Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO: PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADAS COM METODOLOGIA ALTERNATIVA

SOUZA, Jorge Luis Moretti – jmoretti@ufpr.br
Universidade Federal do Paraná/ UFPR

JERSZURKI, Daniela - dani_jerszurki@hotmail.com
Universidade Federal do Paraná/ UFPR

SCHAFER, Rossana - rossana@deutschkomp.com.br
Universidade Federal do Paraná/ UFPR

GURSKI, Bruno Cesar - brunocep@ufpr.br
Universidade Federal do Paraná/ UFPR

SCHAFER, Herbert - herbert@deutschkomp.com.br
Universidade Tuiuti do Paraná/ UTP

RESUMO: Teve-se por objetivo analisar o desempenho de balanços hídricos diários calculados a partir das variáveis de entrada precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo), estimadas de forma alternativa, em comparação com a metodologia padrão. Para tanto, foram obtidas medidas de P em um pluviômetro padrão do tipo Ville de Paris e em um pluviômetro alternativo constituído de garrafa PET. Para a estimativa da ETo foram empregados o método padrão de Penman-Monteith e o método alternativo de Camargo. Para fins de comparação entre as metodologias padrão (pluviômetro Ville de Paris – PVP e ETo pelo método de Penman-Monteith – EToPM) e alternativa (pluviômetro alternativo – PA e ETo pelo método de Camargo – EToCM) foram calculados balanços hídricos diários entre julho de 2008 e janeiro de 2009, na região de Curitiba, Paraná. Os balanços hídricos foram comparados pelo erro absoluto da deficiência hídrica (DEF). O desempenho do balanço hídrico realizado com a metodologia alternativa, em comparação com a metodologia padrão, depende da água disponível no solo (AD) e da combinação do grau de acerto (associação e exatidão) com que os métodos alternativos estimam P e ETo. As componentes do balanço hídrico alternativo em relação ao padrão (DEF; evapotranspiração real – ER; e, armazenamento de água no solo – ARM) têm maiores desvios para períodos quentes e com ocorrência de P insuficiente para manter o armazenamento da água no solo próximo da zona úmida. Os resultados indicaram que, para diferentes regiões, métodos alternativos devem ser testados individualmente e em conjunto com algum tipo de metodologia, quando de sua recomendação e utilização.

Palavras- chaves: Medida e estimativa; pluviômetro; relações hídricas.

CLIMATOLOGICAL WATER BALANCE: PRECIPITATION AND REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATED WITH ALTERNATIVE METHODOLOGIES

ABSTRACT: The objective of this work was to identify and analyze the performance of the daily water balances estimated from climatic variables precipitation (P) and reference evapotranspiration (ETo) estimated by alternative methods, compared to standard methodology. For that purpose, were obtained measurements of P by a raingauge Ville de Paris model and an alternative plastic raingauge. Daily ETo was estimated by Penman-Monteith method (standard) and by the alternative method of Camargo. The comparison between the standard methodology (Ville de Paris raingauge – PVP and ETo by Penman-Monteith – EToPM) and alternative methodology (PET raingauge – PA and ETo by Camargo – EToCM) was studied in daily climatological water balances between July of 2008 and January of 2009, in Curitiba, Parana state. Daily water balances were compared

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

by the absolute error of the water deficit (DEF). The performance of the water balance estimated with the alternative methodology depends upon of the readily available water (AW) in the soil and by the combination of the degree of accuracy and association of the alternative methods in order to estimate P and ETo. The components of alternative and standard water balance (DEF; actual evapotranspiration – ER; and, soil water storage – S) showed larger deviations in warm periods and insufficient rainfall to maintain the soil water storage around the wet zone. The results showed that the alternative methods should be tested before its utilization, for different regions, individually and in combination with different methodologies

Keys- words: Measurement and estimation; pluviometer; water relations

1.INTRODUÇÃO

Informações quantitativas da precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo), variáveis de entrada no cálculo do balanço hídrico climatológico, são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e freqüência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem (SOUZA et al., 2006; BRUNO et al., 2007; SOUZA e GOMES, 2007; SPAROVEK et al., 2007; DOURADO-NETO et al., 2010). A literatura tem mostrado que o desenvolvimento e aprimoramento de modelos de simulação do balanço hídrico têm resultado em interessantes ferramentas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação (SOUZA e GOMES, 2008). GOMES (2005), por exemplo, cita e descreve uma relação de pelo menos 24 trabalhos que envolveram direta ou indiretamente a realização de balanços hídricos para auxiliar na composição de modelos computacionais, voltados à agricultura irrigada. O modelo mais aceito para a estimativa do balanço hídrico para fins agrícolas é o descrito por Thornthwaite e Mather (1955), o qual vem sendo adaptado e utilizado por inúmeros autores ao longo do tempo (SOUZA e GOMES, 2007; SOUZA E GOMES, 2008; ARAUJO et al., 2009). O método tem se mostrado eficiente para programar e definir diversas atividades agrícolas, tendo como variáveis de saída o armazenamento da água no solo (ARM), a evapotranspiração real (ER), deficiência (DEF) e excedente hídrico (EXC) (OMETTO, 1981; PEREIRA et al., 1997). A compreensão do balanço hídrico, mesmo que de forma simplificada, é importante para o entendimento dos processos de degradação e conservação dos recursos naturais relacionados ao uso do solo e da água. Entretanto, a estimativa e medida dos principais processos que constituem o balanço hídrico muitas vezes envolvem a realização de cálculos complexos, ou necessitam da aquisição de equipamentos de alto custo que em raríssimas exceções encontram-se disponíveis aos pequenos produtores rurais ou técnicos agrícolas.

No manejo da irrigação é necessário certo conhecimento da relação planta-solo-clima, além da tecnologia da aplicação da água. Enquanto os componentes planta e solo têm sido alvo de muitos estudos científicos que estão, em maior ou menor grau, acessíveis ao agricultor, o componente clima depende da localização física da propriedade rural e das condições ambientais da região. Por serem específicos do local, os dados climáticos, muitas vezes, não estão disponíveis ou apresentam pouca precisão, por desconhecimento ou pela falta de acesso do agricultor a instrumentos e métodos práticos capazes de municiá-lo destes dados.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

A utilização de instrumentos e métodos alternativos de baixo custo para medir ou estimar parâmetros climáticos, que utilizem materiais acessíveis e que sejam fáceis de empregar e calcular, caracteriza-se como uma possibilidade de superação da falta ou imprecisão dos dados, tornando viável a observação das principais variáveis envolvidas em um balanço hídrico, sem comprometer a necessária precisão das medidas efetuadas dos fenômenos observados, desde que se conheça e respeite as limitações de cada um destes métodos e instrumentos.

A P e a ETo estão entre as variáveis de entrada no modelo de balanço hídrico climatológico de maior dificuldade na aquisição, mas que podem ser facilmente obtidas a partir de modelos ou métodos alternativos. No Brasil, o instrumento mais utilizado para a medida da precipitação (P) é o pluviômetro tipo Ville de Paris (SILVA, 2008). Souza et al. (2013) ao analisarem diferentes modelos alternativos de pluviômetros para a região de Curitiba, obtiveram correlação positiva entre as medidas obtidas pelo pluviômetro Ville de Paris e àqueles construídos a partir de garrafas PET. Segundo os autores, o emprego de pluviômetros alternativos para a medida da precipitação é muito comum, sendo uma eficiente alternativa, dado o alto custo dos pluviômetros convencionais. A evapotranspiração de referência (ETo) tem sua estimativa padronizada pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Apesar do uso consagrado na literatura (CAMARGO e CAMARGO, 2000), o método prevê a utilização de um grande número de variáveis, o que tende a inviabilizar o uso do modelo em regiões com menor disponibilidade de dados (LEMOS FILHO et al., 2010). Inúmeros modelos para a estimativa da ETo são citados na literatura (PEREIRA et al., 1997), sendo o grau de acurácia dos resultados influenciado, em maior ou menor grau, pelas condições climáticas da região em estudo. Nesse sentido, trabalhos envolvendo estimativas alternativas das principais variáveis climáticas para o cálculo de um balanço hídrico são essenciais em regiões onde a utilização dos modelos ou métodos padrões tende a ser restrita, gerando subsídio para a escolha das melhores opções para diferentes condições.

O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho de balanços hídricos diários calculados a partir das variáveis de entrada P e ETo, estimadas de forma alternativa, em comparação com a metodologia padrão, visando disponibilizar aos profissionais da área ferramentas metodológicas e instrumentais de baixo custo, fácil aquisição ou construção, uso e cálculo e, que apresentem precisão aceitável quando comparados aos métodos e instrumentos considerados padrão pela comunidade científica.

2.MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Paraná, sob coordenadas 25º25'48'' de latitude Sul e 49º16'15'' de longitude Oeste, e altitude média de 934,6 m. A região possui clima tipo Cfb, subtropical úmido mesotérmico, de verões frescos e com ocorrência de geadas severas e frequentes, não apresentando estação seca. A média das temperaturas do ar dos meses mais quentes é inferior a 22 ºC e a dos meses mais frios é inferior a 18 ºC (ÁLVARES et al., 2013).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

As medidas de P diária foram realizadas pelo uso do pluviômetro do tipo Ville de Paris, utilizado como instrumento padrão (SOUZA et al., 2013). Como modelo alternativo, foi utilizado um pluviômetro constituído de duas garrafas PET de água mineral, instalado em uma haste contendo encaixes de latão rebitado e distante da superfície do solo (Tabela 1). A distância entre os pluviômetros foi de 2 m, para evitar possíveis interferências pela proximidade ou aumento da variabilidade nas leituras devido à distância (REICHARDT et al., 1995; SILVA et al., 2006). De acordo com os resultados obtidos por Souza et al. (2013), o pluviômetro alternativo é o mais recomendado para a medida da P na região de estudo por apresentar facilidades construtivas e operacionais, como fácil manuseio e baixo custo.

Tabela 1 - Área de captação, altura de instalação, características construtivas e capacidade de registro dos pluviômetros utilizados.

Modelo do pluviômetro	Área de captação	Altura em relação ao solo	Características construtivas	Capacidade de registro da"lâmina de água "
	--cm^2--	----m----		--mm--
Ville de Paris	400	1,5	Pluviômetro comercial padrão, com capacidade de 7,0 L (útil: 5,25 L; medido com o nível da água no início do bico do funil)	131,3
Alternativo	62,1	1,5	Capacidade de 1,5L, contendo um funil interno feito a partir de outra garrafa PET de mesma marca e volume, inserida uma dentro da outra (útil: 0,7 L; 18,5 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	112,7

A ETo padrão foi estimada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (ALLEN et al., 1998).

$$ETo_{PM\,i} = \frac{0{,}408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{MED} + 273)} \cdot U_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0{,}34 \cdot U_2)}$$

Sendo: $ETo_{PM\ i}$ – evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith para um i-ésimo dia (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa $^oC^{-1}$); Rn – radiação líquida na superfície (MJ $m^{-2}\,d^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ $m^{-2}\,d^{-1}$); γ – constante psicrométrica (kPa $^oC^{-1}$); T_{MED} – temperatura média do ar (^oC); U_2 – velocidade do vento a dois metros de altura ($m \cdot s^{-1}$); es –tensão de saturação de vapor (kPa); ea – tensão parcial de vapor (kPa).

O método alternativo empregado para o cálculo da ETo foi o de Camargo (1971) descrito por Pereira et al. (1997). O método de Camargo é um modelo

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

simplificado que utiliza apenas dados de temperatura média diária do ar e radiação solar extraterrestre, a qual pode ser facilmente estimada a partir de equações empíricas ou obtida em tabelas específicas.

$$ETo_{CM\ i} = Q_{o\,i} \cdot F \cdot T_{MED\,i}$$

Sendo: $ETo_{CM\ i}$ – evapotranspiração de referência estimada com o método de Camargo (1971) para o i-ésimo dia (mm dia^{-1}); Qo_i – radiação solar extraterrestre do i-ésimo dia, expressa em equivalente de evaporação (mm dia^{-1}); F – fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do local; $T_{MED\ i}$ – temperatura média do ar no i-ésimo dia (°C).

Os dados climáticos necessários para as estimativas da ETo com os métodos padrão e alternativo foram obtidos na estação climatológica de Curitiba, fornecidos pelo Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), compreendendo o período de 15 de julho de 2008 a 15 de janeiro de 2009. Foram necessários dados diários de temperatura máxima (Tmax), média (Tmed) e mínima (Tmin) do ar; velocidade (Uz) e altura (z) da medida do vento; e, número médio de horas de insolação (BRASIL, 1992). De acordo com Pereira et al. (1997), o fator de ajuste da equação de Camargo (1971) foi considerado igual a 0,01.

Para fins de comparação entre as duas metodologias empregadas, foram calculados balanços hídricos diários entre a segunda quinzena de julho de 2008 e a primeira quinzena de janeiro de 2009, considerando as variáveis de entrada P e ETo obtidas pela metodologia padrão (pluviômetro Ville de Paris – PVP e ETo pelo método de Penman-Monteith – EToPM) e alternativa (pluviômetro alternativo – PA e ETo pelo método de Camargo – EToCM). Para comparação dos resultados obtidos ao longo do tempo, os balanços hídricos diários tiveram fechamento de seus componentes em períodos quinzenais. Para a realização das simulações do balanço hídrico sequencial foram utilizadas as séries diárias de P e ETo medidas e estimadas com os métodos padrão e alternativo, coeficiente de cultivo (kc), fração de água disponível (p) e capacidade de água disponível no solo (CAD).

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi obtida a partir da multiplicação da ETo pelo respectivo coeficiente de cultivo (Kc). De acordo com Doorenbos e Kassam (1979) e Allen et al. (1998), o valor de Kc foi considerado igual à unidade durante todo o período do experimento, já que a cultura de referência foi a grama.

Nas análises, foi considerada a realização do balanço hídrico diário para quatro capacidades de água disponível (CAD) do solo: 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm. O valor da fração de água disponível p foi considerada igual a 0,5 ao longo de todo o período analisado.

$$AD = CAD \cdot p$$

Sendo: AD – água disponível no solo (mm); CAD – capacidade de água disponível do solo (mm); p – fração de água disponível no solo para um determinado tipo de cultura (adimensional).

Conforme recomendação de Souza e Gomes (2007), a estimativa do armazenamento de água no solo e, ou, "negativo acumulado", para o cálculo do

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

balanço hídrico diário, foi realizado utilizando a equação cossenoidal, a partir das seguintes condições:

– Quando CAD (1 – p) < ARM ≤ CAD, ou seja, na zona úmida,

$$ARM = CAD - L$$

– Quando 0 < ARM ≤ CAD < (1 – p), ou seja, na zona seca,

$$ARM = (1-p)\cdot CAD \cdot \left\{1 - \frac{2}{\pi}\cdot arctg\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{|L| - CAD\cdot p}{(1-p)\cdot CAD}\right)\right]\right\}$$

Sendo: CAD – a capacidade de água disponível (mm); ARM – o armazenamento de água do solo (mm); L – o valor do negativo acumulado no decêndio (mm); p – a fração de água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

Para o início do cálculo dos balanços hídricos a partir de 15 de julho de 2008, o armazenamento de água no solo foi determinado a partir de um balanço hídrico diário preliminar, tendo como entrada valores de P e ETo obtidos com metodologia padrão, entre o dia primeiro de janeiro de 2008 e 14 de julho de 2008. Nestas análises, foram considerados os valores de P obtida pelo pluviômetro Ville de Paris, ETo obtida pela equação de Penman-Monteith, CAD's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm, e valores de kc e fração p iguais a 1,0 e 0,5, respectivamente.

A análise dos métodos alternativos para estimativa das variáveis de entrada (P e ETo) no balanço hídrico diário, em comparação com a metodologia padrão, foi realizada a partir do erro absoluto da deficiência hídrica (DEF).

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma geral, foi possível observar que o pluviômetro alternativo subestimou a P em 28,6 mm no período de seis meses, em relação ao pluviômetro padrão (Tabela 2).

As subestimativas foram maiores na primeira quinzena dos meses de agosto/2008, outubro/2008 e janeiro/2009. Nestas quinzenas, verificou-se que as precipitações ocorridas foram superiores a 92,5 mm quinzena^{-1} no pluviômetro padrão, o que pode ter prejudicado a estimativa realizada com o pluviômetro alternativo. Este pluviômetro possui pequena área de captação e menor volume de reservatório (Tabela 1), o que pode ocasionar maiores perdas quando as precipitações diárias são maiores (respingos) e, ou, acompanhadas de ventos (SOUZA et al., 2013). Com exceção das três quinzenas comentadas anteriormente, em que os desvios diários entre o pluviômetro padrão e alternativo foram de 0,40 mm dia^{-1}; 0,45 mm dia^{-1} e 0,47 mm dia^{-1} para a primeira quinzena de agosto/2008, outubro/2008 e janeiro/2009, respectivamente, as demais quinzenas apresentaram desvios inferiores a 0,27 mm dia^{-1}.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 2 - Valores diários de P e ETo, apresentados em agrupamentos quinzenais, utilizados nos balanços hídricos diários, empregando metodologias padrão (ETo_{PM} e P_{VP}) e alternativa (ETo_{CM} e P_A), incluindo desvios, verificados no período entre julho de 2008 e janeiro de 2009.

Mês/Quinzena	P_{VP}	P_A	ETo_{PM}	ETo_{CM}	Desvios "$P_{VP} - P_A$"		Desvios "$ETo_{PM} - ETo_{CM}$"	
					Quinzena	Diário	Quinzena	Diário
	(mm quinzena^{-1})				(mm período^{-1})			
Jul./2ª	32,7	32,8	27,1	25,2	–0,10	–0,01	1,90	0,12
Ago./1ª	147,2	141,2	21,8	23,5	6,00	0,40	–1,70	–0,11
Ago./2ª	0,1	0,1	36,2	32,5	0,00	0,00	3,70	0,23
Set./1ª	15,9	16,6	30,6	31,9	–0,70	–0,05	–1,30	–0,09
Set./2ª	22,5	20,7	28,0	29,0	1,80	0,12	–1,00	–0,07
Out./1ª	114,6	107,9	34,7	39,7	6,70	0,45	–5,00	–0,33
Out./2ª	138,2	136,0	41,7	48,7	2,20	0,14	–7,00	–0,44
Nov./1ª	34,6	30,7	41,4	48,3	3,90	0,26	–6,90	–0,46
Nov./2ª	13,3	14,0	41,6	46,4	–0,70	–0,05	–4,80	–0,32
Dez./1ª	33,2	34,2	46,2	51,3	–1,00	–0,07	–5,10	–0,34
Dez./2ª	24,7	21,3	50,0	57,9	3,40	0,21	–7,90	–0,49
Jan./1ª	92,5	85,4	47,2	53,6	7,10	0,47	–6,40	–0,43
Total	669,5	640,9	446,5	448,0	28,6	–	–41,5	–

O método de Camargo superestimou em 41,5 mm período^{-1} a ETo estimada em relação ao método padrão. Os valores de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith foram maiores que os estimados pelo método de Camargo apenas na primeira quinzena de julho/2008 e segunda quinzena de agosto/2008. Os maiores desvios diários (ETo em mm dia^{-1}) entre os valores de ETo estimada com o método padrão e alternativo foram observados a partir da primeira quinzena de outubro/2008. Neste período, merecem destaque a primeira quinzena de novembro/2008 e janeiro/2009 e a segunda quinzena de outubro/2008 e dezembro/2008, em que os desvios do método de Camargo superestimam a EToPM em 0,46 mm dia^{-1}, 0,43 mm dia^{-1}, 0,44 mm dia^{-1} e 0,49 mm dia^{-1}, respectivamente. De modo geral, o método apresentou os melhores resultados para as estações verão e outono. Resultados satisfatórios também foram encontrados por Camargo e Sentelhas (1997), os quais compararam os valores estimados pelo modelo de Camargo com os valores medidos por evapotranspirômetros no interior de São Paulo. Para outras regiões brasileiras o método de Camargo também apresenta resultados satisfatórios. De acordo com Borges e Mendiondo (2007) o modelo de Camargo apresentou resultados confiáveis quanto à estimativa da ETo, quando comparado ao método de Penman-Monteith, para a região da bacia hidrográfica do rio Jacupiranga, São Paulo.

Considerando a metodologia padrão, os valores de ER obtidos no período analisado, com os balanços hídricos possuindo água disponível de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm (Figura 1 e Tabela 3), provavelmente ocorreram em razão da capacidade de água disponível no solo (CAD) e da água disponível para a cultura (AD). Abaixo do armazenamento "CAD (1 – p)" o solo passa a limitar exponencialmente a liberação da água para a cultura, aumentando a diferença entre a ETo e ER no período e promovendo maior deficiência (DEF = ETo – ER). É importante observar que nas análises o valor de kc foi considerado igual a 1,0, logo ETo = ETc.

Como o método de Camargo superestimou os valores de ETo, principalmente no período entre a primeira quinzena de setembro/2008 e a

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

primeira quinzena de dezembro/2009, verifica-se na Figura 1 que, independente do valor de AD do solo (15 mm, 30 mm, 45 mm ou 60 mm), as curvas da ER obtidas com o balanço hídrico utilizando o método alternativo estiveram, na maioria das vezes, acima das curvas da ER obtidas com a metodologia padrão. Este fato provavelmente contribuiu para que as curvas de armazenamento da água no solo apresentassem tendência inversa, ou seja, o armazenamento nos balanços hídricos utilizando metodologia padrão foram, de forma geral, maiores do que os valores de armazenamento dos balanços hídricos utilizando a metodologia alternativa. Além disso, cabe ressaltar que o pluviômetro alternativo apresentou P 28,6 mm período^{-1} menor que a metodologia padrão no período analisado, o que também contribuiu para a redução do armazenamento de água no solo, pois a entrada de água no sistema foi menor, principalmente nas três quinzenas já discutidas para a P (primeira quinzena de agosto/2008, outubro/2008 e janeiro/2009).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 3 - Componentes do balanço hídrico diário (ARM, ER e DEF), calculados de julho de 2008 a janeiro de 2009 (fechamento em quinzenas), utilizando dados de P e ETo obtidos com metodologia padrão (EToPM e PVP) e (EToCM e PA), para solos possuindo CAD igual 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (kc = 1,0 e p = 0,5).

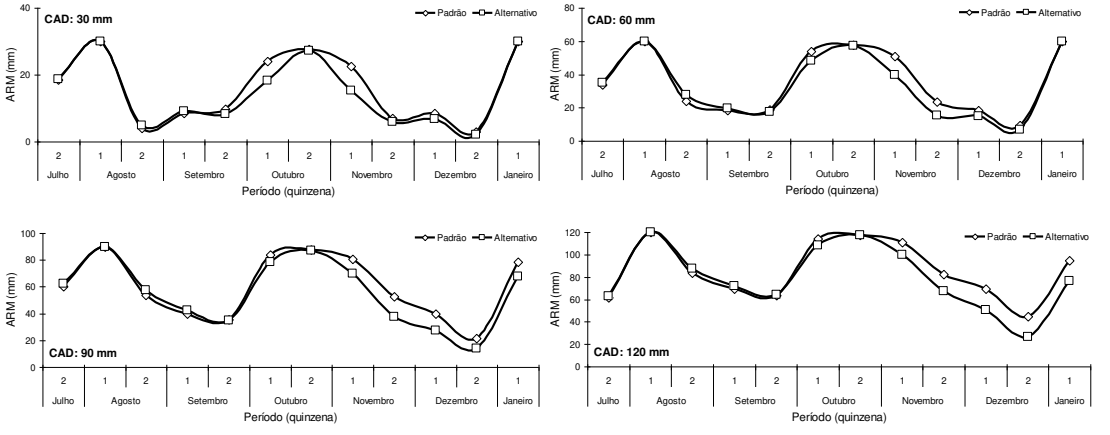
CAD (mm)	AD (mm)	Componentes	Anos 2008 Jul 2ª	Ago. 1ª	Ago. 2ª	Set. 1ª	Set. 2ª	Out. 1ª	Out. 2ª	Nov. 1ª	Nov. 2ª	Dez. 1ª	Dez. 2ª	200 Jan. 1ª	Total
			quinzenas												
Metodologia padrão															
—	—	P_{VP}(mm	32,	147,	0,1	15,	22,	114,	138,	34,6	13,	33,	24,	92,5	669,
		ETo_{PM} (mm	27,	21,8	36,	30.	28,	34,7	41,7	41,4	41,	46,	50,	47,2	415,
30	15	*ARM* (mm)	18,	30,0	4,1	8,5	9,7	24,0	27,6	22,5	7,1	8,6	2,9	30,0	—
		ER (mm	15,	21,8	26,	11,	21,	34,1	41,7	39,7	28,	31,	30,	27,1	329,
		DEF (mm	11,	0,0	10,	19,	6,7	0,6	0,0	1,7	12,	14,	19,	12,1	108,
60	30	*ARM* (mm)	33,	60,0	24,	18,	19,	54,0	57,6	50,8	23,	18,	9,4	60,0	—
		ER (mm	23,	21,8	36,	21,	21,	34,1	41,7	41,4	40,	38,	33,	33,3	388,
		DEF (mm	3,5	0,0	0,2	9,0	6,1	0,6	0,0	0,0	0,9	8,1	16,	13,9	58,5
90	45	*ARM* (mm)	60,	90,0	53,	39,	35,	84,0	87,6	80,8	52,	39,	21,	78,3	—
		ER (mm	27,	21,8	36,	30,	26,	34,5	41,7	41,4	41,	45,	42,	35,9	425,
		DEF (mm	0,0	0,0	0,0	0,4	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	7,2	11,3	20,9
120	60	*ARM* (mm)	61,	120,	83,	69,	63,	114,	117,	110,	82,	69,	45,	94,5	—
		ER (mm	25,	21,8	36,	30,	28,	34,7	41,7	41,4	41,	46,	49,	43,0	440,
		DEF (mm	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	4,2	6,2
Metodologia Alternativa															
—	—	P_A (mm	32,	141,	0,1	16,	20,	107,	136,	30,7	14,	34,	21,	85,4	640,
		ETo_{CM} (mm	25,	23,5	32,	31,	29,	39,7	48,7	48,3	46,	51,	57,	53,6	488,
30	15	*ARM* (mm)	18,	30,0	4,8	9,2	8,3	18,4	27,3	15,3	5,9	6,9	2,1	30,0	—
		ER (mm	15,	23,5	25,	12,	21,	38,5	48,7	42,7	23,	33,	26,	32,1	342,
		DEF (mm	9,6	0,0	7,2	19,	7,4	1,2	0,0	5,6	23,	18,	31,	21,4	144,
60	30	*ARM* (mm)	35,	60,0	27,	19,	17,	48,3	57,3	39,7	15,	15,	7,0	60,0	—
		ER (mm	22,	23,5	32,	24,	22,	38,7	48,7	48,3	38,	34,	29,	30,9	394,
		DEF (mm	2,7	0,0	0,0	7,2	6,4	1,0	0,0	0,0	8,2	16,	28,	22,6	93,3
90	45	*ARM* (mm)	62,	90,0	57,	42,	35,	78,3	87,3	69,7	37,	27,	14,	67,9	—
		ER (mm	25,	23,5	32,	31,	27,	39,4	48,7	48,3	46,	44,	34,	31,7	434,
		DEF (mm	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	0,3	0,0	0,0	0,4	7,0	23,	21,9	54,0
120	60	*ARM* (mm)	63,	120,	87,	72,	64,	108,	117,	99,7	67,	50,	26,	76,7	—
		ER (mm	24,	23,5	32,	31,	29,	39,7	48,7	48,3	46,	50,	45,	35,3	455,
		DEF (mm	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	12,	18,2	32,1

O regime pluviométrico da região no período analisado e a limitação imposta pelo solo com AD igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm contribuíram para que os valores de ER determinados com base no balanço hídrico padrão (EToPM e PVP) apresentassem valores 26,1%, 13,1%, 4,7% e 1,4% menores que os valores da EToPM, respectivamente.

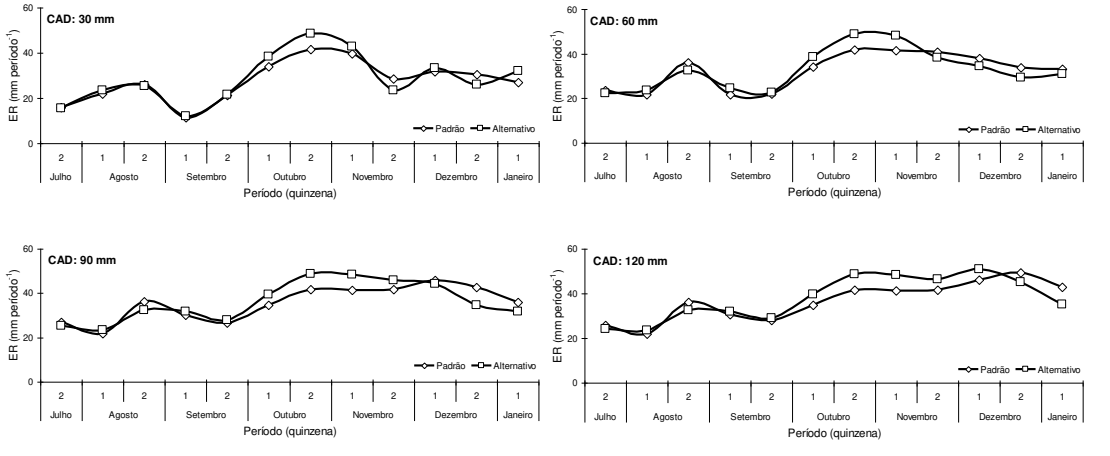
Da mesma forma, a utilização dos métodos alternativos para estimar a evapotranspiração e P (EToCM e PVP), bem como o regime pluviométrico da região no período analisado e a limitação imposta pelo solo com AD igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, contribuíram para que os valores de ER proveniente do balanço hídrico alternativo (EToCM e PA) ficassem 23,2%, 11,6%, 2,8% menores e 2,1% maior que o valor da EToPM, respectivamente.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

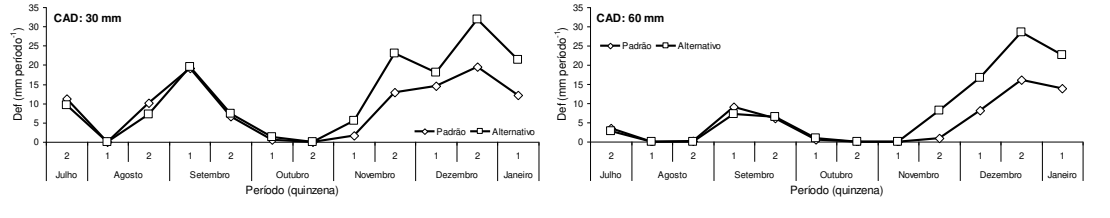
Para a metodologia padrão, os valores de DEF obtidos no período analisado, com os balanços hídricos considerando água disponível no solo de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, foram de 108,6 mm, 58,5 mm, 20,9 mm e 6,2 mm, respectivamente. Considerando a metodologia alternativa, os valores de DEF obtidos no período analisado com água disponível de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, foram de 144,9 mm, 93,3 mm, 54,0 mm e 32,1 mm, respectivamente. Os valores de deficiência reduziram com o aumento da CAD e AD, visto que maiores quantidades de água provenientes das precipitações pluviométricas ficaram armazenadas no perfil do solo (Figura 1 e Tabela 3).



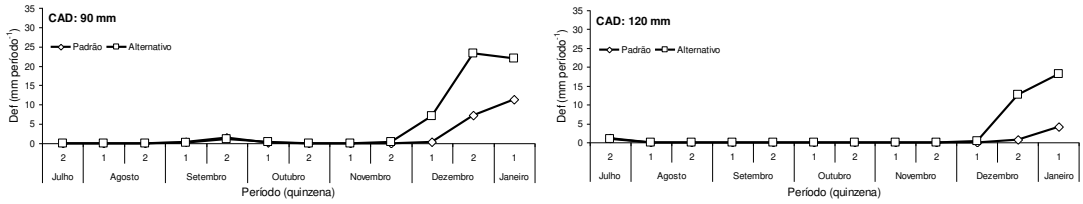
(a) Armazenamento de água no solo (ARM)



(b) Evapotranspiração Real (ER)



ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)



(c) Deficiência de água no solo (DEF)

Figura 1 - Componentes do balanço hídrico diário (ARM, ER e DEF), calculados entre julho de 2008 e janeiro de 2009 (fechamento em quinzenas), utilizando dados de P e ETo obtidos com metodologia padrão (P_{VP} e ETo_{PM}) e alternativa (P_A e ETo_{CM}), para solos possuindo CAD igual 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (kc = 1,0 e p = 0,5), sendo: (a) armazenamento (ARM); (b) evapotranspiração real (ER); e, (c) deficiência hídrica (DEF)

O desvio total entre os valores de DEF estimados a partir de balanços hídricos utilizando metodologias padrão e alternativa (DEFpadrão – DEFAlternativa), no período analisado, foram de: –36,3 mm período–1, –34,8 mm período–1, –33,1 mm período–1 e –25,9 mm período–1, para valores de AD igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, respectivamente.

Como o somatório da EToCM no período analisado foi 41,5 mm período–1 maior do que o somatório da EToPM, e a P total medida com o pluviômetro Ville de Paris foi 28,6 mm período–1 maior que a P estimada como o pluviômetro alternativo, verificou-se que o balanço hídrico realizado com a metodologia alternativa teve um saldo de –70,1 mm período–1 (41,5 mm período–1 + 28,6 mm período–1) para a contabilização da água no perfil do solo, em relação ao balanço hídrico padrão. Os resultados obtidos com os desvios da deficiência (DEFpadrão – DEFAlternativa), evidenciaram que a CAD e AD do solo foram importantíssimos na atenuação do valor de –70,1 mm período–1 para o balanço hídrico alternativo.

Este fato pode ser observado nas Figuras 1 e 2, em que a superestimativa da ETo e subestimativa da P influenciaram negativamente a contabilidade do balanço hídrico alternativo a partir da 2a quinzena de outubro/2008, 1a quinzena de novembro/2008, 2a quinzena de novembro/2008 e 1ª quinzena de dezembro/2008, para valores de AD iguais a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, respectivamente.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

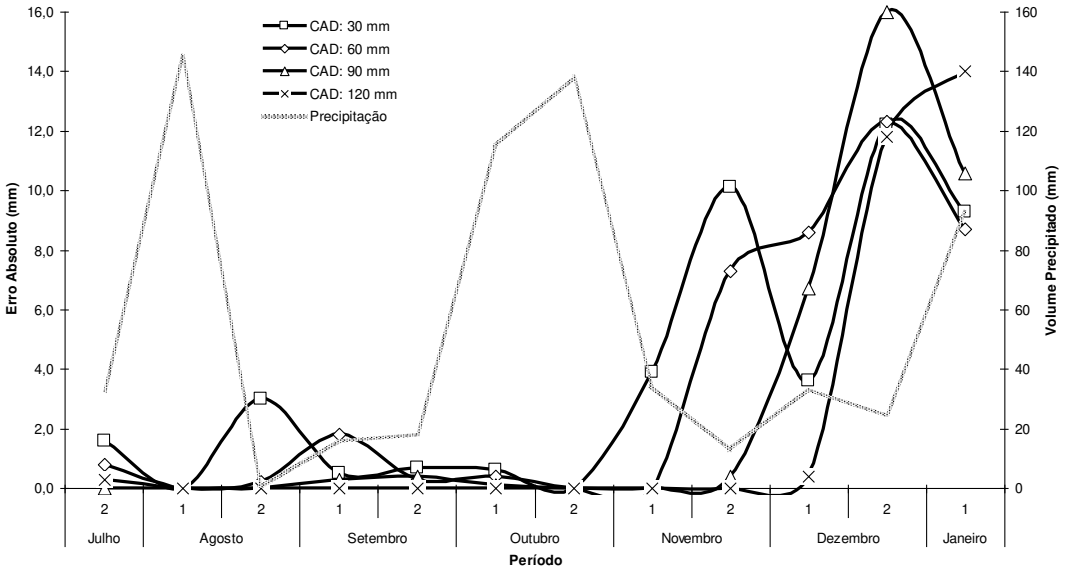


Figura 2 - Erro absoluto (em módulo) no valor da deficiência hídrica (DEF), verificada entre os balanços hídricos realizados com metodologia padrão e alternativa para as CAD's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (com fechamento quinzenal), contraposto ao total de P (PVP) ocorrida no período considerado.

Enquanto os valores de P foram suficientes para manter o armazenamento da água no solo próximo da zona úmida (CAD ·(1– p) < ARM < CAD), as superestimativas da EToCM e subestimativas da P com o pluviômetro alternativo não foram suficientes para prejudicar a contabilidade do balanço hídrico alternativo (2a quinzena de julho/2008 a 2a quinzena de outubro/2008). No entanto, a partir deste ponto, quando houve um período com menor pluviosidade (1ª quinzena de novembro/2008 a 2ª quinzena de dezembro/2008), os desvios entre os valores de alguns componentes (ER, ARM e DEF) dos balanços hídricos padrão e alternativo aumentaram, e o valor de sua amplitude dependeu bastante da CAD e AD do solo.

Os pontos discutidos para as componentes do balanço hídrico (ER, ARM e DEF) mostram que cuidados devem ser tomados com a utilização de métodos alternativos, como foi realizado no presente trabalho. Mesmo considerando um prévio desempenho satisfatório das estimativas de P (SOUZA et al., 2013) e ETo (GURSKI et al., 2016) pelos métodos alternativos, verificou-se que os desvios entre os valores das componentes de um balanço hídrico padrão e alternativo podem ser expressivos, principalmente nos períodos quentes, combinados com valores de P decrescente. O resultado do balanço hídrico alternativo piora bastante quando a superestimativa dos valores da ETo se somam a subestimativa da P do pluviômetro.

4. CONCLUSÕES

O desempenho do balanço hídrico realizado com a metodologia alternativa, em comparação com a metodologia padrão, depende da água disponível no solo (AD) e da combinação do grau de acerto (associação e exatidão) com que os métodos alternativos estimam ETo e P.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

As componentes do balanço hídrico alternativo em relação ao padrão (ER, ARM, DEF) têm maiores desvios para períodos quentes e com ocorrência de P insuficiente para manter o armazenamento da água no solo próximo de sua zona úmida.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que, para diferentes regiões, métodos alternativos devem ser testados individualmente e, quando bem avaliados, deve-se ter o cuidado de também avaliá-los quando forem utilizados em conjunto com algum tipo de metodologia, quando de sua recomendação e utilização.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. G.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998.

ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L., SENTELHAS, P. J.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. "Koppen's climate classification map for Brazil". Meteorologische Zeitschrif, v.2, p.711-728, 2013.

ARAUJO, M.A.; SOUZA, J. L. M.; BRONDANI, G. E.; PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa - Paraná. Scientia Agraria, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 403-412, 2009.

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. 1, p .293–300, 2007.

BRASIL –. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. Normais climatológicas (1961 – 1990). Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação/Departamento Nacional de Meteorologia, 84p. 1992.

BRUNO, I. P.; SILVA, L. C.; REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O. O. S.; VOLPE, C. A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. Scientia. Agricola, São Paulo, v. 64, n. 1, p. 215-220, 2007.

CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 28p. (Boletim Técnico, 116). 1971.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. P. B. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Bragantia, Campinas, v. 59, n. 1, p. 125–137, 2000.

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

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: Irrigation and Drainage Paper 33, Rome, Italy. 1979.

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

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

GOMES, S. Ajuste a avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades do Estado do Paraná. Curitiba, 103f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, 2005.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; SCHAFER, R.; SCHAFER, H. Métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência anual e nas diferentes estações do ano em Curitiba-PR, Brasil. Cultura Agronômica, v. 25, n. 2, p. 155-166, 2016.

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, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 165–172, 2010.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Ceres, 425 p. 1981.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ, 183p. 1997.

REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L. R.; BACCHI, O. O. S.; PILOTTO, J. E. Daily rainfall variability at a local scale (1,000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. Scientia Agricola, v. 52, n. 1, p. 43-49, 1995.

SILVA, A. L.; ROVERATTI, R.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; TIMM, L. C.; BRUNO, I. P.; OLIVEIRA, J. C. M.; DOURADO NETO, D. Variability of water balance components in a coffee crop in Brazil. Scientia Agricola, v. 63, n. 2, p. 105-114, 2006.

SILVA, A. T. A. Aspectos meteorológicos e balanço hídrico em um aterro de resíduos sólidos 14 urbanos. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do Rio Doce. Revista Árvore, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 399–410, 2006.

SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Avaliação e desempenho das equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v. 29, n. 4, p. 433-442, 2007.

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

SOUZA, J. L. M.; SCHAFER, R. F.; SCHAFER, H.; JERSZURKI, D. Precipitação medida com pluviômetros alternativos na região de Curitiba (PR). Revista Acadêmica, Ciências Agrárias Ambientais, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 583–592, 2013.

SPAROVEK, G.; JONG VAN LIER, Q.; DOURADO-NETO, D. Computer assisted Köppen climate classification for Brazil. International. Journal of Climatolology, v. 27, n. 1, p. 257-266, 2007.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, N.J. 1(8), 104p, 1955.