

AValiação DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO MODELO DSSAT/CROPGRO-SOYBEAN PARA LOCALIDADE DE PIRACICABA-SP.

Rodolfo Armando de Almeida Pereira¹, Evandro Henrique Figueiredo Moura da Silva², Alexandre Ortega Gonçalves³, Murilo Carreira Ruiz Morales⁴, Fábio Ricardo Marin⁵

¹Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo, rodolfopereira@usp.br; ²Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo, ehfmsilva@usp.br; ³Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo, alexandre.ortega@embrapa.br; ⁴Graduando em Engenharia Agrônômica, ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo, murilo.morales@usp.br; ⁵Professor Associado do Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo, fabio.marin@usp.br.

RESUMO: A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais *commodity* agrícola, principalmente no Brasil que tem parte significativa de seu PIB justificado pela agricultura. Nesse sentido é importante a realização de estudos relacionados a produtividade da soja, sendo bastante comum a utilização de modelos de produtividade. O experimento foi conduzido na cidade de Piracicaba-SP, utilizando-se a cultivar PRODUZA IPRO, dando início ao plantio no dia 09 de novembro de 2016, adotando-se sistema de plantio direto em uma área de antecessão de milho consorciado com braquiária. O objetivo deste trabalho, então, foi avaliar e comparar dentro da plataforma DSSAT, no modelo CROPGRO-Soybean dois métodos (o primeiro método utilizado foi o de Penman-Monteith, o segundo Priestley-Taylor) que estimam a evapotranspiração da cultura, a partir de radiação, temperatura do ar e precipitação como parâmetros de entrada. Ambos os modelos, quando comparados com o modelo de razão de Bowen, apresentaram resultados insatisfatórios, devido a tendência em superestimar a ETc. Pode-se dizer que o modelo de Penman-Monteith apresentou dados de evapotranspiração mais próximos da realidade.

PALAVRAS-CHAVE: Penman-Monteith, Priestley-Taylor, razão de Bowen

EVAPOTRANSPIRATION ASSESSMENT EVALUATED BY MODEL DSSAT / CROPGRO-SOYBEAN TO PIRACICABA-SP.

ABSTRACT: The soybean (*Glycine max* L.) is the main agricultural commodity, mainly in Brazil that has significant GDP's part justify by the soybean. In this way, it is very important the studies achievement associated with the soy bean's production, it is beeing very commom the use of productivity models. Experiment was conducted at *Piracicaba-SP*, it was used the cultivate (grow crops) PRODUZA IPRO, the planting had is beginning on November 09, 2016, it was adopted a direct planting system in an area with corn and brachiaria antecessors cultures. The goal of this paper was evaluate and compare in a DSSAT/CROPGRO-Soybean model with two methods (Penman-Monteith and Priestley-Taylor) that estimate culture's evapotranspiration according to radiation, air temperature and precipitation with input parameters. Both models when compare with Bowen Ratio, showed unsatisfactory results, due tendency to overestimate the ETc. It's possible to say the Penman-Monteith's model showed evapotranspiration's results more reals.

KEY-WORDS: Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Bowen Ratio

INTRODUÇÃO

Na safra 2015/2016 a soja (*Glycine max* L.) sofreu um quebra na produtividade, fazendo com que a produtividade média brasileira caísse para 2.882 kg.ha⁻¹ (EMBRAPA, 2015). Essa redução na produtividade é geralmente associada a ataques de pragas, doenças ou fatores meteorológicos, principalmente relacionados as condições hídricas como a irregularidade de chuvas, afetando principalmente o balanço hídrico. O efeito hídrico na produtividade da soja é relatado em alguns trabalhos, como o de Matzenauer et al., (2003), Cunha et al., (1998) e Adeboye et al., (2017), onde neles os autores relatam a diminuição da produtividade em função da disponibilidade hídrica.

Nesse sentido é importante que os modelos usados para estimativa da produtividade de culturas, principalmente a da soja, consigam simular os parâmetros de água no sistema solo-planta-atmosfera de maneira satisfatória. Para isso é necessário estimar a evapotranspiração, sendo essa variável utilizada em modelos como o da *Food and Agriculture Organization* (FAO) (DOORENBOS, J.; KASSAM, 1994), o MONICA (BATTISTI et al., 2017), CROPGRO-*Soybean* (BAO et al., 2017), APSIM-*Soybean* (ARCHONTOULIS et al., 2014), para ponderar, possíveis oscilações de produtividade.

A evapotranspiração de cultura (ET_c) é um dos principais desafios na modelagem agrometeorológica, uma vez que mensurar tal variável é difícil e onerosa sendo aplicado apenas em situações experimentais (OLIVEIRA MORAES et al., 2009). Dessa maneira existe vários métodos na literatura para se estimar a ET_c, desde métodos práticos que utilizam o coeficiente de cultura (K_c) (PEREIRA et al., 1997), ou que necessitam de equipamentos mais sofisticados como método da razão de Bowen (BOWEN, 1926) e Eddy Covariance (BURBA, 2013) que são baseados no fluxo de energia no sistema micrometeorológico, ou métodos matemáticos adaptados que são baseados em variáveis micrometeorológicas relacionadas ao processo de balanço de energia, como de Priestley e Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972) e o método padrão da FAO (ALLEN et al., 1998) que é baseado em uma derivação da equação de Penman (1948).

Assim o objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho da metodologia aplicada para estimativa da evapotranspiração dentro do modelo DSSAT/CROPGRO-*Soybean* em comparação com o método da razão de Bowen na cultura da soja.

MATERIAL E MÉTODOS

Apresenta-se nessa seção o material e métodos do presente estudo, que será apresentado nos diferentes tópicos: (i) instalação do experimento de campo e coleta de dados; (ii) *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT/CROPGRO *Soybean*); (iii) método de Priestley e Taylor; (iv) método de Penman e Monteith; (v) método da razão de Bowen e (vi) estatísticas para avaliação dos modelos.

Instalação do experimento de campo e coleta dos dados

Para aplicação do método da razão de Bowen (MRB) foi necessário instalar um experimento à campo. O experimento foi conduzido na cidade de Piracicaba-SP, latitude 22°52'S e longitude 47°30' O, e altitude de 546 m. A cidade de Piracicaba apresenta uma precipitação média anual de 1.250 mm, sendo caracterizada por verões chuvosos e quentes e invernos secos, conseqüentemente sendo classificada como Cwa pela classificação de Köppen (CEPAGRI, 2016). Foi disponibilizada uma área de três hectares, onde dentro desse limite foi delimitado uma subárea para a implantação do experimento, sendo o tipo de solo classificação como Argissoloso Vermelho Eutrófico (EMBRAPA, 2006).

A soja foi plantada no dia 09 de novembro de 2016, adotando-se um sistema de plantio direto em transição antecedido por um consórcio milho e braquiária (*Brachiaria decumbens*), a semeadura obedeceu a um espaçamento de 0,45 m entre linhas e população de 220 mil plantas por hectare, utilizou-se a cultivar PRODUZA IPRO.

Os dados meteorológicos foram coletados na própria área experimental, por uma torre micrometeorológica com os seguintes sensores: dois termo-higrômetros (HMP155, Vaisala) com diferença de altura de 0,8 m entre eles, sendo que o mais baixo fica localizado 0,2 m acima do nível do dossel, acompanhando o crescimento da planta, seguindo a metodologia também descrita Allen et al. (1998). Um pluviômetro (TE525MM, Texas Instruments), quatro sensores de umidade volumétrica, temperatura e condutividade elétrica do solo (GS3, Decagon), sendo esses instalados na linha e na entrelinha nas profundidades de 0,2 e 0,5 m, dois sensores de fluxo de calor no solo (HFP01, Hukseflux), sendo uma na linha (G1) e outro na entrelinha (G2) e um saldo radiômetro (NR-Lite2, Kipp & Zone). Para o monitoramento dos dados coletados por esses sensores utilizou-se uma datalogger (CR1000, Campbell Scientific), que fazia coletas periódicas a cada 15 minutos

DSSAT/CROPGRO-Soybean

O DSSAT (*The Decision Support System Agrotechnology Transfer*) é uma plataforma que ajuda a modelar o crescimento, desenvolvimento e também a produtividade de uma cultura em uma área uniforme baseado em informações fornecidas ou simuladas de nitrogênio, carbono, água e solo (JONES et al., 2003). Essas informações são associadas aos elementos meteorológico registrados em determinado período, que servem como dados de entrada do modelo. Essas informações são combinadas aos modelos de cultura, com o intuito de desenvolver estudos na área de manejo das culturas. Dentro da plataforma do DSSAT existe uma gama de modelos para diferentes culturas, como: CERES-Maize (Milho), CERES-Sorghum (Sorgo), CERES-Rice (Arroz), CERES-Barley (Cevada), CERES-Sunflower (Girassol), CROPGRO-Soybean (Soja), sendo assim um facilitador na área da pesquisa (TALACUECE, 2014).

O CROPGRO-Soybean é um modelo para a cultura da soja que faz parte da plataforma DSSAT, capaz de descrever os principais processos biofísicos, como: fotossíntese; particionamento de biomassa; respiração; dinâmica da água; crescimento foliar, raiz e caule; fenologia e evapotranspiração. Sendo tais processos simulados com base nos de entrada e nos parâmetros fisiológicos da cultura (TALACUECE, 2014).

O modelo é estruturado em código FORTRAN, sendo o parâmetros referentes a cultura da soja armazenados em arquivos externos. Processos como a evapotranspiração são simulados a partir de modelos já bem estabelecidos na ciência, como o de Priestley

e Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972) e o método da FAO (ALLEN et al., 1998). É possível optar por qual método você prefere executar sua simulação. Entretanto é importante salientar que esses modelos foram adaptados para melhorar a simulação ou então para suprir a necessidade de uma grande diversidade de variáveis meteorológicas como parâmetros de entrada. Nesse experimento, serviram como dados meteorológicos de entrada a radiação, temperatura do ar e precipitação.

Método de Priestley e Taylor (PT)

O método de PT é um método empírico, onde Priestley e Taylor (1972), em um primeiro momento, desenvolveram uma abordagem para estimativas dos fluxos de massa e energia para superfícies líquidas, como rios, oceanos e lagos. Em sequência os autores adaptaram o método para estimar os fluxos de energia sobre superfícies vegetadas, baseando-se na abordagem de Penman (1948). Assim, a abordagem mais simplificada para o método de PT é obtida a partir da Equação (1).

$$ET = \alpha \cdot w \cdot \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (1)$$

sendo R_n o saldo de radiação ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); w um fator de ponderação dependente da temperatura do ar e do coeficiente psicrométrico; α um coeficiente empírico de correção (PEREIRA et al., 1997). O valor de α , segundo Priestley e Taylor (1972), variou de 1,08 a 1,34 para diferentes superfícies, sendo o valor de $\alpha = 1,26$ um valor representativo para diferentes superfícies.

caso ($0^\circ\text{C} < T < 16^\circ\text{C}$), então:

$$w = 0,407 + 0,0145 \cdot T \quad (2)$$

caso ($16,1^\circ\text{C} < T < 32^\circ$), então:

$$w = 0,483 + 0,01 \cdot T \quad (3)$$

Método de Penman-Monteith (PM)

O método de PM é um método mecanístico, considerado o método padrão pela FAO (ALLEN et al., 1998) para estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}), sendo tal método uma derivação da equação proposta por Penman (1948), que combinou o conceito de balanço de energia e transporte de massa baseado nas principais variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e radiação). Monteith (1965) padronizou a metodologia de Penman (1948) para superfícies vegetadas, incluindo a resistência da cobertura (r_c) e a resistência aerodinâmica (r_a) (Equação 4). Allen et al., (1998) parametrizou a equação de Monteith (1965) para um gramado hipotético com altura entre 8 a 15 cm onde os regimes aerodinâmicos e radiativo podem ser considerados uniformes para todo o dossel, permitindo assumir que a superfície pode ser representada por uma única grande folha (Equação 5).

$$\lambda \cdot ET = \frac{s \cdot (Rn - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \cdot \frac{\Delta e}{r_a}}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (4)$$

$$ET = \frac{0,408 \cdot s \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot \Delta e}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (5)$$

Em que Rn é o saldo de radiação (MJ.m⁻².d⁻¹), G é o fluxo de calor no solo (MJ.m⁻².d⁻¹), Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa), ρ_{ar} é a densidade do ar (kg.m⁻³), c_p o calor específico do ar (MJ.kg⁻¹), s é a curva tangente de pressão de saturação (kPa.°C⁻¹), γ a constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹) e u₂ é a velocidade do vento medida à dois metros de altura.

Método da Razão de Bowen (MRB)

Os fluxos de massa e energia determinam parte dos processos micrometeorológicos que ocorrem em todo o sistema terrestre, principalmente sistema atmosfera-solo-planta. Um dos métodos micrometeorológicos para modelar o balanço de energia e da evapotranspiração em culturas agrícolas é o Método da Razão de Bowen (MRB) (BOWEN, 1926). A partir das medidas dos gradientes de temperatura do ar, umidade do ar, saldo de radiação e fluxo de calor no solo o MRB estima o fluxo de calor latente (LE).

Assim, foi utilizado uma torre meteorológica para registrar: o saldo de radiação (Rn); fluxo de calor no solo (G) a 10 cm abaixo da superfície do solo; os gradientes verticais de temperatura do ar (Tar) e umidade relativa (UR). Tais dados foram armazenados em um sistema de aquisição de dados (Datalogger) em intervalos diários e de 15 minutos (MARIN et al., 2005).

Sendo a Razão de Bowen (β) dada pela equação 6 e o balanço de energia pela equação 7.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (6)$$

$$Rn = H + LE + G \quad (7)$$

Isolando o calor sensível (H) na Equação 1 e substituindo na Equação 2, obtêm-se Equação 8.

$$LE = Rn - \beta \cdot LE - G$$

$$LE + \beta \cdot LE = Rn - G$$

$$LE \cdot (1 + \beta) = Rn - G$$

$$LE = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

Se dividirmos o fluxo de calor latente de evaporação (LE) (Equação 3) pelo calor latente de evaporação ($\lambda = 2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$), obtêm-se a evapotranspiração de cultura (ETc) em mm.d^{-1} (Equação 9).

$$ETc = \frac{LE}{\lambda} = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)\lambda} \quad (9)$$

sendo Rn, G e LE dados em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

Assim, as medidas dos gradientes verticais de temperatura do ar e umidade relativa são aplicadas na equação 6 para quantificar o β .

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (10)$$

em que γ é o coeficiente psicrométrico, ΔT é a diferença de temperatura do bulbo seco, em $^{\circ}\text{C}$ e Δe é o déficit de pressão de vapor em kPa.

Segundo Righi (2005) o MRB não está livre de erros, ou seja, é necessário avaliar os valores calculados e se eles apresentam consistência física. Para isso foi utilizado a metodologia de Perez et al. (1999) com o objetivo de evitar erros de estimativas causados por problemas de advecção ou de equipamento (Tabela 1).

Tabela 1. Condições para utilização dos dados calculados pelo MRB, segundo (PEREZ et al., 1999)

Energia Disponível	Déficit de Pressão de Vapor	Razão de Bowen	Fluxos de Calor
$Rn - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$\lambda E > 0$ e $H \leq 0$ para $1 \leq \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$\lambda E < 0$ e $H > 0$
$Rn - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$\lambda E > 0$ e $H > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	$\lambda E < 0$ e $H \geq 0$ para $1 \leq \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Avaliação do desempenho dos métodos

Assumindo que o MRB é um dado de evapotranspiração observado, realizou-se a avaliação dos métodos de estimativa de evapotranspiração baseando-se nas seguintes estatísticas: correlação (r), raiz quadrado médio do erro (RQME), índice BIAS, índice de concordância (d) e o coeficiente de eficiência do modelo (COE).

Os valores da correlação (r) variam de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo dos limites superior ou inferior maior é a relação entre os valores estimados e observados. Em suma, r quantifica o grau de relação entre duas variáveis.

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}} \quad (11)$$

A raiz quadrada média do erro (RQME) estabelece o erro médio do modelo, fazendo uma ponderação baseado no próprio erro, ou seja, quanto menor o valor de RQME melhor é o desempenho do modelo (MARTINS et al., 2014).

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (12)$$

A tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores estimados pode ser expresso pelo índice BIAS. Assim, quanto mais próximo de zero menor é a tendência do modelo. (LEITE et al, 2002; MARTINS et al., 2014)

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

A grau de concordância entre os dados estimados e observados é quantificado pelo índice d. Sendo que d pode variar de 0 a 1, ou seja, quanto mais próximo de 1 maior é a concordância entre os dados observados e estimados (WILLMOTT, 1981)

$$d = 1 - \left\{ \frac{[\sum (E_i - O_i)^2]}{[\sum ((E_i - \bar{E}) + [O_i - \bar{O}])^2]} \right\} \quad (14)$$

O coeficiente de eficiência do modelo (COE) representa o quão bom é o ajuste dos valores simulados. O COE pode varia de $-\infty$ até 1, onde quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste no modelo (BRAS et al., 2003).

$$COE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{(O_i - \bar{O})} \quad (15)$$

em que E_i são os valores de evapotranspiração estimados; O_i são os valores de evapotranspiração observados pelo MRB; n é o número de observações; \bar{O} é a média dos valores observados; \bar{E} é a média dos valores estimados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos dois métodos utilizados pelo DSSAT/CROPGROP-*Soybean* para estimar a evapotranspiração não foram satisfatórios segundo as estatísticas (Tabela 1). Ambos os métodos apresentaram tendência em superestimar os valores de ET, sendo o erro médio associado a essas estimativas na casa dos 2,98 mm.d⁻¹, para o método de PT, e 2,21 mm.d⁻¹ para o método de PM (Tabela 1). Segundo os valores de COE obtidos os desempenhos dos dois modelos foram ruins, sendo o modelo não aceitável quando o valor de COE for inferior à 0,36 segundo Silva et al.,(2008).

Tabela 2. Estatísticas aplicadas para avaliar o desempenho do modelo.

Método	r	d	RQME	BIAS	COE
PT	0.2163	0.3640	2.9884	0.9078	-6.6502
PM	0.4212	0.5117	2.2155	0.6296	-3.2047

*Para avaliação, o método da Razão de Bowen foi adotado como dado observado.

A acurácia e precisão dos modelos são apresentadas na Figura 1, onde nota-se que ficaram dispersos e distantes da reta. Além disso, o R^2 que explica a variabilidade total do modelo ficou distante do coeficiente 1, sendo esse valor indicativo de uma correlação linear perfeita. É importante salientar que os dados de ETc, considerados como observados, são estimados pelo MRB, o qual apresenta um erro. Silva et al.,(2011) analisou a sensibilidade do MRB para a cultura da cana-de-açúcar e averiguo que quando maior o intervalo de tempo para o cálculo, mais sensível é o método. Nesse sentido, os cálculos do trabalho foram realizados em intervalos de tempo de 15 minutos.

Segundo Oliveira et al., (2016), a evapotranspiração simulada pelo DSSAT/CROPGRO-Soybean apresentou valores acima do observado, assim como os dados obtidos nesse trabalho. Oliveira et al., (2016), utilizou a metodologia *Eddy Covariance* (EC) (BURBA, 2013) para estimar a evapotranspiração, sendo este método, quando exceção ao uso de lisímetros, a melhor maneira de quantificar essa variável. Arruda et al.,(2006) destacam uma subestimativa do fluxo de calor latente (LE) estimado pelo MRB em comparação e a abordagem do EC, ou seja, menor LE implica em uma diminuição de energia disponível para evaporação e transpiração.

Os parâmetros relacionados ao solo também são fatores que influenciam a simulação da evapotranspiração. Sendo o solo um reservatório ativo de água, ele controla, em partes, a perda de água por transpiração e também a evaporação (PEREIRA et al., 1997). Dellacort et a., (2011) concluíram de seu trabalho que o modelo CROPGRO-Drybean, para o feijão, que ocorreu uma discrepância acentuada nos valores medidos e simulados de umidade do solo. Além disso, os autores relatam a inconsistência no índice de área foliar (IAF).

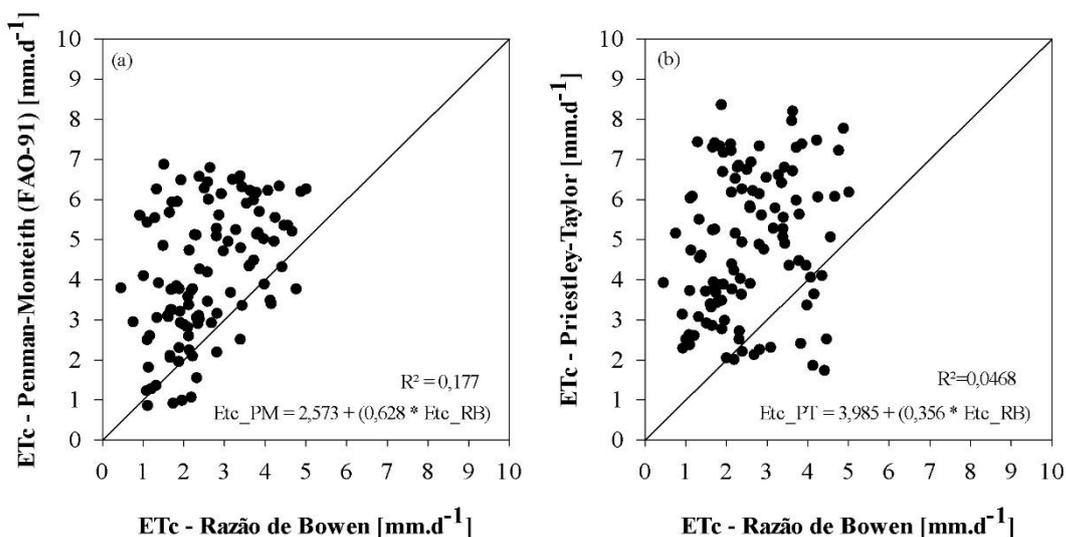


Figura 1. Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (a) e Priestley-Taylor (b) versus a Evapotranspiração pelo método da Razão de Bowen.

Partindo do princípio da conservação de energia, pode-se dizer que um sistema não pode evapotranspirar mais que a energia disponível para isso, assim na Figura 2, tem-se a curva de evapotranspiração máxima, assumindo que todo calor latente disponível foi utilizado para o processo de evaporação. Nota-se que os dois métodos utilizados pelo DSSAT/CROPGRO-Soybean, PT e PM, mesmo baseados no balanço de energia superestimam os valores de evapotranspiração, ou seja, eles supõem que o sistema apresenta mais energia disponível do que realmente tem.

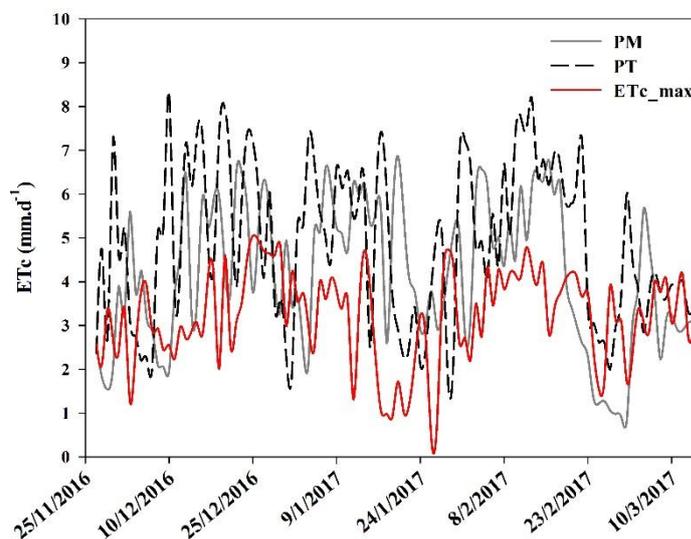


Figura 2. Evapotranspiração pelos dois métodos, Penman-Monteith (PM) e Priestley-Taylor (PT) e a evapotranspiração máxima baseada no processo de balanço de energia $ET_c = (R_n - G) / \lambda$.

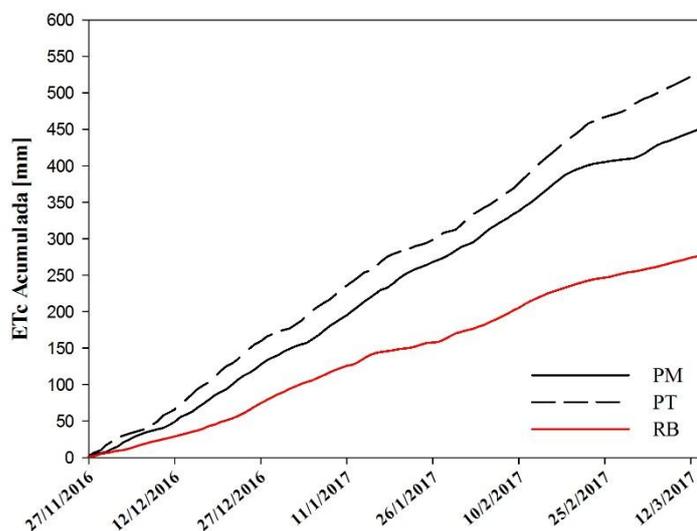


Figura 3. Evapotranspiração acumulada ao longo do ciclo da soja, quantificada pelos três métodos: Penman-Monteith (PM), Priestley-Taylor (PT) e a Razão de Bowen (RB).

Nesse sentido, o acumulado de evapotranspiração ao longo do ciclo divergiu nos métodos (Figura 3). Os valores de acumulado foram 530 mm para PT, 460 mm com o método de PM e 280 mm utilizando o MRB, ou seja, os valores superestimam em mais de 150 mm. Oliveria et al., (2016) encontrou um valor de evapotranspiração acumulada, para a soja, de 423,6 mm no ciclo, sendo tal valor obtido a partir da metodologia do EC.

CONCLUSÃO

Os métodos utilizados no DSSAT/CROPGRO-*Soybean* superestimam os valores de evapotranspiração. Entretanto, o MRB, segundo a literatura tende a subestimar os valores de evapotranspiração, justificando a grande diferença dos valores acumulados de ET. No geral o modelo de PM obteve um desempenho mais aceitável, considerando que o MRB apresenta possíveis erros em sua estimativa.

A superestimativa pode ser corrigida de duas maneiras: a primeira é a calibração do modelo para pode estimar com melhor acurácia e precisão a produtividade; a segunda opção é utilizar mais dados meteorológicos nas variáveis de entrada, além de uma confiável análise de solo.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Pesquisa e Experimentação em Modelagem Agrícola (GEPEMA), por todo o apoio na condução desse experimento e ao Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP pela infraestrutura para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ADEBOYE, O. B. et al. Soil water storage, yield, water productivity and transpiration efficiency of soybeans (*Glyxine max* L.Merr) as affected by soil surface management in Ile-Ife, Nigeria. **International Soil and Water Conservation Research**, 2017.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ARCHONTOULIS, S. V; MIGUEZ, F. E.; MOORE, K. J. A methodology and an optimization tool to calibrate phenology of short-day species included in the APSIM PLANT model: Application to soybean. 2014.

ARRUDA, J. C. et al. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 233–240, 2006.

BAO, Y. et al. CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURE RESEARCH PAPER Potential adaptation strategies for rainfed soybean production in the south-eastern USA under climate change based on the CSM-CROPGRO-Soybean model. 2017.

BATTISTI, R. et al. Gauging the sources of uncertainty in soybean yield simulations using the MONICA model. 2017.

BONFIM, Y. P.; FERREIRA, V. DA R. S.; CAETANO, M. A LOGÍSTICA E O AGRONEGÓCIO EM GOIÁS: O CASO DA SOJA. **Revista de Gestão**, v. 20, n. 4, p. 557–573, 2013.

BOWEN, I. S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any

Water Surface. **Physical Review**, v. 27, n. 6, p. 779–787, 1 jun. 1926.

BRAS, R.; CI; SOLO. SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DOS MARINS (SP). v. 27, n. 1, p. 735–741, 2003.

BURBA, G. **Eddy Covariance Method**. [s.l: s.n.].

CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html>. Acesso em: 10 maio. 2017.

CUNHA, R. . Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p. 111–119, 1998.

DALLACORT, R. et al. Simulation of bean crop growth, evapotranspiration and yield in Paraná State by the CROPGRO-Drybean model. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 429–436, 22 jun. 2011.

EMBRAPA. **Dados econômicos - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 8 maio. 2017.

EMBRAPA, S. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l: s.n.].
FÁBIO RICARDO MARIN, B. et al. EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION REQUIREMENTS OF A COFFEE PLANTATION IN SOUTHERN BRAZIL. v. 41, p. 187–197, 2005.

JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **J. Agronomy**, v. 18, p. 235–265, 2003.

LEITE, H. G.; VALDIR, E.; LIMA DE ANDRADE, C. UM MÉTODO PARA CONDUÇÃO DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS SEM O USO DE EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS A METHOD FOR CONDUCTING FOREST INVENTORIES WITHOUT USING VOLUMETRIC EQUATIONS. v. 26, n. 3, p. 321–328, 2002.

MARTINS, F. B. et al. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimado por duas categorias de modelos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 505–514, dez. 2014.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; TAVARES MALUF, J. R. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul
Estimative of the relative water consumption of soybean in Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, v. 33336, n. 6, p. 1013–1019, 2003.

MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. Symposium of the society of experimental biology, Vol. 19 (pp. 205-234)**Cambridge: Cambridge University Press, , 1965.

OLIVEIRA, E. C. DE et al. Evapotranspiration Soybean: Comparison Between Eddy Covariance Method and the Estimate of Cropgro-Soybean Model. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 28, 2016.

OLIVEIRA MORAES, S.; RENÊ, C.; BARBOZA JÚNIOR, A. Departamento de Ciências Exatas Disciplina: Métodos Instrumentais de Análise Física do Ambiente. 2009.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass.** Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. **Anais...**The Royal Society, 1948

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo (transpi) razão.** [s.l.] fealq Piracicaba, 1997. v. 183

PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141–150, 1999.

POLYANNA, M. DE O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258–265, 2008.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.

RIGHI, E. Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada.** Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 28 jan. 2005.

SILVA, B. K. N. et al. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. **Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1046–1053, 2011.

TALACUECE, M. A. D. **Modelagem da relação clima-productividade da soja em Moçambique: Perspectivas Atuais e futuras.** [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2014.

WILLMOTT, C. J. ON THE VALIDATION OF MODELS. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1 jul. 1981.