois períodos estudados, tanto para os municípios da mesoregião Nordeste Paraense quanto para Castanhal (Tabela 4,5), portanto não é indicado para a região de estudo. Sanches et al. (2015, p.19) encontrou um desempenho péssimo para esse método na região Norte e mesmo após calibrado apresentou desempenho sofrível. Chagas et al., (2013, p. 351) também observaram um desempenho sofrível para esse método no período seco e encontraram superestimativa de 20,55% nos valores de E_{To} no município de Rio Real-BA. Ajustes inferiores para o método Hargreaves Samani também foram observados por Alencar et al. (2011, p. 337) para a cidade de Uberaba, MG.

O método de Camargo apresentou péssimo desempenho, além de RMSE altos, em todos municípios e em todos os períodos. Segundo Cunha et al., (2013, p. 735) o método de Camargo é derivado do método de Thornthwaite e funciona eficazmente para regiões de clima tropical e equatorial úmidos, mas para esta região de estudo apresentou péssimo desempenho (Tabela 4,5), não sendo, portanto recomendado para a região de estudo. Silva et al., (2014, p. 390) também observaram um péssimo desempenho para esse método ao estimar a E_{To} em Fernando de Noronha, em diferentes escalas temporais.

O péssimo desempenho do método de Camargo encontrado para todos os critérios de comparação com relação aos demais métodos, corrobora os resultados de Borges Junior et al., (2012, p. 380) para a microrregião de Garanhuns, PE, cujos resultados indicaram coeficientes de correlação igual a 0,24 e 0,54, para os períodos primavera-verão e outono-inverno, respectivamente.

O método Radiação Fao 24 apresentou ótimo desempenho no período mais chuvoso para os municípios da mesoregião Nordeste Paraense e bom desempenho e uma precisão boa e/ou aceitável para o período menos chuvoso em todos os municípios estudados. Sendo portanto, indicado para calibração de coeficientes afim de acarretar melhoria de desempenho desse método. O método de Radiação FAO 24, que é uma adaptação do método de Makkink, apresentou bom desempenho tanto na região de estudo como em outras regiões do País

(ALENCAR et al., 2011, p. 337); (CAVALCANTE JR. et al., 2011, p. 1699); (CUNHA et al., 2013, p. 735), (LACERDA; TURCO, 2015, p. 27).

O método de Priestley-Taylor apresentou melhor valores de r^2 nos períodos mais chuvosos, para os todos os municípios estudados, entretanto, o método apresentou um desempenho bom (Tabela 4,5) para todos os períodos. Cavalcante Jr. et al., (2011, p. 1699) avaliaram este método como mau desempenho durante o período seco. Por outro lado, segundo os autores, este método apresentou uma significativa melhora no seu desempenho ao ser analisado na estação úmida.

Sanches et al. (2015, p. 19) também avaliaram esse método como bom antes da calibração e ótimo após a calibração para a região Norte. Silva et al., (2014, p. 390) verificaram, porém, que o método de Priestley-Taylor apresentou melhoras nos coeficientes de correlação, concordância e confiança, mudando seu desempenho de mediano para bom para a região de Fernando de Noronha quando analisado em intervalos de 10-10 dias.

O método de Makking apresentou ótimo desempenho no período menos chuvoso para todos os municípios, porém apresentou bom desempenho e RMSE bom (14,22%) e aceitável (22,13%) para período menos chuvoso. O fato deste método incorporar tanto o efeito energético através da radiação solar e parâmetros de psicrometria, pode dar ao mesmo maior eficiência e robustez na estimativa da ETo. Para o estado do Pará (SILVA; COSTA, 2000, p. 418), esse método apresentou ótima precisão na estimativa da ETo, quando comparadas ao método padrão.

Tabela 4. Classificação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo em relação ao método Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária para municípios da mesorregião Nordeste Paraense, no período mais chuvoso e menos chuvoso.

| Municípios da Mesorregião Nordeste Paraense | | | | | |
|--|------|------|------|-------|-----------------|
| Período mais chuvoso | | | | | |
| Métodos | D | r | c | RMSE% | Classificação * |
| Camargo | 0,42 | 0,36 | 0,16 | 22,82 | Péssimo |
| Regressão | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 5,06 | Ótimo |
| Blaney-Criddle FAO24 | 0,96 | 0,96 | 0,92 | 10,12 | Ótimo |
| Hargreaves-Samani | 0,61 | 0,64 | 0,39 | 30,16 | Péssimo |
| Makkink | 0,93 | 0,98 | 0,92 | 12,81 | Ótimo |
| Priestley-Taylor | 0,81 | 0,98 | 0,79 | 22,84 | Bom |
| Radiação FAO 24 | 0,95 | 0,99 | 0,94 | 13,02 | Ótimo |
| Turc | 0,97 | 0,98 | 0,95 | 8,66 | Ótimo |
| Período menos chuvoso | | | | | |
| Métodos | D | r | c | RMSE% | Classificação * |
| Camargo | 0,48 | 0,57 | 0,27 | 26,04 | Péssimo |
| Regressão | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 2,74 | Ótimo |
| Blaney-Criddle FAO24 | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 4,00 | Ótimo |
| Hargreaves-Samani | 0,75 | 0,67 | 0,50 | 11,40 | Sufrível |
| Makking | 0,80 | 0,91 | 0,72 | 14,22 | Bom |
| Priestley-Taylor | 0,83 | 0,89 | 0,74 | 13,23 | Bom |
| Radiação FAO 24 | 0,92 | 0,97 | 0,80 | 15,82 | Bom |
| Turc | 0,95 | 0,91 | 0,86 | 6,44 | Muito bom |

Classificação*: Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 5. Classificação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo em relação ao método Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária para o município Castanhal, no período mais chuvoso e menos chuvoso.

| Castanhal | | | | | |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|-----------------|
| Período mais chuvoso | | | | | |
| Métodos | d | r | c | RMSE% | Classificação * |
| Camargo | 0,25 | 0,11 | 0,027 | 31,64 | Péssimo |
| Regressão | 0,98 | 0,99 | 0,98 | 5,85 | Ótimo |
| Blaney-Criddle FAO24 | 0,96 | 0,96 | 0,93 | 11,02 | Ótimo |
| Hargreaves-Samani | 0,48 | 0,38 | 0,18 | 28,8 | Péssimo |
| Makkink | 0,92 | 0,98 | 0,91 | 14,82 | Ótimo |
| Priestley-Taylor | 0,83 | 0,97 | 0,80 | 25,71 | Bom |
| Radiação FAO 24 | 0,81 | 0,99 | 0,80 | 13,93 | Bom |
| Turc | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 7,19 | Ótimo |
| Período menos chuvoso | | | | | |
| Métodos | d | r | c | RMSE% | Classificação * |
| Camargo | 0,38 | 0,38 | 0,14 | 22,01 | Péssimo |
| Regressão | 0,98 | 0,99 | 0,98 | 6,84 | Ótimo |
| Blaney-Criddle FAO24 | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 5,24 | Ótimo |
| Hargreaves-Samani | 0,44 | 0,29 | 0,13 | 21,97 | Péssimo |
| Makkink | 0,78 | 0,95 | 0,75 | 22,13 | Bom |
| Priestley-Taylor | 0,85 | 0,92 | 0,78 | 18,91 | Bom |
| Radiação FAO 24 | 0,83 | 0,99 | 0,80 | 23,04 | Bom |
| Turc | 0,96 | 0,96 | 0,92 | 8,19 | Ótimo |

Classificação*: Camargo e Sentelhas (1997).

Foram definidos coeficientes de ajuste para as metodologias de Makkink, Priestley-Taylor e Radiação FAO 24 (Tabela 6 e 7). Depois de calculados os valores de ETo pelos modelos ajustados, aplicou-se regressão linear novamente. Os modelos ajustados tiveram comportamento 1:1, ou seja, os coeficientes de reta “a” e “b” apresentaram valores iguais a zero e a unidade, respectivamente. Os coeficientes de correlação de Pearson (r), como esperado, não sofreram alterações. Sendo por esse motivo, que foram ajustados somente as equações que apresentaram r e r² elevados, afim de ajustar os outros parâmetros.

Os parâmetros estatísticos d, c e RMSE apresentaram melhoras significativas para os métodos ajustados. É oportuno ressaltar que as calibrações foram somente no sentido de ajustar a tendência dos dados em relação ao estimado pelo Penman-Monteith FAO 56 e não alterou a dispersão dos dados. O desempenho do método Priestley-Taylor passou de bom para

ótimo no período mais chuvoso para todos os municípios estudados e para muito bom para o período menos chuvoso.

O método de Radiação FAO 24 também melhorou o desempenho passando de bom para ótimo no período mais chuvoso no município de Castanhal e de bom para muito bom para o período menos chuvoso, tanto para Castanhal como para os municípios da mesorregião Nordeste Paraense. O método de Makkink só foi ajustado para os períodos menos chuvoso de todos os municípios, passando o desempenho de bom para ótimo no município de Castanhal e para muito bom para os municípios da Mesorregião Nordeste Paraense. Apesar do estudo realizado por Sanches et al. (2015, p. 19) ser desenvolvido na região norte, o método de makking apresentou ajuste péssimo, porém, muito bom após calibrado.

Tabela 6. Classificação do desempenho dos métodos com os coeficientes de ajuste para a estimativa da ETo em relação ao método Penman-Monteith-FAO 56, para municípios da mesorregião Nordeste Paraense, no período mais chuvoso e menos chuvoso.

| Municípios da mesorregião Nordeste Paraense | | | | | | |
|--|------|------|------|-------|-----------|--|
| Período mais chuvoso | | | | | | |
| Métodos | d | R | C | RMSE% | Clas * | Equação com coeficientes de ajuste |
| Priestley-Taylor | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 4,49 | Ótimo | $E_{To} = \left[\frac{1,26 \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot (R_n - G)}{1,11} \right] - 0,41$ |
| Período menos chuvoso | | | | | | |
| Métodos | d | R | C | RMSE% | Clas * | |
| Makkink | 0,95 | 0,91 | 0,86 | 6,42 | Muito bom | $E_{To} = \left[\frac{0,61 \times \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \times R_g - 0,12}{0,78} \right] - 0,40$ |
| Priestley-Taylor | 0,94 | 0,89 | 0,83 | 6,86 | Muito bom | $E_{To} = \left[\frac{1,26 \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot (R_n - G)}{0,88} \right] - 1,23$ |
| Radiação FAO 24 | 0,98 | 0,97 | 0,95 | 4,65 | Muito bom | $E_{To} = \left[\frac{(a + b) \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot R_g}{1,30} \right] - 0,72$ |

Tabela 7. Classificação do desempenho dos métodos com os coeficientes de ajuste para a estimativa da ETo em relação ao método Penman-Monteith-FAO 56, para o município de Castanhal, no período mais chuvoso e menos chuvoso após a adição de coeficientes de ajuste.

| Castanhal | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|-------|-----------|--|
| Período mais chuvoso | | | | | | |
| Métodos | d | R | c | RMSE% | Clas * | Equação com coeficientes de ajuste |
| Priestley-Taylor | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 7,13 | Ótimo | $E_{To} = \left[\frac{1,26 \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot (R_n - G)}{0,99} \right] - 0,85$ |
| Radiação FAO 24 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 4,43 | Ótimo | $E_{To} = \left[\frac{(a + b) \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot R_g}{0,80} \right] - 1,41$ |
| Período menos chuvoso | | | | | | |
| Métodos | D | R | c | RMSE% | Clas * | |
| Makking | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 4,65 | Ótimo | $E_{To} = \left[\frac{0,61 \times \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \times R_g - 0,12}{0,84} \right] + 0,21$ |
| Priestley-Taylor | 0,96 | 0,93 | 0,84 | 6,86 | Muito bom | $E_{To} = \left[\frac{1,26 \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot (R_n - G)}{0,94} \right] - 0,99$ |
| Radiação FAO 24 | 0,96 | 0,99 | 0,87 | 6,42 | Muito bom | $E_{To} = \left[\frac{(a + b) \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot R_g}{0,88} \right] - 1,09$ |

Os métodos, Blaney-Criddle-FAO24, Turc e Regressão múltipla apresentam as melhores avaliações para todos os critérios estatísticos, quando comparados com o método de Penman-Monteith-FAO56, para todos os municípios sendo confiáveis para utilização na região. O método de Camargo e de Hargreaves-Samani apresentam avaliação inferior para todos os critérios de comparação com relação aos demais métodos.

Os demais métodos, embora melhores que os de Hargreaves-Samani e de Camargo, podem ser considerados menos exatos do que os dois citados como melhores (Blaney-Criddle-FAO24, Turc e Regressão. Contudo, após o ajuste, esses métodos apresentaram melhoras significativas, sendo aconselhável seu uso para os municípios estudados.

2.4 Conclusão

Tanto para os municípios da mesorregião Nordeste Paraense como para Castanhal o método Turc, Blaney-Criddle-FAO24 e a função de Regressão múltipla apresentaram as melhores avaliações para todos os critérios estatísticos, não necessitando de ajustes; os métodos Priestley-Taylor, Makking e Radiação FAO 24, melhoraram consideravelmente os após os ajustes, portanto as equações ajustadas podem ser utilizadas na região de estudo. O método de Camargo e Hargreaves-Samani obteve a pior avaliação para todos municípios e para todos os critérios de comparação com relação aos demais métodos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALENCAR, L.P.; DELGADO, R.C.; ALMEIDA, T.S.; WANDERLEY, H.S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências agrárias**. v.6, n.2, p.337-343, 2011.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO,. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998. 297p.

ALLEN, R. G. **REF-ET: Reference evapotranspiration calculator, Version 2.1**. Idaho: Idaho University. 2000. 82p.

ARAÚJO, W.F.; CONCEIÇÃO M.A.F.; VENANCIO J.B. Evapotranspiração de referência diária em boa vista (RR) com base na temperatura do ar. **Irriga**, Edição Especial, p.155 -169, 2012.

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. E SILVEIRA, A. L. L. (Eds.), **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2007, cap.5 p.177-242.

BORGES JÚNIOR, J.C.F; ANJOS, R.J.; SILVA, T.J.A.; LIMA, J.R.S.; ANDRADE, C.L.T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n. p.380-390. 2012.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

CAMARGO, A.P. de; CAMARGO, M.B.P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v.59, p.125- 137, 2000.

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

CARVALHO, D.F; ROCHA, H.S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.50, n.1, p. 17-26, jan. 2015.

CAVALCANTE JUNIOR, E.G.; OLIVEIRA, A.D.; ALMEIDA B.M.; SOBRINHO J.E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 32, suplemento 1, p.1699-1708, 2011.

CHAGAS, R.M.; FACCIOLI, G.G; AGUIAR NETTO, A.O.; SOUSA, I.F.; VASCO, A.N.; SILVA, M.G. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) no município de rio Real-BA. **Irriga**, v.18, n.1, p. 351-363, 2013.

CHANG, J. Evapotranspiration. In: CHANG, J. Climate and agriculture: an ecological survey. 2nd ed. Chicago: Aldine Publishing, 1971. p.129-143.

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.2 p.735-742. 2013.

FANAYA JÚNIOR, E. D.; LOPES, A.S.; OLIVEIRA, G.Q.; JUNG, L. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquidauana, MS. **Irriga**, v.17, n. 4, p.418-434, 2012.

Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará. **Boletim Agropecuário do Estado do Pará 2015**. Belém, nº 1, julho 2015. Disponível em: www.fapespa.pa.gov.br. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

LACERDA Z. C., TURCO J.E.P. Estimation methods of reference evapotranspiration (eto) for Uberlândia–MG. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p.27-38, 2015.

LEMOS FILHO, L.C.A.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A; CARVALHO, L.G. Spatial- temporal analysis of water requirements of coffee crop in Minas Gerais State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14 n. 2, p.24-33, 2010.

MOURA, A.R.C.; MONTENEGRO, S.M.L.; ANTONINO, A.C.D; AZEVEDO, J.R.G; SILVA, B.B.; OLIVEIRA, L.M.M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3 p.181 - 191. 2013.

OLIVEIRA, V.M.R.; DANTAS, G.F; PALARETTI, L.F.; DALRI, A.B.; SANTOS, M.G.; FISCHER FILHO, J.A. Estimativa de evapotranspiração de referência na região de Rio Paranaíba-MG. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 4, p. 790-798, outubro - dezembro, 2015.

PILAU, F.; BATTISTI, G.; SOMAVILLA, R.L.; RIGHI, E.Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, **Ciência Rural**, v.42, n.2,p.283-290. 2012.

REIS, E.F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G.O.; PEZZOPANE, J.E.M.; TAGLIAFERRE,C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, Chile, v.25,n.3, p.75-84. 2007.

SANCHES, F.M.; XIMENES, A.R., CORADI, P.C.; ROQUE, C.G.; CUNHA, F.F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil, **Revista de Ciências Agroambientais.**, v.13, n.2, p.19-31, 2015.

SAGRI. Secretaria Executiva de Agricultura do Estado do Pará, 2015. Dados Agropecuários. Disponível em: <<http://www.sagri.pa.gov.br/>>. Acesso em: 10 de Junho de 2015.

SCHWART, G. Manejo sustentável de florestas secundárias: espécies potenciais no Nordeste do Pará, Brasil. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v.3, n.5, p.125-147, 2007.

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.126, p.265- 267, 2000.

SILVA A. O. Coeficientes de angström-prescott e sua influência na radiação solar e ETo no perímetro irrigado de bebedouro em Petrolina. **Brazilian journal of biosystems Engineering**, v.8,n.4, p.333-342. 2014.

SILVA, M. M.; COSTA, A. C. L. Estudo comparativo da evapotranspiração em área de floresta de manguezal na região Bragantina-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CBM, 2000. p. 418-421.

SILVA, J.R.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS, T.E.M. ; SANTOS, E.S. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Fernando de Noronha. **Irriga**, v.19n., p.390-404. 2014.

SOUZA, R.O.R.M.; PANTOJA, A.V.; AMARAL, M.A.C.M. ; NETO, J.A.P. Cenário da agricultura irrigada no estado do Pará. **Irriga**, v.17, n.3,p.177-188. 2012.

SOUZA, L.P.; FARIAS, O.S.; MOREIRA, J.G.V; GOMES, F.A.;JUNIOR, E.F.F. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Cruzeiro do Sul – Acre. **Enciclopédia biosfera** , v.7, n. 13,p.1-8. 2011.

TANAKA, A. A.; SOUZA A. P.; KLAR, A.; SILVA A. C.; GOMES A.W.A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.51, n.2, p.91-104, fev. 2016.

WILMOTT, C.J.; ACKLESON, R.E.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M.; KLINK, D.R.; LEGATES, J.; ROWE C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of geophysical research**, p. 8995-9005. 1985.

3 DEMANDA HÍDRICA, COEFICIENTE DE CULTIVO E FATOR DE DESACOPLAMENTO DO FEIJÃO CAUPI NO PARÁ

RESUMO

O feijão caupi possui grande importância sócioeconômica para o estado do Pará, porém a região necessita de informações seguras quanto demanda hídrica, para promover um manejo adequado de irrigação no período considerado mais seco do ano. Assim, o objetivo da pesquisa foi determinar a demanda hídrica, coeficiente da cultura (K_c) e fator de desacoplamento nos diferentes estádios de desenvolvimento do feijão caupi em Castanhal-Pará. Com a evapotranspiração da cultura (ET_c) obtida por meio de lisímetros de drenagem, e a evapotranspiração de referência (ET_o) foram obtidos os coeficientes de cultura (K_c), utilizados, para ajustar modelos em função dos graus dias acumulados (GD) e índice de área foliar (IAF), o fator de desacoplamento foi estimado para indicar os fatores que estão governando a evapotranspiração. Os valores de ET_c atingiram um total acumulado durante o ciclo do feijão caupi de $267,73 \text{ mm} \pm 10,21 \text{ mm}$. O valor médio do fator de desacoplamento foi 0,66 indicando que a cultura do feijão caupi não desacopla totalmente da atmosfera nas condições climáticas do nordeste paraense. O K_c do feijão caupi apresentou valor médio de 0,8, 1,4 e 0,6 na fase vegetativa, fase reprodutiva e estágio final, respectivamente. O modelo Gaussiano apresentou ótimo ajuste para a estimativa dos valores K_c em função dos graus-dia acumulados e do IAF. Tais valores se diferenciam de alguns encontrados na literatura, o que reforça a necessidade da avaliação do coeficiente de cultura em condições locais e por métodos mais precisos.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata* L. Walp. Penman-monteith. Lisímetros. Fator de desacoplamento.

ABSTRACT

Cowpea has great socioeconomic importance in the Pará state. However, in order to provide suitable irrigation management during the dry period this region requires solid information regarding water demand by regional crops. This research aims to determine the water demand, the crop coefficient (Kc) and the uncoupling factor during the different development stages of cowpea in Castanhal-Pará. The crop evapotranspiration (ETc) was measured by drainage lysimeters. This information was coupled to the reference evapotranspiration (ETo) to obtain the crop coefficients, which were used to adjust the model function of accumulated degree-days and the leaf area index (LAI). The uncoupling factor was estimated to indicate the factors that control evapotranspiration. The ETc values reached a cumulative total of 267.73 mm \pm 10.21 mm during the cowpea cycle. The average value of the uncoupling factor was 0.66. This indicates that the cowpea crop does not fully uncouple from the atmosphere underneath the climatic conditions in northeast Pará. The cowpea Kc values presented averages of 0.8, 1.4 and 0.8 in the vegetative phase, reproductive phase and final stage, respectively. The Gaussian model showed an excellent fit for the estimation of Kc values based on accumulated degree days and the LAI. These amounts differ from others found in the literature. Therefore, it reinforces the necessity for an assessment of crop coefficients under local conditions and for the employment of more precise methods.

Key words: *Vigna unguiculata* L. Walp. Penman-monteith. Lysimeters. Factor decoupling.

3.1 Introdução

A cadeia produtiva do feijão caupi é uma importante fonte de emprego e renda na região do nordeste paraense, porém, dados mais atuais da Secretaria Executiva de Agricultura do Estado do Pará (SAGRI 2015) mostram que no período de 2012 o rendimento do Estado oscila de 850 a 650 kg ha⁻¹ e vem caindo desde 2003, essa condição pode estar relacionada tanto às condições de natureza técnica como climáticas. Considerando que a maior parte do Estado do Pará apresenta duas estações climáticas bem definidas (LOPES et al., 2013, p. 738) o plantio dessa cultura se restringe ao primeiro semestre do ano, durante o período mais chuvoso.

A produtividade do feijão caupi, na região, poderia ser maior com a adoção da irrigação para suprir a necessidade hídrica de forma total ou parcial, no período considerado menos chuvoso do ano, permitindo assim, a ampliação do período de cultivo e o aumento do número de safras. Contudo, o estado do Pará possui cerca de 29.333 ha de área irrigada, sendo que em 41% desta área são utilizados métodos de irrigação não tradicionais (SOUZA 2012). Isso reforça a necessidade de informações referentes a evapotranspiração para o estado do Pará, para subsidiar o adequado manejo de água e ainda para aplicação em modelos de previsão de crescimento e produção dessa cultura na região.

O fator de desacoplamento (Ω) é um indicativo da interação biosfera-atmosfera nos processos de evapotranspiração vegetal (SILVA et al., 2012, p. 249), que permite distinguir os fatores que influenciam a troca de vapor d'água com a atmosfera, ou seja, o grau de acoplamento entre a folha e atmosfera estabelece se a taxa de transpiração é principalmente controlada pelo déficit de pressão de vapor e a condutância estomática ou se pelo saldo de radiação.

A evapotranspiração pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, dentre os métodos diretos a lisimetria é o método mais antigo, (MARQUES et al., 2015, p.745), e pode potencialmente fornecer estimativas confiáveis, permitindo a contabilização dos termos do balanço hídrico de forma precisa. Os lisímetros podem ser divididos por duas categorias: de pesagem e de drenagem.

O lisímetro de pesagem é considerado mais preciso, porém mais caro. Os lisímetros de drenagem possuem vantagens quando comparado com o método de balanço hídrico no campo, pois o volume de solo vegetado é devidamente isolado, assim, todas as entradas e saídas de água desse sistema são controladas (SANTOS et al., 2009, p. 304). Porém, o isolamento das plantas pode interferir no consumo de água, crescimento e desenvolvimento quando comparado em condições de campo.

O Coeficiente da Cultura (K_c) é um parâmetro relacionado aos fatores ambientais e fisiológicos das plantas motivo pelo qual faz necessário a realização de experimentos para a determinação dos coeficientes de cultivo em âmbito regional. Valores experimentais de K_c para o feijão-caupi são encontrados na literatura para o nordeste paraense (AGUIAR et al., 1992, p.33), no entanto, os autores basearam-se na variação do teor de umidade do solo para estimar o consumo de água e obteve os dados de E_{To} a partir de dados de tanque classe A.

O estado do Pará não apresenta estudos referentes à demanda hídrica do feijão caupi com três anos de experimentação, nem informações técnicas disponíveis e atuais quanto à evapotranspiração obtida através de lisimetria, considerado por diversos autores uma ferramenta padrão devido sua precisão (SANTOS et al., 2009, p. 304; MARQUES et al., 2015, p. 745; BASTOS et al., 2008, p. 182). Portanto este estudo teve como objetivo determinar a demanda hídrica, coeficiente da cultura (K_c) e fator de desacoplamento nos diferentes estádios de desenvolvimento do feijão caupi no Nordeste Paraense.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área experimental

O experimento foi instalado à campo, na Fazenda Experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, situada no município de Castanhal-PA, ($1^{\circ}19'24.48''S$; $47^{\circ}57'38.20''W$). O clima da região segundo a classificação de Koppen é Af, com temperatura média anual de $26^{\circ}C$: máximas e mínimas de 35 e $18^{\circ}C$ e umidade relativa máxima de 95% e mínima de 79%. Precipitação média anual em torno de 2.571,6 mm, entretanto, durante os meses de janeiro, fevereiro e março concentra-se cerca de 35% dessa chuva, ou seja, esse trimestre é caracterizado como o mais chuvoso. E o trimestre menos chuvoso compreende os meses de julho, agosto e setembro com 16% do total pluviométrico e o mês menos chuvoso é o de setembro, o qual apresenta apenas 4% de toda precipitação.

O experimento ocorreu nos anos de 2013, 2014 e 2015 no período de setembro a novembro em uma área de $15.000m^2$ nos dois primeiros anos e em uma área de $3.168m^2$ no ano de 2015.

As sementeiras foram realizadas manualmente na área dos lisímetros e ao redor deles, com uma taxa de treze a quinze sementes/ m^2 com espaçamento de 50 cm entre linhas, após o desbaste a densidade foi de dez plantas por metro linear. Realizaram-se, durante a condução do experimento, tratamentos culturais, de modo a manter a área livre de plantas invasoras, doenças e pragas. A cultivar utilizada foi a BR3-Tracuateua, de hábito de crescimento indeterminado,

porte prostrado, ciclo de 60-70 dias, sendo a mais recomendada para as condições edafoclimáticas do nordeste paraense (FREIRE FILHO et al., 2009, p. 749).

3.2.2 Caracterização físico-química e hídrica do solo

Para a caracterização química do solo em estudo, foram coletadas amostras na área experimental, nas profundidades de 0 a 20 cm e para análise física foram coletadas amostras da área experimental e de dentro dos lisímetros (após um mês de instalados), nas profundidades de 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm. Posteriormente, as amostras foram enviadas ao Laboratório de Solos da EMBRAPA Amazônia oriental para a realização das análises. Dados obtidos de análise física estão apresentados na Tabela 8 e de análise química do solo na Tabela 9.

Tabela 8. Dados de análise física do solo das áreas experimentais nos anos de 2013, 2014, e 2015 e dos lisímetros. Fazenda Escola da UFRA, Castanhal-PA.

| Ano | Amostras | Areia (Area/Lis.) | Silte (Area/Lis.) | Argila (Area/Lis.) | Densidade (Area/Lis.) |
|------|----------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | % | | | g cm^{-3} |
| 2013 | 0-15 | 72/72 | 16/16 | 12/12 | 1,52/1,40 |
| | 15-30 | 70/71 | 15/15 | 15/14 | 1,35/1,25 |
| | 30-45 | 70/72 | 14/13 | 16/15 | 1,62/1,40 |
| | 45-60 | 70/70 | 16/16 | 14/14 | 1,51/1,32 |
| 2014 | 0-15 | 73/74 | 14/14 | 13/12 | 1,41/1,23 |
| | 15-30 | 71/71 | 16/16 | 13/13 | 1,69/1,52 |
| | 30-45 | 71/72 | 17/16 | 12/12 | 1,62/1,46 |
| | 45-60 | 71/71 | 16/16 | 13/13 | 1,44/1,27 |
| 2015 | 0-15 | 72/73 | 15,5/15 | 12,5/12 | 1,61/1,39 |
| | 15-30 | 70/71 | 15/15 | 15/14 | 1,89/1,69 |
| | 30-45 | 70/70 | 16/16 | 14/14 | 1,66/1,48 |
| | 45-60 | 70/71 | 16/16 | 14/13 | 1,58/1,39 |

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental (2013,2014 e 2015).

A adubação química foi realizada conforme resultado da análise química do solo, obtida no laboratório de solos da EMBRAPA Amazônia Oriental, a qual indicou uma adubação de

fundação de 0:60:45 kg há⁻¹ NPK para o primeiro ano, 0:40:45 kg há⁻¹ NPK para o segundo ano e 0:60:45 kg ha⁻¹ de NPK para o terceiro ano de experimento.

Tabela 9. Dados da análise química do solo para as áreas experimentais nos anos de 2013, 2014 e 2015, Fazenda Escola UFRA, Castanhal-PA.

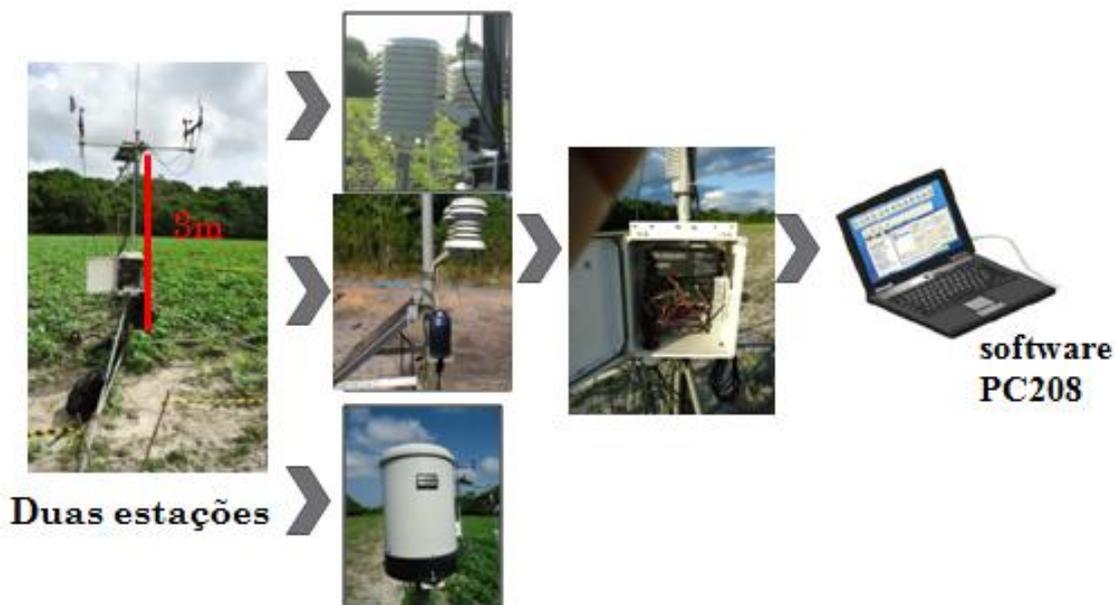
| Características | Unidades | Amostras (0 a 20 cm) | | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------|------|------|
| | | 2013 | 2014 | 2015 |
| Ph (H₂O) | | 4,9 | 4,6 | 4,9 |
| N | % | 0,04 | 0,06 | 0,05 |
| P | mg.dm ⁻³ | 1 | 10 | 2 |
| K⁺ | | 12 | 9 | 11 |
| Na | | 10 | 2 | 6 |
| Ca⁺ | | 0,5 | 1,4 | 0,5 |
| Ca⁺ + Mg | cmol _c dm ⁻³ | 0,8 | 2,1 | 0,8 |
| Al⁺ | | 0,5 | 0,4 | 0,8 |

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental (2013, 2014 e 2015).

3.2.3 Instrumentação e coleta de dados agrometeorológicos.

Dois Estações meteorológicas (Figura 6) foram instaladas na área experimental para medir as variáveis meteorológicas necessárias a qual foi equipadas com sensores de temperatura e umidade do ar, em dois níveis (2,0m acima do solo e 0,5m acima do dossel da cultura), precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade do solo. Todos os sensores foram conectados a um *datalogger* CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). Ambos programados para efetuar a leitura dos sensores a cada 10 segundos, com gravação das médias e dos totais a cada 10 minutos.

Figura 6-Estação meteorologica, sensores,datalogger CR10X e programa utilizado na coleta de dados meteorologico na area experimental.

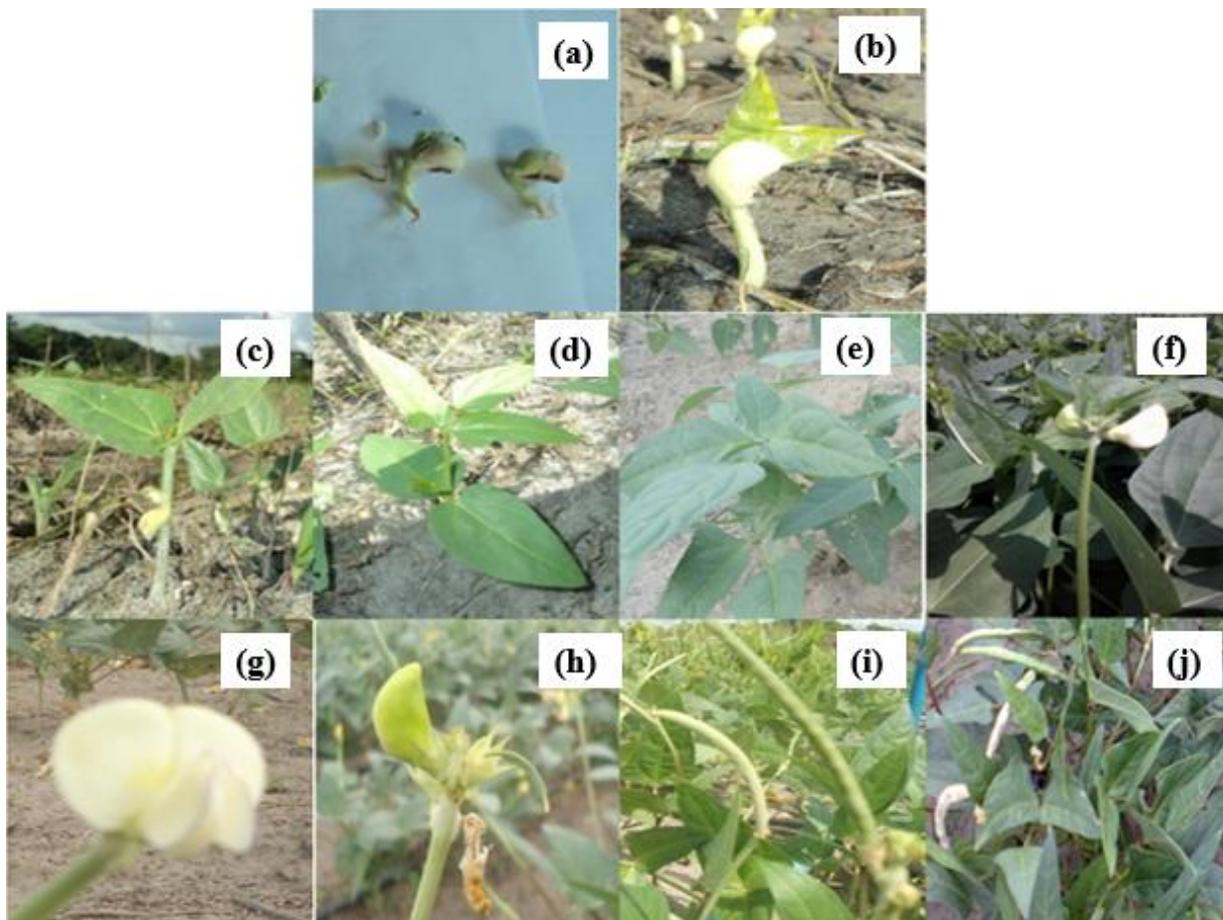


Os sensores foram alimentados por energia solar coletada por placas solares instaladas na porção superior da torre. Semanalmente os dados foram coletados através do software PC208. A altura dos sensores foi alterada com o crescimento da cultura, mantendo-se sempre o mesmo intervalo do perfil (0,5-2m) garantindo que os mesmos permanecessem dentro da camada limite de equilíbrio (ROSEMBERG et al., 1983, p. 495).

3.2.4 Desenvolvimento fenológico

O desenvolvimento fenológico foi avaliado diariamente usando a escala proposta por Gepts e Fernández (1982, p.10) (Figura 7). Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com oito repetições. Cada repetição consistiu de linhas de 1 metro de comprimento, contendo em média 10 plantas, as quais foram monitoradas a partir da emergência. Definiu-se como o início de um determinado estágio fenológico, o instante em que 50% + 1 das plantas da linha atingiram o estágio em questão. Assim, a frequência de ocorrência das fases era o principal critério para determinar a evolução fonológica (GUIUNTA et al.,2009, p.74)

Figura 7-Fases fenológicas vegetativas, V0(a), V1(b), V2(c), V3(d), V4(e) e reprodutivas R5(f), R6(g), R7(h), R8(i), R9(j) do feijão caupi.



Fonte: Vivian Farias

3.2.5 Condução e coleta de dados

A altura da planta foi avaliada diariamente assim como o desenvolvimento fenológico, em um experimento inteiramente casualizado, com oito repetições de um metro linear de plantas.

A análise da área foliar se deu pela amostragem aleatória de plantas nas linhas do plantio onde os lisímetros foram instalados. Para isso, um conjunto de plantas foi coletado semanalmente em um metro linear contendo dez plantas.

A área foliar foi obtida através do método dos discos (BENINCASA, 2003, p. 41). O método consiste em fazer uma relação entre um disco foliar de área e peso conhecido e o peso total do restante das folhas (MS). Para retirada dos discos foi utilizado um vazador de 2cm de diâmetro (3,14 cm²), sendo três discos de cada planta (30 discos por amostra) os quais foram secos em estufa junto com o resto do material. A área foliar foi estimada através das Equações 18 e 19.

$$Af = \frac{Ad * (Pd + Pf)}{Pd} \quad (18)$$

$$Ad = (\pi r^2) * nd \quad (19)$$

Em que:

Af é a área foliar; Ad , área dos discos; Pd , peso seco dos discos; Pf , peso seco do resto das folhas; e nd , número de discos, r o raio e $\pi = 3,1416$

A área foliar específica (AFE) foi estimada através da razão entre área foliar e o peso seco das folhas (Equação 20).

$$AFE = \frac{Af}{(Pd + Pf)} \quad (20)$$

Em que:

Af é a área foliar; Pd , peso seco dos discos; Pf , peso seco do resto das folhas.

O índice de área foliar (IAF) foi estimado considerando a MSf e a AFE, conforme a Equação 21.

$$IAF = MSf * AFE \quad (21)$$

em que MSf é a matéria seca da folha e AFE é a área foliar específica.

3.2.6 Necessidade térmica

A necessidade térmica foi obtida para cada fase fenológica da cultura, seguindo a teoria dos graus dias ou tempo térmico (GD). Os valores diários de GD, foram calculados pela Equação 22 descrita por Ometto (1981), pois foi a que abrangeu as condições térmicas no período do experimento.

$$Tb < Tmin; Tmax < TB$$

$$GD = \left[\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right] + (T_{\min} - Tb) \quad (22)$$

Em que:

GD é a soma térmica em graus dias; T_{\max} e T_{\min} são as temperatura do ar, máxima e mínima respectivamente em escala diária ($^{\circ}C$); Tb é a temperatura basal inferior da cultura abaixo da qual o desenvolvimento é bastante reduzido. Neste estudo considerou-se a $Tb = 9^{\circ}C$ e $TB = 38^{\circ}C$ (FARIAS et al., 2015, p.1781).

3.2.7 Evapotranspiração de referência (ET_o).

Os valores diários de Evapotranspiração de Referência (ET_o) foram calculados pelo método de Penman-Montheith FAO 56 (ALLEN et al., 1998, p. 299) (Equação 23) com dados

obtidos na Estação Meteorológica automática do INMET em Castanhal, localizada a aproximadamente 3 Km da área experimental.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{ar} + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (23)$$

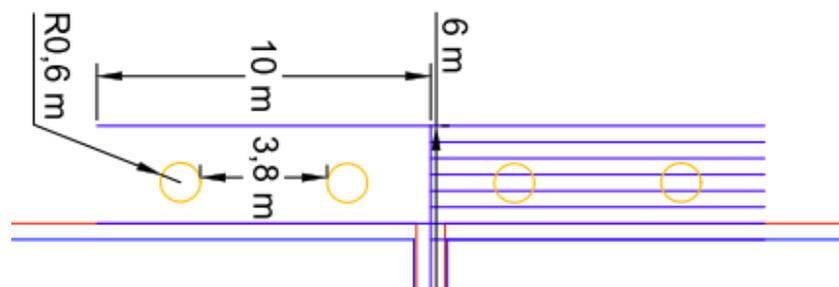
Em que:

ET_o é a evapotranspiração de referência ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n a radiação líquida ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{ar} a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 a velocidade do vento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $(e_s - e_a)$ déficit de pressão de vapor (kPa); $\Delta = \frac{4098 \cdot e}{(T + 237,3)^2}$ a declividade da curva de pressão de vapor vs. temperatura ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); sendo $\gamma = \frac{c_p \times P}{0,622 \times \lambda}$ o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); a constante 0,408 corresponde a $1/\lambda$, em que λ é o calor latente de evaporação da água ($2,45 \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); e a constante 900, a um fator de conversão referente a escala diária de dados.

3.2.8 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi monitorada diariamente, pelo método direto, utilizando-se quatro lisímetros de drenagem idênticos instalados na extremidade do experimento, com capacidade volumétrica de 500 L, construídos a partir de caixas de água de plástico, em formato cônico, e com as seguintes medidas: diâmetros superior e inferior de 1,20 m e 0,98 m, respectivamente, e profundidade de 0,60 m, semelhante aos trabalhos de Santos et al. (2009, p. 304) e Marques et al. (2015, p. 745).

Figura 8. Disposição dos lisímetros de drenagem na área experimental.

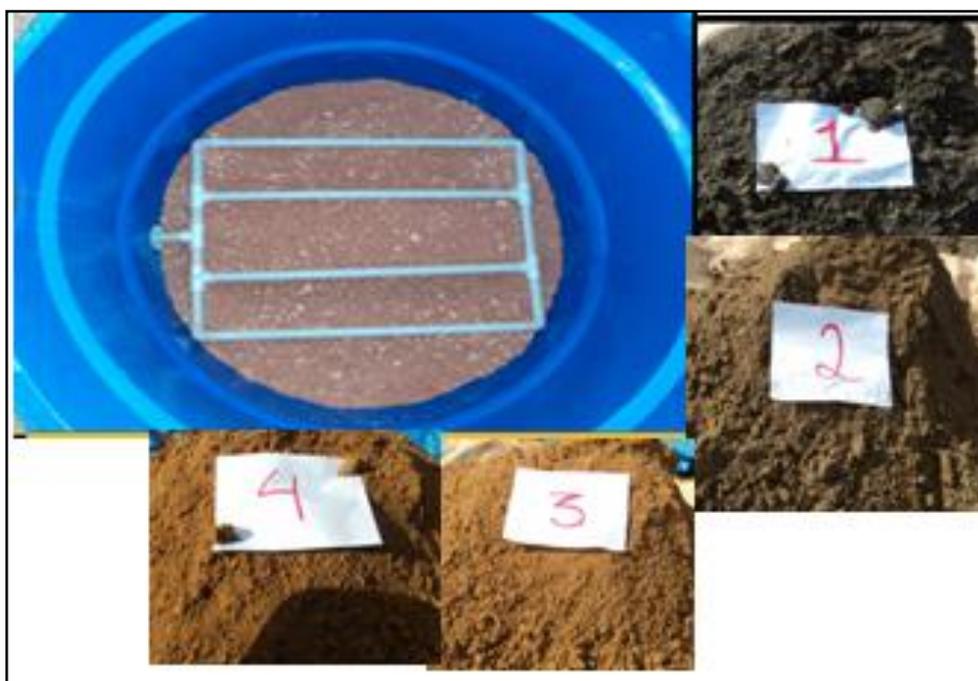


No local da instalação, foi realizada a separação das camadas de solo (Figura 9) escavando-se, manualmente, o solo em quatro camadas de 15 cm, até profundidade igual a 60 cm. Em cada camada foram coletadas amostras de solo para caracterização física para manter

ao máximo possível as condições e características iniciais do solo dentro dos lisímetros. Posteriormente o preenchimento das caixas foi feito colocando-se as camadas de solo na ordem inversa de sua retirada.

Para cada camada completada, o solo recebeu uma leve compactação para promover uma maior acomodação deste solo dentro das caixas, lembrando que tal procedimento foi feito com o solo seco, evitando assim uma compactação maior das camadas de solo.

Figura 9. Sistema de drenagem do lisímetro e camadas do solo separadas a cada 15 cm.



O sistema de drenagem dos lisímetros foi do tipo gravitacional, com um dreno em PVC, de 25 mm de diâmetro, conectado a um poço de observação e coleta do volume drenado, com 1,5 m de profundidade semelhante a metodologia proposta por Marques et al., (2015, p. 745). Seguindo a metodologia de Oliveira (2007, p. 111), a ordem do sistema de drenagem livre no fundo do tanque foi a seguinte: 5 cm de brita tipo cascalhinho, a tubulação em PVC de 25 mm de diâmetro, em forma de retângulo e perfurada na parte superior e lateral com orifícios espaçados de 5 cm, outra camada de brita de 15 cm e manta geotêxtil de poliéster para evitar possíveis entupimentos dos orifícios de drenagem. A água drenada foi coletada no poço de observação do lisímetro de drenagem sendo o volume drenado quantificado com provetas graduadas em mm.

A água precipitada foi medida por um pluviômetro instalado na estação localizada na área experimental, sendo o volume precipitado dentro dos lisímetros determinado a partir da

lâmina de chuva medida e área de interceptação do mesmo. Após o período de um mês, foram semeadas treze sementes por metro linear, que posteriormente foram desbastadas, totalizando dez plantas por metro linear e 20 plantas em cada lisímetro (Figura 10).

Figura 10. Plantas de feijão caupi cultivar BR3 Tacuateua plantadas em cima e ao redor dos lisímetros.



Estimou-se a ET_c nos lisímetros utilizando-se o balanço hídrico aplicado a um volume de controle de solo conforme a Equação 24 (SANTOS et al., 2009, p. 304).

$$ET_c = P + I - D \quad (24)$$

Em que:

P a precipitação; I é a irrigação; D é a drenagem; ET_c evapotranspiração da cultura. Para o caso em questão, os termos ascensão capilar e o escoamento superficial foram desprezados.

3.2.9 Coeficiente da cultura (K_c)

Os valores de coeficiente da cultura (K_c) foram determinados pela equação (DOORENBOS; PRUITT, 1977, p. 194):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (25)$$

em que, o K_c é o coeficiente da cultura, a ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm.d^{-1}) e ET_o a evapotranspiração de referência (mm.d^{-1}).

3.2.10 Irrigação

O método de irrigação utilizado foi localizado por gotejamento, com vazão média, medida no campo, de $0,605 \text{ L/h}^{-1}$ por gotejador, para uma pressão de 3 mca. Após a instalação do sistema de irrigação, foram realizadas avaliações hidráulicas para a determinação do desempenho através Coeficiente de Uniformidade de Distribuição – CUD (equação 26) e análise de uniformidade, realizada em todos os emissores dos quatro lisímetros, utilizando recipientes coletores de 1000 ml, fazendo a coleta de água por um período de 30 minutos, com duas repetições.

$$CUD = \left(\frac{q_{25}}{\bar{q}} \right) \times 100 \quad (26)$$

Em que CUD é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, %; q_{25} : média de 25% do total dos gotejadores com as menores vazões, L h^{-1} e \bar{q} a vazão média dos gotejadores, L h^{-1} .

Para os anos de 2013, 2014 e 2015 foram encontrados CUD de 96, 94 e 93 respectivamente, sendo classificados como excelente (MERRIAM; KELLER, 1978, p. 271). A umidade do solo foi monitorada pelo TDR (Time Domain Reflectometry) em 30 cm de profundidade. Inicialmente foi realizado um processo de calibração da TDR que consistiu na obtenção de leituras diárias da constante dielétrica aparente do solo (k_a) e da umidade volumétrica (θ) correspondente, possibilitando obter, equações de regressão lineares.

A irrigação foi em escala diária, cuja lâmina de irrigação para a reposição do conteúdo de água no solo, era aplicada até a capacidade de campo (CC) para cada lisímetro e sua bordadura, ou seja, até os quatro lisímetros começassem a drenar. A lamina de irrigação foi calculada em função dos dados de tempo, vazão e área do lisímetro. A reposição da água era realizada de modo a proporcionar uma lâmina de drenagem correspondente a cerca de 10-15% da lâmina d'água aplicada, conforme Pereira et al., (2013, p. 31) e Marques et al., (2015, p. 745).

3.2.11 Fator de desacoplamento

Utilizou-se o fator de desacoplamento proposto por Jarvis & McNaughton (SILVA et al., 2012, p. 849) a fim de se avaliar a sensibilidade da evapotranspiração do feijão caupi ao controle climático ou biológico para a região de estudo (Equação 27):

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \cdot (1 + g_a / g_c)} \quad (27)$$

em que, Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor versus a temperatura (kPa °C⁻¹); γ é o coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹); g_a e g_c são as condutâncias aerodinâmicas (m s⁻¹) e da superfície (m s⁻¹), respectivamente.

Quando o fator de desacoplamento é igual ou próximo a 0, o controle biótico sobre a evapotranspiração é grande, e quando próximo a 1, as condições externas são determinantes no processo.

Para estimativa da condutância aerodinâmica (g_a) foi utilizada primeiramente a Equação(28) de resistência aerodinâmica (r_s)(ALLEN et al.,1998 p. 299)

$$r_s = \frac{\ln\left[\frac{z_m-d}{z_{om}}\right]\ln\left[\frac{z_h-d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_2} \quad (28)$$

Posteriormente a g_a foi determinada conforme Vico et al., (2013, p. 191).

$$g_a = 1/r_s \quad (29)$$

Em que:

z_m é a altura de medição da velocidade do vento (m); z_h é a altura de medição da umidade relativa (m); d a altura de deslocamento do plano zero (m); z_{om} é o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (m); z_{oh} é o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (m); k a constante de Von Karman (0,41) e u_2 a velocidade do vento na altura z (m s⁻¹).

A altura de deslocamento do plano zero (d) e o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (z_{om}) foram estimados através da altura da cultura (h_c)(m) por meio das seguintes equações (BRUTSAERT, 1982, p. 299):

$$d = \frac{2}{3} h_c \quad (30)$$

$$z_{om} = 0,123 h_c \quad (31)$$

Enquanto que o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (z_{oh}) pode ser estimado por (BRUTSAERT, 1982, p. 299):

$$Z_{oh} = 0,1 z_{om} \quad (32)$$

A condutância da superfície (g_c) foi estimada a partir dos valores de condutância estomática (g_f) proposta em escala diária conforme Lima et al., (2016, p. 547).

$$g_f = g_{fp} * Fp \quad (33)$$

Em que:

g_{fp} é a condutância estomática potencial (m s⁻¹). As medidas de g_{fp} foram obtidas conforme equações 34 e 35.

$$gf_p = 755 * e^{(-e^{(-z)} - z + 1)} - 46 \quad (34)$$

$$z = \frac{prod - 0,021}{0,026}$$

$$prod = \frac{T * DPV}{I_0} \quad (35)$$

Em que:

T, DPV e I_0 correspondem a valores médios de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), déficit de pressão de vapor no ar (kPa) e insolação global (KJ h^{-1}), respectivamente obtidos entre 11 e 13 horas, O z é um fator de ponderação em função do produto das variáveis meteorológicas (*prod*).

O fator de penalização (*Fp*) expressa a redução relativa da *gfp* em função da fração de água atual disponível no solo (*F*). O *Fp*, pode variar de 0 a 1, sendo 1 para condições ótimas de água no solo e 0 para condição de ponto de murcha permanente.

$$Fp = \frac{2}{1 + e^{(-5,9*(F-0,009))}} - 1 \quad (36)$$

Em que:

Fp é o fator de penalização

O valor *F* pode ser estimado utilizando a metodologia proposta por Noilhan & Planton (1989, p. 536).

$$F = \frac{\theta_r^i - \theta_{pm}}{\theta_{cc} - \theta_{pm}} \quad (37)$$

Em que:

θ_r^i a umidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), medida pelos TDRs, θ_{cc} e θ_{pm} valores do conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha respectivamente, obtidos em laboratório, determinados em amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se a câmara de pressão de Richards.

3.2.12 Análise estatística

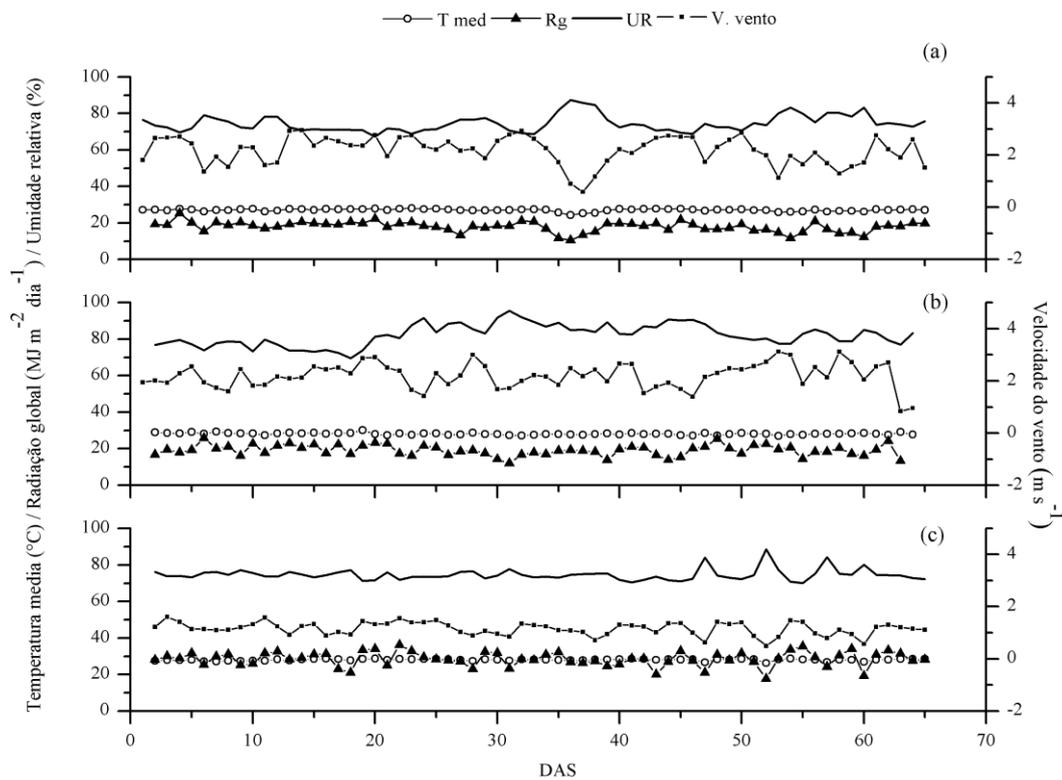
A análise de variância foi aplicada nos dados de ETc dos quatro lisímetros e nos dados ETc entre os ciclos. As variáveis Kc e GD, Kc e IAF foram submetidas à análise de variância em ajustes descritos por funções Gaussianas (SOUZA et al., 2015), segundo suas significâncias pelo Teste F, utilizando-se o software Origin Pro 8

3.3 Resultados e discussão

Durante os anos do estudo, a temperatura média do ar manteve-se próxima a média climática da região para esse período (28 °C) ao longo do ciclo da cultura. No ano de 2015, no entanto, houve menor amplitude térmica e consequentemente menor velocidade do vento devido à presença do fenômeno El Niño (GRIMM, 2015, p. 351) que também ocasionou a redução na quantidade de chuvas durante o experimento.

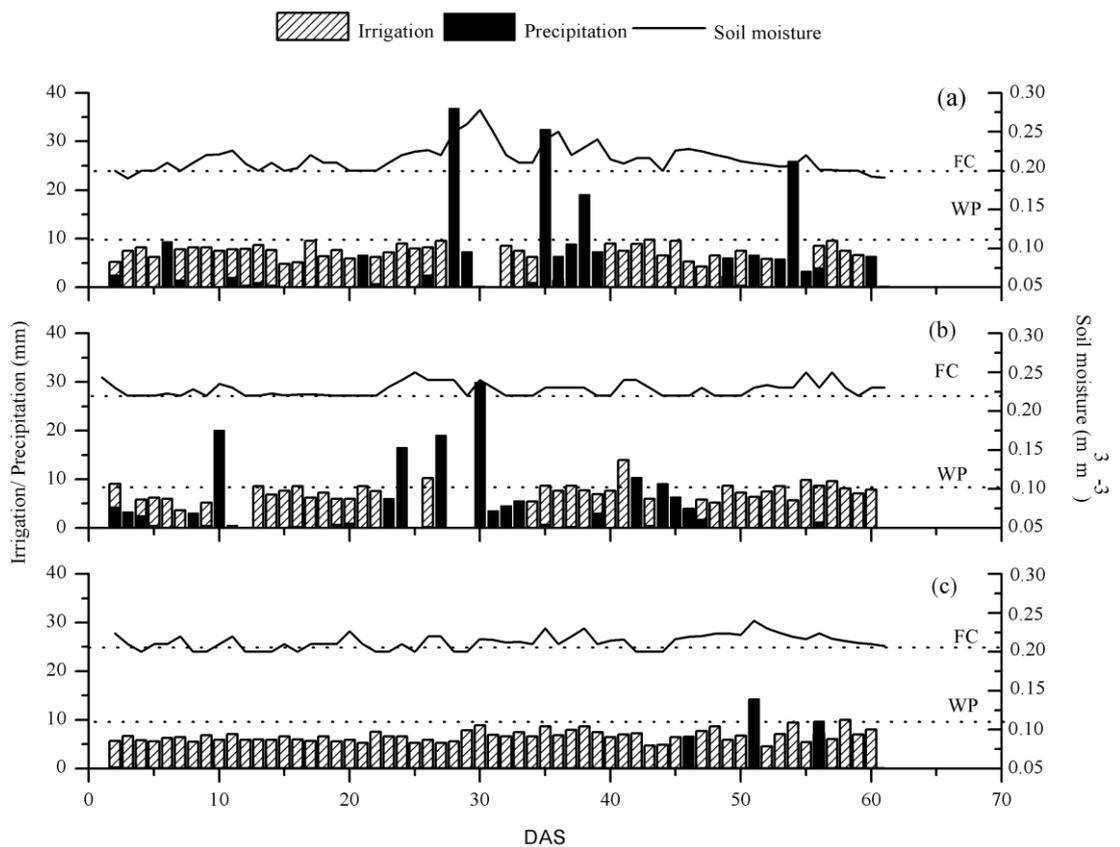
Em anos El Niño, as chuvas na região Amazônica tendem a ser menor que em um ano normal (SOUSA et al., 2015, p. 13), tendo como consequência o aumento natural na temperatura do ar, fato este que proporciona um aumento na demanda evaporativa da atmosfera, em função do aumento da radiação solar global ocasionado pela diminuição da nebulosidade e da redução na umidade relativa do ar (Figura 11), refletindo em aumento da ETo. Esta característica foi observada durante o experimento de 2015, quando os valores de ETo e de ETc foram mais elevados comparado aos experimentos de 2013 e 2014.

Figura 11. Dados meteorológicos médios diários durante o ciclo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) nos anos de 2013 (a), 2014 (b), 2015 (c), sob as condições climáticas do município de Castanhal-Pa.



O total de chuvas observado durante o experimento de 2013 foi 207,51 mm, enquanto que em 2014 e 2015 ocorreram 160,00 mm e 30,73 mm de chuva, respectivamente. A redução das chuvas no ano de 2015 correspondeu a um valor de aproximadamente 80% da média histórica (153,65 mm). Apesar desta diferença no regime de chuvas entre os experimentos, a oferta de água pelo sistema de irrigação somado aos eventos de chuva durante o período experimental, fez com que a cultura fosse submetida à condições elevadas de umidade do solo (Figura 12), de modo a possibilitar uma condição potencial de perda de água via evapotranspiração. Nos dias em que não ocorreram precipitações utilizou-se irrigação por gotejamento aplicada no final do dia, cuja lamina total correspondeu a 285,58; 268,39 e 311,68 mm nos anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente (Figura 12).

Figura 12. Irrigação (mm), precipitação (mm), umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PM) ao longo do ciclo do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do município de Castanhal-Pa.



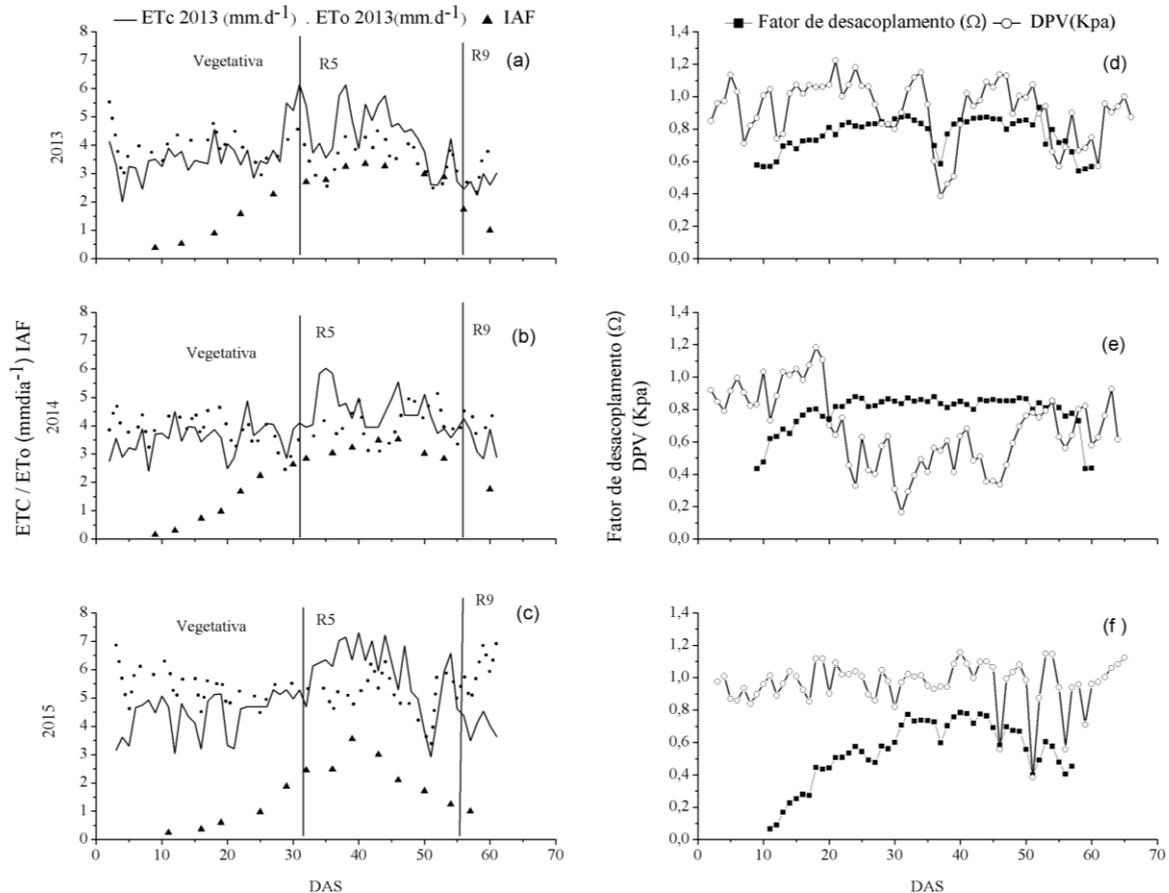
O consumo hídrico total do feijão-caupi durante o ciclo foi 246,98 mm em 2013, 248,89 mm em 2014 e 306,98 mm em 2015, houve diferença significativa somente no terceiro ano. Em média o consumo hídrico foi 267,73 mm \pm 10,21 mm, e a evapotranspiração média diária foi 3,7 mm \pm 0,2 mm. O valor médio difere dos obtidos por Aguiar et al. (1992, p. 33) que verificaram a quantidade de 305,7 mm ou 4,4 mm dia⁻¹ para cultivar Manteguinha no nordeste paraense, porém, esses valores estão próximos da ETc do terceiro ano.

A lâmina total de água aplicada nos três anos de experimento durante os dias de estudo, através da irrigação e da chuva, atingiu em média 407,94 mm \pm 20,13 mm. Comparando esse valor com a evapotranspiração acumulada no mesmo período, constata-se que a cultura não sofreu restrição de água, tendo recebido uma lâmina extra de água drenada de 140,21 mm \pm 5,10 mm, em todo período estudado. A textura arenosa do solo favoreceu a ocorrência das perdas de água por drenagem.

Embora o experimento tenha sido realizado no período menos chuvoso a fim de se ter um maior controle da entrada de água, período este que é distinto da época comumente adotada na região que é junho, o padrão de chuva local é sem dúvidas o principal fator para a baixa produção observada, a julgar pela variabilidade das chuvas observada entres os 3 anos.

No estágio inicial de desenvolvimento quando o índice de área foliar (IAF) ainda é baixo, em torno de 0,5 \pm 0,05, a perda de água ocorreu, principalmente, devido à evaporação da água na superfície do solo que se encontrava descoberto pela vegetação. Como esperado neste período, a ETc permaneceu relativamente menor que a ETo até aproximadamente 25 dias após a semeadura (DAS) em todos os anos de experimento (Figura 13). A maioria dos picos observados na ETc correspondem a evaporação em razão de eventos de precipitação, ocorridos no dia anterior, que umedeceu a superfície do solo.

Figura 13. Evapotranspiração da cultura (ETc) do feijão caupi, evapotranspiração de referencia (ETo) e IAF no ano de 2013 (a), 2014(b) e 2015(c). Fator de desacoplamento (Ω) e déficit de pressão de vapor (DPV) do feijão caupi no ano de 2013 (d), 2014(e), 2015(f), sob as condições climáticas de Castanhal-Pa.



Entre aproximadamente 25 e 50 DAS nota-se um padrão diferente entre ETc e ETo, coincidindo com as fases de crescimento (V4), florescimento (R5) e enchimento de grãos (R8), atingindo valores máximos em torno de 6 mm dia⁻¹. Isso ocorreu devido ao aumento da transpiração proporcionado pelo crescimento do IAF, devido ao incremento na fração de cobertura do solo, e conseqüente diminuição da evaporação do solo em decorrência da redução da sua área exposta. Durante este período, considerado o de maior demanda hídrica, é necessário um controle rigoroso da oferta de água, seja por aproveitamento da chuva ou pelo sistema de irrigação para a otimização do desenvolvimento da cultura do feijão caupi de forma satisfatória.

O máximo IAF encontrado foi em média de $3,5 \pm 0,08$ atingido a aproximadamente 40 DAS, permanecendo próximo deste valor durante grande parte do subperíodo reprodutivo (Figura 13). O máximo consumo de água acompanhou a tendência do aumento no IAF,

estando estes resultados de acordo com os resultados do trabalho realizado com feijão caupi por Bastos et al. (2008, p. 182).

Após os 50 DAS, a ET_c diminuiu devido à senescência de parte das folhas da cultura. A demanda atmosférica, representada pela ET_o, no entanto, permaneceu elevada permitindo um consumo hídrico médio de 4,52 mm d⁻¹.

Considerando-se os estádios fenológicos do caupi, observa-se que o período reprodutivo (floração e enchimento de grãos) é a fase de maior demanda de água, consumindo em média 4,55 mm d⁻¹ semelhante aos resultados obtidos por Lima et al. (2011, p. 65) para essa fase (4,47 mm d⁻¹). A falta de água próximo ao florescimento pode reduzir o crescimento vegetativo, limitando a produção, podendo levar a drásticas reduções na produtividade de grãos (ENDRES et al., 2010, p.11).

O fator de desacoplamento (Ω) foi estimado de maneira a distinguir a sensibilidade da evapotranspiração da cultura às variáveis físicas e a fatores fisiológicos (Figuras 13d,13e,13f). O valor médio diário de Ω foi 0,38 no início do ciclo quando o feijão caupi apresentava IAF em torno de $0,9 \pm 0,1$. Os baixos valores iniciais de Ω indicam que as condições atmosféricas, vento e umidade do ar, desempenhavam maior influência sobre a transferência de vapor d'água para atmosfera associado a um maior controle estomático da planta, havendo, porém, maior evaporação do solo do que transpiração em função do baixo IAF.

Com o aumento do IAF, após os 15 DAS, e conseqüente aumento de Ω ocorreu uma mudança no processo de controle da evapotranspiração, indicando que a ET_c se tornou cada vez mais dependente do saldo de radiação recebido e menos dependente do controle estomático e do déficit de pressão de vapor (DPV). Devido à superfície do solo se encontrar coberto pela vegetação, o processo de transpiração superou a evaporação direta do solo, conforme também observado por Nassif et al., (2014, p. 250) em cultivo de cana de açúcar.

Após os 20 DAS até em torno de 50 DAS, os valores de Ω alcançaram em média 0,8, principalmente, nos anos de 2013 e 2014, sugerindo a existência de uma baixa interação do dossel vegetativo com a atmosfera, indicando que a maior contribuição ao processo de evapotranspiração se deu devido à entrada de energia na forma de radiação, uma vez que a elevada quantidade de água manteve a condutância estomática foliar em níveis elevados durante o experimento, demonstrando que o controle estomático possuía um papel secundário na troca gasosa entre a superfície e a atmosfera neste período do ciclo.

Em média, durante o ciclo do feijão caupi o Ω variou de 0,72 (2013), 0,74 (2014), 0,54 (2015), indicando que a cultura do feijão caupi não desacopla totalmente da atmosfera nas condições climáticas do nordeste paraense, em especial em anos onde o regime de chuva é

afetado negativamente como observado em 2015 onde se percebe o maior controle estomático do caupi até 30 DAS, diferente dos anos anteriores quando o regime de chuva foi superior fazendo com que o dossel se apresentasse desacoplado da atmosfera aos 10 DAS, com valores de Ω acima de 0,6.

Apesar dos três anos experimentais terem sido submetidos a irrigação, a qual manteve a umidade no solo sempre próxima da CC (Figura 12), nos anos de 2013 e 2014 quando houve maior ocorrência de eventos de chuva, o molhamento do solo foi muito mais uniforme do que com o sistema de irrigação por gotejamento, motivo pelo qual se nota um maior acoplamento e maior dependência do controle estomático na fase inicial do ciclo no experimento de 2015.

Efeito semelhante foi observado por Flumignan et al. (2011, p. 791) ao constatarem maiores valores de transpiração e do coeficiente basal (K_{cb}) do café ao compararem tratamentos irrigados por aspersão com irrigados por gotejamento devido ao fato de que o maior molhamento do solo pela aspersão contribui para uma maior extração de água de diferentes porções do solo fazendo com que haja maior abertura estomática e conseqüentemente menor acoplamento com a atmosfera. Souza et al. (2015, p.13) também constatarem o efeito de eventos de chuva no desacoplamento do dossel da caatinga representado por aumentos no valor de Ω .

Nassif et al. (2014, p. 250) perceberam que os valores de Ω para cana de açúcar em Piracicaba foram menores do que os valores encontrados por Silva et al. (2012, p. 849) para a mesma cultura irrigada no nordeste do Brasil, o que indica que para esta cultura a disponibilidade de energia teve maior contribuição na evapotranspiração em regiões quentes e secas do que em regiões mais frias e úmidas, havendo um maior controle da velocidade do vento e do DPV na evapotranspiração da cultura neste último caso. Observando os valores obtidos para Ω neste estudo percebe-se que a evapotranspiração do feijão caupi irrigado por gotejamento na região de estudo é mais influenciada pela disponibilidade energética do que pelo controle estomático e DPV.

Os valores de K_c obtidos para o feijão caupi são apresentados na Figura 3. O K_c apresentou elevada correlação ($R^2 > 0,8$) com a variável graus-dia acumulado e com o IAF, resultando em ajustes descritos por funções gaussianas semelhante ao encontrado por Souza et al. (2015). A forma da curva de K_c representa as mudanças na vegetação e na cobertura do solo durante o crescimento e maturação do feijão-caupi, que afetam a relação entre E_{Tc} e E_{To} . Os parâmetros das funções Gaussianas que promovem uma assimetria na curva para a direita (Figuras 3a, 3b, 3c) são respectivamente 719,9; 698,04 e 739,9, ou seja, esses parâmetros indicam a partir de qual GDA o K_c começa a reduzir, portanto, se o feijão-caupi

alcançar os graus dias em um período mais curto a tendência é a curva se tornar mais sinuosa e o K_c decrescer mais rapidamente.

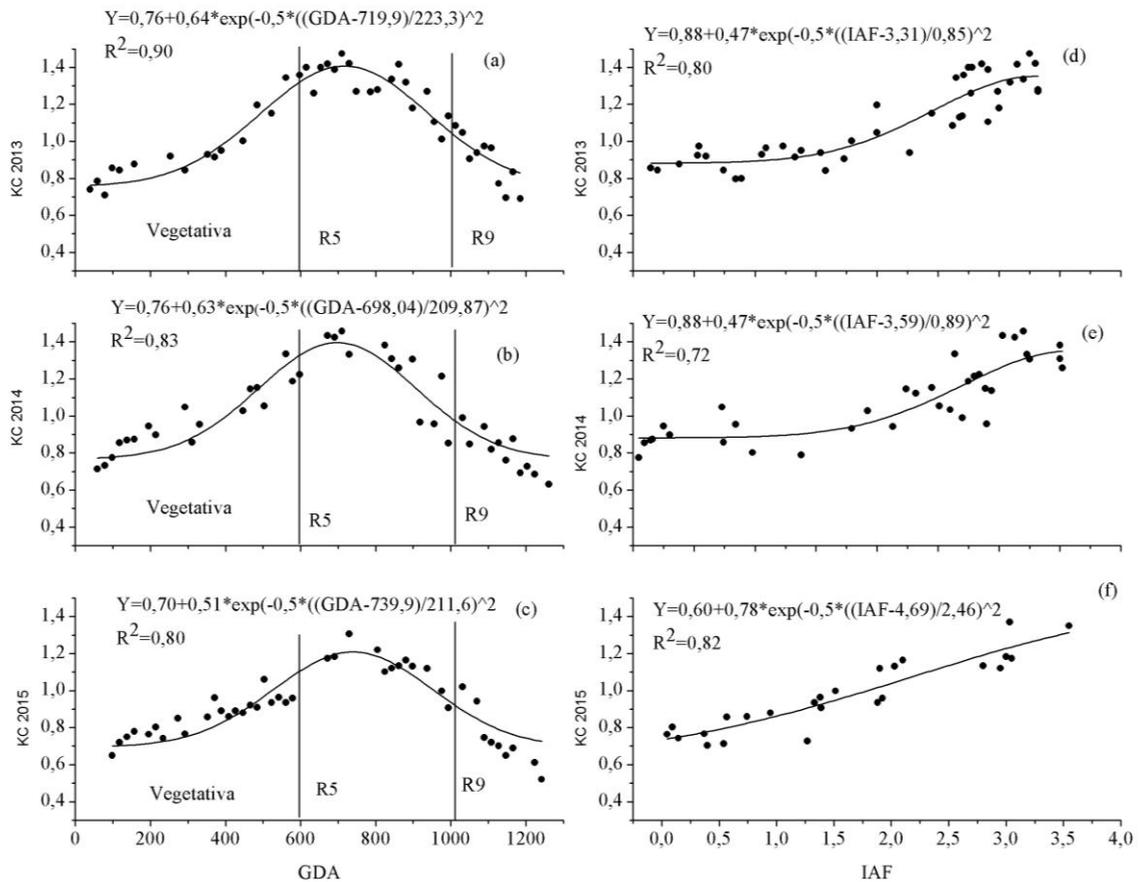
Os coeficientes de cultura apresentados, para as fases fenológicas ou para o ciclo da cultura, em relação ao número de dias após o plantio, podem levar à estimativa equivocada de demanda de água em regiões diferentes, devido à variação no ciclo de desenvolvimento imposta pelos fatores climáticos, principalmente, a temperatura.

Constatou-se haver uma estreita relação entre o K_c com o IAF em todos os 3 experimentos, havendo, porém, melhor explicação ao se analisar as equações relacionadas aos graus-dias acumulados, a julgar pelos maiores coeficientes de determinação (R^2). De forma geral, os coeficientes de determinação do IAF também foram considerados bons, demonstrando que ambas as funções podem ser utilizadas na estimativa regional do K_c .

Os resultados sugerem que o K_c apresenta melhor correlação a índices térmicos, como os graus-dias acumulados, do que aos parâmetros de crescimento da cultura, como o IAF possivelmente dada a grande dependência do K_c com a duração das fases fenológicas, as quais dependem também das condições climáticas locais.

Bons ajustes de modelos correlacionando os valores de K_c em função dos graus-dias acumulados têm sido citados para feijão caupi (DETAR, 2009) e ainda para feijão carioca como pode ser observado nos resultados obtidos por Medeiros et al. (2004), que obtiveram relações altamente significativas entre K_{cb} e graus-dia, cultivando sobre lisímetro de nível freático constante. Marques et al. (2015) também observaram melhores ajustes do K_c em função dos graus-dias acumulados do que do índice de cobertura vegetal para a cultura do manjeriço utilizando lisímetros de drenagem.

Figura 14. Relação entre o coeficiente da cultura (Kc) com os graus dias acumulados (GDA) e o índice de área foliar (IAF) representadas por funções Gaussianas e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), sob as condições climáticas de Castanhal-Pa. Linhas verticais indicam a ocorrência das fases fenológicas.



Na fase inicial, considerada desde a emergência até os 15 DAS (V4), o Kc apresentou para os três anos valor médio de 0,8 sendo diretamente influenciado pela evaporação do solo (irrigações frequentes) devido aos baixos valores de IAF (Figura 2) e alto controle estomático do processo sugeridos pelos baixos valores de Ω (Figura 13d, 13e, 13f).

Este valor está próximo de outros resultados relatados na literatura para esta cultura, como o observado por Bastos et al. (2008) para as condições do vale do Guruguéia-Piauí e ao valor sugerido por Allen et al. (1998). Por outro lado, o resultado está acima do kc obtido por Souza et al. (2015), que encontraram 0,68 para a fase vegetativa (30 dias) e abaixo do valor (0,99) encontrado por Lima et al. (2011), considerando-se, porém, que fatores como a frequência de irrigação e a própria cultivar utilizada podem ter contribuído para esta diferença.

O Kc alcançou o valor máximo de $1,4 \pm 0,09$ em torno de 40 DAS (750 GDA), correspondendo ao estágio R7 (vagem canivete), não havendo, porém, uma estabilização no consumo hídrico como proposto por Allen et al. (1998) para a cultura do feijoeiro comum. Tal fato se deve ao hábito de crescimento indeterminado do feijão-caupi que continua a emitir novas folhas, mesmo após o florescimento, detalhe também observado por Souza et al., (2005, p. 241). Semelhantes valores de Kc para esta fase foram obtidos por Bastos et al. (2008) para a variedade BR-17 Gurguéia (1,1 a 1,4), por Souza et al.,(2005, p. 241) com a cultivar Setentão (1,35) e por Souza et al. (2015, p. 13) para a cultivar Pujante cultivado em sistema de consórcio com o milho (1,3).

Segundo Allen et al (1998), o máximo valor de Kc para o feijoeiro comum seria de 1,15, mas Medeiros et al. (2004), obtiveram valores de Kc de até 1,7. Estes autores citam as condições meteorológicas no período e o crescimento da cultura além das bordas dos lisímetros como fator determinante para esta tendência de elevação do valor de Kc.

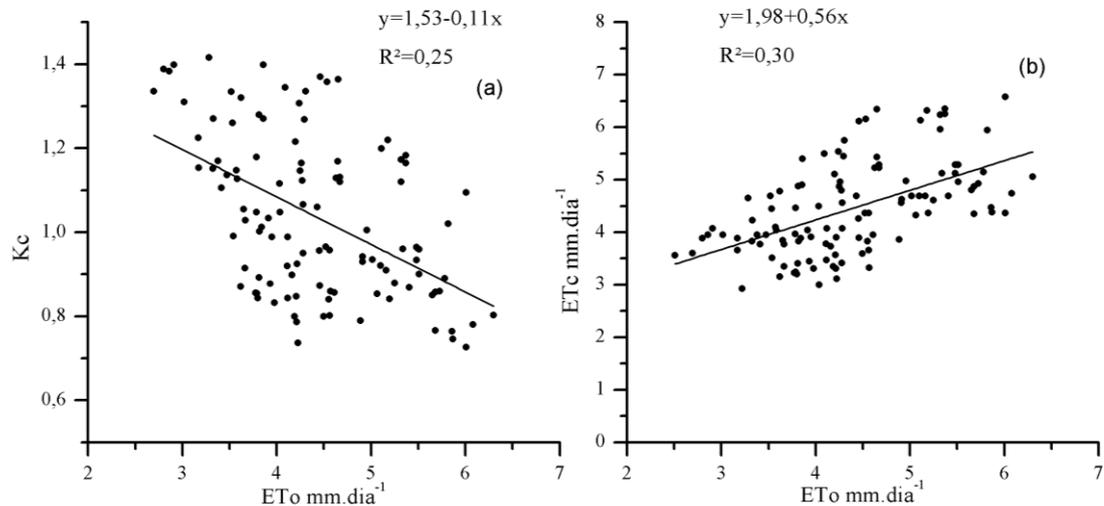
O Kc obtido para o estágio reprodutivo foi superior àqueles relatados por Aguiar, Leão e Saundeaders (1992) para o nordeste paraense devido aos distintos métodos adotados como à cultivar utilizada, uma vez que a E_{Tc} pode ser influenciada pelas características dos estômatos, anatomia da folha, propriedades aerodinâmicas e albedo (Allen et al., 1998).

No estágio final, após os 50 DAS (900 GDA), nota-se uma queda acentuada nos valores de Kc provocada pela senescência de parte das folhas da planta, conforme constatado na variação do IAF (figura 2a, 2b, 2c), apresentando em média um valor de 0,8 na maturação fisiológica (R9).

O Kc diminui sob altos valores de E_{To} (Figura 4 a), mesmo sob elevada umidade do solo. Além disso, Resultados de Flumignan et al., (2011, p. 791) e Marin et al., (2016, p. 139) demonstram a forte dependência do Kc e K_{cb} à elevada demanda atmosférica representada pelos valores de E_{To}, indicando haver um maior controle da transpiração pela planta através do fechamento estomático sob tais condições, o que pode também ser um dos motivos da diferença encontrada em relação aos demais trabalhos.

Por conseguinte, foi observado em uma relação linear entre o E_{Tc} e E_{To} (Figura 15 b), que valores de E_{Tc} substimam valores de E_{To} acima de 5 mm dia^{-1} , indicando um aumento das resistências internas ao transporte de água das plantas quando submetidos a condições de alta demanda atmosférica. Os resultados de Nassif et al., (2014, p.250) mostrou a resposta de condutância (gs) para temperatura do ar, radiação solar e DPV, em que gs diminui com o aumento de E_{To}.

Figura 15. Relação entre coeficiente da cultura (K_c) e evapotranspiração de referência (ET_o) (a) e relação entre evapotranspiração da cultura (ET_c) e ET_o (b).



Em condições de alta energia disponível, velocidade do vento e DPV, que são normalmente encontradas quando ET_o ultrapassa 4,0 mm dia⁻¹, pode-se esperar que algumas espécies com alta resistência estomatosa não responda diretamente à demanda de água na atmosfera. Contudo, pode ser observado que a diminuição na taxa de transpiração sob elevadas demandas atmosféricas foi compensada. Esta compensação baseou-se no fato da evapotranspiração da cultura se tornar menos dependente das condições atmosféricas e o saldo de radiação se tornar o principal contribuinte para esse processo, conforme pode ser observado pelos valores do Ω .

Ressalta-se que a metodologia empregada para a determinação dos valores da ET_c e ET_o foi diferente das utilizadas em alguns dos trabalhos citados, fato que comprova a importância da obtenção de valores precisos e regionalizados de ET_c e de K_c para uma real eficácia no manejo da irrigação local.

3.4 Conclusão

O consumo hídrico total do feijão caupi foi em média 267,73 mm \pm 10,21 ou 3,7 mm \pm 0,2 mm dia⁻¹.

Em média durante o ciclo do feijão caupi o Ω variou de 0,54 (2015), 0,72 (2013) e 0,74 (2014), indicando que a cultura do feijão caupi não desacopla totalmente da atmosfera nas condições climáticas de Castanhal Pará.

O Kc do feijão caupi apresentou valor médio de 0,8 na fase vegetativa, atingido um máximo de 1,4 durante a fase reprodutiva, chegando ao estágio final com valor médio de 0,5.

O modelo Gaussiano apresentou ótimo ajuste para a estimativa dos valores de coeficiente de cultura do feijão caupi em função dos graus-dia acumulados e do IAF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J.V.; LEÃO M.C.S.; SAUNDERS L.C.U. Determinação do consumo de água pelo caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) irrigado em Bragança – Pará. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.23, n. 2, p. 33-37, 1992.

ALLEN, R.G.; Pereira L.S.; RAES, D.; SMIT, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. 56. ed. New York: Rome:FAO, 1998. 299 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56.)

BASTOS, E.A.; FERREIRA V.M.; SILVA, C.R.; ANDRADE JUNIOR, A.S. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no Vale do Guruguéia, Piauí. **Irriga**, Botucatu, v.13, n. 2, p.182-190, 2008.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep. 2003.41p.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the atmosphere. Reidel: Dordrecht, 1982. 299 p.
DETAR, W. R. Crop coefficients and water use for cowpea in the San Joaquin Valley of California. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 53-66, 2009.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 24 ed. New York: Rome:FAO, 1977. 194p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

ENDRES, L.; SOUZA, J. L.; TEODORO, L.; MARROQUIM, P. M. G.; SANTOS, C. M.; BRITO, J. E. D. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.11- 16, 2010.

FREIRE FILHO, F. R.; CRAVO, M. S., RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; CASTELO, E. O.; BRANDÃO, E. S.; BELMINO, C. S. & MELO, M. I. S. BRS Milênio e BRS Urubuquara cultivares de feijão-caupi para a região Bragantina do Pará. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n.6, p. 749-752, nov/dez, 2009.

FARIAS, V.D.S.; COSTA, D.L.P; SOUZA, P.J.O.P.; TAKAKI, A.Y.; LIMA M.J.A. Temperaturas basais e necessidade térmica para o ciclo do feijão caupi. **Enciclopédia Biosfera**, Goiania, v. 11, n. 21, p. 1781-1792, 2015.

FLUMIGNAN, D.L. et al. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. **Agricultural Water Management**, v.98, p.791-800, 2011.

GEPTS, P.; FERNÁNDEZ, F. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)**. Colômbia: CIAT. 1982.10 p.

GIUNTA, P., PRUNEDDU, G. MOTZO. R. “Radiation interception and biomass and nitrogen accumulation in different cereal and grain legume species.” **Field Crops Research**, p. 76-84. 2009.

GRIM, A.M. El Niño, novamente!. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.30, n.4, p. 351-357, 2015.

LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. S. ; COSTA, D. L. P. ; SAMPAIO, L. S. ; SOUZA, P. J. O. P. O efeito combinado das variáveis ambientais na condutância estomática foliar do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v.34, n. 04, p. 547-553. 2016.

LIMA, J.R.S. ; ANTONINO A.C.D.; LIRA C.A.B.O.; SOUZA E.S.; SILVA I.F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n.1, p. 65-74. 2011.

LOPES, G. S.; LEMOS R.N.S.; ARAUJO J.R.G.; MARQUES L.J.P.; VIEIRA D.L. Preferência para oviposição e ciclo de vida de mosca-negra-dos citros *Aleurocanthus woglumi* Ashby em espécies frutíferas. **Revista Brasileira de fruticultura**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 738-745, 2013.

MARIN, F. R. ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; VIANNA, M.S. CARVALHO, K. S. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 139-145, 2016.

MARQUES, P.A.A.JOSÉ J.V.; ROCHA H.S.; FRAGA JUNIOR E.F.F; SOARES D.A.; DURTE S.N. Consumo hídrico do manjeriço por meio de lisímetro de drenagem. **Irriga**, Botucatu, v.20, n. 4, p.745-761. 2015.

MEDEIROS, G. A. ARRUDA F.B.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; BONI N.R. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1733-1742, 2000.

MERRIAM, J. L., KELLER, J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

NASCIMENTO, S.P.; BASTOS E.A.; ARAUJO E.C.E.; FILHO F.R.F.; SILVA E.M. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 853-860. 2011.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; COSTA, L.G. Evapotranspiration and Transpiration Coupling to the Atmosphere of Sugarcane in Southern Brazil: Scaling Up from Leaf to Field **Sugar tech**, v.16, n.3, p. 250-254, 2014.

NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parameterization of land surface process for meteorological models. **Monthly Weather Review**, Washington, v.177, n.3, p.536-549, 1989.

OLIVEIRA, L.M.M. Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos. Recife – PE, 111p. Dissertação de (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: Fealq, 2013.31 p.

PERES, J.G.; SOUZA, C.F.; BRUGNAR, S.; MARCUSSI, L. Utilização de lisímetros de pesagem para a determinação dos coeficientes de cultura do meloeiro (*cucumis melo l.*) para cultivo em estufa agrícola na região de araras – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 475-487. 2013.

ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495 p.

SANTOS, F.; MONTENEGRO, A. A. R.; SILVA, R.S. EDIVAR, R.S. Determinação do consumo hídrico da cenoura utilizando lisímetros de drenagem, no agreste pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n.3, p. 304-310. 2009.

SILVA, T.G.F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M.S.B.; CARMO, J.F.A; RIBEIRO, A. Fator de desacoplamento em um canal irrigado no submédio do vale do São Francisco. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.849-858.2012.

SOUSA, A.M.L. ROCHA E.J.P.; VITORINO, M.I.; SOUZA P.J.O.P.; BOTELHO M .N. Variabilidade Espaço-Temporal da Precipitação na Amazônia Durante Eventos Enos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 8, n. 1, p. 13-24. 2015.

SOUZA, L.S.B.; MOURA M.S.B.; SEDIYAMA G.C.; SILVA T.G.F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v.50, n.8, p.627-636, 2015.

SOUZA, L.S.B.; MOURA M.S.B.; SEDIYAMA G.C.; SILVA T.G.F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura do milho e feijão-caupi em sistemas exclusivo e consorciado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 151 – 160, 2015.

SOUZA, M.S.M.; BEZERRA, F.M.L.; TEÓFILO, E.M. Coeficientes de cultura do feijão caupi na região litorânea do Ceará. **Irriga**, Botucatu v. 10, n.3, p. 241-248. 2005.

VICO, G.; MANZONI, S.; PALMROTH, S.; WEIH, M.; KATUL, G. Aperspective on optimal leaf stomatal conductance under CO₂ and light co-limitations. **Agricultural and Forest Meteorology**. n. 182 p.191-199. mai. 2013.

4 AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJÃO CAUPI PELO MODELO DE PENMAN MONTEITH.

RESUMO

Os métodos indiretos vêm sendo utilizados para estimar a evapotranspiração da cultura (ETC), por serem mais práticos e viáveis, além disso, são essenciais para melhorar a gestão da água na agricultura, compreender as interações entre o ambiente físico e os ecossistemas, o ciclo regional da água de manejo da irrigação. Sendo assim, este estudo tem por objetivo estimar a ETC horária e diária do feijão caupi nas condições de Castanhal Pará, através da equação do modelo de Penman Monteith com uma resistência do dossel (r_c) proposta por Ortega-Farias (1993) e uma r_c estimada a partir da condutância estomática (g_f) proposta por Lima et al (2016). A r_c obtida pela equação proposta por Ortega-Farias (1993), foi utilizada na estimativa horária e diária da ETC. A r_c também foi obtida através da g_f estimada conforme Lima et al (2016), porém esses valores de r_c foram utilizados para estimativa somente da ETC em escala diária. Para avaliar a estimativa pelo método de Penman Monteith a ETC foi monitorada diariamente, pelo método direto, utilizando-se quatro lisímetros de drenagem, e a evapotranspiração horária do feijão caupi foi obtida pelo método do balanço de energia razão de Bowen. O modelo de Penman-Monteith com a resistência proposta por Ortega Farias (1993), pode ser usado para se estimar a evapotranspiração do feijão caupi, cultivado nas condições edafoclimáticas de Castanhal Pará. O modelo apresentou uma elevada exatidão, para todas as fases fenológicas do feijão caupi, na escala horária em diferentes condições atmosféricas. Em escala diária superestimou o valor encontrado pelos lisímetros nos períodos de índice de área foliar (IAF) < 3 . Melhor ajuste para a ETC diária, foi encontrado utilizando a equação de Penman-Monteith com a r_c obtida através da g_f proposta por Lima et al (2016,p 547).

Palavra chave: Consumo hídrico, razão de Bowen, lisímetros, resistência do dossel.

ABSTRACT

Indirect methods have been used to estimate crop evapotranspiration (ETC), because they are more practical and feasible. In addition, they are essential for improving water management in agriculture, understanding the interactions between the physical environment and ecosystems and the regional water cycle of irrigation management. Therefore, this study aims to estimate the hourly and daily ETC of cowpea under climatic conditions of Castanhal Pará considering the equation of the Penman Monteith's model with a canopy resistance (r_c) proposed by Ortega-Farias (1993) and a r_c estimated from the stomatal conductance (g_f) according to Lima et al (2016). The r_c obtained by the equation proposed by Ortega-Farias (1993), was used at the hourly and daily estimation of ETC. The r_c was also obtained through the g_f estimated according to Lima et al (2016). However, these r_c values were used only in the estimation of the ETC on a daily scale. In order to evaluate the estimation by the Penman Monteith's method, the ETC was daily monitored by the direct method using four drainage lysimeters, and the hourly evapotranspiration of cowpea was obtained by the Bowen ratio energy balance method. The Penman-Monteith's model coupled with the resistance proposed by Ortega Farias (1993), can be used to estimate the evapotranspiration of cowpea cultivated under the edaphoclimatic conditions of Castanhal Pará. The model presented a high accuracy, for all the phenological phases of the cowpea, in the hourly scale in different atmospheric conditions. On a daily scale, it overestimated the value found by lysimeters in leaf area index (LAI) periods < 3. The best fit for the daily ETC was found using the Penman-Monteith equation with the r_c obtained through the g_f proposed by Lima et al (2016, p 547).

Key words: Water consumption, Bowen ratio, lysimeters, canopy resistance.

4.1 Introdução

Na região Norte, a produtividade do feijão-caupi tem destaque no Estado do Pará, em especial na região do nordeste Paraense, onde se sobressai como uma das culturas mais cultivadas na região. Além disso, a região vem se notabilizando pela forte incorporação de tecnologia ao sistema produtivo, almejando reduzir riscos e planificar a produção (Rebello et al., 2011) permitindo que o uso de modelos agrometeorológicos se torne uma excelente ferramenta de planejamento.

A evapotranspiração (ET) é amplamente estudada nos domínios da meteorologia, geografia, hidrologia, ecologia e agricultura por apresentar grande variabilidade espaçotemporal (ERSHADI et al., 2015, p.521). Modelos para calcular ET sob diferentes ecossistemas são essenciais para melhorar a gestão da água na agricultura, compreender as interações entre o ambiente físico e os ecossistemas, o ciclo regional da água, sendo possível avaliar os impactos e a viabilidade da economia de água através da modelagem (ZHAO et al., 2013, p. 93; XU et al., 2017, p. 55.).

A evapotranspiração da cultura (ETC) pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, havendo, porém, a necessidade de equipamentos sofisticados, caros e mão de obra capacitada para manuseá-los, o que no geral inviabiliza a aplicação de alguns métodos diretos. Por isso, tem-se recorrido à utilização de equações empíricas, por serem mais práticas e viáveis de serem usadas para fins de manejo da irrigação. O modelo de Penman-Monteith (ETC_{PM}) tem sido usado com sucesso para estimar a ETC em diversos locais e variadas culturas (ORTEGA-FARIAS et al., 2004, p. 1; LIMA et al., 2006, p. 477 ; QIU et al., 2013, p. 163;PIRKNER et al., 2014, p. 725 Xu et al., 2017, p. 55).

Para avaliar a aplicabilidade de um modelo ao local de interesse, é necessário testar suas estimativas comparando-as com dados observados, ou seja, informações confiáveis de medições diretas da evapotranspiração, o que é extremamente raro (CAVALCANTE JUNIOR et al., 2011, p. 1699). A lisimetria é o método direto considerado mais preciso para a medição da ETC (MARQUES et al., 2015, p. 745). Outros métodos bastante confiáveis e precisos são o de Covariância de vórtices turbulentos “Eddy Covariance” e o Razão de Bowen, mas o uso do método de Covariância é limitado pelo elevado custo dos equipamentos, o que faz com que Razão de Bowen seja uma ótima alternativa.

O balanço de energia com a razão de Bowen (ETC_B), representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia da superfície, é considerado confiável e padrão para estimativas da ETC, e vem sendo comumente utilizado por vários autores (BEZERRA et al., 2010, p. 625; SILVA et al., 2011, p.139; SOUZA et al., 2012, p. 548; ESTEVES et al., 2014.

p. 441), inclusive para avaliar a estimativa da ETC pelo modelo de Penman-Monteith (BORGES et al., 2008, p. 393; SOUZA et al., 2008, p. 400 SILVA et al., 2015, p. 411).

Uma vantagem do uso da equação de Penman Monteith é que calcula a ETC sem a utilização do coeficiente de cultura (K_c), porém o maior obstáculo no uso desse modelo, está relacionado com a estimativa correta da resistência do dossel (r_c) (RANA; KATERJI, 1998, p. 141), pois, alguns modelos de estimativa desse parâmetro são limitados devido não oferecerem nenhuma base teórica para a compreensão dos mecanismos de resposta da condutância estomática (g_f) (MEDLYN et al., 2013, p.13).

Ortega-Farias (1993, p.137) propôs um modelo para a estimativa da r_c que é muito favorável para os usuários da equação de Penman Monteith, pois necessita de dados similares (saldo de radiação, déficit de pressão de vapor), e ainda pode incluir os valores do conteúdo de água do solo. Esse modelo foi usado com sucesso na cultura do feijão caupi, no município de Areia- PB (LIMA et al., 2006, p.477), em soja (ORTEGA-FARIAS et al., 2004, p.1), em tomate sob condições irrigadas (ORTEGA-FARIAS et al., 2000, p. 91) e em grama (ORTEGA-FARIAS, 1993, p.137; ORTEGA-FARIAS et al., 1999, p.129).

Lima et al., (2016, p.547) ajustou e validou um modelo empírico de condutância estomática (g_f) para o feijão caupi, em função do efeito combinado da temperatura, irradiância solar, déficit de pressão de vapor e o teor de água do solo na forma de fração de água transpirável, para condições do nordeste Paraense. Sendo assim, este estudo tem por objetivo estimar a ETC horária e diária do feijão caupi nas condições de Castanhal, Pará, através da equação de Penman Monteith (ETC_{PM}) com uma resistência do dossel (r_{cO}) proposta por Ortega Farias (1993, p. 137) e uma r_{cL} estimada a partir da condutância estomática (g_f) proposta por Lima et al., (2016, p.547).

4.2 Material e métodos

4.2.1 Área experimental

O experimento foi instalado na Fazenda Experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Castanhal, PA, (1°19'24.48"S; 47°57'38.20"W). O clima da região segundo a classificação de Koppen é Af, com temperatura média anual de 26 °C: máximas e mínimas de 35°C e 18 °C e umidade relativa máxima de 95% e mínima de 79%. Precipitação média anual em torno de 2.571,6 mm, entretanto, durante os meses de janeiro, fevereiro e março concentra-se cerca de 35% dessa chuva, ou seja, esse trimestre é caracterizado como o mais chuvoso. E o trimestre menos chuvoso compreende os meses de

julho, agosto e setembro com 16% do total pluviométrico e o mês menos chuvoso é o de setembro, o qual apresenta apenas 4% de toda precipitação.

4.2.2 Condução e coleta de dados

O experimento ocorreu nos anos de 2013 e de 2014 no período de setembro a novembro em uma área de 15.000 m². A semeadura do feijão-caupi, cultivar BR3-Tracuateua, foi realizada mecanicamente, com exceção da área dos lisímetros, a uma taxa de treze a quinze sementes/m² com espaçamento de 50 cm entre linhas, resultando em uma densidade de dez plantas por metro linear após o desbaste.

Realizou-se fertilização do solo fundamentada no resultado da análise química do solo, obtida no laboratório de solos da EMBRAPA Amazônia Oriental, a qual indicou uma adubação de fundação de 10:60:40 kg ha⁻¹ de NPK para a área em 2013 e de 0:40:45 kg ha⁻¹ de NPK em 2014. Realizaram-se, durante a condução do experimento, tratos culturais, de modo a manter a área livre de plantas invasoras, doenças e pragas.

A altura da planta foi avaliada diariamente 10 dias após a semeadura (DAS) assim como o desenvolvimento fenológico, usando a escala proposta por Gepts e Fernández (1982) em um experimento inteiramente casualizado, com oito repetições de um metro linear de plantas.

4.2.3 Variáveis meteorológicas

Um dos principais cuidados ao se instalar um sistema para medir a razão de Bowen é o nível em que os sensores devem ser colocados e a representatividade da área (STANNARD, 1997, p. 375). Por esse motivo, os instrumentos foram instalados com bordadura suficiente na direção predominante do vento (de 600 m) a fim de se evitar problemas associados ao efeito de áreas adjacentes nas medidas, obedecendo a razão sugerida de 1:100 (ROSEMBERG et al., 1983, p. 495; STANNARD, 1997, p. 375).

Dois estações agrometeorológicas foram instaladas na área experimental para medir as variáveis meteorológicas necessárias as quais foram equipadas com sensores de temperatura e umidade do ar, em dois níveis (de 0,5 e 2,0 m acima do dossel da cultura), precipitação pluviométrica, radiação solar global, saldo de radiação, velocidade do vento, umidade do solo, temperatura do solo e fluxo de calor no solo. Todos os sensores foram conectados a um *datalogger* CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). Ambos programados para efetuar a leitura dos sensores a cada 10 segundos, com gravação das médias e dos totais a cada 10 minutos.

4.2.4 Irrigação

Adotou-se um sistema de irrigação por gotejamento, com avaliações hidráulicas antes do início do experimento para a determinação do desempenho através Coeficiente de Uniformidade de Distribuição – CUD (equação 38) e análise de uniformidade, realizada em todos os emissores instalados nos lisímetros e na área, utilizando recipientes coletores de 1000 ml, fazendo a coleta de água por um período de 30 minutos, com duas repetições.

$$CUD = \left(\frac{q_{25}}{\bar{q}} \right) X 100 \quad (38)$$

Em que:

CUD: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, %;

q_{25} : média de 25% do total dos gotejadores com as menores vazões, $L h^{-1}$;

\bar{q} : vazão média dos gotejadores, $L h^{-1}$;

Para os anos de 2013 e 2014 foram encontrados CUD de 92 e 89 respectivamente na área e 96 e 94 nos lisímetros. A umidade do solo foi monitorada dentro dos lisímetros e na área através do uso de TDRs (Time Domain Reflectometry).

A irrigação foi realizada em escala diária, cuja lâmina de irrigação para a reposição do conteúdo de água no solo, era aplicada até a capacidade de campo (CC) para cada lisímetro e área experimental, ou seja, até que os quatro lisímetros começassem a drenar. A lâmina de irrigação foi calculada em função dos dados de tempo, vazão e área do lisímetro. A reposição da água era realizada de modo a proporcionar uma lâmina de drenagem correspondente a cerca de 10-15% da lâmina d'água aplicada, conforme Pereira et al. (2013, p. 31) e Marques et al. (2015, p.745).

4.2.5 Evapotranspiração pelo método balanço de energia - razão de Bowen (ETC_B)

A evapotranspiração horária do feijão caupi foi obtida pelo método do balanço de energia (ETC_B), que é baseado no princípio de conservação de energia dado pela seguinte expressão (SILVA et al., 2011, p. 147):

$$Rn + LE + H + G + Sd + F = 0 \quad (39)$$

Em que:

Rn - saldo de radiação ($W m^{-2}$); LE e H - fluxos verticais de calor latente e sensível ($W m^{-2}$), respectivamente; G - fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); Sd - energia armazenada no sistema solo-dossel vegetativo; F - energia utilizada no processo fotossintético. Os termos Sd e F

foram desconsiderados haja vista que eles representam menos de 1% de Rn (AZEVEDO et al., 2006, p. 259). Portanto, a Equação 32 torna-se:

$$LE = \frac{(Rn-G)}{(1-\beta)} \quad (40)$$

Em que

β é a razão de Bowen, dada pela razão entre os gradientes verticais de temperatura do ar e pressão real de vapor (PEREZ et al., 1999, p.141):

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (41)$$

Em que:

$\gamma = \frac{c_p \times P}{0,622 \times \lambda}$ o coeficiente psicrométrico (Kpa °C⁻¹), C_p o calor específico do ar (1013 J kg⁻¹ °C⁻¹), P a pressão atmosférica (hPa), λ é o calor latente de evaporação (J kg⁻¹), ΔT e Δe as diferenças de temperatura do ar (°C) e pressão parcial de vapor (kPa), entre os níveis 1 e 2. Os valores da pressão de vapor no ar (e), foram calculados de acordo com Allen et al. (1998, p.297).

A partir dos critérios propostos por Perez et al. (1999, p. 141) os dados inconsistentes de β foram excluídos. Assim em função dos sinais observados na relação fluxo-gradiente entre os componentes e de quais valores de β próximos de -1 poderiam ser desprezados, com base na precisão das medidas de temperatura e umidade do ar, as quais foram consideradas, para o tipo de sensor usado (HMP35A), como $\pm 0,2$ °C e $\pm 2\%$ para a temperatura ($\delta\Delta T$) e umidade relativa do ar ($\delta\Delta e$) respectivamente. Tais valores foram utilizados para a obtenção do erro (ε), a fim de se determinar o intervalo próximo de -1 a ser excluído.

$$\varepsilon = \frac{(\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T)}{\Delta e} \quad (42)$$

O intervalo excluído foram os valores de β próximos de -1:

$$-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$$

De forma adicional foi utilizado o critério de Ortega-farias et al. (1996, p. 131), em que desconsiderou-se os valores de $\beta < -0,75$.

Após o controle de qualidade, foi feito o preenchimento de falhas, onde os dados de fluxo de energia (H ou LE) eram obtidos em função da correlação encontrada com a energia disponível ($Rn + G$) para cada fase. Os horários mais comuns de ocorrência de erros pelo método da razão de Bowen são os referentes ao período noturno, ao amanhecer e no fim da

tarde, estes dois últimos decorrentes da mudança no sinal nos saldos de radiação e no fluxo de calor no solo (PEREZ et al., 1999, p. 141; TEIXEIRA, 2012, p. 1544)

Assumiu-se a evapotranspiração da cultura (ETC_B) como sendo dependente do fluxo de calor latente consumido no dia (Equação 43)

$$ETC_B = \frac{LE}{\lambda} \quad (43)$$

Em que: ETC_B é a evapotranspiração de cultura pelo método de razão de Bowem; LE é o fluxo de calor latente; e λ é o calor latente de vaporização da água.

4.2.6 Evapotranspiração pelos Lisímetros de drenagem (ETC_{Lis})

A ETC_{Lis} foi monitorada diariamente, pelo método direto, utilizando-se quatro lisímetros de drenagem idênticos instalados na extremidade do experimento, com capacidade volumétrica de 500 L, construídos a partir de caixas de água de plástico, em formato cônico, e com as seguintes medidas: diâmetros superior e inferior de 1,20 m e 0,98 m, respectivamente, e profundidade de 0,60 m, semelhante aos trabalhos de Marques et al. (2015, p. 745) e descrito por Farias et al., (2017, p.190).

No local da instalação, foi realizada a separação das camadas de solo escavando-se, manualmente, o solo em quatro camadas de 15 cm, até profundidade igual a 60 cm. Em cada camada foram coletadas amostras de solo para caracterização física para manter ao máximo possível as condições e características iniciais do solo dentro dos lisímetros. Após um período de um mês foram semeadas treze sementes por metro linear e posteriormente desbastadas, totalizando dez plantas por metro linear e 20 plantas em cada lisímetro.

Estimou-se a ETC_{Lis} utilizando-se o balanço hídrico aplicado a um volume de controle de solo conforme a Equação 44 (SANTOS et al., 2009, p. 304).

$$ETC_{LIS} = P + I - D \quad (44)$$

Em que:

P a precipitação; I é a irrigação; D é a drenagem; ETC evapotranspiração da cultura. Para o caso em questão, os termos ascensão capilar e o escoamento superficial foram desprezados.

4.2.7 Estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (ETC_{PM}).

A ETC_{PM} foi expressa de acordo com a seguinte equação (MONTEITH; UNSWORTH, 1990, p. 291):

$$ET_{PM} = \frac{\Delta.(Rn-G) + \gamma.Ea}{\Delta + \gamma(1 + rc.ra^{-1})} \quad (45)$$

Em que:

ET_{PM} é a evapotranspiração calculada do modelo de Penman-Monteith numa base horária (mm h^{-1}); Δ a inclinação da curva de pressão de vapor em função da temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn o saldo de radiação (mm h^{-1}); G o fluxo de calor no solo (mm h^{-1}); Ea é o transporte de vapor aerodinâmico (mm h^{-1}); γ a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e rc e ra as resistências do dossel e aerodinâmica (s m^{-1}), respectivamente.

Ea apresenta o efeito combinado da velocidade do vento, temperatura do ar e déficit de pressão de vapor sobre as perdas de água do dossel e pode ser definida pela Equação 38.

$$Ea = \frac{L_V . \varepsilon . \rho_a . DPV}{P.ra.cf} \quad (46)$$

Em que:

DPV déficit de pressão de vapor (kPa); L_V calor latente de vaporização (J kg^{-1}); ρ_a densidade do ar (Kg m^{-3}); ε Relação entre o peso molecular do vapor de água e o do ar seco (0,622); P pressão atmosférica (kPa); cf fator de conversão ($680 \text{ W m}^{-2} (\text{mm h}^{-1})^{-1}$).

Para estimativa da resistência aerodinâmica, Allen et al. (1989) recomenda a seguinte equação:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m-d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h-d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_2} \quad (47)$$

Em que:

z_m a altura de medição da velocidade do vento (m); z_h a altura de medição da umidade relativa (m); d a altura de deslocamento do plano zero (m); z_{om} o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (m); z_{oh} o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (m); k a constante de Von Karman (0,41) e u_2 a velocidade do vento na altura z (m s^{-1}).

A altura de deslocamento do plano zero (d) e o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (z_{om}) foram estimados em função da altura da cultura (h_c) por meio das seguintes equações (BRUTSAERT, 1982, p. 299):

$$d = \frac{2}{3} h_c \quad z_{om} = 0,123 h_c \quad (48)$$

Já o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (z_{oh}) pôde ser estimado por (BRUTSAERT, 1982, p. 299):

$$Z_{oh} = 0,1 z_{om} \quad (49)$$

A inclinação (Δ) da curva de pressão de vapor em função da temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) foi obtida a partir da equação (ALLEN et al., 1998, p. 299):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (50)$$

sendo T a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), e_s pressão de saturação de vapor.

4.2.8 Estimativa de r_c por Ortega-Farias (1993) (rc_O) e por Lima et al (2016) (rc_L).

A rc foi obtida pela equação proposta por Ortega-Farias (1993, p.137), a qual, foi utilizada na estimativa horaria da ETC_{PM} . É um modelo alternativo muito atrativo para os usuários da equação de Penman Monteith, pois necessita de dados similares (saldo de radiação, déficit de pressão de vapor), sendo de fácil implementação, podendo incluir os valores do conteúdo de água do solo, além disso, esse modelo foi usado com sucesso em várias culturas (ORTEGA-FARIAS et al., 1999, p. 129), (ORTEGA-FARIAS et al., 2000,) (ORTEGA-FARIAS et al., 2004, p. 1).

$$r_c = \frac{\rho_a \cdot c_p \cdot DPV}{\Delta \cdot (Rn - G)} \cdot F^{-1} \quad (51)$$

Em que:

c_p o calor específico do ar à pressão constante ($1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e F o conteúdo de água do solo normalizado (0 a 1).

O valor F pode ser estimado utilizando a metodologia proposta por Noilhan e Planton (1989, p. 536).

$$F = \frac{\theta_r^i - \theta_{pm}}{\theta_{cc} - \theta_{pm}} \quad (52)$$

Em que:

θ_r^i a umidade do solo, medida pelos TDRs, θ_{cc} e θ_{pm} valores do conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha respectivamente. Esses valores foram obtidos em laboratório, determinados em amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se a câmara de pressão de Richards.

O valor F nesse estudo foi de 1 na maioria do período do experimento.

A rc também foi obtida através da gf estimada conforme Lima et al., (2016) (rc_L) para estimativa da ETC_{PM} em escala diária, pois o modelo estima a gf em escala diária.

$$gf = gf_p * Fp \quad (53)$$

Em que:

gfp é a condutância estomática potencial. As medidas de gfp foram obtidas conforme equações 45, 46 e 47.

$$gfp = 755 * e^{(-e^{(-z)} - z + 1)} - 46 \quad (54)$$

$$z = \frac{prod - 0,021}{0,026} \quad (55)$$

$$prod = \frac{T * DPV}{I_0} \quad (56)$$

Em que:

T, DPV e I_0 correspondem a valores médios de temperatura média do ar (°C), déficit de pressão de vapor no ar (kPa) e irradiância solar ($KJ h^{-1}$) obtidos entre 11 e 13 horas, O z é um fator de ponderação em função do produto das variáveis meteorológicas ($prod$).

O fator de penalização (Fp) expressa a redução relativa da gfp em função da fração de água atual disponível no solo (F). O Fp , pode variar de 0 a 1 sendo 1 para condições ótimas de água no solo e 0 para condição de ponto de murcha permanente.

$$Fp = \frac{2}{1 + e^{(-5,9*(F-0,009))}} - 1 \quad (57)$$

Foi determinada primeiramente a resistência estomática (r_s) conforme Vico et al., (2013, p. 191).

$$r_s = 1/gf \quad (58)$$

Posteriormente, rc_L foi determinada conforme proposta organizada e recomendada pela FAO, em que, rc é calculada em função da resistência estomática (r_s) e do índice de área foliar (IAF) da cultura (SMITH, 1991), ou seja:

$$rc_L = \frac{r_s}{0,5 \times IAF} \quad (59)$$

4.2.9 Análises estatísticas e validação do modelo.

A avaliação das estimativas da evapotranspiração calculadas por Penman-Monteith (ETC_{PM}) com a formulação de rc_O e rc_L , foi feita em comparação aos valores de evapotranspiração obtidos pelo método do balanço de energia-razão de Bowen (ETC_B), para os valores horários e lisímetros (ETC_{Lis}) para os valores diários. Esta comparação incluiu a

razão (b) entre ETC_{PM} e ETC_B e ETC_{PM} e ETc dos Lisímetros, o teste Z para checar se o valor de b foi significativamente diferente de 1.

A avaliação do desempenho e eficiência do modelo foi por meio de testes estatísticos de validação como: Erro padrão (SE); índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985, p. 8995) e coeficiente de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS 1997, p. 89) e coeficiente de determinação (r^2). Os melhores resultados devem apresentar elevados valores de d , c r^2 e valores reduzidos valores de SE.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P-O)^2}{\sum_{i=1}^N [(|P-\bar{O}|) + (|O-\bar{O}|)]^2} \quad (60)$$

Em que: O são os dados observados, P os dados estimados, \bar{O} média dos dados observados e N números de dados.

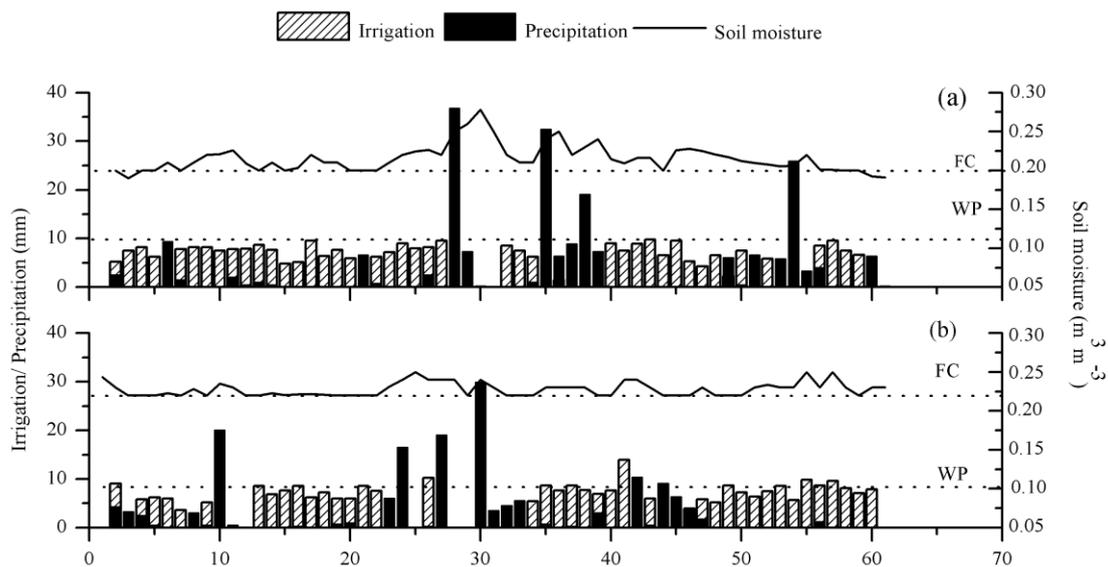
$$c = r \cdot d \quad (61)$$

Em que: r é o coeficiente de correlação e d o índice de Willmott.

4.3 Resultado e discussão

Durante os anos do estudo, a temperatura média do ar (28 °C) e a umidade relativa (80%), mantiveram-se próximas a média climática da região para esse período ao longo do ciclo da cultura. O total de chuvas observado durante o experimento de 2013 foi de 207,51 mm, enquanto que em 2014 ocorreram 160,00 mm. Apesar desta diferença no regime de chuvas entre os experimentos, a oferta de água pelo sistema de irrigação somado aos eventos de chuva durante o período experimental, fez com que a cultura fosse submetida à condições elevadas de umidade do solo (Figura 1), de modo a possibilitar uma condição potencial de perda de água via evapotranspiração. Nos dias em que não ocorreram precipitações utilizou-se irrigação por gotejamento aplicada no final do dia, cuja lamina total correspondeu a 285,58; 268,39 mm.

Figura 16. Irrigação (mm), precipitação (mm), umidade do solo ($m^3 m^{-3}$), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PM) ao longo do ciclo do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do município de Castanhal-Pa.

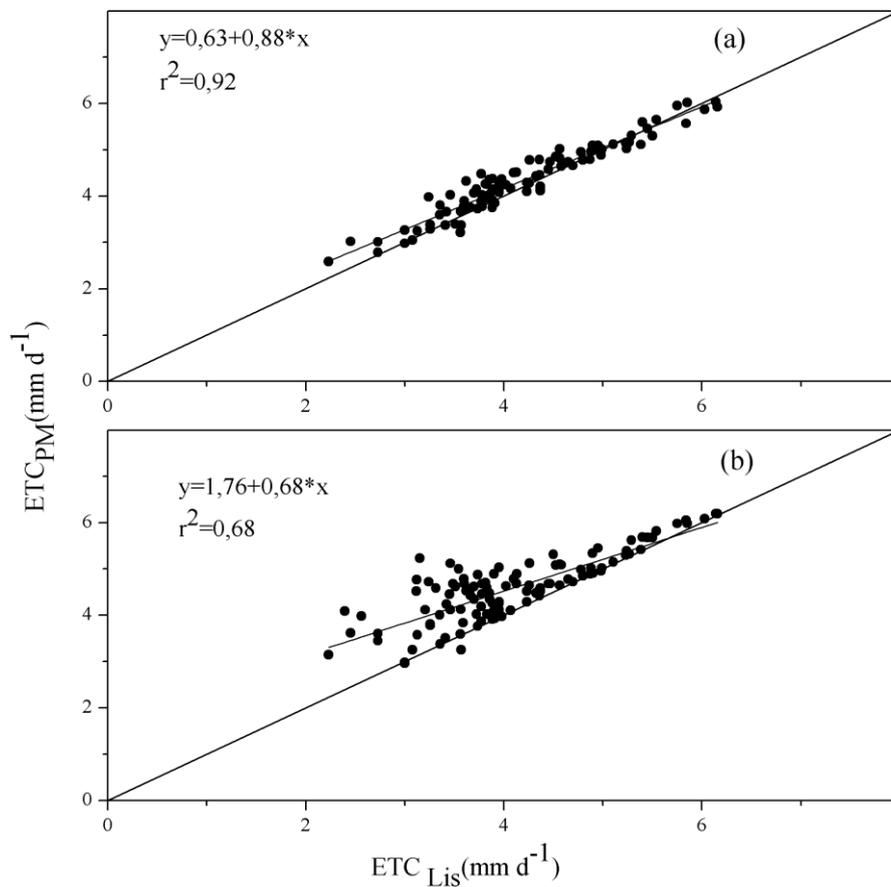


A comparação dos valores diários de evapotranspiração do feijão caupi entre os métodos estão apresentadas na Figura 2. As regressões foram significativas ($p < 0,001$) e indicaram que poucos valores de ETC_{PM} calculados com a rc_L proposta a partir da g_f estimada por Lima et al., (2016 p. 547) tenderam a serem maiores do que os valores encontrados com os lisímetros (ETC_{Lis}), com uma superestimativa média de 1,81% ou 4,4 mm. Contudo essa

superestimativa é mais acentuada nos valores de ETC_{PM} calculados com rc proposta por Ortega Farias (rc_O).

Os valores acumulados de evapotranspiração ao longo do ciclo do feijão-caupi estimados por ETC_{PM} calculados com rc_O e medidos pelos lisímetros (ETC_{Lis}) foram de 247,93 e 277,67 mm, respectivamente, indicando que o modelo de Penman Monteith superestimou, na média, em 10% o valor encontrado pelos lisímetros, o que correspondeu em média a uma diferença acumulada de aproximadamente 30,00 mm.

Figura 17. Correlação entre evapotranspiração da cultura (ETC_{Lis}) medida no lisímetro e estimada pelo método Penman-Monteith (ETC_{PM}), com resistência do dossel proposta a partir da condutância estimada por Lima et al (2016) e proposta por Ortega Farias (1993).



O modelo de Penman Monteith também superestimou os valores de evapotranspiração da cultura para uma espécie de planta ornamental, *impatiens nova guiné* (Morille et al., 2013, p. 80). Os autores concluíram que a superestimativa deveu-se ao fato do modelo considerar apenas as condições climáticas acima da cultura, e observaram um

aumento significativo na qualidade dos resultados comparados aos obtidos pelo método direto, quando foram considerados os parâmetros climáticos dentro do dossel.

Os valores de ETC_{PM} estimadas com rc_L ficaram mais próximos da linha 1:1, com um coeficiente de determinação (r^2) igual a 0,92, já para os valores de ETC_{PM} estimados com rc_O apresentaram r^2 igual 0,68. O baixo valor de r^2 foi devido os valores elevados de ETC_{PM} estimadas por rc_O no período de baixo IAF, quando há uma maior contribuição da evaporação do solo (Figura 2).

Para o modelo de Penman Monteith calculado com rc_O , os valores diários de evapotranspiração, foram avaliados no período de $IAF < 3$ ou $IAF \geq 3$ (Tabela 5), respectivamente, para analisar o desempenho do modelo proposto com baixa e alta cobertura de dossel (Ortega-Farias et al., 2004 p.1).

Como pode ser observado na Tabela 1, não só o r^2 como os valores dos outros testes melhoram quando estimados somente para período de $IAF \geq 3$. Ortega Farias ajustou um modelo para a grama, o qual, não considera o IAF na estimativa da rc_O , o que provocou elevados valores de ETC_{PM} para períodos de $IAF < 3$. Xu et al., (2017, p.55) concluíram que os parâmetros do modelo de rc foram cruciais para a precisão da simulação ETC do arroz nas condições climáticas subtropicais da região do lago da China. Segundo os autores, a condição de cobertura do dossel é a chave para a aplicabilidade do modelo de Penman Monteith, já que o modelo assume a cobertura do dossel como uma única "grande-folha".

Tabela 10. Estatísticas do desempenho do modelo de Penman-Monteith para valores diários com a rc_O proposta por Ortega-Farias (1993) e rc_L estimada a partir da condutância estomática (gf) proposta por Lima et al. (2016, p.547) e para valores horários com rc_O proposta por Ortega Farias.

| Testes | $ETC_{PM} rc_O$ horária | $ETC_{PM} rc_O$ diária ($IAF < 3$) | $ETC_{PM} rc_O$ diária ($IAF \geq 3$) | $ETC_{PM} rc_L$ diária |
|-------------|-------------------------|---|--|------------------------|
| d | 0,991 | 0,98 | 0,998 | 0,998 |
| SE | 0,07 | 0,83 | 0,30 | 0,28 |
| c | 0,943 | 0,68 | 0,96 | 0,96 |
| r^2 | 0,92 | 0,47 | 0,94 | 0,95 |
| B | 0,86 | 1,14 | 1,02 | 0,98 |
| Teste Z^2 | F | F | V | V |

A exatidão do modelo foi testada por meio do coeficiente d (Tabela10), onde observou-se em média bom ajuste para os valores horários e diários de estimativa de ETC_{PM} . Lima et al. (2006, p. 477) encontraram alta exatidão entre os valores de ETC do feijão caupi

estimados por razão de Bowen e calculada pelo modelo de Penman-Monteith com resistência do dossel proposta por Ortega Farias (1993), apresentando valores de d maiores que 0,99. Porém avaliaram apenas os valores de evapotranspiração a partir de 23 DAS, onde provavelmente, os valores de IAF eram iguais ou muito próximos de 3.

Nesta pesquisa também foi possível observar ótimos ajustes para a ETC_{PM} diária estimada com rc_O , para o período do ciclo em que a cultura apresentava $IAF \geq 3$ com d de 0,998, c de 0,96, r^2 de 0,94 e SE de 0,30, porém esses valores são inferiores quando estimados para o período de $IAF \leq 3$.

Os melhores resultados de ETC_{PM} diário foram encontrados utilizando a rc_L . Isso foi possível devido a utilização do IAF na estimativa da resistência do dossel e ainda pelo fato que a rc_L foi calculada com um modelo de gf ajustado e validado para feijão-caupi na região Amazônica. Segundo Pasquale e Theodore (1998, p.185) o IAF como indicador do grau de cobertura do dossel também afeta a rc .

A Figura 18 mostra que os valores diários calculados pelo modelo Penman-Monteith (ETC_{PM}) foram muito próximos dos valores estimados pelo método do balanço de energia (ETC_B), havendo, no entanto, uma superestimativa do modelo calculado com rc_O no início e final do ciclo do feijão-caupi, onde o $IAF < 3$.

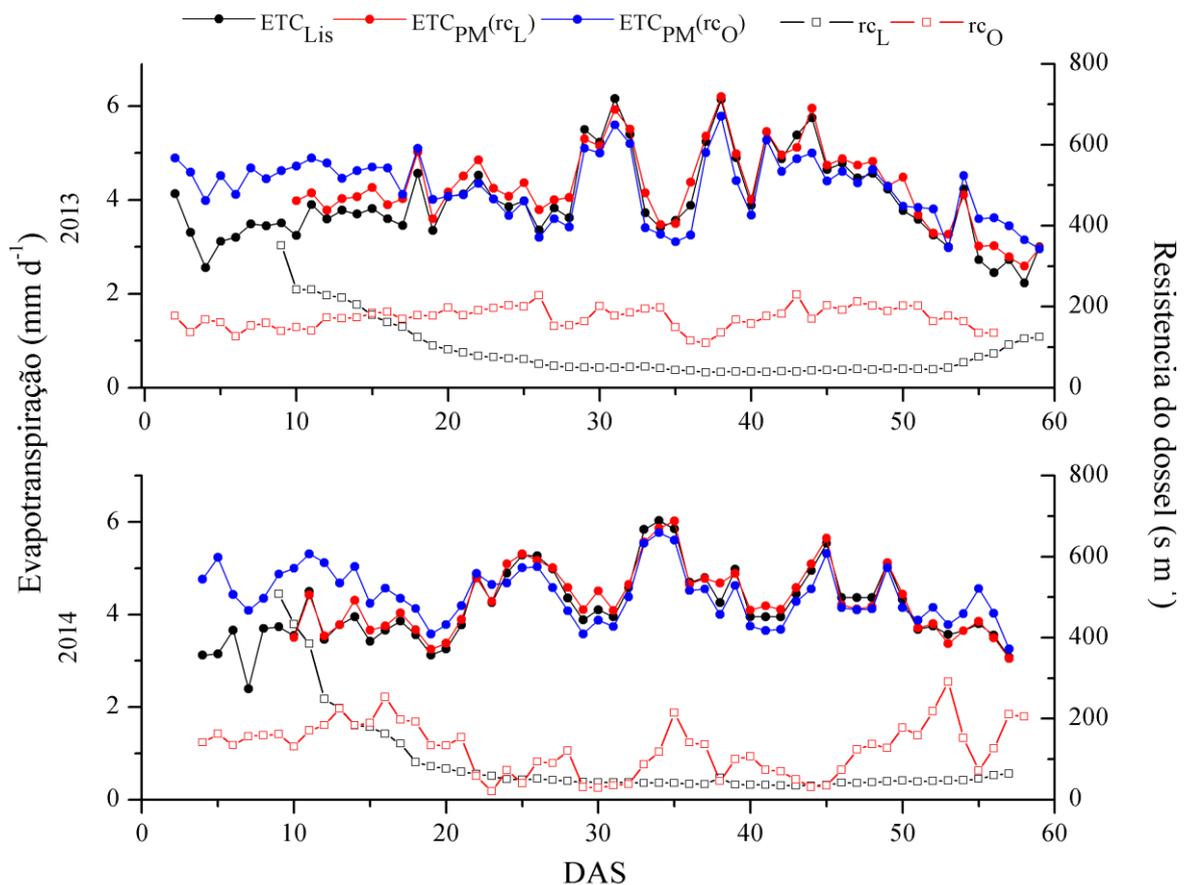
Contudo para os dados diários de $IAF \geq 3$, o teste Z indicou que a razão b (1,02) foi estatisticamente igual a 1, sugerindo a igualdade entre ETC_{PM} obtida com rc_O e a ETC_B para esse período. Ortega-Farias et al. (2004, p.1) encontraram para a cultura de soja, resultados de SE igual a 0,47 mm d^{-1} e valor b de 0,97, o qual não diferiu estatisticamente de 1. Por outro lado, o mesmo método aplicado a uma cultura de tomate gerou um erro padrão de estimativa de 0,51 mm d^{-1} , com a razão b sendo diferente de 1 (Ortega-Farias et al., 2000, p.91).

A rc_O apresentou variação principalmente em função do DPV e R_n uma vez que não houve mudanças significativas no conteúdo de água no solo normalizado (F), já que essas variáveis climáticas possuem maior importância no controle do processo físico da evaporação (Ortega-Farias et al., 2004, p1). O efeito do DPV é amplamente aceito na literatura especializada e seu aumento tem efeito direto na transpiração e consequente redução da gf , e em condições de campo a redução da gf está mais relacionada com a redução da R_n (Lima et al. 2016, p, 547).

Os valores de gf estimados por Lima et al. (2016, p, 547) também variaram em função do DPV e do R_n , porém o rc_L , que foi calculada em função da resistência estomática (r_s) e do índice de área foliar (IAF) da cultura, variou menos que a rc_O , pois, sua variação dependeu do IAF, em uma relação inversamente proporcional, com valores de rc_L mais elevados no início

do ciclo sob condições de baixo IAF. Indicando que, no início e no final do ciclo, onde a cultura apresenta IAF menores, existem maior resistência do dossel, e ainda neste período as condições atmosféricas, como vento e umidade do ar, desempenhavam maior influência sobre a transferência de vapor d'água para atmosfera, havendo, porém, maior evaporação do solo do que transpiração em função do baixo IAF. (Farias et al. 2017, p.190).

Figura 18. Evapotranspiração diária obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ETB) e pelo método de Penman-Monteith (ETPM), saldo de radiação (R_n) e resistência do dossel (r_c) durante o período de 04/04/2002 a 14/06/2002 (23-94 DAP).



Quanto ao desempenho do modelo de Penman Monteith obtido com a rc_O em escala horária (Tabela 10), os valores de evapotranspiração do feijão-caupi horários, apresentaram-se muito próximos do estimado, com valores elevados de d 0,991 e c 0,943 e r^2 0,92. O valor do SE para os valores horários foi igual a $0,07 \text{ mm h}^{-1}$. Os resultados do teste Z mostraram que o valor b (0,86) foi estatisticamente diferente da unidade no nível de confiança de 95%, indicando que os valores de ETC_{PM} tenderam a ser menores que os valores de ETC_B numa escala horária. Ortega-Farias et al. (2004, p.1) encontraram resultados semelhantes aos dessa

pesquisa, com um valor de SE igual a 0,06 mm h⁻¹ e b diferente de 1, numa cultura de soja sob variadas condições de umidade do solo e atmosféricas.

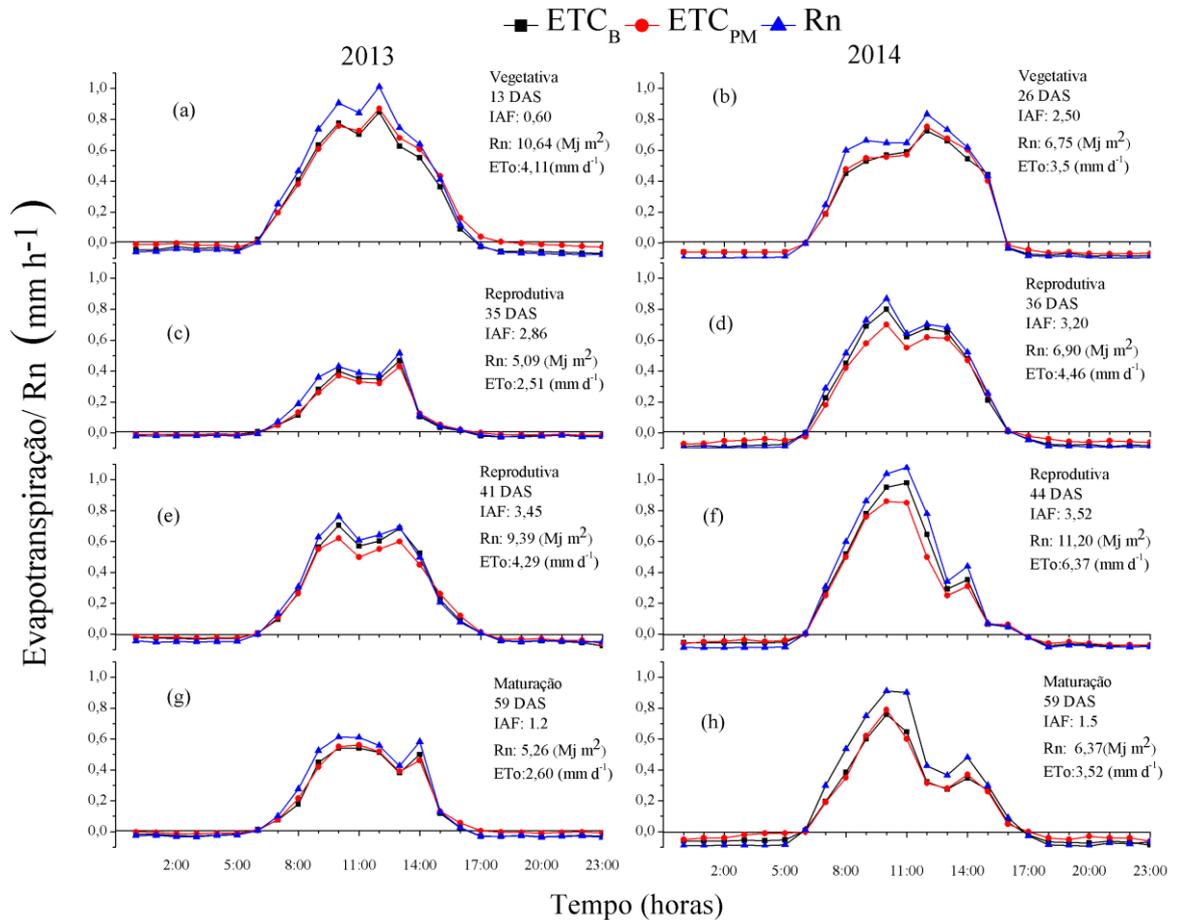
Foi avaliado o desempenho do modelo de Penman Monteith obtido com a rc_0 em escala horária, em diferentes estádios de crescimento e sob diferentes condições meteorológicas. Os valores de evapotranspiração horária durante a fase vegetativa, reprodutiva e de maturação fisiológica do feijão caupi, estimados pelo método do balanço de energia - Razão de Bowen (ETC_B) e calculada pelo método de Penman-Monteith (ETC_{PM}) são apresentados na Figura 19.

Apesar dos dias avaliados apresentarem condições atmosféricas diferentes nos dois anos, conforme observado nos dados de saldo de radiação (R_n) e de evapotranspiração de referencia (ET_0), o conteúdo de água do solo esteve sempre elevado (Figura 16), tanto na fase vegetativa como na fase reprodutiva e na maturação fisiológica, e sob tais condições a estimativa de ETC_{PM} na escala horária apresentou bom ajuste e mesmo padrão para diferentes condições meteorológicas e para os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

O R_n e as ETC_B e ETC_{PM} diminuíram rapidamente em 2013 nos dias 35 e 59 DAS e em 2014 nos dias 26 e 44 DAS. Esse fenômeno pode ser atribuído às condições de nebulosidade devido a chuva ocorrida nesses dias, e a grande variação na condutância estomática da cultura que ocorre à medida que a luz se desvanece (Allen et al. 2006, p. 1; Xu et al 2017, p.55).

Para todas as condições climáticas analisadas, a ETC_{PM} e a ETC_B foram amplamente afetadas por R_n , e o seu padrão de variação diurno acompanhou basicamente a curva de disponibilidade de energia. Xu et al. (2017, p. 55) também observaram que tanto os valores de evapotranspiração observados como os simulados por ETC_{PM} foram influenciados por R_n e apresentaram o mesmo padrão de variação em todos os estádios de crescimento do arroz, independente das condições meteorológicas, com uma tendência em superestimar ou subestimar ao meio-dia.

Figura 19- Valores de evapotranspiração horária estimada por Razão de Bowen(ETC_B), Penman Monteith (ETC_{PM}) e Saldo de radiação (Rn), em diferentes fases fenológicas e diferentes condições atmosféricas.



Observa-se que durante a fase vegetativa (Figura 4a e 4b) os valores de ETC_{PM} foram próximos aos de ETC_B , com índice de concordância de 0,9964 e de 0,9942, para os anos de 2013 e 2014, respectivamente. Na fase reprodutiva, os valores de ETC_B e de ETC_{PM} também foram similares, independentemente das condições atmosféricas. Todos os dias apresentaram uma alta exatidão na estimativa de ETC_{PM} com d acima de 0,9905, havendo, no entanto, uma tendência em subestimar a evapotranspiração medida (ETC_B) durante o período de 10:00 hs as 14:00 hs, nos dias de maior demanda atmosférica, semelhante ao observado por Xu et al. (2017).

Considerando que nessa fase o índice de área foliar é superior a 3, a evaporação do solo é tão pequena, que a resistência de superfície permite uma boa aproximação do parâmetro fisiológico resistência estomática (Kelliher et al. 1995). Portanto, a subestimativa nos valores de ETC_{PM} nessa fase, pode ser devido a maior resistência estomática, provocada pelo aumento do saldo de radiação no horário.

Lima et al. (2016, p. 547) perceberam que a condutância estomática do feijão-caupi diminui em horários onde há valores elevados no DPV. Farias et al. (2017, p. 190), observaram em uma relação linear entre a coeficiente da cultura (K_c) e a evapotranspiração de referência (E_{To}), que o K_c diminui sob altos valores de E_{To} , mesmo sob elevada umidade do solo. Indicando haver um maior controle da transpiração pela planta através do fechamento estomático sob a tais condições, o que pode também ser um dos motivos da diferença encontrada em relação aos demais trabalhos indicando um aumento das resistências internas ao transporte de água do feijão-caupi quando submetidos à condições de alta demanda atmosférica, mesmo em condições de elevado conteúdo de água no solo.

Xu et al. (2017) também notaram que a evapotranspiração observada do arroz foi ligeiramente superior à simulada pelo modelo de Penman Monteith ao meio-dia (durante 11:00-13:00) nos dias em que o solo estava saturado e em períodos de grande taxa de evaporação. Os autores deduziram que, como o modelo PM é caracterizado como um modelo de "grande-folha", o dossel é praticamente a única fonte de vapor de água no período de maior IAF, e a evapotranspiração é equivalente à transpiração da cultura.

Durante a fase reprodutiva a cultura utiliza maior quantidade de água nos seus processos fisiológicos do que nas fases anteriores resultando em um valor médio da razão ETC_B/R_n na fase de 0,85 e da razão ETC_{PM}/R_n de 0,82. Durante a fase vegetativa a razão ETB/R_n atingiu 0,74 e 0,76 para a razão $ETPM/R_n$, indicando um aumento da evapotranspiração da fase vegetativa para a fase reprodutiva,

Por esses dados conclui-se que, na fase reprodutiva, considerando a razão ETC_B/R_n , cerca de 85% do saldo de radiação foram utilizados no processo de evapotranspiração. Esses valores foram mais elevados que alguns encontrados na literatura. Lima et al. (2006 p. 447) para o feijão-caupi na fase reprodutiva ($ET_B/R_n=0,82$; $ET_{PM}/R_n=0,74$) e na fase vegetativa ($ET_B/R_n=0,71$; $ET_{PM}/R_n=0,67$) nas condições da microrregião do Brejo Paraibano.

San José et al. (2003) encontraram, durante a fase reprodutiva do feijão-caupi cultivado nas condições das savanas tropicais da Venezuela, valores médios da razão $LE/(R_n-G)$ de 0,79, ou seja, 79% da energia disponível foram utilizados para o processo de evapotranspiração da cultura. Lima et al. (2011 p. 65) observaram fração evaporativa ($LE/(R_n-G)$) de cerca de 84% na fase vegetativa e 73% na fase reprodutiva do feijão caupi em condições de sequeiro em Pernambuco.

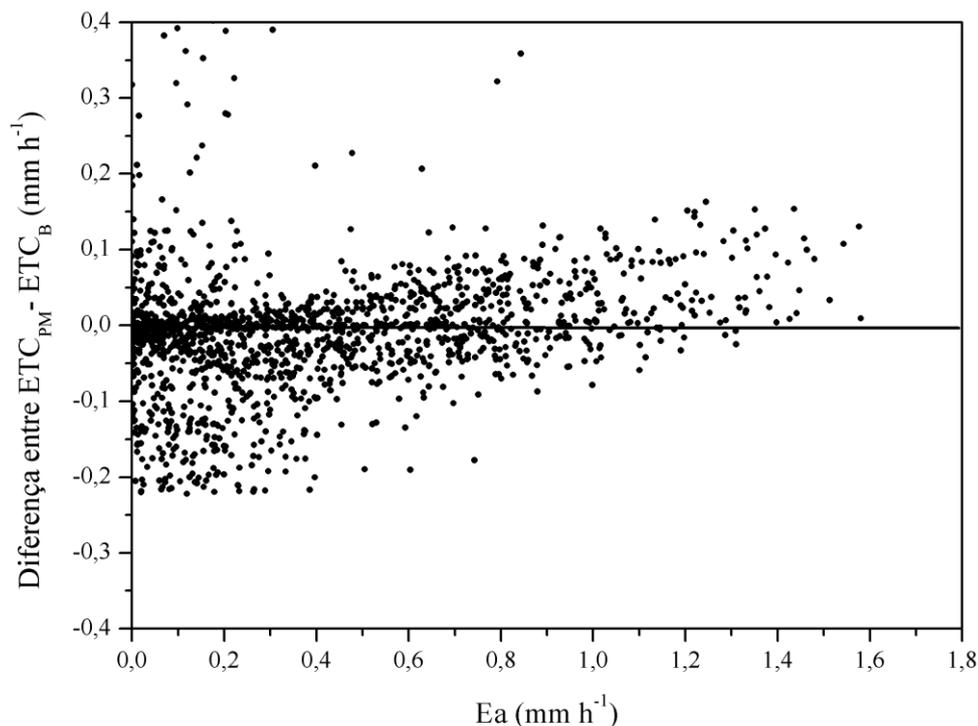
A elevada fração evaporativa já era esperada, visto que a lâmina total de água aplicada nos dois anos de experimento, através da irrigação e da chuva, atingiu em média $386,04 \text{ mm} \pm 18,13 \text{ mm}$. Comparando esse valor com a evapotranspiração acumulada no mesmo período,

constata-se que a cultura não sofreu restrição de água, tendo recebido uma lâmina extra de água drenada de $138,11 \text{ mm} \pm 5,10 \text{ mm}$, em todo período estudado, diferente dos trabalhos citados acima, os quais foram realizados em condições de sequeiro e sob diferentes conteúdos de água no solo.

Durante os dias observados na fase de maturação fisiológica (Figura 4g e 4h) os valores de ETC_B e ETC_{PM} também foram muito próximos com d igual a 0,99. Nessa fase a cultura ainda utiliza água para os seus processos fisiológicos, porém em menor quantidade do que na fase reprodutiva, já que parte de suas folhas se encontrava em senescência, havendo supostamente contribuição da evaporação da água do solo na evapotranspiração.

O valor máximo de E_a observado na região foi de $1,6 \text{ mm h}^{-1}$ (Figura 5), devido às condições de elevada umidade na região. Esse valor é considerado baixo quando comparado ao encontrado por Ortega Farias et al. (2004, p.1) na França para condições climáticas do mediterrâneo tropical, os quais observaram valores de E_a acima de 4 mm h^{-1} , em resposta às condições atmosféricas secas e com elevados valores de velocidade do vento.

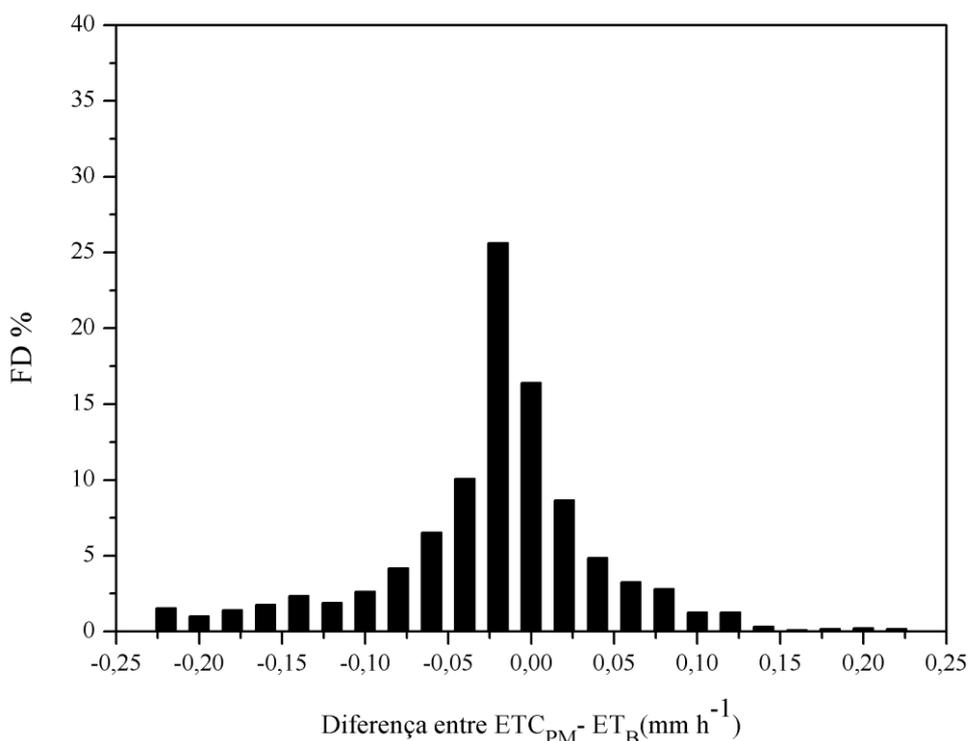
Figura 20. Diferença entre valores horários de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith (ETC_{PM}) e balanço de energia- razão de Bowen (ETC_B).



As maiores diferenças entre ETC_{PM} e ETC_B foram observadas para valores de E_a menores que 1 mm h^{-1} . Porém esses altos valores no erro absoluto representam uma frequência de distribuição insignificante e menor que 1% (Figura 6). O erro absoluto com maior frequência de distribuição (FD%) correspondeu a uma diferença de $-0,02 \text{ mm h}^{-1}$, contudo os valores negativos se concentram antes do valor de E_a de 1 mm h^{-1} , quando o DPV variou de 0,04 Kpa a 1,62 kPa. Os valores começaram a ficar positivos a partir de E_a 1 mm h^{-1} , quando o DPV variou de 2,06 kPa a 2,62 kPa.

Estes resultados indicam que a ETC_{PM} estimada tendeu a ser menor que a ETC_B observada em condições de menor transporte de vapor, sob condições de menor DPV, maior umidade relativa e de menor saldo de radiação. Sob tais condições o processo de evapotranspiração se tornou mais dependente da interação aerodinâmica entre a planta e a atmosfera, indicando que o feijão-caupi apresentou maior resistência do dossel e consequentemente redução na estimativa de ETC_{PM} , mesmo em condições de elevado conteúdo de água no solo. Por outro lado, sob condições de E_a acima de 1 mm h^{-1} a planta encontrou condições climáticas que permitiram menor resistência da superfície e aumento na estimativa de ETC_{PM} .

Figura 21. Frequência de distribuição da diferença entre os valores horários de evapotranspiração obtida pelo método de Penman Monteith ($ETCPM$) e balanço de energia- razão de Bowen ($ETCB$).



Nota-se ainda que os valores de ETC_{PM} tenderam a ser menor que ETC_B em escala horária, contudo as maiores diferenças apresentaram menor frequência de distribuição (FD%), indicando que de forma geral o modelo de Penman-Monteith com a resistência do dossel proposta por Ortega Farias (rc_O) apresentou bom ajuste para evapotranspiração horária.

4.4 Conclusão

O modelo de Penman-Monteith, com uma resistência do dossel proposta por Ortega-Farias (1993) (rc_O), pode ser usado para se estimar a evapotranspiração do feijão caupi, cultivado nas condições edafoclimáticas de Castanhal Pará. O modelo apresentou uma elevada exatidão, para todas as fases fenológicas do feijão caupi, na escala horária (d de 0,99) em diferentes condições atmosféricas. Em escala diária, o modelo apresentou maior precisão e exatidão para condições de $IAF \geq 3$. Contudo, o modelo de Penman Monteith estimou melhor a evapotranspiração do feijão caupi com a resistência do dossel (rc_L) estimada a partir da condutância (gf) proposta por Lima et al. (2016, p. 547).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998. 297p.

ALLEN, R.G., PRUITT, W.O., WRIGHT, J.L., HOWELL, T.A., VENTURA, F., SNYDER, R., SMITH, M. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, v.81 n.1, p. 1-22, 2006.

AZEVEDO, P. V.; SOUSA, I. F.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera L.*) orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.84, p.259-264, 2006.

BEZERRA, J. R. C.; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da; DIAS, J. M.; Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS 200 – Marrom, irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 625-632, 2010.

BORGES, C. J. R.; SILVA, V. DE P. R. DA; CAMPOS, J. H. B. C.; AZEVEDO, P. V. DE; MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. D. A. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.393-399, 2008.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Reidel: Dordrecht, 1982. 299 p.

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

CAVALCANTE JUNIOR, E. G. et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Revista Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, v. 32, p. 1699-1708, 2011.

ERSHADI, A., MCCABE, M.F., EVANS, J.P., WOOD, E.F. Impact of model structure and parameterization on penman–monteith type evaporation models. **Jornal Hydrologi**, v. 525, p. 521–535, 2015.

ESTEVEZ B.S.; SOUSA, E.F.; MENDONÇA J. C.; LOUSADA, L.L.; MARCIANO, C.R.; SIQUEIRA D.P. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n.3, p. 441-452, 2014.

FARIAS V.D.S.; LIMA, M.J.A.; NUNES, H.G.G.C.; SOUSA, D.P; SOUZA, P.J.O.P. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the Eastern Amazon. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 190 – 200, 2017.

GEPTS, P.; FERNÁNDEZ, F. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)**. Colômbia: CIAT. 1982.10 p.

JAMIESON, P.D.; PORTER, J. R.; WILSON, D.R. A test of computer simulation model ARC- WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops**. v 27, p. 337–350, 1991.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology** v.7, p. 51-73, Jan. 1991.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO A.C.D.; SOARES, W.A.; SILVA, I.F. Estimativa da evapotranspiração do feijão caupi utilizando o modelo de penman-monteith. **irriga**, botucatu, v. 11, n. 4, p. 477-491, outubro-dezembro, 2006.

LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P. ; SAMPAIO, L. S. ; SOUZA, P. J. O. P. O efeito combinado das variáveis ambientais na condutância estomática foliar do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v.34, n. 04, 2016.

MARQUES, P.A.A.JOSÉ J.V.; ROCHA H.S.; FRAGA JUNIOR E.F.F; SOARES D.A.; DURTE S.N. Consumo hídrico do manjeriço por meio de lisímetro de drenagem. **Irriga**, Botucatu, v.20, n. 4, p.745-761. 2015.

MEDLYN BE; DUURSMA RA; DE KAUWE MG. The optimal stomatal response to atmospheric CO₂ concentration: alternative solutions, alternative interpretations. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.9, p.13-24. 2013.

MERRIAM, J. L., KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M. **Principles of environmental physics**. 2.ed. Londres: Edward Arnold, 1990. 291 p.

MORILLE, B.; MIGEON, C.;BOURNET, P. E. Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. **Scientia Horticulturae**. v. 152, p.80-91, mar. 2013.

NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parameterization of land surface process for meteorological models. *Monthly Weather Review*, Washington, v.177, n.3, p.536-549, 1989.

ORTEGA-FARIAS, S. **A comparative evaluation of the residual energy balance, Penman and Penman-Monteith estimates of daytime variation of evapotranspiration**. 1993. 137f. Tese Phd. Oregon State University, Corvallis, Oregon, 1993.

ORTEGA-FARIAS, S.; CALDERON, R.; FUENTES, C. A. S. Y. Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith. **Ciencia Investigación Agraria**, Santiago, v.27, n.2, p.91-96, 2000.

ORTEGA-FARIAS, S.; OLIOSO, A.; ANTONIOLETTI, R.; BRISSON, N. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, Berlin, v.23, n.1, p.1-9, 2004.

ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 81, p. 131-143. 1996.

ORTEGA-FARIAS, S.; ACEVEDO, C.; FUENTES, S. Calibration of the Penman-Monteith method to estimate latent heat flux over a grass canopy. *Acta Horticulture*, Leuven, v.537, n.1, p.129-133, 1999.

PASQUALE, S.; THEODORE, C.H. Maize canopies under two soil water regimes: Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*.Amsterdam, v. 89 n.4, p. 185–200, 1998.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.97, n.3, p.141-150, 1999.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: Fealq, 2013.31 p.

PIRKNER, M.; DICKEN U.; TANNY, J. Penman-Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screenhouses: a case study with table-grape. *Int Jornal Biometeorol*, v.58, p.725–737, 2014.

QIU, R.; KANG, S.; DUA T.;TONG T.; HAO, X.; CHEN R.; CHENA R.; LIB, F. Effect of convection on the Penman–Monteith model estimates of hot pepper grown in solar greenhouse. *Scientia Horticulturae*, n.160. p. 163–171. 2013.

RANA, G.; KATERJI, N. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. *Theoretical and Applied Climatology*, Hamburgo, v.60, n.1-4, p.141-149, 1998.

REBELLO, FK; COSTA, AJG; FIGUEIRÓ, CLM. 2011. **Conjuntura da produção e comercialização do feijão-caupi no Nordeste Paraense: safra 2010**. Contexto Amazônico. Disponível em: http://www.bancoamazonia.com.br/images/arquivos/institucional/biblioteca/boletim/contexto_amazonico_4.pdf. Acessado em 09 setembro 2016.

ROSEMBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate**: the biological environment. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.

SANTOS, F.; MONTENEGRO, A. A. R.; SILVA, R.S. EDIVAR, R.S. Determinação do consumo hídrico da cenoura utilizando lisímetros de drenagem, no agreste pernambucano. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 4, n.3, p. 304-310. 2009.

SILVA, T.G.F., MOURA, M.S.B, ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.15, p.139-147. 2011.

SILVA, V. P.R.; GARCÊZ, L.R.A; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, M.F.; ALMEIDA, R.S.R. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em

condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.411–417, 2015.

SOUZA, C. B.; SILVA, B. B. DA; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, V. DE P. R. DA. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.400-407, 2008.

SOUZA, P.J.O.P.; RIBEIRO,A.; ROCHA, E.J.P.; FARIAS, J.R.B.; SOUZA, E.B. Sazonalidade no balanço de energia em áreas de cultivo de soja na Amazônia. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p.548-557, 2012.

SMITH M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome : FAO, 1991, p 54.

STANNARD, D.I. A theoretically based determination of bowenratio fetch requirements. **Boundary Layer Meteorology**, v.83, p.375-406, 1997.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W.G.M. Five methods to interpret field measurements of energy fluxes over a micro-splinker irrigated mango orchard. **Irrigation Science**, v.30, p.13-28, 2012.

VICO, G.; MANZONI, S.;PALMROTH, S.; WEIH, M.; KATUL, G. Aperspective on optimal leaf stomatal conductance under CO₂ and light co-limitations. **Agricultural and Forest Meteorology**. n. 182 p.191-199. 2013.

XU, J.; LIU, X.; YANG, S.; QI, Z.; WANG, Y. Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation by calibrating canopy resistance model parameters in the Penman-Monteith equation. **Agricultural Water Management**. v. 182, p. 55-66, 2017.

WILMOTT, C.J.; ACKLESON, R.E.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M.; KLINK, D.R.; LEGATES, J.; ROWE C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of geophysical research**, p. 8995-9005. 1985.

ZHAO, N.N., LIU, Y., CAI, J.B., ROSA, R.D., PAREDES, P., PEREIRA, L.S. Dual cropcoefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize cropsequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporationcomponent. **Agricultural Water Management**, v.117, p. 93–105, 2013.