

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

JULIA MATTIA ONGARATTO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA TAQUARI
ANTAS-RS**

CAXIAS DO SUL

2019

JULIA MATTIA ONGARATTO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA TAQUARI
ANTAS-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental da
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

CAXIAS DO SUL

2019

JULIA MATTIA ONGARATTO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA TAQUARI
ANTAS-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.
Orientador Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Gisele Cemin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Tiago Panizzon
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

A conclusão do presente trabalho e por consequência, da graduação em Engenharia Ambiental me fazem sentir que todos os desafios que me foram impostos ao longo destes seis anos e meio valeram a pena e que, muitos destes desafios só foram superados em razão do apoio de algumas pessoas que são muito importantes para mim.

Primeiramente gostaria agradecer aos meus pais Gilberto Ongaratto e Eneri Eliana Mattia, por me deram o suporte necessário para concluir esta etapa da minha vida, me apoiando em todos os momentos, auxiliando na tomada de decisões importantes, e me confortando em todos os momentos necessários.

Agradecer também ao meu namorado Henrique Tramontina que foi companheiro durante todos estes anos. Companheiro de estudos durante os finais de semana, sempre me auxiliando nas dificuldades encontradas e me dando o suporte necessário quando o desespero batia.

Ao meu orientador, Taison Anderson Bortolin, por me ajudar não só com o Trabalho de Conclusão de curso, mas também em todas as outras disciplinas em que tive o prazer de ter você como docente, com certeza me espelho em você pelo ótimo profissional que és.

Por fim, agradeço a todos os amigos e demais parentes que me acompanharam nesta jornada, alguns somente nos finais de semana, outros também na graduação, mas que de uma maneira ou de outra foram muito importantes.

“Há uma limitação desconcertante de nossa mente: nossa confiança excessiva no que acreditamos saber, e nossa aparente incapacidade de admitir a verdadeira extensão da nossa ignorância e a incerteza do mundo em que vivemos.”
Daniel Kahneman

RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma componente muito importante do balanço hídrico e sua estimativa é essencial para execução de projetos agrícolas e ambientais, para estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação, modelagem de processos climatológicos e planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos. O método de Penman-Monteith é considerado pela FAO, como padrão para estimativa da ET_o, no entanto, devido ao grande número de variáveis meteorológicas empregadas neste método, tem-se utilizado de vários outros métodos para estimar a ET_o. Este tem como objetivo avaliar o desempenho dos diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica Taquari Antas - RS. Em virtude disto, utilizaram-se métodos indiretos para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), sendo eles, o método de Penman-Monteith, considerado pela FAO como método padrão e os métodos de Thornthwaite, Hargraves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo e Jensen-Haise, além de imagens do sensor MODIS. Os dados utilizados para estimar a ET_o nas quatro estações meteorológicas utilizadas foram obtidos através do sistema Agritempo, que utiliza os dados das estações meteorológicas automáticas do INMET. O método da regressão linear foi utilizado para analisar a correlação existente entre a ET_o estimada pelos sete métodos, também foram utilizados o índice de concordância de Willmott e o índice de desempenho. Os resultados apontam que os métodos de Blaney-Criddle e Jensen-Haise foram os que apresentaram os melhores resultados, sendo classificados com desempenho “ótimo”. Enquanto os métodos que apresentaram os piores desempenhos foram o de Thornthwaite seguido pelo método de Camargo. As imagens do sensor MODIS tendem a superestimar os valores da ET em comparação a todos os métodos analisados neste trabalho, no entanto tem como vantagem a apresentação da distribuição espacial da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica.

Palavras-chave: evapotranspiração de referência, Penman-monteith, métodos indiretos

ABSTRACT

The reference evapotranspiration (ET_o) is a very important component of the water balance and its estimation is essential for the execution of agricultural and environmental projects, for water balance studies, irrigation projects and management, climatological process modeling and management planning of water resources. However, due to the large number of meteorological variables employed in this method, several other methods have been used to estimate ET_o. This coursework has the objective of evaluating the performance of the different methods of estimation of evapotranspiration in the Taquari Antas River Basin Development, in Rio Grande do Sul. Therefore, indirect methods were used to estimate the reference evapotranspiration (ET_o), being them the Penman-Monteith method that was considered by FAO as the standard method and the methods of Thornthwaite, Hargraves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo and Jensen-Haise, as well as MODIS sensor images. The data used to estimate the ET_o on the four meteorological stations used were obtained through the Agritempo system, which uses data from INMET automatic meteorological stations. The linear regression method was used to analyze the correlation between the ET_o estimated by the seven methods, also used the Willmott concordance index and the performance index. The results show that the Blaney-Criddle and Jensen-Haise methods presented the best results, being classified with "optimal" performance. While the methods that presented the worst performances were those of Thornthwaite followed by Camargo's method. The images of the MODIS sensor tend to overestimate the ET values in comparison to all the methods analyzed in this coursework, however it has the advantage of presenting the spatial distribution of the evapotranspirations in the River Basin Development

Key-words: reference evapotranspiration, Penman-monteith, indirect methods

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico terrestre	16
Figura 2 - Evapotranspiração real.....	19
Figura 3 - Evapotranspiração de cultura.....	19
Figura 4 - Evapotranspiração Potencial.....	20
Figura 5 - Evapotranspiração de referência	21
Figura 6 - Esquema de um lisímetro de drenagem	23
Figura 7 - Esquema de um lisímetro de lençol freático regulável.....	23
Figura 8 - Principais regiões do espectro eletromagnético.....	34
Figura 9 - Localização da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas.....	38
Figura 10 - Fluxograma Metodológico.....	40
Figura 11 - Localização das estações meteorológicas	41
Figura 12 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Bento Gonçalves	51
Figura 13 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês ⁻¹ em Bento Gonçalves.....	53
Figura 14 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de São José dos Ausentes	55
Figura 15 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês ⁻¹ em São José dos Ausentes	57
Figura 16 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Lagoa Vermelha	59
Figura 17 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês ⁻¹ em Lagoa Vermelha.....	60
Figura 18 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Rio Pardo.....	62
Figura 19 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês ⁻¹ em Rio Pardo	63
Figura 20 - Evapotranspiração real mensal da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas obtidas com utilização de produtos MODIS (janeiro a junho)	67
Figura 21 - Evapotranspiração real mensal da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas obtidas com utilização de produtos MODIS (julho a dezembro).....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização das estações meteorológicas.....	41
Tabela 2 - Índice de concordância.....	49
Tabela 3 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Bento Gonçalves	50
Tabela 4 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de Bento Gonçalves	51
Tabela 5 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de São José dos Ausentes	54
Tabela 6 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de São José dos Ausentes	55
Tabela 7 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Lagoa Vermelha	58
Tabela 8 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de Lagoa Vermelha	59
Tabela 9 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Rio Pardo ..	61
Tabela 10 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de Rio Pardo	62
Tabela 11- Análise de desempenho dos métodos de estimativa de ETo para os municípios...	64
Tabela 12 - Médias mensais da evapotranspiração de referência para a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas	65
Tabela 13 - Médias mensais de estimativa da evapotranspiração pelo sensor MODIS e método de Penman-Monteith	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ETr	Evapotranspiração real
ETc	Evapotranspiração da cultura
EP	Evapotranspiração potencial
ETo	Evapotranspiração de referência
ET	Evapotranspiração
Kc	Coefficiente da cultura
PM-FAO	Penman-Monteith-FAO
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
LE	Calor latente
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
AVHRR	Advance Very High Resolution Radiometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
EEFLUX	Earth Engine Evapotranspiration Flux
GEE	Google Earth Engine
EOS	Earth Observing System
ESE	Earth Science Enterprises
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
HDF	Hierarchy Data Format
SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	CICLO HIDROLÓGICO.....	16
3.1.1	Evapotranspiração real e da cultura.....	18
3.1.2	Evapotranspiração potencial e de referência	20
3.2	MEDIÇÕES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	22
3.2.1	Medida direta de evapotranspiração	22
3.2.2	Medida indireta de evapotranspiração	24
3.2.2.1	Método de Thornthwaite	25
3.2.2.2	Método de Penman-Monteith	26
3.2.2.3	Método de Camargo	27
3.2.2.4	Método de Hargreaves-Samani	29
3.2.2.5	Método de Blaney-Criddle	30
3.2.2.6	Método de Jensen-Haise.....	30
3.2.2.7	Método de Makkink	31
3.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	32
3.4	SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO... 33	
3.4.1	Sensor Modis	35
4.	ÁREA DE ESTUDO	38
5.	MATERIAL E MÉTODOS	39
5.1	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	40

5.1.1	Método de Thornthwaite.....	42
5.1.2	Método de Penman-Monteith-FAO	42
5.1.3	Método de Camargo	46
5.1.4	Método de Hargreaves-Samani	46
5.1.5	Método de Blaney-Criddle	46
5.1.6	Método de Jensen-Haise.....	47
5.1.7	Método de Makkink	48
5.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	48
5.3	OBTENÇÃO DE DADOS ORBITRAIS	49
6.	RESULTADOS	50
6.1	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA ETO MENSAL ..	50
6.1.1	Município de Bento Gonçalves	50
6.1.2	Município de São José dos Ausentes	54
6.1.3	Município de Lagoa Vermelha	58
6.1.4	Município de Rio Pardo	61
6.1.5	Análise Final.....	64
6.2	SENSOR MODIS	66
7.	CONCLUSÃO.....	71
8.	LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM BENTO GONÇALVES - RS	85
	APÊNDICE B – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM SÃO JOSÉ DOS AUSENTES - RS	85
	APÊNDICE C – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM LAGOA VERMELHA - RS	85

APÊNDICE D – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM RIO PARDO – RS	85
---	-----------

1. INTRODUÇÃO

Um dos desafios da sociedade é atender a demanda pela água de boa qualidade, sendo que a sua escassez para a irrigação e demais usos já ocorre em algumas regiões do Brasil, como o sertão nordestino, em certos períodos do ano.

Sendo assim, a necessidade do conhecimento acerca dos componentes do ciclo hidrológico, dentre os quais a evapotranspiração se destaca devido a sua importância em abastecer a atmosfera de água (SILVEIRA e STONE 1994). A estimativa da evapotranspiração de referência auxilia pesquisadores e profissionais da área na execução de projetos agrícolas e ambientais e é necessária para estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação, modelagem de processos climatológicos e planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos.

Segundo Varejão-Silva (2006) em regiões onde a disponibilidade hídrica é baixa, a evapotranspiração pode até se tornar um fator limitante da produção agrícola, e em algumas situações chega a colocar em risco a sobrevivência da população. A compreensão acerca da distribuição espacial e temporal de vapor d'água transferido para a atmosfera facilita a formação de políticas que visam o uso racional da água. Estudos relacionados a este assunto possibilitam um melhor controle do aproveitamento de grandes reservatórios, racionalizando a demanda de água. Também torna possível avaliar de forma mais adequada a quantidade de água usada na irrigação e os turnos de rega, minimizando desta forma os desperdícios.

A evapotranspiração também é um parâmetro importante quando se trata de recarga de aquíferos. Para realizar a avaliação de recarga, a primeira fase a ser considerada é a disponibilidade de informações relativas a diversos parâmetros do sistema, sendo eles, dados climáticos, hidrológicos, geomorfológicos, geológicos e de ocupação do solo, uma vez que a cobertura vegetal depende da evapotranspiração que é um parâmetro fundamental do balanço hídrico (BARBOSA e MATTOS, 2008).

Em função da dificuldade para realizar as medições diretas, o uso de dados de sensoriamento remoto juntamente com a aplicação dos métodos indiretos tem se tornando uma ferramenta em potencial para a determinação da evapotranspiração. O sensoriamento remoto permite a estimativa da evapotranspiração para grandes áreas, sendo possível realizar a determinação espacial desta variável. Os métodos indiretos são utilizados para estimar a transferência de vapor d'água para a atmosfera em condições climáticas específicas, no entanto, poucos têm sido adaptados para situações climáticas distintas daquelas que lhes deram origem. Existem diversos métodos para estimar a evapotranspiração, dentre os quais alguns são

baseados somente na temperatura, como o de Thornthwaite e outros são baseados também na radiação solar, como o de Makkink e Jensen-Haise.

Dentre os diversos métodos de cálculo da evapotranspiração, destaca-se o método de Penman-Monteith, recomendado pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) e utilizado para a calibração de outros métodos, visto que este mostra-se eficiente em diversas condições climáticas. No entanto, em alguns casos, o uso do método de Penman-Monteith é restrito pela falta de algumas variáveis de entrada, o que gera a necessidade da utilização de outros métodos indiretos, menos exigentes em relação aos dados requeridos.

Pereira et al. (2009) recomendam que antes de aplicar um método para determinada região, é necessário verificar o desempenho deste e, se necessário, fazer calibrações com o objetivo de minimizar os erros de estimativa. Esse desempenho vem sendo analisado através da comparação dos respectivos métodos ao método padrão de Penman-Monteith (PAIVA e PINHEIRO, 2016; MOURA et. al, 2013). Sendo assim, a análise estatística do desempenho de métodos indiretos mais simples em comparação ao de Penman-Monteith representa um estudo expressivo para aplicação mais exata à simulação hidrológica, ao manejo de irrigação e à análise climática de uma determinada região.

Dentro deste cenário, o objetivo deste trabalho é avaliar desempenho dos diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica Taquari Antas -RS. A Bacia Hidrográfica Taquari Antas, está localizada a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul e é caracterizada pelo desenvolvimento de atividades agrícolas e pecuárias, sendo de fundamental importância o conhecimento da evapotranspiração, uma vez que, junto com demais fatores, possibilitam a determinação da disponibilidade de água e déficits hídricos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é avaliar o desempenho dos diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica Taquari Antas -RS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos:

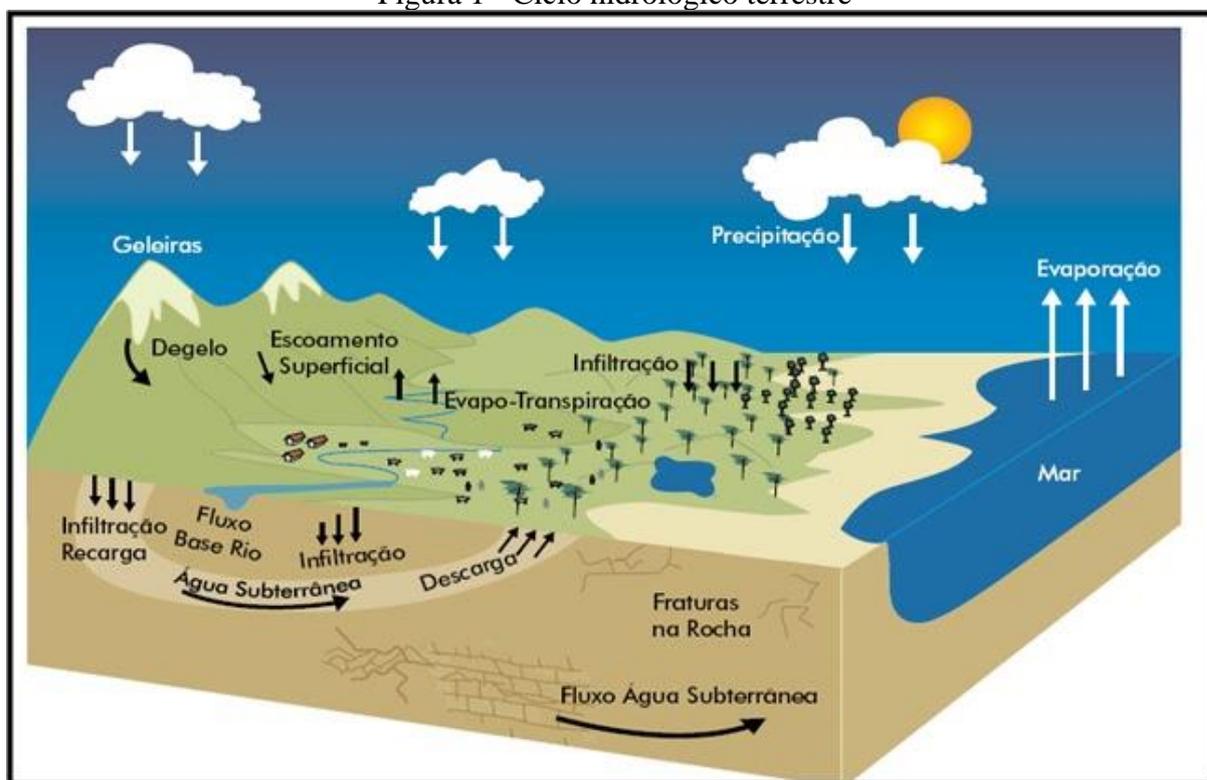
- a) Aplicar e comparar os diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração;
- b) avaliar o conjunto de métodos mais adequado para estimar a transferência de vapor de água para atmosfera na região de estudo;
- c) comparar os resultados obtidos com estimativas por satélite.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico refere-se à circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, promovido principalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2007). As principais componentes do ciclo hidrológico, de uma maneira resumida, são: a precipitação, escoamento superficial e subterrâneo, a evapotranspiração, e o armazenamento de água no solo, lagos e rios (Figura 1). Tanto a chuva quanto a vazão dos escoamentos são variáveis facilmente mensuráveis, já o armazenamento e a evapotranspiração requerem a utilização de métodos indiretos para a sua medição (KAN, 2005).

Figura 1 - Ciclo hidrológico terrestre



Fonte: Aquaflux (2019)

O ciclo hidrológico inicia com a evaporação da água presente em superfícies líquidas e no solo, que junto à transpiração das plantas, forma o vapor d'água presente na atmosfera. Ao ser resfriado, ocorre a formação de nuvens e precipitação em forma de chuva e neve (SILVA e COSTA CALHEIROS, 2015).

Observa-se que parte da água precipitada pode até mesmo evaporar antes de atingir o solo, e o restante acaba sendo interceptado por vegetações e superfícies impermeáveis de áreas urbanas, de rápida evaporação (SILVA e COSTA CALHEIROS, 2015). Outra parte acaba

escoando pela superfície em direção aos oceanos, sendo coletada pelo caminho por rios e lagos. Há ocorrência de uma porção que infiltra o solo entre a superfície e o lençol freático, que são as águas subterrâneas (NARASIMHAN, 2009).

Desta forma, os principais processos responsáveis por abastecer a atmosfera de água são os processos de evaporação e a evapotranspiração, enquanto no sentido atmosfera-superfície, onde a transferência de água ocorre em qualquer estado físico, os processos mais significativos são as precipitações de chuva e de neve (TUCCI, 2007). Em superfícies vegetadas, o processo simultâneo de evaporação pela superfície do solo e transpiração pelas plantas é denominado evapotranspiração (RIGHETTO, 1998).

Sendo assim, a evaporação é o conjunto de fenômenos físicos que transformam em vapor a água que precipita sobre a superfície do solo e a água dos mares, dos rios, dos lagos e dos reservatórios de acumulação (GARCEZ e ALVAREZ, 1988). Os principais fatores que determinam o poder evaporante da atmosfera são o grau de umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a radiação solar (VAREJÃO SILVA, 2006).

Já a transpiração, é a perda de água que é absorvida pelas plantas, através dos estômatos existentes na parte inferior das folhas. Com a luz solar, os estômatos se abrem, permitindo a propagação do dióxido de carbono para o interior das folhas, sendo assim, a água contida nas células passa para as regiões intercelulares, onde ela é vaporizada, e quando os poros estão abertos, escapa-se para a atmosfera. (LENCASTRE e FRANCO, 1992)

Conforme Tucci (2007), o solo, as plantas e atmosfera podem ser apontados como elementos de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, no qual os diversos processos de fluxos estão interligados. Considerando este sistema, é importante salientar que o fluxo de água ocorre dos pontos de maior potencial hídrico para os de menor potencial, sendo que a menor resistência ao fluxo se encontra internamente na planta e a maior resistência ocorre no fluxo das folhas para a atmosfera devido à mudança do estado líquido para gasoso (TUCCI, 2007).

Mesmo que o processo de transpiração não seja idêntico ao de evaporação, ele sofre a influência de fatores meteorológicos assim como na evaporação, como por exemplo: a radiação solar, a temperatura do ar, umidade do ar e a velocidade do vento. Além disso, a evapotranspiração também sofre influência de fatores relativos à própria planta, como o estado de desenvolvimento e o tamanho da superfície foliar transpirante, sendo que quanto maior a área foliar maior será a superfície transpirante, sendo assim, maior o potencial para o uso da água (RIGHETTO, 1998).

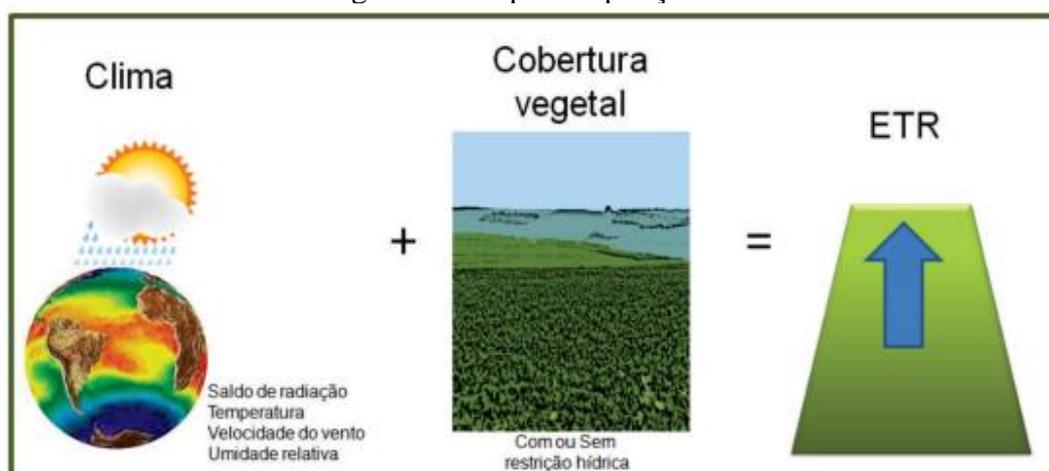
Devido ao avanço dos estudos relacionados à evapotranspiração e, para que fosse possível realizar uma análise do processo evapotranspirativo alguns outros conceitos foram surgindo na literatura, como: evapotranspiração potencial ou de referência, e evapotranspiração real (PEREIRA; ANGELOCCI, SENTELHAS, 2002).

3.1.1 Evapotranspiração real e da cultura

A evapotranspiração que ocorre em uma parcela de solo cultivada depende das condições meteorológicas, da atividade biológica da vegetação presente e também da umidade disponível na zona das raízes (VAREJÃO SILVA, 2006). Quando todas as demais variáveis são mantidas constantes, a taxa evapotranspirométrica aumenta à medida em que a umidade do solo se aproxima de sua capacidade máxima de retenção de água, geralmente estabilizando um pouco abaixo desta capacidade máxima (ASCE, 1973). De outro modo, a evapotranspiração tende a zero quando a disponibilidade hídrica na zona explorada pelas raízes se aproxima do ponto de murcha permanente, que ocorre quando a planta não consegue mais retirar água do solo. Assim, a transferência do vapor de água para a atmosfera, por meio da evapotranspiração, que transcorre em uma parcela do terreno onde há vegetação, em condições naturais ou de cultivo, está vinculada à disponibilidade hídrica do solo e é chamada de evapotranspiração real (VAREJÃO SILVA, 2006).

De acordo com Thornthwaite e Wilm (1944), a evapotranspiração real (ETr) é o processo no qual ocorre a transferência de água, por meio da evaporação e da transpiração, para a atmosfera terrestre, de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal. Entretanto, Camargo e Camargo (2000) afirmam que a evapotranspiração real corresponde à perda de água de uma superfície natural, independentemente do tipo de cultura, da umidade do solo e das condições (Figura 2).

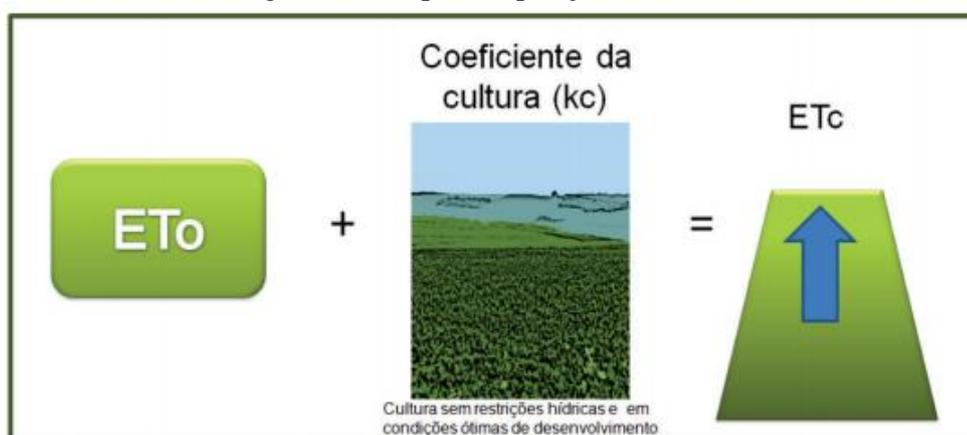
Figura 2 - Evapotranspiração real



Fonte: Allen et al. (1998).

Já a evapotranspiração da cultura (ET_c) é definida como sendo a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera observada em uma cultura onde não há presença de pragas e doenças e sob condições de solo próximo à capacidade de campo, sendo fundamental para o adequado manejo de irrigação (Figura 3). Essa transferência é vinculada às condições meteorológicas e ao tipo de cultura, sendo que pode ser compreendida como a evapotranspiração potencial que ocorre nos diferentes estágios fenológicos da mesma (DOORENBOS e PRUITT, 1997; PEREIRA; VILA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

Figura 3 - Evapotranspiração de cultura



Fonte: Allen et al. (1998).

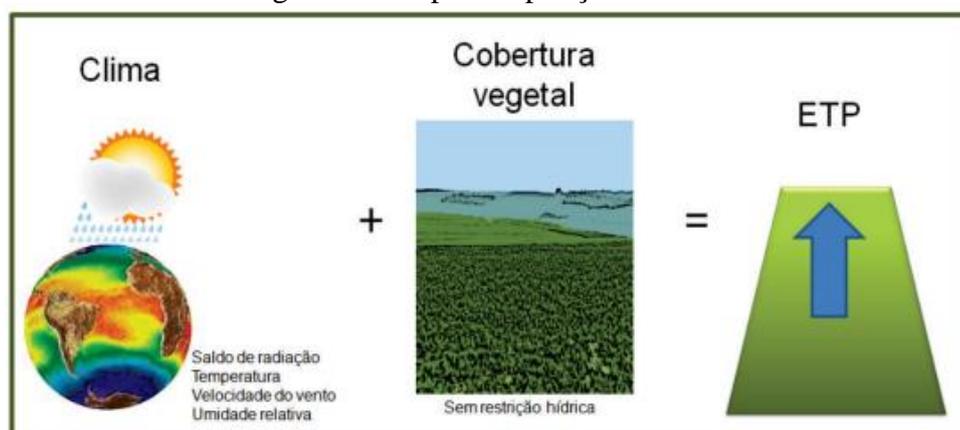
Os dados de evapotranspiração real dificilmente podem ser utilizados para realizar comparações, visto que as variáveis meteorológicas intervenientes oscilam muito no espaço e no tempo. Além disso, ela está associada à atividade fisiológica da vegetação presente a qual, modifica com a idade e fase de desenvolvimento.

3.1.2 Evapotranspiração potencial e de referência

Com o intuito de estabelecer um critério comparativo, Thornthwaite introduziu, em 1944, o termo evapotranspiração potencial (EP), definindo-a como a perda máxima de água por uma fração de solo úmido, totalmente coberto de vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e suficientemente extensa para eliminar os efeitos de energia advectiva local (CARVALHO, 2011).

Penman (1948), por não considerar a definição suficientemente precisa, modificou um pouco o conceito original de EP introduzido por Thornthwaite e definiu a evapotranspiração potencial como a quantidade de água evapotranspirada na unidade de tempo, a partir de uma pequena superfície gramada, que cobre o solo uniformemente, sem ocorrência de limitações hídricas (Figura 4). O conceito proposto por Penman também não pode ser considerado preciso, tendo em vista que não estabelece a altura nem o tipo de vegetação e também deixa em aberto o que se deve entender por cobrir o solo uniformemente (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 4 - Evapotranspiração Potencial



Fonte: Allen et al. (1998).

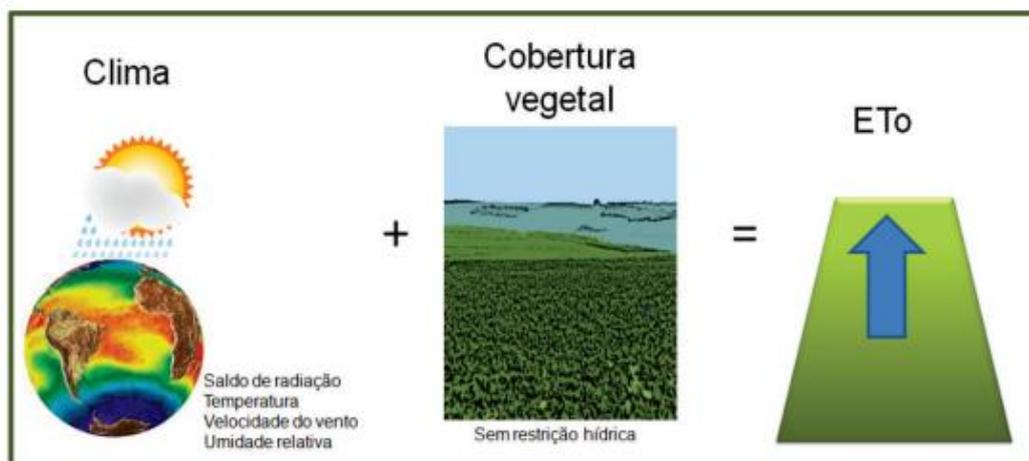
Outro aspecto que deve ser considerado é que a evapotranspiração potencial normalmente é calculada através de dados meteorológicos que são medidos em condições não potenciais (VAREJÃO-SILVA, 2006).

No conceito de evapotranspiração potencial apresentam-se implícitas duas hipóteses: mantendo-se o solo plenamente abastecido, em capacidade de campo, a maior parte da energia solar disponível seria utilizada como calor latente, e somente variações no coeficiente de reflexão da superfície seriam pertinentes para modificar a taxa evapotranspiratória, por fazer variar a quantidade de energia solar disponível ao processo (VAREJÃO-SILVA, 2006).

No entanto, o uso do termo evapotranspiração potencial vem sendo desencorajado devido às ambiguidades nas definições (GIACOMONI, 2005), e desta forma a expressão

recomendada é evapotranspiração de referência (ET_o). Doorenbos e Pruitt (1977) introduziram o conceito de evapotranspiração de referência (Figura 5), em substituição ao termo ETP.

Figura 5 - Evapotranspiração de referência



Fonte: Allen et al. (1998).

Mas foi somente no ano de 1990 que houve uma grande mudança sobre a conceituação e estimativa da ET_o. A *Food and Agriculture Organization* (FAO) promoveu um encontro com especialistas da área, para analisar os conceitos e metodologias para cálculo de ET, com o objetivo de estabelecer uma nova definição para cultura de referência, assim como o método de referência para estimar a ET, para esta referência (PEREIRA et al., 1997). Desta forma, o novo conceito proposto para a ETP passou a ser a ET_o, tornando-se assim um conceito largamente utilizado. O método recomendado para a sua estimativa é o de Penman-Monteith-FAO. Neste método, a cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, que possui características semelhante a grama. Os parâmetros para a cultura hipotética são: altura de 0,12m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 69s.m⁻¹(CARVALHO et al., 2011).

Apesar dos termos adotados pela FAO, é bastante comum o uso dos termos ETP e ET_o. O termo ETP é o mais utilizado quando se trata de estudo climatológicos, visto que, na maioria das vezes, está relacionado à análise do potencial hídrico de uma região. Enquanto a ET_o é mais utilizada para projetos de manejo e irrigação, já que a ET_c, é determinada aplicando-se o coeficiente de ajuste coeficiente de cultura (K_c) à evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), que neste caso, é a cultura hipotética (CARVALHO et al., 2011).

De acordo com Varejão-Silva (2006) a determinação da evapotranspiração de referência é importante, pois serve como uma base comum de comparação, que tem como objetivo avaliar diferentes demandas evapotranspiratórias, objetivando ao planejamento e à condução de atividade de rega.

A estimativa da evapotranspiração é relativamente mais difícil e complexa, em comparação a da precipitação e do escoamento superficial. Em função disso, além das medidas diretas, vários métodos foram desenvolvidos visando a sua medição e estimativa, os chamados métodos indiretos (PEREIRA, NOVA & SEDIYAMA, 1997).

3.2 MEDIÇÕES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

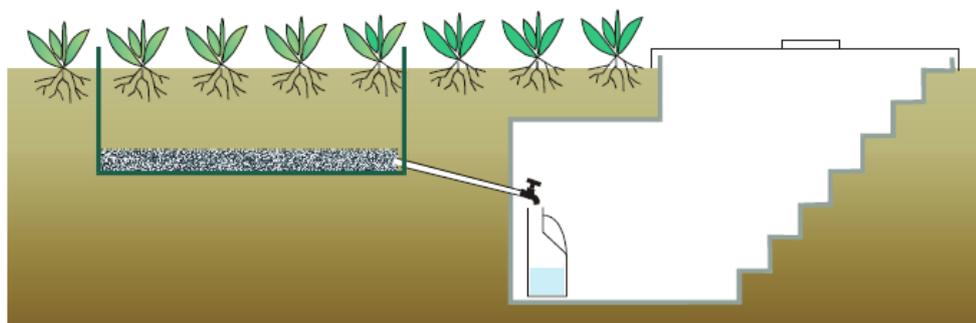
Em solos vegetados e reservatórios de água doce, a evapotranspiração representa uma demanda considerável de água, justificando-se os esforços para quantificá-la e minimizá-la. As perdas de água por evapotranspiração, responsável por subtrair uma parcela considerável dos recursos hídricos disponíveis, não pode ser negligenciada a nível de planejamento e tampouco de execução (VAREJÃO-SILVA, 2006). Para a sua quantificação, a medição pode ser realizada de forma direta, ou indireta.

3.2.1 Medida direta de evapotranspiração

Para a medida direta da evapotranspiração são utilizados lisímetros, os quais são estruturas constituídas de um reservatório que contém uma amostra representativa do solo, com um volume mínimo de 1m^3 , e uma amostra da comunidade vegetal que se deseja estudar, providos de um sistema de drenagem e instrumental de operação (TUCCI, 2009).

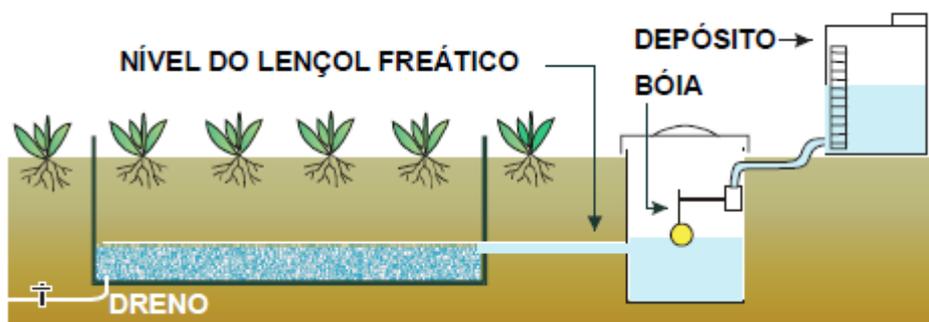
Os lisímetros podem ser divididos em duas categorias: pesáveis e não pesáveis. Os pesáveis são ideais para a determinação da evapotranspiração em períodos curtos (diários ou horário) (BERNARDO et al., 2006). O cálculo de evapotranspiração pelo método do lisímetro de pesagem é realizado pela variação do peso do solo em relação a área do tanque. Já os lisímetros não pesáveis, de drenagem (Figura 6) ou de lençol freático constante (Figura 7), são ideais para grandes períodos de medição e se baseiam no princípio de conservação de massa para a água em um certo volume de solo (CAMARGO, 1962; PEREIRA et al., 2002).

Figura 6 - Esquema de um lisímetro de drenagem



Fonte: Varejão-Silva (2006)

Figura 7 - Esquema de um lisímetro de lençol freático regulável



Fonte: Varejão-Silva (2006)

As plantas situadas dentro do lisímetro devem ser idênticas àquelas que estão em seu redor, no que diz respeito ao estágio de desenvolvimento, porte e idade, para que não haja assim nenhuma descontinuidade entre a cultura implantada no lisímetro e a comunidade vegetal em torno do mesmo (VAREJÃO-SILVA, 2006).

De acordo com Varejão-Silva (2006), a profundidade do lisímetro deve possibilitar o desenvolvimento normal do sistema radicular das plantas nele situadas. Além disso, as suas paredes devem ser resistentes e finas, para que não prejudique os fluxos de ar e calor do solo. É exigido que as características do solo sejam idênticas às do terreno que os cerca, sendo assim, no momento da escavação do solo, deve-se evitar a inversão ou mistura dos horizontes, o que modificaria a estrutura do solo e, conseqüentemente, as medidas das variáveis (TUCCI, 2007)

As variáveis controladas junto ao lisímetro, tais como precipitação, escoamento, infiltração, armazenamento e percolação profunda, permitem estabelecer a evapotranspiração real e de referência. Para determinar a evapotranspiração real, deve-se manter as condições naturais de umidade do solo. Já para determinar a evapotranspiração de referência, deve-se

promover a irrigação da cultura que foi implantada no lisímetro, mantendo-se o solo em capacidade de campo (TUCCI, 2007).

Todas essas exigências têm o intuito de assegurar a representatividade dos lisímetros, no entanto, acabam transformando-os em estruturas relativamente grande, de difícil instalação que alteram, com a sua presença, as condições naturais do ambiente em que são instalados (VAREJÃO-SILVA, 2006). O custo de instalação desses equipamentos é relativamente alto e sua operação exige a mão-de-obra especializada, fatores que impedem uma utilização generalizada em atividades agrícolas de rotina. No entanto, Tucci (2007) relata que este procedimento é muito utilizado para calibrar metodologias de estimativa da evapotranspiração.

3.2.2 Medida indireta de evapotranspiração

Além dos métodos diretos de medição, existem também os métodos indiretos, de estimativa da ETo, que são mais utilizados e tem uma fácil aferição. No entanto, Pereira et. al. (1997) chamam a atenção que a escolha de um método de estimativa da ETo depende de uma série de fatores. Dentre eles, pode-se citar a disponibilidade de dados meteorológicos, escala de tempo desejada e as condições climáticas para as quais foram desenvolvidos tais métodos.

Existem diversos métodos de estimativa da ETo e alguns só podem ser utilizados para estimativas mensais, outros para intervalos decendiais ou maiores (LIMA, 1991). A escolha do método a ser utilizado dever ser feita em função da disponibilidade de dados climáticos, visto que as mesmas têm influência direta na determinação da ETo (LORENZI, 2010).

Dentro os diversos métodos de estimativa da ETo, a FAO adotou o método de Penman-Monteith como sendo o padrão. No entanto, o nível de exigência de entrada dos dados acaba dificultando a sua aplicação, o que leva ao uso de equações menos precisas, mas que também permitem uma boa estimativa da ETo, de acordo com as variáveis climáticas disponíveis na região de estudo (PAIVA e PINHEIRO, 2016). Diversos trabalhos foram elaborados comparando a equação de Penman-Monteith às outras com o objetivo de identificar um método que obtenha um melhor desempenho na estimação da ETo. Alguns dos métodos mais utilizados nos trabalhos anteriores são apresentados no Quadro 1 e serão descritos nos próximos itens.

Quadro 1- Métodos de estimativa de evapotranspiração

Método	Referência original e/ou citada	Elementos meteorológicos de entrada ¹
Thornthwaite (TW)	Thornthwaite (1948)	T _{mn} , T _m , T
Penman-Monteith-FAO (PM-FAO)	Allen et al. (1998)	T _x , T _n , T, UR, v, n, P, R _s , R _n
Camargo	Pereira et al. (1997)	T _m
Hargreaves (HG)	Allen et al. (1998), Sousa et al. (2010)	T _x , T _n , T, R _s
Blaney-Criddle (BC)	Doorenbos & Pruitt (1977), Pereira et al. (1997), López-Urrea et al. (2006).	T _m , UR _{mín} , n, v
Jensen-Haise (JH)	Pereira et al. (1997), Trajkovic & Kolakovic (2009)	R _s , T
Makkink (MK)	Pereira et al. (1997), Yoder et al. (2005)	R _s , P, T

¹ T_x, T_n e T: temperaturas diárias máxima, mínima e média, respectivamente; UR: umidade relativa média diária; v: velocidade do vento; n: insolação ou horas de brilho solar; P: pressão atmosférica média diária; R_s: radiação solar; R_n: saldo de radiação no sistema solo-planta-atmosfera; T_{mn}: temperatura normal (média de 30 anos) do mês ou a média mensal de vários anos com representatividade climática; T_m: temperatura média mensal, observada no mês em estudo; ECA: evaporação do tanque Classe A; UR_{min}: umidade relativa mínima; G: fluxo de calor no solo

Fonte: adaptado Carvalho et al. (2011)

3.2.2.1 Método de Thornthwaite

No ano de 1948, C. W. Thornthwaite desenvolveu uma equação para estimar a ETP (SELLERS, 1965), baseada em dados de precipitação e escoamento, de diversas bacias hidrográficas localizadas nas regiões central e leste dos Estados Unidos, onde predomina o clima temperado com invernos úmidos e verões secos (CHANG, 1968). Este método correlaciona estas informações com a variável temperatura e possibilita a estimativa da ETP (TUCCI, 2009).

Camargo e Camargo (2000) admitem que o modelo de Thornthwaite apresenta imensa praticidade, por necessitar como elemento meteorológico apenas a temperatura média do ar, e relatam que diversos autores consideram tal método como ideal para estudos climatológicos e

em projetos de irrigação. Em geral, o modelo de Thornthwaite funciona bem em climas úmidos (CAMARGO e CAMARGO, 2000).

Araujo et al (2007) correlacionaram os dados de ETo estimados por várias equações, na região de Boa Vista, em Roraima. O método de Thornthwaite é o que apresenta o pior desempenho e acaba superestimando a ETo em comparação ao método de Penman-Monteith. Os autores atribuem isto ao fato da elevada temperatura na região, que é base do cálculo deste método.

Borges e Menciondo (2005) apresentam dados da região da Bacia do rio Jacupiranga, em São Paulo. O método de Thornthwaite apresentou um bom desempenho, no entanto, possui tendência a altos erros nos meses mais secos, agosto e setembro e baixos erros nos meses mais chuvosos, de fevereiro e março.

Pereira e Camargo (1989) fizeram uma análise da literatura que critica o desempenho da equação de Thornthwaite na estimativa da ETo. Os autores concluíram, que mesmo se baseando apenas em dados de temperatura média, o método apresenta bons resultados em regiões de clima úmido. Para regiões de climas áridos, a crítica é pertinente, visto que o método não considera a energia recebida por advecção regional do ar seco, rico de energia latente recebida das áreas secas distantes.

Sanches et al. (2015) compararam diversos métodos de estimativa da ETo com o método padrão Penman-Monteith FAO para a região norte do Brasil. Eles encontraram o pior desempenho para o método de Thornthwaite, classificando o método como “péssimo” para aquela região.

Tendo em vista que o modelo de Thornthwaite tende a subestimar a ETo em condições de aridez ou a superestimar em caso de superumidade, pode-se empregar uma temperatura média, corrigida em função da amplitude térmica diária, que é denominada de temperatura efetiva (CAMARGO e CAMARGO, 2000) que traz bons resultados em condições de aridez.

3.2.2.2 Método de Penman-Monteith

O método de Penman-Monteith é considerado pela FAO como o modelo padrão para a estimativa da ETo, por apresentar o melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima, também vem sendo recomendado pela FAO para a calibração de modelos empíricos (ALLEN et al., 1998). Camargo & Camargo enfatizam que o método Penman-Monteith-FAO, prevê com eficiência a ETo em várias condições de umidade atmosférica, no entanto, necessita de diversos elementos meteorológicos que nem sempre estão disponíveis em algumas regiões.

Steiner et al. (1991) relatam que as equações de estimativa da evapotranspiração potencial não têm sido testadas de forma adequadas em regiões de secas ou de aridez. Para que pudessem testar os modelos nessas condições eles instalaram dois lisímetros de pesagem no Texas (EUA). Dentre os quatro modelos utilizados, a equação de Penman-Monteith foi a que apresentou a melhor estimativa.

López-Urrea et al. (2006) avaliaram sete métodos de cálculo diário de ETo, e compararam com dados de um lisímetro de pesagem, para um clima semiárido na Província de Albacate, Espanha. Assim como Steiner et al. (1991), López-Urrea et al. (2006) concluíram que o método de Penman-Monteith foi o método mais preciso.

Oliveira et al. (2008) avaliaram nove métodos de ETo em comparação a um lisímetro de pesagem hidráulica, na bacia experimental do riacho Gameleira, no Pernambuco. Os autores concluíram que juntamente com o método da Radiação Solar, o método de Penman-Monteith foi o que mais se ajustou aos valores obtidos através do lisímetro.

Silva et al. (2018) avaliaram o desempenho do método de Penman-Monteith com dados meteorológicos limitados e de outros métodos como alternativa para estimar a evapotranspiração de referência no município de Jaíba, em Minas Gerais. Os autores concluíram que na ausência somente da radiação solar, umidade relativa ou velocidade do vento o método de Penman-Monteith foi o que apresentou o melhor desempenho. No entanto quando há ausência de dados de radiação solar juntamente com outra variável meteorológica, o método de Penman-Monteith apresenta um desempenho médio. Já os métodos que utilizam somente dados de temperatura não são recomendados para a região de estudo.

Carvalho et al. (2010) expõem que sempre que houver disponibilidade de dados, o método Penman-Monteith é o recomendado, tendo em vista sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial. Caso não seja possível utilizar este modelo, deve-se analisar um método que esteja de acordo com os dados disponíveis e que seja adequado para as condições climáticas da região.

3.2.2.3 Método de Camargo

Camargo (1962) propôs um modelo simplificado, baseado no método de Thornthwaite (1948), utilizando apenas dados de temperatura média do ar e de radiação solar incidente no topo da atmosfera (CONCEIÇÃO, 2012). Ele substituiu na equação de Thornthwaite o complexo índice “I” por um índice “T”, de temperatura média anual. O novo índice funcionou muito bem regiões de clima tropical e equatorial úmidos, entretanto, em regiões de clima

temperado ou frio o autor verificou que o índice deve ser calculado a partir da temperatura média anual, apenas dos meses vegetativos, que possuam temperaturas médias positivas. (CAMARGO e CAMARGO, 2000).

Camargo e Camargo (1983) compararam estimativas de evapotranspiração potencial, em escala mensal e decenal, pelas equações de Camargo e Hargreaves-Samani para dezesseis localidades paulistas que apresentam diferentes condições climáticas. Notou-se alta precisão ($r^2= 0,96$) e grande exatidão para o método de Camargo.

Silva et al. (2005) utilizaram o método de Camargo e de Thornthwaite para o dimensionamento de um sistema de drenagem, na região de Piracicaba, em São Paulo, embora as estimativas por estes dois métodos subestimasse a ETo, em relação à PM-FAO, eles concluíram que não houve influência dos métodos selecionados no dimensionamento.

Já Barros et al. (2009) relacionaram as medidas que foram obtidas através de lisímetros de pesagem para a região de Seropédica, Rio de Janeiro, com seis métodos de estimativa de ETo, eles concluíram que o método de Camargo não estimou satisfatoriamente a ETo para pequenos períodos de tempo, por isso recomendaram o método para escalas temporais maiores que cinco dias.

Pilau et al. (2012) avaliaram o desempenho de seis métodos de estimativa de ETo para os municípios de Frederico Westphalen e Palmeiras das Missões, no Rio Grande do Sul. Os autores concluem que os métodos da radiação solar e de Makkink são os que apresentam melhor desempenho em todas as escalas de tempo, no entanto, salientam que quando houver apenas dados de temperatura disponíveis, o método de Camargo é que deve ser preferencialmente utilizado.

Brixner et al. (2014) avaliaram o desempenho de alguns métodos de estimativa de ETo para o período de outubro a março na região de Campanha, no Rio Grande do Sul. Os autores constataram que na escala mensal, o método que mais se destacou foi o de Camargo, seguido pelos métodos de Radiação Solar, Makkink e Blaney-Criddle, ambos apresentando desempenho “bom”.

3.2.2.4 Método de Hargreaves-Samani

Hargreaves (1974), na sua primeira equação para estimar a ETP, utilizou dados de latitude, temperatura média mensal e umidade relativa. Posteriormente, o mesmo autor, apresentou uma nova equação simplificada, na qual, foi retirada a umidade relativa e introduzida à radiação global (CAMARGO & CAMARGO, 2000). A equação de Hargreaves-Samani é similar a equação de Camargo, que se baseia na radiação solar extraterrestre acima da atmosfera, enquanto Hargreaves se baseia na radiação global, ao nível do solo.

Sentelhas et al. (2010) realizaram um estudo, para doze localidades no sul de Ontário, no Canadá, eles estudaram métodos que utilizam, principalmente, dados de temperatura, como o Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani e Thornthwaite, foi observado que os métodos de Hargreaves-Samani e Thornthwaite foram as melhores opções para estimar a ETo.

Tabari (2010) também avaliou a eficiência de métodos de estimativa de ETo, ele utilizou os métodos de Hargreaves, Makkink, Turc, Priestley-Taylor em quatro áreas com diferentes climas no Irão. O método de Hargreaves não apresentou bom desempenho na condição de clima frio e úmido, entretanto, juntamente com o método de Turc foram os métodos mais eficientes, em relação aos demais.

Por sua vez, Tagliaferre et al. (2010) analisaram o desempenho dos métodos de Penman-Monteith modificado, Radiação Solar, Blaney-Criddle, Hargreaves, Priestley-Taylor e Turc, em relação ao modelo padrão Penman-Monteith-FAO para o município de Eunápolis, ao sul da Bahia, onde o clima é subúmido. Os métodos de Radiação Solar, Blaney-Criddle foram os que apresentaram o melhor desempenho, enquanto o método de Hargreaves foi classificado como o pior modelo para estimar a ETo.

Borges & Mendiondo (2007) avaliaram a precisão de seis métodos em comparação do método de Penman-Monteith-FAO, para a bacia do Rio Jacupiranga, em São Paulo. Dentre os métodos analisados, o de Hargreaves foi o que apresentou melhor resultado e é indicado pelos autores devido à sua alta confiabilidade e por necessitar somente de dados de temperatura do ar, o que simplifica a aplicação.

Já Lima Junior et al. (2016) analisaram a necessidade de uma parametrização do método de Hargreaves para estimar a evapotranspiração de referência para o estado do Ceará. Os autores concluíram que a calibração dos coeficientes da equação se mostra como uma boa alternativa em regiões onde a disponibilidade dos dados é limitada, no entanto, este modelo superestima a equação de Penman-Monteith nos primeiros meses do ano, independentemente se é calibrado ou não.

3.2.2.5 Método de Blaney-Criddle

H.F. Blaney e W. D. Criddle, no ano de 1950 desenvolveram uma fórmula empírica para estimar a necessidade de água para que uma determinada cultura se desenvolva sem limitações hídricas, a fórmula utiliza dados de temperatura do ar e porcentagem média diária de horas de fotoperíodo anual (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Camargo (1962) relacionou os dados de ETP estimados por várias equações com dados medidos através de lisímetros instalados em três locais distintos do planalto do Estado de São Paulo. Através de análises de correlação com os dados medidos, a equação de Blaney-Criddle superestimou os dados de ETP na estação de inverno, como costuma acontecer.

Pereira et al. (2009) compararam diversos métodos de estimativa com o método padrão de Penman-Monteith-FAO para a bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha região de Serra da Mantiqueira, em Minas Gerais. O método de Blaney-Criddle assim como o de Jensen-Haise e Radiação Solar se mostraram os mais adequados para estimar a ETo, em escala diária, independentemente da época do ano.

Gotardo et al. (2016) compararam métodos de estimativa da evapotranspiração de referência utilizando uma bacia experimental na região do Cerrado brasileiro. Os resultados encontrados pelos autores apontam que os métodos que apresentaram os melhores desempenhos foram o de Penman-Monteith e o de Blaney-Criddle, sendo eles recomendados para a região em períodos de secas e de chuvas também.

Bragança et al. (2010), comparando métodos de estimativa da ETo para três municípios do Espírito Santo, Venda Nova, Sooretama e Cachoeiro de Itapemirim, durante o período úmido, demonstraram que o método de Blaney-Criddle tende a superestimar o método padrão de Penman-Monteith em aproximadamente (18%; 9,0%; e 3,5%) e respectivamente.

O método de Blaney-Criddle costuma estimar satisfatoriamente a ETP em climas quentes, e é utilizada para mensurar a irrigação. Entretanto, superestima consideravelmente a ETP, no inverno (CAMARGO e CAMARGO, 2000).

3.2.2.6 Método de Jensen-Haise

A equação de Jensen -Haise é um exemplo de método baseado na radiação solar, e tem dado resultados razoáveis em diferentes condições climáticas (TUCCI, 2007). O método inicialmente foi proposto para estimativa diárias de ETP, no entanto, Jensen (1973) recomenda

que seja limitado a intervalos de cinco dias, exceto quando a radiação for medida diretamente. Nestes casos, o intervalo de tempo pode ser diário.

Uma das grandes dificuldades encontradas neste método, está na disponibilidade de informações. Não são muitas as estações meteorológicas que medem diariamente a radiação solar, sendo assim, é necessário estimar os dados de radiação, o que acaba prejudicando a sua precisão (TUCCI, 2007).

Jung et al. (2016) estudaram diferentes métodos para estimar a ETP no período seco e na região do Alto Pantanal, no estado do Mato Grosso do Sul. Os autores compararam os dados estimados com o método padrão de Penman-Monteith. O método de Jensen-Haise apresenta um desempenho bom no período de secas, já no período de chuvas o desempenho cai, sendo mediano.

Oliveira et al. (2008) realizaram um estudo para avaliar a ETo na bacia experimental do riacho Gameleira, em Pernambuco, utilizando dados medidos por lisímetros e comparando com diferentes métodos indiretos. O método de Jensen-Haise, tanto na escala diária como na pentadial, apresentou o pior desempenho entre os métodos estudados, superestimando os valores de ETo em comparação aos dados do lisímetro. Os autores destacam que se trata de um método simples, por utilizar como variáveis apenas a temperatura média diária e a radiação solar, no entanto ressaltam que poucos estudos foram realizados com este método, principalmente no Brasil.

3.2.2.7 Método de Makkink

No ano de 1957, Makkink utiliza dados da evapotranspiração potencial de um gramado em lisímetro de lençol freático constante, para relacionar a ETP diária e a radiação solar ao nível da superfície (PEREIRA, NOVA & SEDIYAMA, 1997). Assim, o método de Makkink é baseado na radiação solar.

Yoder et al. (2005) elaboraram um estudo para a região úmida do platô de Cumberland, situada nos Estados Unidos, comparando vários métodos indiretos com os dados de um lisímetro de paisagem. O método de Penman-Monteith apresentou o melhor resultado, seguido pelos métodos de Penman e Turc. Enquanto o método de Makkink subestimou a ETo.

Xu e Chen (2005) realizaram uma análise de sete métodos de estimativa de ETo, comparando-os com dados de lisímetros de paisagem, na Alemanha. Os autores constataram que os métodos de Makkink, Thornthwaite e Priestley-Taylor apresentaram os melhores resultados,

com erros abaixo de 10%, enquanto o método de Hargreaves foi o que apresentou pior desempenho.

Er-Raki et al. (2010) em um estudo de evapotranspiração sob condições semiáridas, na bacia Tensift, no Marrocos e no Vale Yaqui, no México, identificaram que o desempenho dos métodos Makkink e Priestley-Taylor foram os piores, exceto sob condições de alta umidade. Os autores relatam que os parâmetros específicos dos dois métodos, quando são calibrados na região de estudo, melhoram extremamente o desempenho deles.

Tanaka et al. (2016) avaliaram o desempenho de doze modelos simplificados de estimativa de ETo para o estado do Mato Grosso. O modelo de Makkink superestimou a ETo de 2 a 3 mm por dia, o que resultou nos piores desempenhos entre os modelos, independentemente do município que foi avaliado, sendo assim este modelo não é recomendado para a região de estudo e necessita de uma calibração regional dos seus coeficientes.

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A comparação entre os métodos de estimativa da ETo é realizada através de uma análise do desempenho destes métodos em relação à equação universal padrão de Penman-Monteith-FAO (CRUZ, 2016). Os indicadores estatísticos utilizados para validação das equações são: precisão (r); índice de concordância ou exatidão (d) de Willmott proposto por WILLMOTT et al. (1985); e o coeficiente de confiança ou consistência (c) proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997). A precisão e dispersão dos valores em torno da média, é dada pelos coeficientes de correlação (r) ou de determinação (r^2).

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação, que indica o grau de dispersão dos resultados obtidos em relação à média (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). A concordância faz referência à exatidão ou à aproximação dos resultados estimados com os dados observados, ela pode ser avaliada graficamente pelo afastamento dos pontos cotados no gráfico de regressão em relação à reta de valores iguais. A fim de quantificar matematicamente essa aproximação, Willmot desenvolveu um coeficiente designado de concordância ou exatidão, que é representado pela letra d .

De acordo com Willmott (1981), o índice de concordância, d , é uma medida descritiva que reflete a precisão dos valores preditos (variável Y) em relação aos valores observados (variável X) que pode ser facilmente interpretado e aplicado em comparações de concordância para diferentes métodos.

O índice d pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que $d=1$ indica uma perfeita concordância e $d=0$ indica total discordância. Este índice é baseado nas somas de quadrados, sendo que no numerador tem-se a soma dos quadrados dos erros e no denominador a soma dos quadrados da soma dos valores absolutos de duas diferenças em relação à média observada.

O coeficiente c , proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997), corresponde ao produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de Willmott (d) e é interpretado de acordo com os referidos autores como: “ótimo” ($c > 0,85$), “muito bom” ($0,76 < c < 0,85$), “bom” ($0,66 < c < 0,75$), “mediano” ($0,61 < c < 0,65$), “sofrível” ($0,51 < c < 0,60$); “mau” ($0,41 < c < 0,50$) e “péssimo” ($c < 0,40$).

O coeficiente de determinação (r^2) é uma medida descritiva da qualidade do ajuste obtido do modelo de regressão que indica a proporção da variação de Y que é “explicada” pela regressão ou quanto da variação na variável resposta Y está sendo explicada pela variável regressora X . O coeficiente de determinação pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 podem indicar que o modelo proposto é adequado.

Este coeficiente não deve ser utilizado individualmente em um estudo de concordância, mas pode auxiliar na tomada de decisão quando diferentes modelos de regressão linear são ajustados, na comparação de diferentes métodos.

3.4 SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O sensoriamento remoto pode ser definido como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou em outras plataformas que tem como objetivo o estudo de eventos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnéticas e as substâncias que o compõem (NOVO, 2010). Segundo FITZ (2010) para que ocorra a aquisição de dados pelos sensores, são necessários 3 elementos básicos: a fonte/energia radiante, o objeto de visada (alvo na superfície), e o sistema de imageamento óptico e detector (sensor).

A energia utilizada em sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética, que se propaga em forma de ondas eletromagnéticas (FLORENZANO, 2011). Esta radiação é originada a partir da transformação de outras formas de energia, como a cinética química, térmica ou nuclear. O espectro eletromagnético (Figura 8) representa todo conjunto de comprimentos de onda conhecidos, que vão desde os raios gama até ondas de rádio (NOVO,

2010). As porções que estão situadas dentro do espectro, são conhecidas como bandas ou fixas espectrais (FITZ, 2010).

Figura 8- Principais regiões do espectro eletromagnético



Fonte: Coladaweb (2012).

A faixa de comprimentos de onda da região visível, é a principal porção do espectro eletromagnético para uso em sensoriamento remoto. Dentre estas faixas, a banda do infravermelho emitido é também largamente utilizada em trabalhos deste tipo, pelo fato de estar associada ao calor (FITZ, 2010). Segundo PONZONI & SHIMABUKURO (2009) na região do infravermelho próximo é onde ocorre uma absorção pequena da radiação e o espalhamento interno da radiação na folha e também ocorre uma baixa absorção pela água. Os autores ainda relatam que no infravermelho médio, a água absorve toda a radiação incidente para esta faixa de comprimentos de onda.

Segundo Comparoé et al. (2008), o potencial das imagens baseados no sensoriamento remoto em examinar padrões espaciais de distribuições regionais da ET foi investigado por vários pesquisadores. Estes esforços, resultaram no desenvolvimento de algoritmos que visam a estimativa da ET por sensoriamento remoto em escalas diversificadas. Dentre os diversos algoritmos, pode-se destacar o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*).

O SEBAL estima o balanço de energia usando condições térmicas extremas dentro de uma imagem ao escolher os chamados pixels “quente” e “frio”. O algoritmo permite o cálculo do fluxo de calor latente (LE) pela diferença na equação clássica do balanço de energia. O SEBAL compreende diversas etapas, sendo que o saldo de radiação à superfície é a primeira variável do balanço de energia a ser obtida pelo algoritmo. Em seguida, é obtido o fluxo de calor no solo (G) em função do saldo de radiação, albedo da superfície, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e da temperatura da superfície (NICÁCIO, 2008). Logo após o algoritmo permite a obtenção do fluxo de calor sensível (H), sendo está a etapa que requer maior atenção e cuidado, especialmente na escolha dos pixels âncoras.

Esse algoritmo pode ser utilizado para diversos agrossistemas, e a sua principal vantagem é a baixa demanda por informações de uso e cobertura do solo e de dados meteorológicos. A parametrização deste algoritmo é empregada em imagens digitais de qualquer sensor orbital que realize medidas de radiância no visível, infravermelho próximo e termal, tais como o Landsat 5, NOAA-AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*).

Outra ferramenta que pode ser utilizada para estimar a evapotranspiração é o aplicativo *Flux Evapotranspiration Flux* (EEFlux) do *Earth Engine*, ele utiliza arquivos de imagens do Landsat na plataforma Google Earth Engine para calcular a evapotranspiração diária na escala de campo local (30 m). Este aplicativo é calibrado automaticamente para cada imagem Landsat, o projeto da aplicação EEFlux é baseado na Mapping Evapotranspiration amplamente avaliada no modelo de alta resolução com calibração internalizada (METRIC) e produz mapas de estimativa ET para qualquer cena Landsat 5, 7 ou 8 em questão de segundos. (NICACIO, 2008). Segundo Nicacio (2008) o EEFlux também oferece geração rápida de mapas de produtos intermediários, como a temperatura de superfície, índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) e mapas de albedo para determinada cena Landsat, o que pode se tornar útil para outras aplicações, além do ET

Apesar do sistema contar com a calibração automatizada do aplicativo METRIC que acaba reduzindo alguns dos requisitos de especialização da produção de ET, os usuários ainda necessitam de uma variedade muito grande de insumos, incluindo imagem de satélite, mapa de cobertura do solo, mapa digital de elevação, clima local, dados e mapas de solos. Sendo assim, se faz necessário uma grande quantidade de pré-processamento dos dados para as diferentes entradas antes da aplicação dos algoritmos. A entrada e o tratamento dos dados acabam tornando-se uma das partes mais demoradas do processo.

3.4.1 Sensor Modis

As diversas polêmicas causadas pelas mudanças climáticas associadas ao desconhecimento dos mecanismos que a natureza tem para contrapor estas mudanças estimularam um projeto que é conhecido como *Earth Observing System* (EOS). Esse projeto é liderado e financiado pelo programa da NASA *Earth Science Enterprises* (ESE) (JUSTICE et al., 2002), e seu principal objetivo é a observação contínua das mudanças globais.

Por meio deste projeto EOS que surgiu o sensor MODIS, que é considerado o principal sensor deste projeto. O seu conceito é baseado em outros sensores, sendo o principal deles o

AVHRR, a bordo dos satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (NICÁCIO, 2008).

Este projeto EOS previa o lançamento de diversos satélites, entre eles o Satélite TERRA, lançado em dezembro de 1999 e também o satélite AQUA, lançado em 2002. O sensor MODIS está a bordo de ambos os satélites. Os dados do sensor MODIS possuem uma excelente qualidade radiométrica e geométrica, que são requisitos importantes para o monitoramento da cobertura terrestre, com o intuito de observar as mudanças de uso e cobertura do solo (JUSTICE et al., 2002). As suas especificações técnicas podem ser vistas no Quadro 2.

Quadro 2 - Especificações técnicas no sensor MODIS

Órbita	705 km, síncrona com o Sol, polar. 10:30 a.m descendente; 1:30 p.m ascendente.
Alcance espectral	0,4-14,4 μm
Cobertura espectral	$\pm 55^\circ$, 2330 km em fileira
Resolução espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) em nadir
Precisão radiométrica	5% Absoluto, < 3 μm ; 1% Absoluto, > 3 μm ; 2% de reflectância
Cobertura de repetição	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias para latitudes inferiores a 30°
Quantização	12 bits

Fonte: adaptado de Barker et al. (1992) e Justice et al. (2002)

Este sensor se caracteriza por ter uma ampla cobertura espacial e espectral e por apresentar uma continuidade nas tomadas de medidas, em regiões espectrais mais finas, que as que estão disponíveis em outros sensores até o momento, o que complementa as informações, e também é a primeira ferramenta dos satélites EOS na condução das pesquisas de mudanças globais (BARKER et al., 1992).

O MODIS possui um total de 44 produtos, que são disponibilizados pela NASA gratuitamente no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), com projeção sinusoidal e dividida em quadrantes de 10×10 graus, que equivalem a 1200×1200 km. Estes produtos são divididos em três grandes grupos: terrestres, oceânicos e atmosféricos (AGUIAR, 2007).

A disponibilização rápida das suas imagens permite que sejam realizadas análises constantes da vegetação em nível global, incluindo a detecção de mudanças de uso e cobertura do solo e avaliação de aspectos fenológicos da vegetação. O produto MODIS que está relacionado ao estudo da evapotranspiração é o MOD16 (SANTOS, 2015).

O produto MOD16A2/A3 é um algoritmo, que integra o projeto NASA-EOS e tem como objetivo principal estimar a evapotranspiração com base em dados de sensoriamento remoto dos sensores Terra/MODIS e Aqua/MODIS para o uso em aplicações hidrológicas e ecológicas de larga escala (MU et al., 2007).

O algoritmo MOD16 é baseado na Equação de Penman-Monteith-FAO, adaptado para o uso com dados de sensoriamento remoto (MU et al., 2007). A determinação da evapotranspiração apresenta duas complicações, que estão relacionadas a: estimativa da condutância estomatal, que controla o processo de transpiração das plantas e a estimativa da evaporação da água do solo, que pode variar de 0 a 80% do total do fluxo do calor latente, dependendo da região de estudo (RUHOFF et al., 2011).

Schuttemeyer et al. (2007) utilizaram dados de Radiação Solar e temperatura do ar, que foram obtidos através dos satélites Aqua e Meteosat de Primeira Geração, para determinar a evapotranspiração utilizando o método de Malkking em três localidades de Gana, na África. Os resultados apontam que a evapotranspiração estimada apresentou um erro médio diário entre 5 e 35 % e um erro sazonal menor que 5% em comparação com a evapotranspiração medida na superfície.

LIMA et al. (2014) utilizaram dados do sensor MODIS para estimar a evapotranspiração real diária nas sub-bacias do ribeirão m entre os estados de Goiás e Minas Gerais. Os autores relatam que os resultados obtidos apresentam consistência com dados observados na literatura. Sendo assim, a metodologia, pode ser utilizada em estudos complementares relacionamentos à gestão de bacias hidrográficas, principalmente em regiões que possuem limitações de dados meteorológicos.

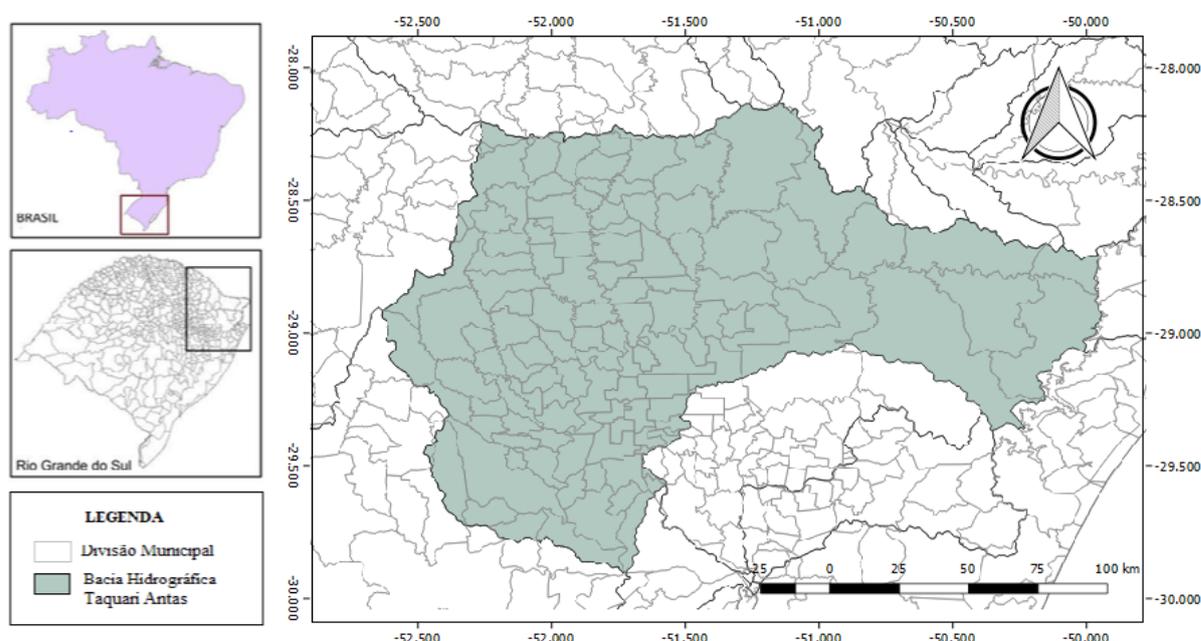
Brito et al. (2018) verificaram a aplicabilidade do produto de evapotranspiração originado pelo sensor MODIS para uma área de pastagem, no município de Ouro Preto do Oeste. Os autores concluíram que os dados do sensor MODIS acabam por superestimar a evapotranspiração.

Teixeira et al. (2015) determinaram a evapotranspiração através de imagens de satélites de diferentes resoluções, utilizando o sensor MODIS, o satélite Landsat e as imagens do RapidEyes, nos municípios de Petrolina e Juazeiro, respectivamente nos estados de Pernambuco (PE) e Bahia (BA) no Nordeste do Brasil. Com a utilização das imagens RapidEye, os resultados indicaram taxas de evapotranspiração de 67% daquele obtido com satélite Landsat e aproximadamente 46% do resultado obtido com imagens MODIS, evidenciando que quanto menor a resolução espacial do satélite, uma maior subestimativa da área irrigada acarretará numa estimativa de menores valores da ET.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica Taquari-Antas, com área de 26.491,82 km², está localizada a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas de 28°10' a 29°57' de latitude Sul e 49°56' a 52°38' de longitude Oeste (RIO GRANDE DO SUL, 2011). Esta bacia abrange as províncias geomorfológicas do Planalto Meridional e Depressão Central, e abrange municípios como: Antônio Prado, Veranópolis, Bento Gonçalves, Cambará do Sul, Carlos Barbosa, Caxias do Sul (Figura 9).

Figura 9- Localização da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas



Fonte: O autor (2019).

A classificação climática da Bacia foi caracterizada pelo sistema Wlasimir Koppen. O sistema combina a média anual e mensal da temperatura, precipitação e a sazonalidade da precipitação. A variedade “Cfa” se caracteriza por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A variedade “Cfb” também apresenta chuvas durante todos os meses do ano, tendo a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C e a do mês mais frio superior a 3°C (RIO GRANDE DO SUL, 2011).

Na bacia a variedade “Cfa” pode ser dividida em subtipos, dos quais dois subtipos abrangem o Oeste da Bacia Hidrográfica. O clima “Cfall1a” tem isoterma anual superior a 18°C e é característico em regiões com altitudes entre 400 e 600m, o que corresponde ao norte da

Bacia. O clima “Cfall1c” é caracterizado por regiões com altitudes inferiores a 400m e abrange a região central da Bacia (RIO GRANDE DO SUL, 2011).

As temperaturas observadas na região apresentam variabilidade temporal típica do clima temperado, com médias menores no inverno e maiores no verão. A temperatura média mensal oscila entre 10,8°C (estação de Vacaria mês de junho) a 22,7°C (estação de Guaporé, mês de janeiro), amplitude de 11,9°C de temperatura média mensal na Bacia. A média das temperaturas médias anuais na Bacia é de 16,6°C, com variação das médias anuais de 14,8°C a 17,9°C (RIO GRANDE DO SUL, 2011).

A precipitação pluviométrica total anual pode variar de 1.400mm a 1.700 mm (RIO GRANDE DO SUL, 2011). A umidade relativa do ar pode variar de 75% a 83,8% (MAGNA, 1997). Quanto ao regime de ventos, existe a predominância de ventos de direção leste ao longo do ano provocados por fenômenos de alta e baixa pressão (UNIVATES, 2011).

A cobertura vegetal da bacia hidrográfica Taquari-Antas é constituída por quatro tipologias distintas, sendo elas: Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária), Floresta Estacional Decidual (Floresta Tropical Caducifólia), Estepe (Campos do Sul do Brasil), Contato Estepe/ Floresta Estacional.

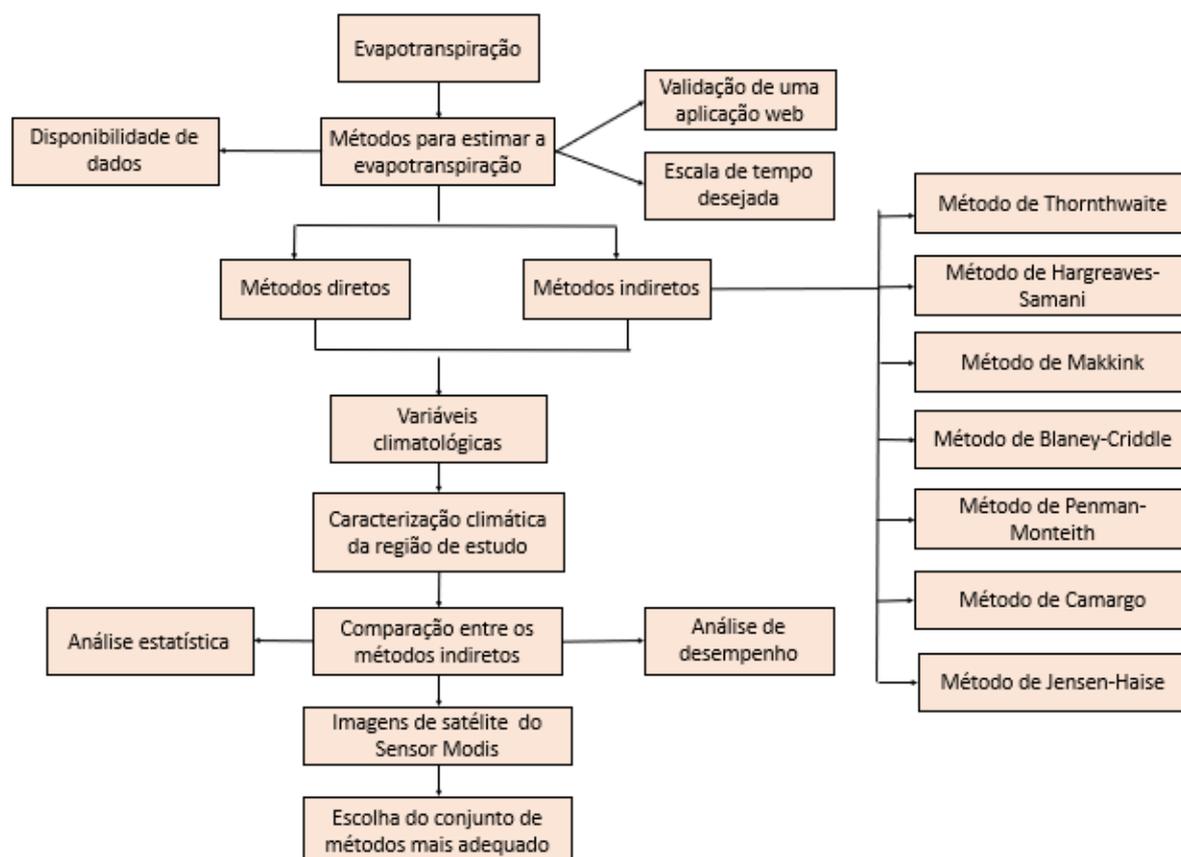
A região da Floresta Ombrófila Mista, é localizada predominantemente na região mais alta do Vale Taquari, a vegetação dominante contempla representantes das floras tropical e temperada (PÉRICO e ECKARDT, 2007). A vegetação Ombrófila Mista é caracterizada por possuir o pinheiro brasileiro (*Araucária angustifolia*) como espécie dominante (KLEIN, 1978).

A floresta estacional decidual ocorre em locais na qual há dois períodos climáticos bem definidos. Na Bacia Taquari-Antas esta topologia pode ser observada de forma muito segmentada entre as Unidades de Gestão (UG) Baixo Taquari- Antas e Médio Taquari-Antas, abrangendo áreas dos municípios Imigrantes, Boa Vista do Sul e Coronel Pilar. A fisionomia decidual desta floresta é marcada pelo dossel emergente, dominado por leguminosas, em que se destacam a *Apuleia leiocarpa* (grápia) e a *Parapiptadenia rígida* (angico).

5. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho, contendo todos os métodos que foram utilizados para a estimativa da evapotranspiração. A figura 10 apresenta o fluxograma metodológico deste trabalho.

Figura 10 - Fluxograma Metodológico



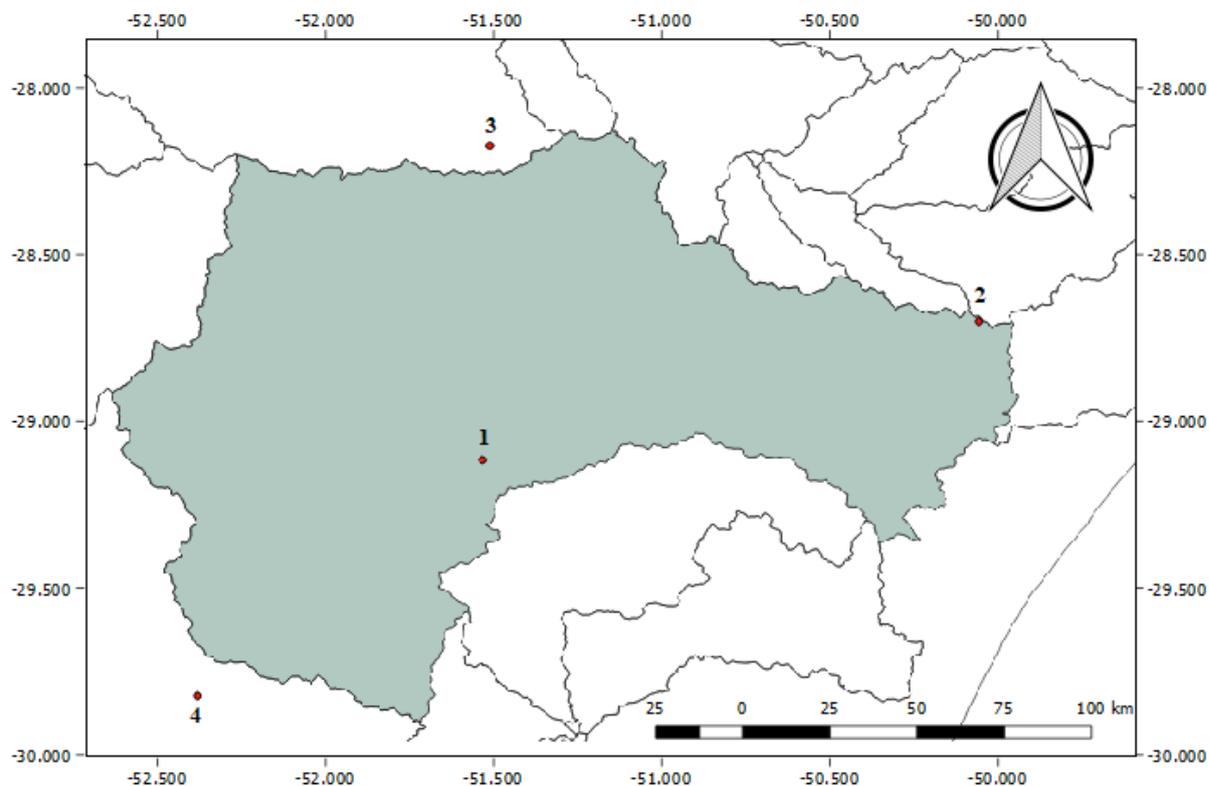
Fonte: O autor (2019).

5.1 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Os valores de evapotranspiração foram estimados, para o período de 01 de janeiro de 2008 até o dia 31 de dezembro de 2010, em quatro estações meteorológicas. Não foi utilizado um período de tempo maior pois não haviam dados de radiação solar disponíveis, e optou-se por trabalhar somente com dados medidos e não dados estimados.

Os dados foram retirados do sistema Agritempo (Embrapa, 2019), através de uma aplicação web (www.siambiental.ucs.br/intermediador) elaborada por Bortolin et al. (2018), no qual utiliza os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foi realizada a validação desta aplicação web, calculando os sete métodos que estão sendo utilizados neste trabalho a partir de dados meteorológicos disponíveis neste sistema. A Figura 11 apresenta a localização das estações meteorológicas utilizadas, bem como a numeração adotada para as mesmas.

Figura 11 - Localização das estações meteorológicas



Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 1 é apresentado a localização das estações meteorológicas que serão utilizadas neste trabalho.

Tabela 1 - Localização das estações meteorológicas

Numeração	Código INPE	Município	Latitude	Longitude	Altitude
1	86979	Bento Gonçalves	-29.164581°	-51.534202°	623 m
2	86967	São José dos Ausentes	-28.748615°	-50.057869°	1229 m
3	86965	Lagoa Vermelha	-28.222381°	-51.512845°	834 m
4	86978	Rio Pardo	-29.872113°	-52.381980°	107 m

Fonte: INPE (2018).

As equações utilizadas para a estimativa da ETo neste trabalho são: Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948), Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al, 1998), Camargo (PEREIRA et al, 1997), Hargreaves-Samani (ALLEN et al, 1998), Blaney-Criddle (DOORENBOS & PRUITT, 1977), Jensen-Haise (PEREIRA et al, 1997), Makkink (PEREIRA et al, 1997).

5.1.1 Método de Thornthwaite

O conjunto de equações desenvolvido por Thornthwaite foi baseado em balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração realizadas através de lisímetros. A equação utilizada para cálculo da evapotranspiração mensal por este método é representada por:

$$ET_o (TW) = 16 \left(10 \frac{T_i}{I}\right)^a \quad (1)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (2)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 T_i)^{1,514} \quad (3)$$

onde:

T_i - temperatura média mensal (°C);

a - expoente da função do índice anual I ;

i - índice mensal de calor para o mês j ;

I - índice anual, que corresponde ao somatório dos 12 índices i mensais.

5.1.2 Método de Penman-Monteith-FAO

Para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, considerado como padrão neste trabalho, foi utilizada a equação parametrizada, denominada Penman-Monteith Padrão FAO, conforme descrito por Bernardo et al. (2006):

$$ET_o (PM) = \frac{0,408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{med} + 273)} \cdot U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 U_2)} \quad (4)$$

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (5)$$

onde:

Δ - declividade da curva de pressão de vapor na saturação (kPa °C⁻¹);

R_n - radiação líquida (MJ m⁻² dia⁻¹);

G - radiação de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

γ - constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

T_{med} - temperatura média diária calculada;

U_2 - velocidade do vento a 2 metros de altura (m.s⁻¹);

e_s - pressão de vapor na saturação (kPa);

e_a - pressão de vapor atual (kPa).

Para utilizar a Equação 4, são necessários dados de radiação líquida, entretanto, como as estações utilizadas não tinham estes dados, foram necessários alguns cálculos para encontrar o valor desta radiação. Primeiramente foi calculada a declividade da curva de pressão de vapor na saturação através da Equação 6:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T+273,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (6)$$

onde:

T - temperatura média diária (°C).

Posteriormente, foi necessário calcular a pressão atmosférica local pela Equação 7:

$$Patm = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

onde:

z - altitude da estação de coleta dos dados meteorológicos (m).

Assim, foi possível calcular a constante psicrométrica através da Equação 8:

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} Patm \quad (8)$$

onde:

$Patm$ - pressão atmosférica local (kPa);

Já a pressão de saturação de vapor foi calculada através da Equação 9:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (9)$$

onde:

T - temperatura média diária (°C).

A pressão atual de vapor foi obtida através da Equação a seguir:

$$ea = \frac{es * UR}{100} \quad (10)$$

onde:

es – pressão de saturação de vapor (kPa);

UR – umidade relativa média do ar (%).

O próximo passo foi o cálculo da distância inversa relativa entre a Terra e o Sol, por meio da Equação abaixo:

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (11)$$

onde:

J – dia Juliano do ano (de 1 a 365 ou 366, para bissexto).

Logo após, foi calculado o ângulo de declinação solar através da Equação 12:

$$\delta = 0,409 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (12)$$

onde:

J – dia Juliano do ano (de 1 a 365 ou 366, para bissexto).

Também foi necessário transformar o valor da latitude do local, que estava em graus para radianos. Isso foi feito através da Equação a seguir:

$$W = \frac{lat * \pi}{180} \quad (13)$$

onde:

lat – latitude do local (graus).

O próximo passo foi calcular o ângulo horário ao nascer do sol, através da Equação abaixo:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{-\tan W * \tan \delta}{X^{0,5}}\right) \quad (14)$$

onde:

W - latitude do local (rad);

δ - ângulo de declinação solar (rad);

$X = (1 - [\tan(W)]^2 * [\tan(\delta)]^2)$. Quando $X \leq 0$, utiliza-se um valor igual a 0,00001.

Com isso, foi possível realizar o cálculo da radiação solar no topo da atmosfera por meio da Equação 15:

$$Ra = \frac{118,08}{\pi} dr (\omega_s * \operatorname{sen}(W) * \operatorname{sen}(\delta) + \cos(W) * \cos(\delta) * \operatorname{sen}(\omega_s)) \quad (15)$$

onde:

dr - distância inversa relativa entre a Terra e o Sol (rad);

W - latitude local (rad);

δ - declinação solar (rad);

ω_s - ângulo horário ao nascer do sol (rad).

Também foi necessário realizar o cálculo da radiação solar incidente na ausência de nuvens, através da seguinte equação:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (16)$$

onde:

z – altitude da estação de coleta dos dados meteorológicos (m);

R_a - radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$).

Posteriormente, foi realizado o cálculo do saldo de radiação de ondas curtas, através da equação descrita abaixo:

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{(T_{max} + 273,16)^4 + (T_{min} + 273,16)^4}{2} \right) * (0,34 - 0,14 \sqrt{ea}) * \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (17)$$

onde:

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$);

T_{max} - temperatura máxima diária ($^{\circ}\text{C}$);

T_{min} - temperatura mínima diária ($^{\circ}\text{C}$);

ea - pressão atual de vapor (kPa);

R_s – radiação solar incidente ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$);

R_{so} - radiação solar incidente na ausência de nuvens ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$).

No passo seguinte foi calculado a radiação de ondas curtas, utilizando a seguinte equação:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (18)$$

onde:

α - coeficiente de reflexão da vegetação (albedo = 0,23);

R_s – radiação solar incidente ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$).

E por último, foi realizado o cálculo da radiação líquida através da Equação 19. Já tendo todas as variáveis necessárias, foi calculado a evapotranspiração por meio da Equação 4.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (19)$$

onde:

R_{ns} - radiação de onda curta ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$);

R_{nl} - radiação de ondas longas ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$).

5.1.3 Método de Camargo

Para cálculo da evapotranspiração pelo método de Camargo foi utilizada a seguinte equação:

$$ET_o (C) = R_{a(\text{dia})} \cdot T \cdot K_F \quad (20)$$

onde:

$R_{a(\text{dia})}$ - radiação solar extraterrestre ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$)

T - temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

K_F - fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do ar no local de estudo.

5.1.4 Método de Hargreaves-Samani

A equação utilizada para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Hargreaves foi a seguinte:

$$ET_o (HG) = 0,0023 (T_{\text{med}} + 17,8) \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \cdot R_a \quad (21)$$

onde:

T_{med} - temperatura média do ar diária ($^{\circ}\text{C}$);

T_{max} - temperatura máxima do ar diária ($^{\circ}\text{C}$);

T_{min} - temperatura mínima do ar diária ($^{\circ}\text{C}$);

R_a - radiação solar extraterrestre, calculada através da Equação 15 ($\text{MJm}^2\text{dia}^{-1}$);

5.1.5 Método de Blaney-Criddle

Para cálculo da evapotranspiração pelo método de Blaney-Criddle foi utilizada a seguinte equação:

$$ET_o (BC) = a + b \cdot [P \cdot (0,46T_{\text{med}} + 8,13)] \quad (22)$$

$$a = 0,0043UR_{\text{min}} - \left(\frac{n}{N}\right) - 1,41 \quad (23)$$

$$b = a_0 + a_1 \cdot UR_{\text{min}} + a_2 \cdot \frac{n}{N} + a_3 \cdot U_d + c \quad (24)$$

$$c = a_4 \cdot UR_{\min} \cdot \frac{n}{N} + a_5 \cdot UR_{\min} \cdot U_d \quad (25)$$

onde:

P - percentagem média diária de horas de luz para diferentes latitudes;

T_{med} - temperatura média diária do ar calculada pelas temperaturas máxima e mínima do ar, conforme equação 5;

a+b - coeficientes regionais de ajuste da equação;

a_0 - 0,811917;

a_1 - (-0,0040922);

a_2 - 1,0705;

a_3 - 0,065649;

a_4 - (-0,0059684);

a_5 - (-0,0005967);

UR_{\min} - umidade relativa mínima do ar (%);

n - número de horas reais de insolação (h);

N - fotoperíodo (h);

U_d - velocidade do vento do período diurno a 2 m de altura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

5.1.6 Método de Jensen-Haise

As equações utilizadas para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Jensen-Haise foram as seguintes:

$$ET_o \text{ (JH)} = R_{S(d)} \cdot (0,0252T + 0,078) \quad (26)$$

$$R_s \text{ (mm)} = \frac{R_s}{\lambda} \quad (27)$$

onde:

$R_{S(d)}$ - radiação solar incidente ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$);

T - temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

R_s (mm) - radiação solar incidente (mm/dia);

λ - calor latente de vaporização ($\text{MJ}\cdot\text{mm}^{-1}$).

5.1.7 Método de Makkink

Para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Makkink, a equação utilizada foi a seguinte:

$$ETo(MK) = 0,61 \cdot W \cdot R_{S(d)} - 0,12 \quad (28)$$

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (29)$$

onde:

$R_{S(d)}$ - radiação solar incidente (mm/dia) calculada conforme equação 27;

W - fator de ponderação;

Δ - declividade da curva de pressão de vapor relação à temperatura, calculada conforme equação 6;

γ - constante psicométrica, calculada conforme equação 8;

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A comparação dos resultados foi executada a partir da análise do desempenho dos métodos de estimativa de ETo em relação à equação padrão ETo(PM). Foi realizada a análise de correlação e de regressão linear, através da geração de um gráfico mensal, no qual foi obtido coeficiente de determinação da regressão linear (r^2), da equação do tipo $y = ax + b$, onde y é o método padrão de estimativa (ETo(PM), mm.d⁻¹) e x é a ETo estimada por meio de outro método (mm.d⁻¹).

Também foram obtidos o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985) que foi calculado por meio da equação:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (30)$$

onde:

P_i : são os valores estimados pelos métodos propostos;

O_i : são os valores estimados pelo Método Penman-Monteith Padrão FAO (ETo(PM));

O : média dos valores estimados pelo Método Penman-Monteith Padrão FAO (ETo(PM));

O índice de concordância de Wilmott varia de 0 (total discordância) a 1 (concordância perfeita).

Com base no cálculo de d e r , é calculado o índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997), denominado de índice de desempenho: $c = r \times d$. A partir dos resultados para este índice, os autores propuseram uma tabela de avaliação qualitativa (Tabela 2). Os parâmetros de comparação foram calculados para cada mês do ano.

Tabela 2- Índice de concordância

Valor de “c”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 – 0,85	Muito bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61 – 0,65	Mediano
0,51 – 0,6	Sofrível
0,41 – 0,5	Mau
≤0,40	Péssimo

c- índice de concordância

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

5.3 OBTENÇÃO DE DADOS ORBITAIS

Os dados de evapotranspiração MODIS foram obtidos com base nos mapas gerados pelo projeto MODIS *Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product* (NASA MOD16A2/A3). O produto de Evapotranspiração / Fluxo de Calor Latente MOD16A2 Versão 6 é um conjunto composto por 8 dias produzido a uma resolução de 500 metros (m) de pixel. O algoritmo utilizado para a coleta de produtos de dados MOD16 é baseado na lógica da equação de Penman-Monteith, que inclui entradas de dados de reanálise meteorológica diária, juntamente com dados de sensoriamento remoto de moderada resolução de imagem (MODIS), tais como dinâmica da propriedade da vegetação, albedo, e cobertura do solo.

O período de dados utilizado corresponde ao mesmo empregado para os outros métodos (janeiro de 2008 a dezembro de 2010). Dessa forma será, possível realizar a comparação com os demais dados de evapotranspiração calculados neste trabalho.

Os dados mensais obtidos a partir do produto MODIS foram trabalhados no software IDRISI para realizar a média mensal da ET para os três anos de série histórica, considerando como limite do estudo a área da bacia Taquari-Antas.

6. RESULTADOS

6.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA ETO MENSAL

6.1.1 Município de Bento Gonçalves

A Tabela 3 apresenta as médias mensais de estimativa da evapotranspiração de referência para o município Bento Gonçalves, obtidas pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Thornthwaite para os anos de 2008, 2009 e 2010. Os valores de ETo mensais para os três anos de estudo, está apresentado no Apêndice A.

Tabela 3 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Bento Gonçalves

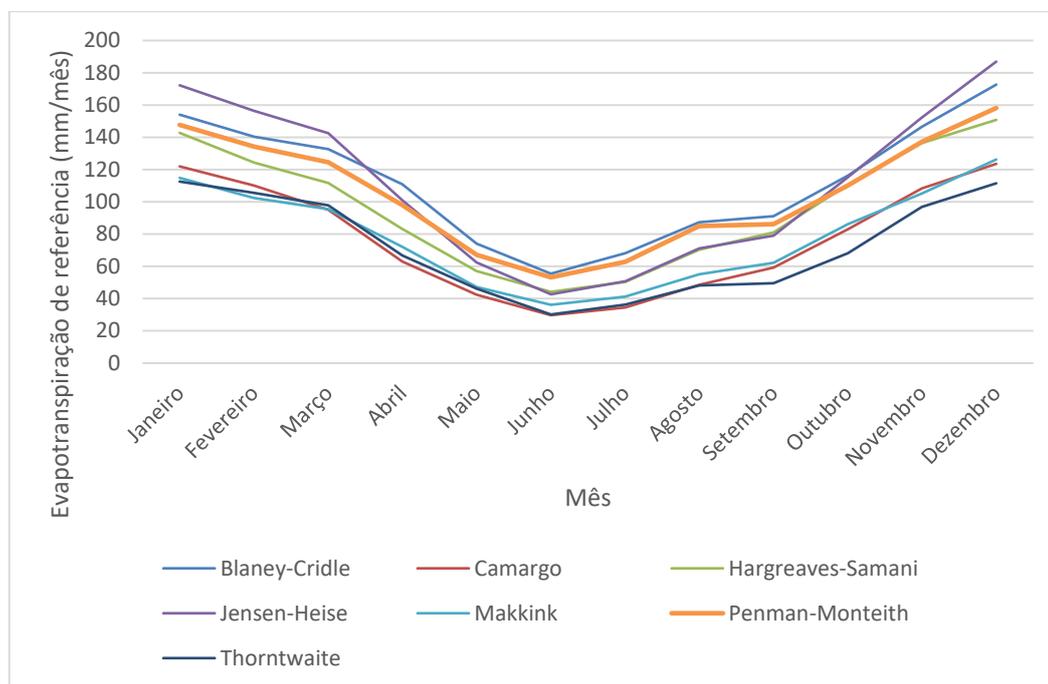
Mês	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
mm.mês ⁻¹							
JAN	147,73	154,13	121,94	142,73	172,16	114,84	112,58
FEV	134,21	140,40	110,06	124,26	156,46	102,29	105,65
MAR	124,53	132,58	95,11	111,71	143,64	95,54	97,81
ABR	98,01	110,85	63,01	83,25	100,95	72,10	66,68
MAI	67,24	74,00	42,46	57,09	62,35	47,26	46,12
JUN	53,20	55,47	29,70	44,20	42,67	36,18	30,17
JUL	62,72	68,09	34,52	50,40	50,80	41,26	36,21
AGO	84,16	87,45	48,63	70,31	71,07	55,08	48,21
SET	86,16	91,05	59,19	81,07	79,02	62,25	49,47
OUT	110,15	116,27	82,92	110,73	115,19	86,15	68,11
NOV	137,30	146,50	108,36	136,80	152,35	105,16	96,76
DEZ	158,15	172,67	123,54	150,80	186,91	126,25	111,46

Fonte: O autor (2019).

*Penman-Monteirh (EToPm); Blaney-Criddle (EToBC); Camargo (EToC); Hargreaves-Samani (EToHS); Jensen-Haise (EToJH);, Makkink (EToM) e, Thornthwaite (EToT)

Observa-se que, para Bento Gonçalves, o método de Blaney-Criddle superestimou os valores de ETo (EToPM) em todos os meses do ano. O mesmo resultado foi constatado para o método de Jensen-Haise. Já os demais métodos utilizados, tendem a subestimar os valores de ETo (EToPM).

Figura 12 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Bento Gonçalves



Fonte: O autor (2019)

Através da Figura 12 é possível constatar que a ETo é muito maior nos meses de verão, em comparação aos demais meses dos anos. Isto ocorre, pois, com o aumento da temperatura do ar aumenta a quantidade de vapor d'água necessária para saturar o ar. Assim, o aumento da temperatura consequentemente aumenta a demanda evaporativa do ar e ocasiona um maior consumo de água pelas plantas, sendo maior a retirada da água do solo.

A Tabela 4 apresenta os indicadores estatísticos testados na comparação entre os métodos Blaney-Cridle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Thorthwaite com o método Penman-Monteith Padrão FAO, para o período de estudo.

Tabela 4 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de Bento Gonçalves

	a	r²	r	d	c	Desempenho
Blaney-Cridle	0,92	0,99	0,99	0,98	0,98	Ótimo
Camargo	0,99	0,91	0,95	0,83	0,79	Muito bom
Hargreaves-Samani	0,94	0,96	0,98	0,97	0,95	Ótimo
Jensen-Haise	0,70	0,98	0,99	0,96	0,95	Ótimo
Makkink	1,15	0,98	0,99	0,84	0,84	Muito bom
Thornthwaite	1,08	0,87	0,93	0,77	0,72	Bom

Fonte: O autor (2019).

O “ r e r^2 ” expressam uma medida da precisão do modelo; o índice de concordância (d) expressa uma medida de exatidão e o índice de desempenho (c) representa o desempenho conjunto do modelo, por isso é considerado um indicador de confiança.

Dentre os sete métodos de avaliação mensal, os métodos que apresentaram melhor desempenho foram o de Blaney-Criddle ($d = 0,98$ e $c = 0,98$), sendo classificado como ótimo, seguido pelo método de Hargreaves-Samani ($d = 0,97$ e $c = 0,95$) e Jensen-Haise ($d = 0,96$ e $c = 0,95$), ambos considerados com “ótimo” desempenho também. Em sequência veem os métodos de Makkink ($d=0,84$ e $c=0,84$) e Camargo ($d=0,83$ e $c=0,79$) ambos classificados como “muito bom”. Já Thornthwaite apresentou um desempenho considerado como “bom”.

De acordo com Pereira et. al (2009), os métodos que empregam o uso da radiação solar apresentam um melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura no ar, o que foi comprovado neste trabalho também. No entanto, o método de Blaney-Criddle também apresentou um ótimo resultado, com valor de “ c ” superior a 0,95. O desempenho encontrado por estes métodos se assimila com os resultados observados para localidades como Santa Maria, RS (MEDEIROS, 1998), Baixo Rio Grande, SP (CONCEIÇÃO, 2003) e Palotina (SYPERRECK et al., 2008). Conceição e Mandelli (2005) registraram desempenho muito bom do método de Hargreaves-Samani (“ c ” = 0,84 e “ d ” = 0,94) para o município de Bento Gonçalves. De acordo com estes autores, o bom desempenho do método de Hargreaves-Samani para esta região pode estar atribuído a menor amplitude térmica.

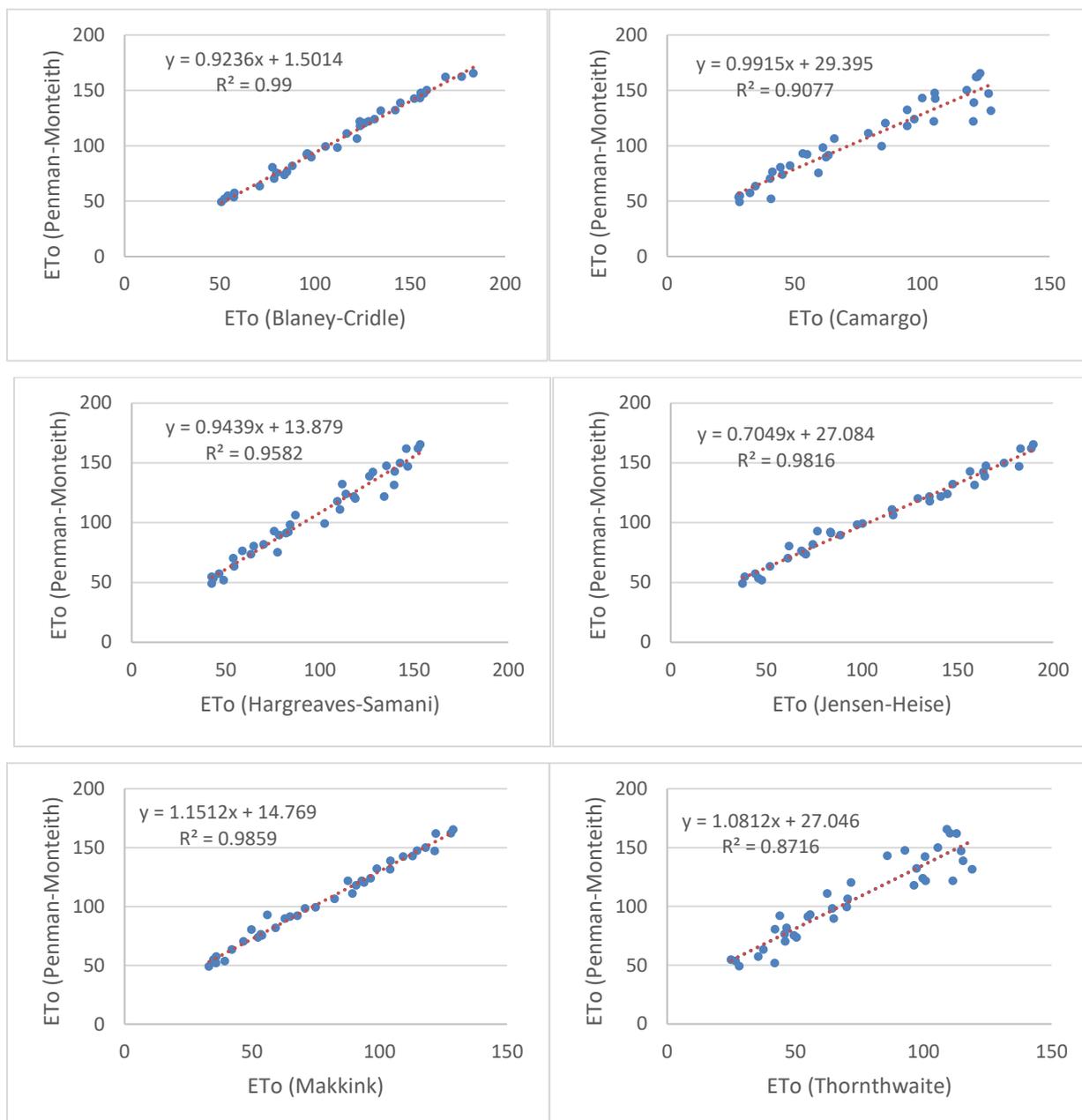
O método de Makkink, que utiliza como variável de entrada a temperatura do ar e a radiação solar global apresentou um desempenho considerado como muito bom, com precisão de 98%. Conceição & Mandelli (2005) registram “ótimo” desempenho do método (“ c ” = 0,91 e “ d ” = 0,95), para as condições do Bento Gonçalves, mesmo município de análise deste trabalho. Paiva (2016) também encontrou resultados satisfatórios para EToMK em Piraí do Sul-PR, sendo um dos métodos recomendados para cálculo da ETo no local.

O método original de Thornthwaite e o de Camargo apresentaram desempenhos similares, sendo o primeiro classificado como “bom” e o segundo como “muito bom”. De acordo com Conceição & Mandelli (2005) a similaridade de desempenho entre estes dois métodos é esperada, pois o segundo foi desenvolvido com base no primeiro. Porém o método de Camargo considera também a radiação solar, enquanto Thornthwaite considera somente a temperatura do ar, isto pode ter contribuído para um melhor resultado do método de Camargo.

O método que apresentou o menor índice de desempenho foi o Thornthwaite ($c=0,719981$), mas ainda é considerado como um bom desempenho. De acordo com Camargo et al. (1999) o método original de Thornthwaite não estima satisfatoriamente a evapotranspiração,

por não considerar o termo aerodinâmico ou contribuição da energia latente, e seu resultado pode ter sido reflexo da ausência deste termo em sua formulação.

Figura 13 – Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês⁻¹ em Bento Gonçalves



Fonte: O autor (2019).

Por meio da análise da Figura 13, observou-se que o coeficiente angular da reta de regressão, passando pela origem para o método de Hargreaves-Samani, aproximou-se de 1, fato também observado por Conceição & Marin (2005), segundo estes autores, isso demonstra que o método testado apresenta boa exatidão.

Analisando diversos trabalhos realizados sobre evapotranspiração, como Vescove e Turco (2005), Fernandes (2006), Gonçalves et al. (2009), Almeida et al. (2010) e Cavalcanti Junior et al. (2010), observou-se que os métodos baseados na radiação (Jensen-Haise, Makkink) apresentaram bons resultados em todos eles. Este padrão indica que os métodos baseados na radiação solar independem das condições climáticas da área estudada, diferentemente do que ocorre com os métodos baseados na temperatura do ar.

6.1.2 Município de São José dos Ausentes

A Tabela 5 apresenta as médias mensais de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de São José dos Ausentes, obtidas pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkin e Thornthwaite para os anos de 2008, 2009 e 2010. Os valores de ETo mensais para os três anos de estudo, está apresentado no Apêndice B.

Tabela 5- Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de São José dos Ausentes

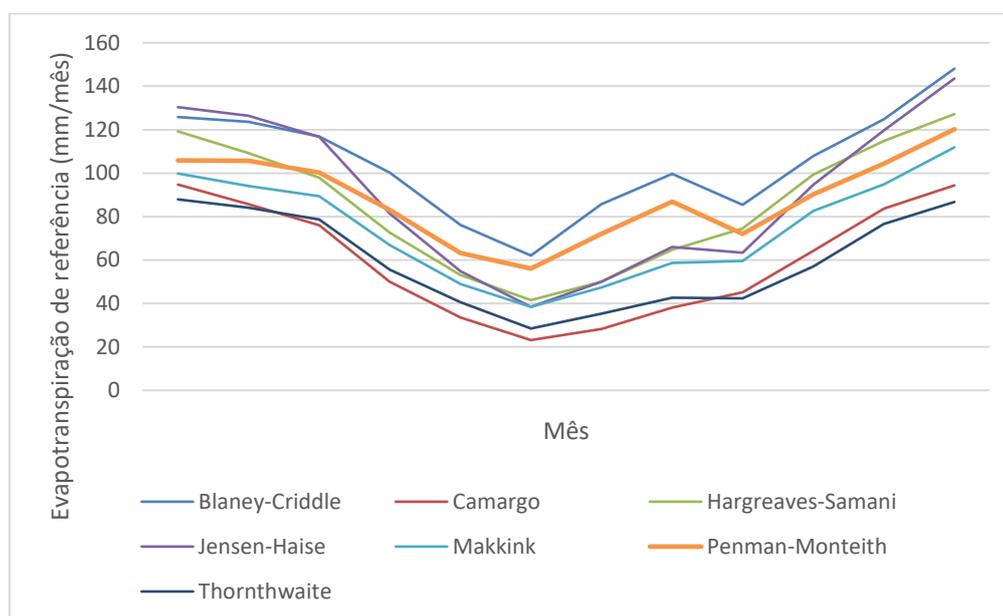
Mês	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
	mm.mês ⁻¹						
JAN	105,85	125,85	94,73	119,21	130,30	99,86	87,90
FEV	105,65	123,56	85,71	109,17	126,39	94,03	84,07
MAR	100,29	116,89	76,01	97,87	116,65	89,36	78,61
ABR	82,98	100,25	49,93	72,64	81,44	66,92	55,57
MAI	63,17	76,18	33,51	53,13	54,85	49,00	40,64
JUN	56,07	62,06	23,14	41,54	38,42	38,44	28,48
JUL	72,09	85,76	28,27	50,02	50,04	47,29	35,30
AGO	86,83	99,65	38,12	64,72	66,01	58,68	42,65
SET	72,08	85,46	45,12	74,52	63,43	59,59	42,39
OUT	90,23	107,87	64,26	99,33	94,68	82,60	57,07
NOV	104,41	124,74	83,71	114,72	119,57	94,87	76,58
DEZ	120,19	148,10	94,37	127,17	143,54	111,87	86,72

Fonte: O autor (2019).

*Penman-Monteirh (EToPm); Blaney-Criddle (EToBC); Camargo (EToC); Hargreaves-Samani (EToHS); Jensen-Haise (EToJH);, Makkink (EToM) e, Thorthwaite (EToT)

Observa-se que, para São José dos Ausentes, assim como para o município de Bento Gonçalves, o método de Blaney-Criddle superestimou os valores de ETo (EToPM) em todos os meses do ano. O mesmo resultado foi constatado para o método de Jensen-Haise, nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro. O método de Hargreaves-Samani, também tende a supertimar a ETo nos meses de janeiro, fevereiro, setembro, outubro, novembro e dezembro. Os demais métodos acabam subestimando os valores de ETo (EToPM).

Figura 14 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de São José dos Ausentes



Fonte: O autor (2019)

A Tabela 6 apresenta os indicadores estatísticos testados na comparação entre os métodos Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Thorthwaite com o método Penman-Monteith Padrão FAO, para o período de estudo.

Tabela 6 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de São José dos Ausentes

	a	r²	r	d	c	Desempenho
Blaney-Criddle	0,79	0,98	0,99	0,88	0,87	Ótimo
Camargo	0,70	0,77	0,88	0,68	0,60	Sofrível
Hargreaves-Samani	0,66	0,84	0,91	0,93	0,85	Muito bom
Jensen-Haise	0,55	0,89	0,94	0,90	0,85	Muito bom
Makkink	0,82	0,90	0,95	0,88	0,83	Muito bom
Thornthwaite	0,83	0,77	0,88	0,66	0,58	Sofrível

Fonte: O autor (2019).

Observa-se que assim como no município de Bento Gonçalves, em São José dos Ausentes o método de Blaney-Criddle ($d= 0,88$ e $c= 0,87$) foi o que apresentou melhor desempenho, sendo classificado como ótimo. Já os métodos de Thornthwaite e Camargo, foram os que apresentaram o menor desempenho ($d= 0,66$ e $c=0,58$; $d=0,68$ e $c=0,60$) respectivamente, ambos sendo classificados como “sofrível”. Já para Pereira et al. (2009) o método de Jensen-Haise foi o que apresentou melhor desempenho entre os métodos analisados, sendo classificado como ótimo.

O método de Hargreaves-Samani também apresentou um bom resultado ($d= 0,93$ e $c= 0,85$) sendo este classificado como “muito bom”. Para Junior et. al (2012), o método de Hargreaves-Samani também obteve um ótimo desempenho ($d= 0,968$ e $c=0,94$), além disso, os autores ressaltam que tal método utiliza somente dados de temperatura (máxima e mínima) e latitude local (que possui relação com a radiação extraterrestre, que varia em função dos dias), podendo ser utilizado facilmente por qualquer pessoa que não possua dados de radiação solar da região.

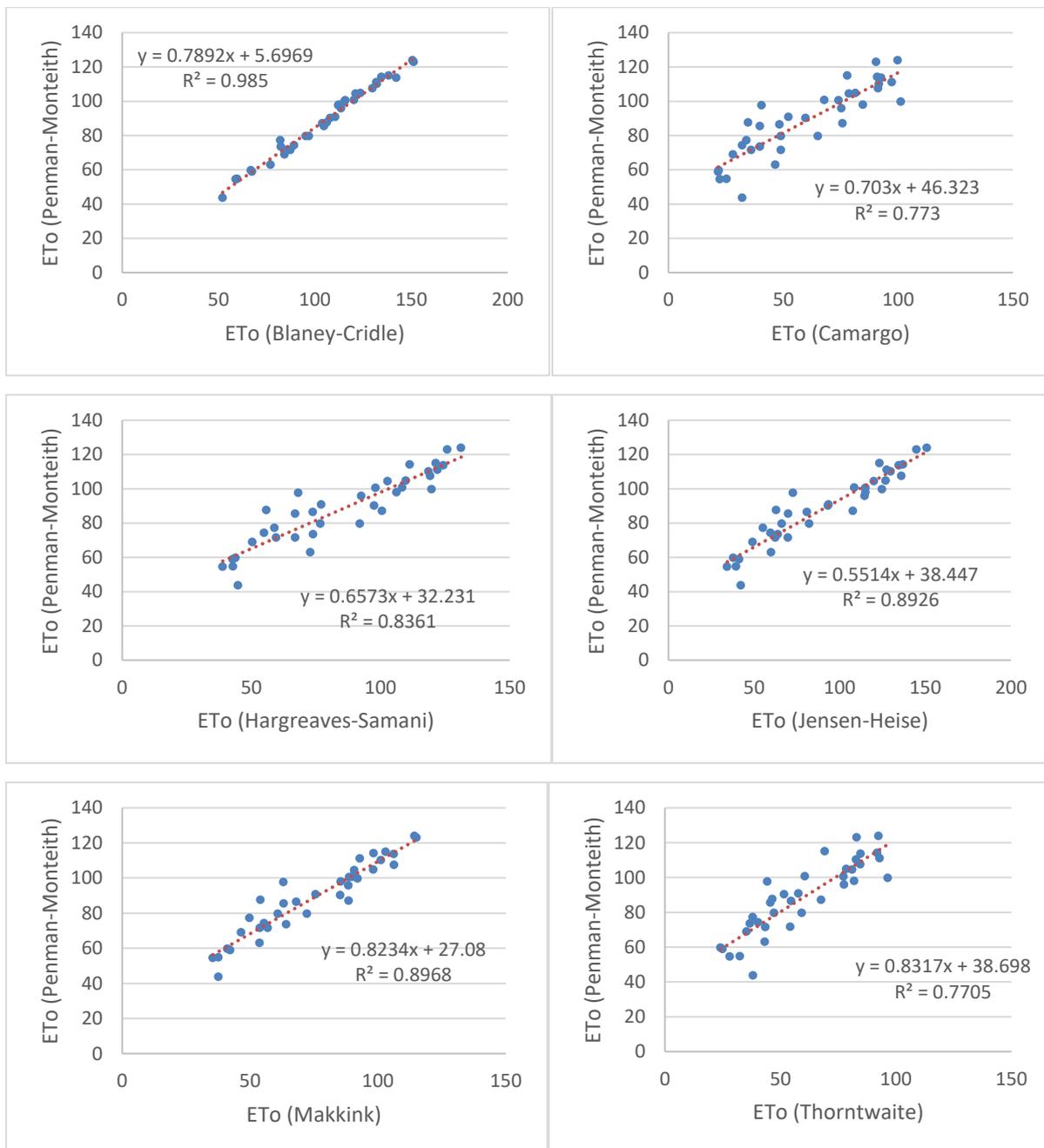
Diferente do resultado encontrado neste estudo, Medeiros (2002), em estudo realizado em Paraipaba-CE, obteve para o método de Hargreaves-Samani desempenho “mau, enquanto Back (2008) em estudo realizado em Urussanga-SC obteve desempenho “péssimo”. Ambos autores não encontraram bons ajustes no emprego deste método e atribuíram estes resultados ao fato dele ter sido desenvolvido para condições áridas, o que não é o caso das regiões estudadas pelos referidos autores.

O método de Thornthwaite, diferentemente dos outros métodos, é calculado mensalmente, e por isso, é um método que se torna pouco preciso para uso em tomadas de decisão a curto prazo (CRUZ, 2016).

Analisando a Figura 15 observa-se que o coeficiente angular dos modelos de regressão para estimativa de ET_o com Jensen-Haise e Hargreaves-Samani estão superestimando a ET_o em 44,9%, 34,3% e 29,7%, no qual suas precisões estão na ordem de 89%, 84%. O método empírico que mais se aproximou do Penman-Monteith, foi o de Blaney-Criddle onde observa-se na Figura 15, que sua precisão foi de 98% superestimando a ET_o em 21%.

De acordo com Palaretti et al. (2014), quando os valores encontrados para r^2 estão muito baixos, há a necessidade de ajustes locais para que a fórmula seja mais eficiente na estimativa de ET_o , neste caso o ideal seria realizar um ajuste para as Equações de Thornthwaite e Camargo.

Figura 15 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês⁻¹ em São José dos Ausentes



Fonte: O autor (2019).

6.1.3 Município de Lagoa Vermelha

A Tabela 7 apresenta as médias mensais de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Lagoa Vermelha, obtidas pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkin e Thorthwaite para os anos de 2008, 2009 e 2010. Os valores de ETo mensais para os três anos de estudo, está apresentado no Apêndice C.

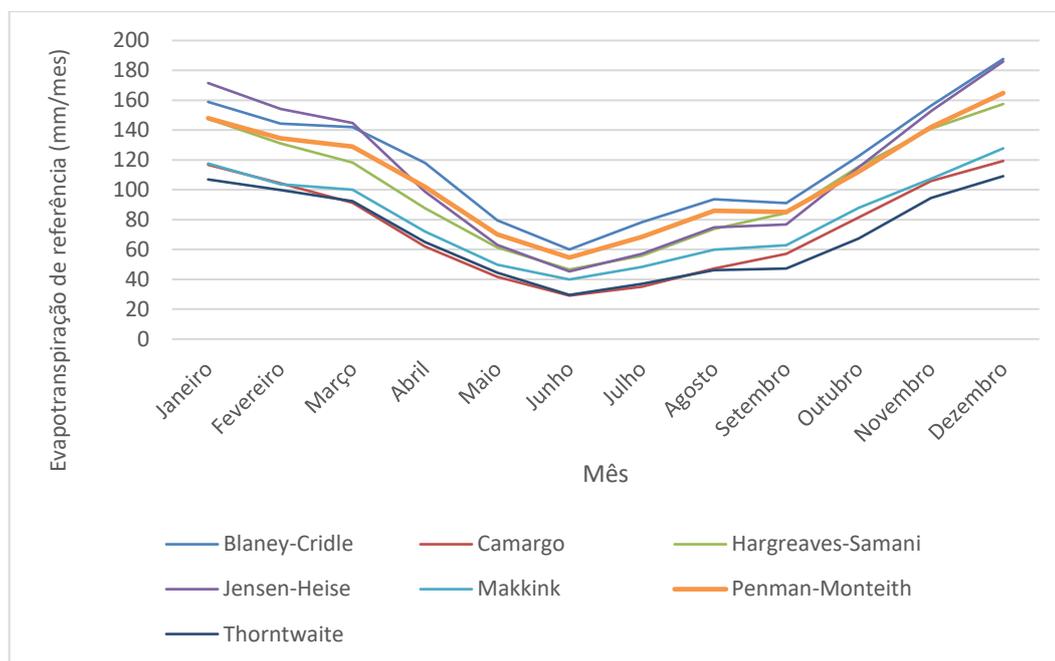
Tabela 7- Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Lagoa Vermelha

Mês	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
mm.mês ⁻¹							
JAN	148,01	158,91	116,77	147,53	171,39	117,63	106,92
FEV	134,56	144,35	104,26	131,14	154,09	103,67	99,83
MAR	128,88	141,92	91,26	118,35	144,70	100,01	92,29
ABR	102,03	118,08	61,97	87,69	98,86	72,17	65,01
MAI	70,24	79,59	41,68	61,42	63,18	49,84	44,55
JUN	54,59	60,03	29,14	46,59	45,32	39,93	29,58
JUL	68,41	78,27	35,13	55,87	57,09	48,22	37,09
AGO	85,97	93,56	47,30	73,73	74,86	59,94	46,14
SET	85,16	91,04	57,10	84,46	76,83	62,79	47,33
OUT	111,97	122,56	81,54	115,38	115,09	87,94	67,31
NOV	142,01	156,33	105,78	140,93	152,72	107,25	94,55
DEZ	164,82	187,63	119,33	157,45	185,95	127,75	109,14

Fonte: O autor (2019).

Analisando a Tabela 7 e a Figura 16, percebe-se que assim como nos demais municípios, o método de Blaney Criddle tende a superestimar os valores de EToPM. Já no método de Jensen Haise isso ocorre somente nos meses de outubro a março, meses no qual a temperatura e a radiação solar tendem a ser mais altas que nos demais.

Figura 16 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Lagoa Vermelha



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 8 apresenta os indicadores estatísticos testados na comparação entre os métodos Blaney-Cridle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Thornthwaite com o método Penman-Monteith Padrão FAO, para o período de estudo.

Tabela 8 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de Lagoa Vermelha

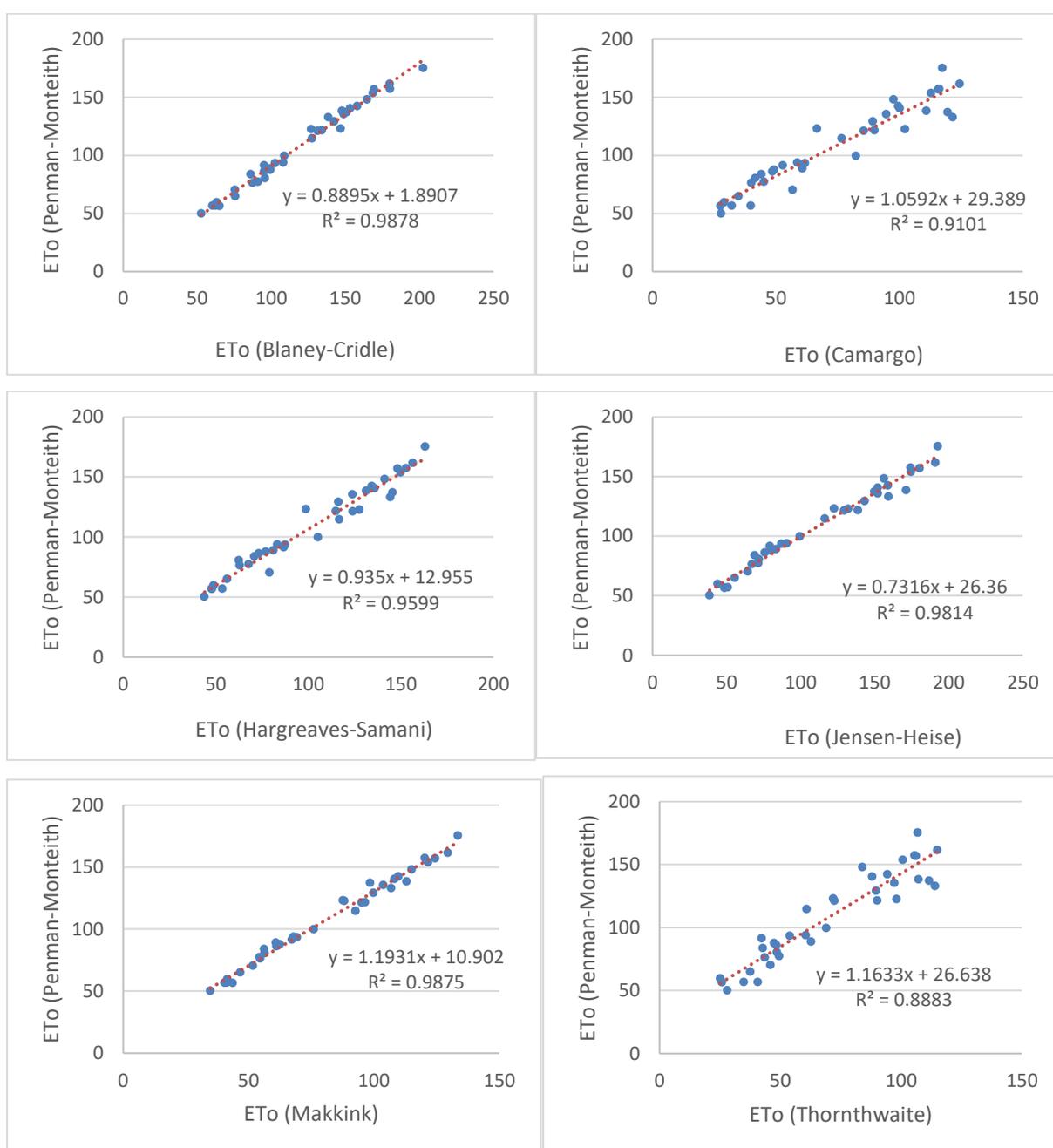
	a	r²	r	d	c	Desempenho
Blaney-Cridle	0,89	0,99	0,99	0,97	0,97	Ótimo
Camargo	1,06	0,91	0,95	0,79	0,75	Bom
Hargreaves-Samani	0,93	0,96	0,98	0,98	0,96	Ótimo
Jensen-Haise	0,73	0,98	0,99	0,97	0,96	Ótimo
Makkink	1,19	0,99	0,99	0,85	0,85	Muito bom
Thornthwaite	1,16	0,89	0,94	0,73	0,69	Bom

Fonte: O autor (2019).

Os métodos de Blaney-Cridle ($d=0,97$ e $c=0,97$), Jensen-Haise ($d=0,97$ e $c=0,96$) e Hargreaves-Samani ($d=0,98$ e $c=0,96$) foram os que apresentaram os melhores resultados com valores do índice de desempenho “c” classificado como ótimo, apresentando coeficiente de correlação “r” de 0,99, 0,99 e 0,98 respectivamente. Os resultados encontrados para Lagoa Vermelha estão semelhantes aos demais municípios analisados anteriormente.

O método de Thornthwaite ($d=0,73$ e $c=0,69$), juntamente com o de Camargo ($d=0,79$ e $c=0,75$) foram os que apresentaram os piores resultados com valores de índice de desempenho “c” classificado como bom. A semelhança entre os dois é esperada, já que o método de Camargo foi originado do método de Thornthwaite. Ambos utilizam dados de temperatura de entrada, no entanto Camargo considera um fator de ajuste que varia conforme a temperatura média anual do ar no local de estudo, o que é apontado por diversos autores como sendo o motivo do método de Camargo apresentar resultados um pouco melhores que Thornthwaite.

Figura 17 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês^{-1} em Lagoa Vermelha



Fonte: o autor (2019).

Observa-se que o coeficiente angular dos modelos de regressão para estimativa de ETo com Blaney-Criddle e Jensen-Haise estão superestimando a ETo em 11% e 26,8,7%, no qual suas precisões estão na ordem de 98% e 98%. Já os métodos de Camargo, Makkink e Thornthwaite estão subestimando a ETo em 5,9%, 19% e 16%, no qual suas precisões estão na ordem de 91%, 98% e 88%. O método empírico que mais se aproximou do Penman-Monteith, foi o de Hargreaves-Samani onde observa-se na Figura 16, que sua precisão foi de 96% superestimando a ETo em 6,5%.

6.1.4 Município de Rio Pardo

A Tabela 9 apresenta as médias mensais de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Rio Pardo, obtidas pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink e Thornthwaite para os anos de 2008, 2009 e 2010. Os valores de ETo mensais para os três anos de estudo, está apresentado no Apêndice D.

Tabela 9 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Rio Pardo

Mês	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
mm.mês ⁻¹							
JAN	163,99	177,51	142,48	156,04	198,48	124,59	132,12
FEV	142,83	155,75	126,67	136,28	173,03	106,68	122,63
MAR	131,37	143,54	107,95	121,50	153,77	97,09	112,62
ABR	96,34	113,18	68,04	91,39	101,18	68,47	72,68
MAI	68,95	77,94	46,89	61,81	64,49	45,84	51,39
JUN	50,58	54,70	31,46	45,66	43,13	34,28	30,13
JUL	57,54	65,74	35,56	50,77	48,10	37,33	35,09
AGO	73,86	80,79	49,46	70,48	68,32	51,10	45,27
SET	85,09	91,73	63,99	82,33	80,72	60,05	52,01
OUT	118,98	129,07	91,29	119,21	125,35	88,72	74,62
NOV	141,63	157,16	119,22	143,97	157,24	102,64	107,65
DEZ	171,99	193,15	140,32	163,95	203,84	129,84	128,96

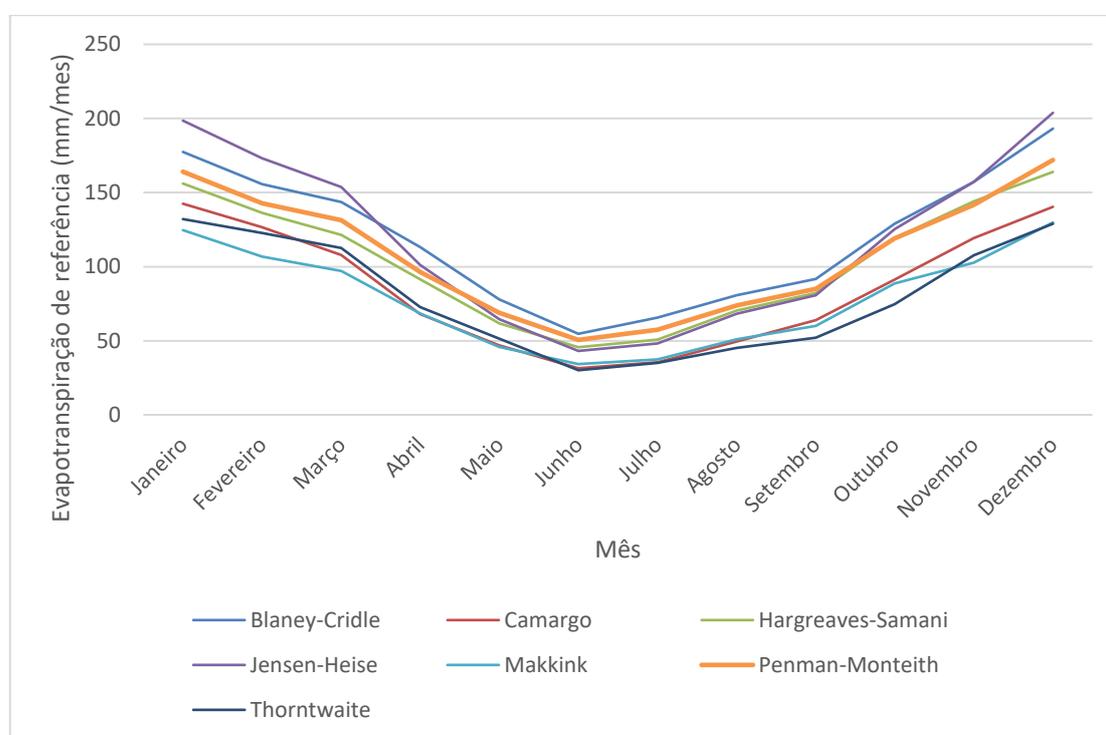
Fonte: o autor (2019).

O método de Jensen-Haise tende a superestimar os valores de ETo durante o período de outubro a março, apresentado valores entre 0,23 mm (outubro) e 34,5 mm (janeiro). Já para o período de abril a setembro o método acaba subestimando os valores de ETo em relação ao método de Penman-Monteith.

Observa-se que a equação de Thornthwaite apresentou resultados mais próximos a EToPM nos meses de janeiro a junho. No segundo semestre as estimativas de ETo aumentaram consideravelmente, apresentando valores subestimados entre 22,4 mm em julho e 43,03 mm no mês de dezembro.

Já a equação de Blaney-Criddle tende a superestimar a ETo em relação à equação padrão ao longo dos meses. Essa superestimativa esteve entre 4,13 mm (junho) e 21,17 mm (dezembro). A equação de Camargo por outro lado, subestimou a ETo em todos os meses do ano, quando comparada aos resultados obtidos por Penman-Monteith. Essas diferenças oscilam entre 16,16 mm (fevereiro) e 31,66 mm (dezembro).

Figura 18 - Médias mensais de estimativa de evapotranspiração no município de Rio Pardo



Fonte: o autor (2019)

A Tabela 10 apresenta os indicadores estatísticos testados na comparação entre os métodos Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Thorthwaite com o método Penman-Monteith Padrão FAO, para o período de estudo.

Tabela 10 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para o município de Rio Pardo (continua)

	a	r²	r	d	c	Desempenho
Blaney-Criddle	0,90	0,99	0,99	0,98	0,97	Ótimo
Camargo	1,00	0,91	0,95	0,90	0,86	Ótimo
Hargreaves-Samani	1,01	0,87	0,99	0,99	0,97	Ótimo

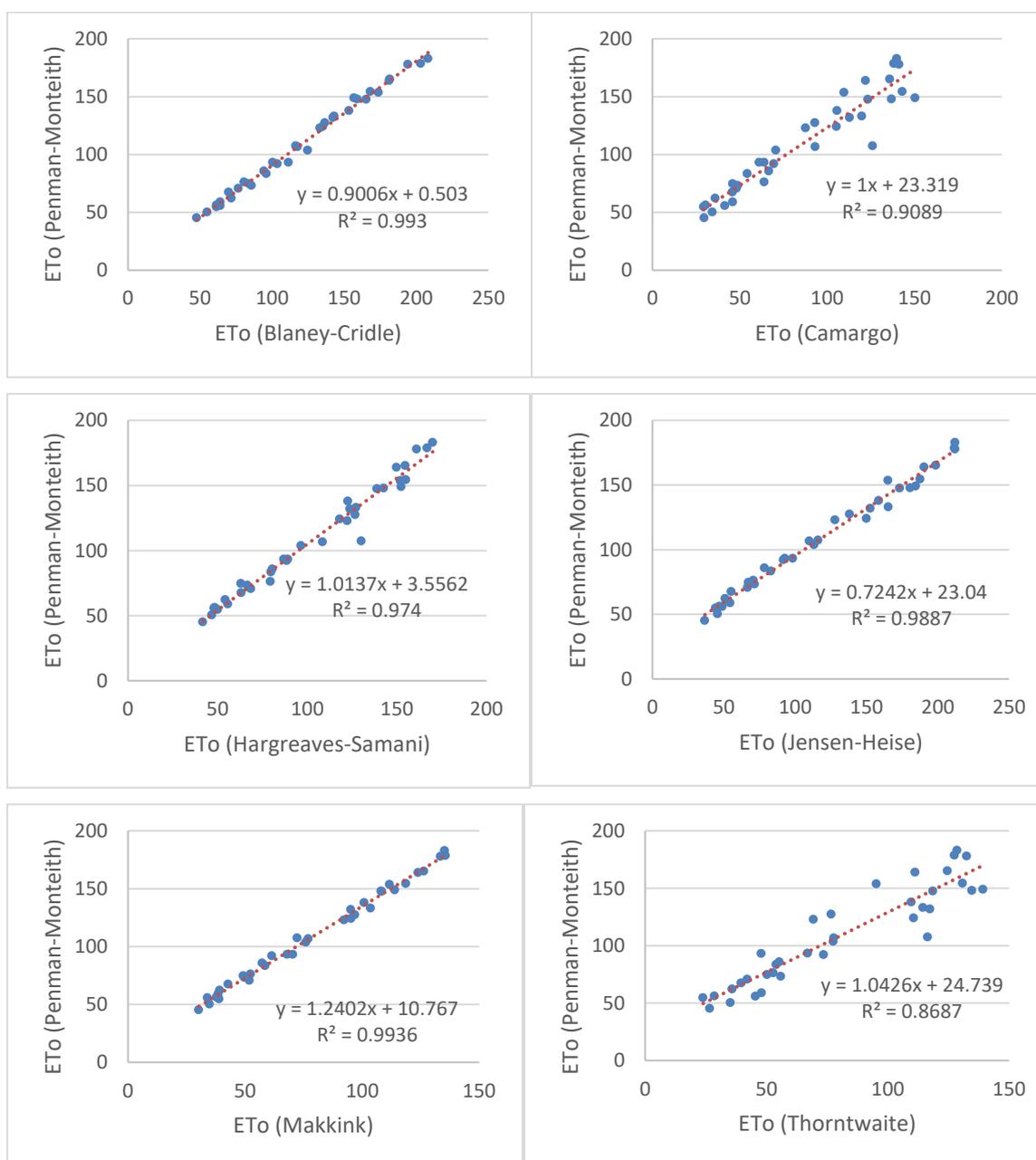
	a	r²	r	d	c	Desempenho
Jensen-Haise	0,72	0,99	0,99	0,96	0,96	Ótimo
Makkink	1,24	0,99	0,99	0,87	0,85	Ótimo
Thornthwaite	1,04	0,87	0,93	0,85	0,79	Muito bom

Fonte: o autor (2019)

(conclusão)

Para o município de Rio Pardo, todos os métodos analisados apresentaram um bom resultado, com índice de desempenho “c” classificado como ótimo, com exceção do método de Thornthwaite, no qual o índice de desempenho “c” ficou classificado como muito bom.

Figura 19 - Correlações entre os valores de ETo observados (EToPm) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo, em mm. mês⁻¹ em Rio Pardo



Fonte: O autor (2019).

Observa-se que o coeficiente angular dos modelos de regressão para estimativa de ETo com Blaney-Criddle e Jensen-Haise estão superestimando a ETo em 9,9% e 27,6%, no qual suas precisões estão na ordem de 99% e 98%. Desta maneira, segundo Brixner et al. (2014) os métodos apresentam tendência de quando aplicados a um balanço hídrico, podem acabar superestimando a demanda hídrica das plantas. Sendo esperado o contrário para os métodos de Camargo, Makkink e Thornthwaite que estão subestimando a ETo em 5,9%, 19% e 16%, no qual suas precisões estão na ordem de 91%, 98% e 88%. O método empírico que mais se aproximou do Penman-Monteith, foi o de Hargreaves-Samani onde observa-se na Figura 19, que sua precisão foi de 96% superestimando a ETo em 6,5%.

6.1.5 Análise Final

A Tabela 11 apresenta uma análise do desempenho dos seis métodos de estimativa de ETo utilizados neste trabalho, para ambos os municípios de estudo.

Tabela 11- Análise de desempenho dos métodos de estimativa de ETo para os municípios

Método	Bento Gonçalves	São José dos Ausentes	Lagoa Vermelha	Rio Pardo
Blaney-Criddle	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Camargo	Muito bom	Sofrível	Bom	Ótimo
Hargreaves-Samani	Ótimo	Muito bom	Ótimo	Ótimo
Jensen-Haise	Ótimo	Muito bom	Ótimo	Ótimo
Makkink	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo
Thornthwaite	Bom	Sofrível	Bom	Muito bom

Fonte: o autor (2019).

É possível observar que os métodos de Blaney-Criddle e Jensen-Haise foram classificados com desempenho ótimo para os quatro municípios de análise. Sendo assim, são os métodos mais recomendados para estimar a ETo na impossibilidade do uso da equação de Penman-Monteith.

Em um estudo realizado por Pereira et al. (2009) na região da Serra da Mantiqueira (clima do tipo Cwb, segundo Koppen), que possui invernos frios e menos úmidos, com verões com temperaturas amenas e mais chuvosos, os métodos de Jensen-Haise e Blaney-Criddle também apresentaram os melhores desempenhos, seguido pelo método de Makkink, apesar da grande diferença climática da região da Serra da Mantiqueira e da região da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (clima do tipo Cfa, segundo Koppen).

Analisando vários trabalhos que foram realizados sobre evapotranspiração como Moura et. al (2013), Almeida et al. (2010) e Cavalcanti Junior et al. (2010) observou-se que os métodos que são baseados na radiação solar apresentam ótimos resultados e independem das condições climáticas da área de estudo, diferencialmente do que acontece com os métodos que são baseados na temperatura do ar. No entanto, neste trabalho apesar dos métodos baseados na radiação, Jensen-Haise e Makkink, apresentarem um ótimo desempenho, alguns métodos baseados na temperatura também apresentaram ótimos resultados, como é o caso de Blaney-Criddle e Hargreaves-Samani.

O método de Blaney-Criddle além de utilizar a temperatura como variável de entrada, também utiliza o número de horas reais de insolação e o fotoperíodo. Já o método de Hargreaves-Samani utiliza como variável de entrada a radiação solar extraterrestre, o que pode ter sido um fator decisivo para o desempenho deste ser melhor do que métodos que utilizam somente a temperatura local como variável de entrada, como é o caso de Thornthwaite.

O método de Thornthwaite foi o que apresentou o pior resultado dentre os métodos analisados, variando o seu desempenho de sofrível para o município de São José dos Ausentes, até muito bom no município de Rio Pardo, como já era esperado. O método de Thornthwaite não estima satisfatoriamente a evapotranspiração, pois não considera o termo aerodinâmico ou a contribuição da energia latente, e o seu baixo desempenho pode ter sido reflexo da ausência deste termo em sua equação (Camargo et al., 1999).

Para uma análise mais aprofundada, foi realizada a média da evapotranspiração de referência para a bacia hidrográfica Taquari-Antas, considerando as quatro estações meteorológicas estudadas. Os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Médias mensais da evapotranspiração de referência para a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas

(continua)

Mês	ET _{oPM}	ET _{oBC}	ET _{oC}	ET _{oHS}	ET _{oJH}	ET _{oM}	ET _{oT}
mm.mês ⁻¹							
JAN	141,40	154,10	118,98	141,38	168,09	114,23	109,88
FEV	129,31	141,02	106,68	125,21	152,49	101,67	103,05
MAR	121,27	133,73	92,59	112,36	139,44	95,50	95,33
ABR	94,84	110,59	60,74	83,75	95,61	69,91	64,99
MAI	67,40	76,93	41,14	58,37	61,22	47,98	45,68
JUN	53,61	58,07	28,36	44,50	42,39	37,21	29,59
JUL	65,19	74,47	33,37	51,77	51,51	43,53	35,92

Mês	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
	mm.mês ⁻¹						
AGO	82,91	90,36	45,88	69,81	70,07	56,20	45,57
SET	82,12	89,82	56,35	80,60	75,00	61,17	47,80
OUT	107,84	118,91	80,00	111,16	112,58	86,35	66,80
NOV	131,34	146,18	104,27	134,03	145,47	102,48	93,88
DEZ	153,79	175,39	119,39	149,85	180,06	123,93	109,07

Fonte: o autor (2019).

(conclusão)

Dentre os métodos analisados, os métodos de Thornthwaite, Makkink e Camargo são os que subestimam a ETo em todos os meses do ano. Já o método de Blaney-Criddle tende a superestimar a ETo em todo o período. O método de Jensen-Haise apresenta um comportamento diferente, durante os meses mais quente (de outubro a abril), onde a radiação solar e a temperatura apresentam valores mais altos, o método tende a superestimar a ETo, já nos demais meses subestima. Com o método de Hargreaves-Samani acontece parecido, o método subestima a ETo em todos os meses do ano, com exceção dos meses de outubro e novembro.

Se analisarmos as Tabelas 11 e 12 ao mesmo tempo, é possível perceber que os métodos de Thornthwaite, Makkink e Camargo, que são os métodos que subestimam a ETo em todos os meses do ano, são os que apresentam os piores desempenhos em comparação ao método de Penman-Monteith. Camargo e Camargo (2000) relatam que o método de Thornthwaite tende a subestimar a ETo em condições de clima mais seco, e o mesmo é esperado para o método de Camargo, visto que é baseado no método de Thornthwaite. Er-Raki et al. (2010) encontraram resultado parecido para o método de Makkink, sob condições semiáridas, na bacia Tensift, no Marrocos e no Vale Yaqui, no México, o método acabou sendo classificado como o de pior desempenho dentre os analisados, exceto sob condições de alta umidade. No entanto, a região de estudo da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas não apresenta condições de clima seco ou semiárido, então o resultado encontrado neste trabalho difere do que foi apresentado pelos autores referenciados acima.

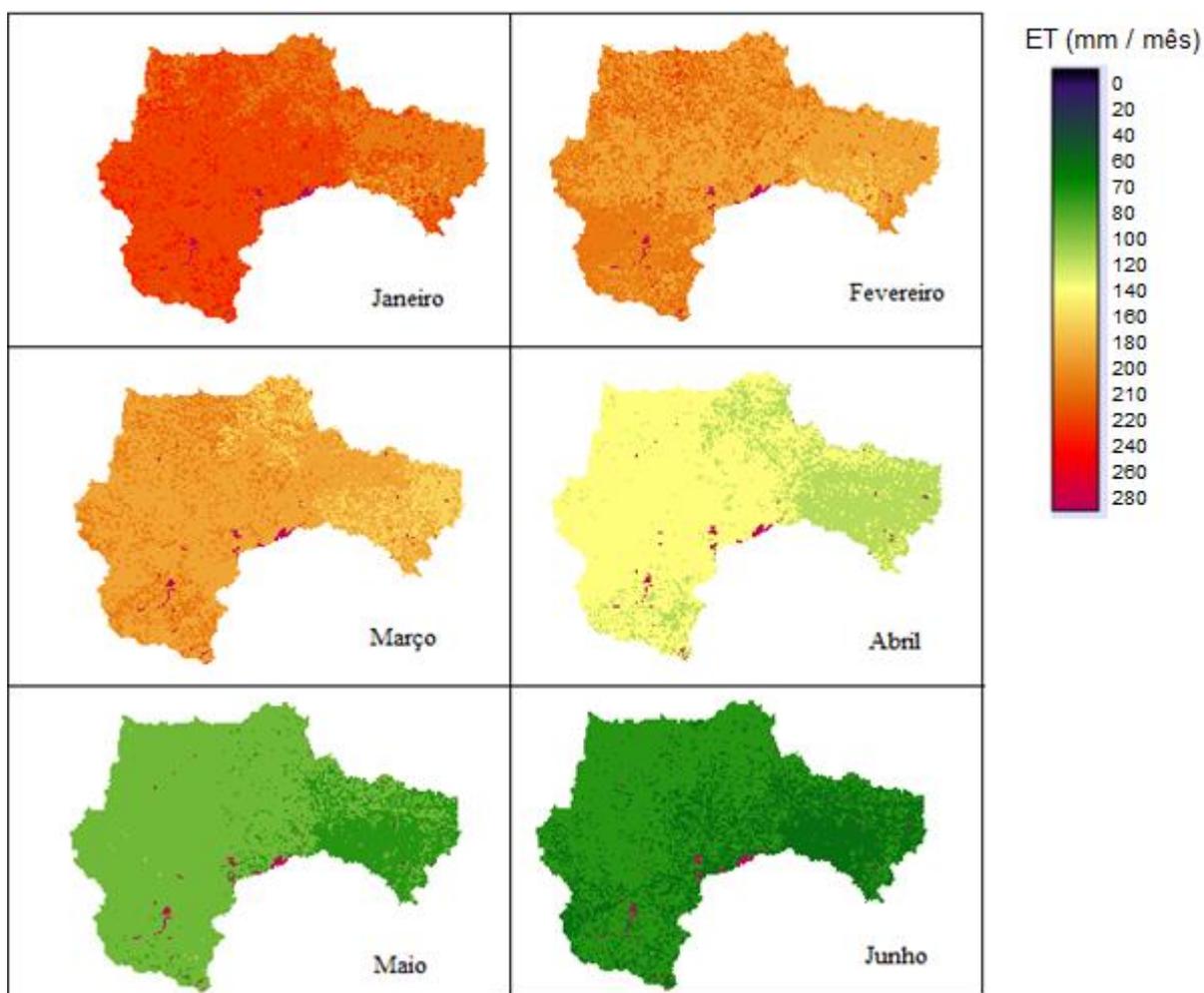
6.2 SENSOR MODIS

Utilizando a metodologia descrita no item 5.3, foi possível calcular a evapotranspiração durante o período dos anos de 2008 a 2010. A escala de observação das séries de evapotranspiração para as imagens obtidas pelo sensor MODIS foi mensal. Para efeito de análise e comparação, serão apresentados os resultados em formas de mapas e tabelas.

São apresentados 12 mapas com as médias da ET durante os três anos de análise, no qual fornecem a distribuição espacial da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas.

As Figuras 20 e 21 apresentam a evapotranspiração acumuladas em valores mensais. De maneira geral, as tonalidades verdes representam valores inferiores a 100 mm. mês⁻¹. As regiões em amarelo e laranja fraco representam valores entre 120 mm. mês⁻¹ e 210 mm. mês⁻¹, já as regiões em laranja forte e vermelho apresentam valores entre 210 mm. mês⁻¹ e 260 mm. mês⁻¹. As regiões em rosa no mapa, são consideradas como sendo de área urbana e foram desconsideradas do valor médio de ET da bacia e da análise por apresentarem valores muito altos.

Figura 20 – Evapotranspiração real mensal da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas obtidas com utilização de produtos MODIS (janeiro a junho)

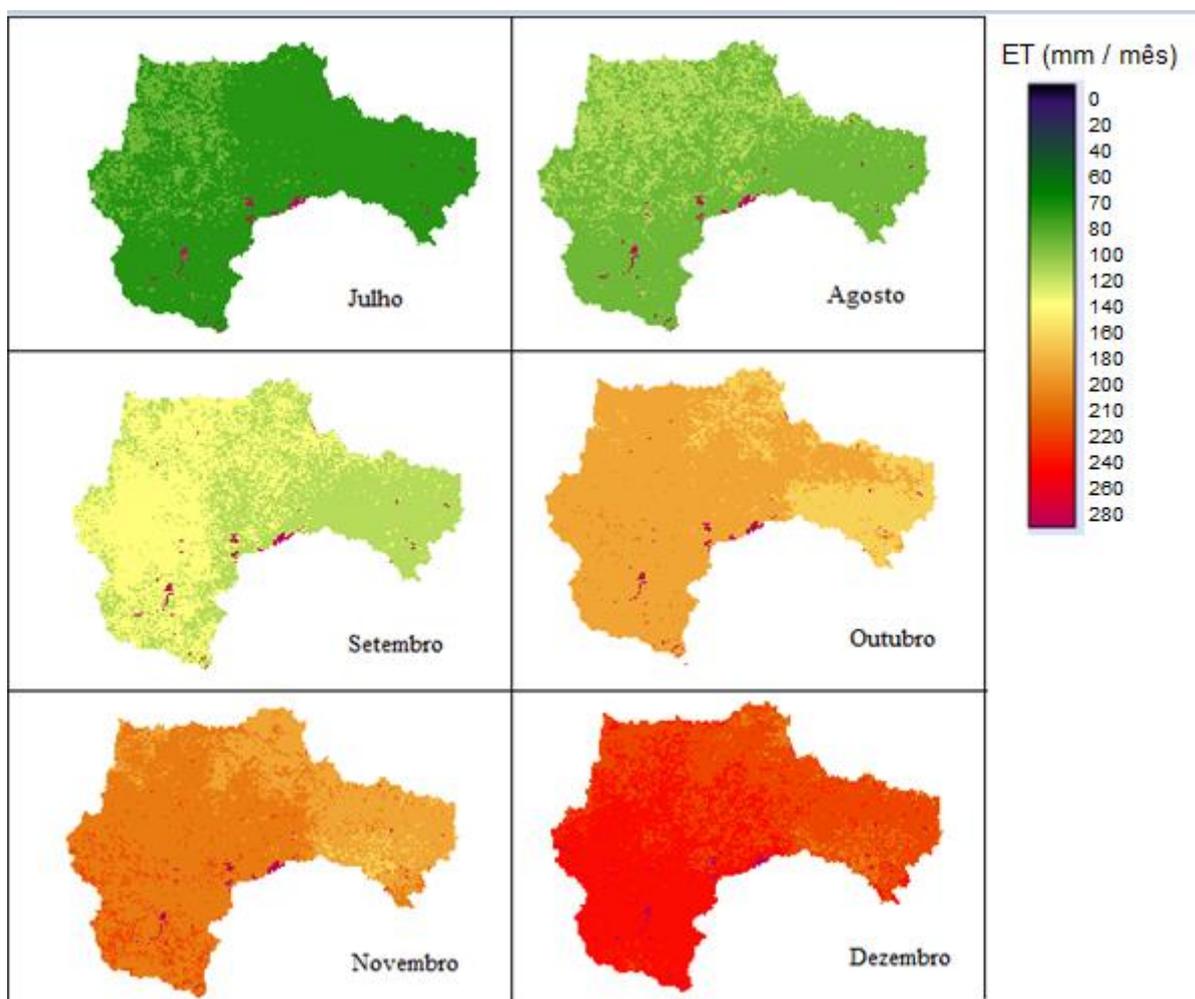


Fonte: O autor (2019).

No transcorrer das figuras é possível verificar o movimento sazonal da diminuição da evapotranspiração à medida que os meses passam do verão para o inverno e a retomada do aumento da ET no final do ano.

Giacomoni (2005) ao realizar uma análise da evapotranspiração utilizando imagens do sensor para o estado do Rio Grande do Sul, encontrou resultado parecido com este estudo, no qual os meses de verão apresentaram uma maior ET, variando de 15 mm/mês a 250 mm/mês. Enquanto nos meses de inverno estes valores variaram de 15 mm/mês a 160 mm/mês.

Figura 21 - Evapotranspiração real mensal da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas obtidas com utilização de produtos MODIS (julho a dezembro)



Fonte: O autor (2019).

Chama a atenção nas Figuras 20 e 21 o crescimento das áreas com menor evapotranspiração dos meses de abril a julho e a consequente diminuição das mesmas nos meses seguintes. É possível notar também, que a região leste da bacia apresenta uma menor evapotranspiração que o restante da mesma, esta região compreende os municípios dos campos de cima da serra, como São José dos Ausentes, Cambara do Sul, Bom Jesus e Jaquirana.

Pode-se relacionar esta diminuição da ET na parte leste da bacia com o clima predominante desta região, que segundo classificação de Koppen apresenta temperatura do mês mais quente inferior a 22°C, enquanto o restante da bacia apresenta outra classificação, na qual a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C. Com isso, as regiões que apresentam maior temperatura possuem maiores valores de ET.

Posteriormente, foi realizado o cálculo das médias mensais da Bacia Taquari-Antas para a estimativa da evapotranspiração obtidas a partir do produto MODIS e comparado com as médias mensais da evapotranspiração na bacia calculadas pelo método de Penman-Monteith, para o período de estudo (Tabela 13). A comparação do sensor foi realizada somente com o método de Penman-Monteith, pois o algoritmo utilizado para a coleta de produtos de dados MOD16 é baseado na lógica desta equação.

Para o cálculo da média da Bacia, as regiões que apresentaram valores muito elevados de evapotranspiração, superiores a 260 mm, foram desconsiderados, tendo em vista que não retratam a realidade, e foram consideradas como sendo regiões urbanas.

Tabela 13 - Médias mensais de estimativa da evapotranspiração pelo sensor MODIS e método de Penman-Monteith

	ET - Sensor MODIS	ET – Penman-Monteith	Diferença %
Janeiro	205,88	141,40	+31,32
Fevereiro	180,75	129,31	+28,45
Março	170,51	121,27	+28,88
Abril	123,10	94,84	+22,95
Mai	85,23	67,40	+20,92
Junho	61,56	53,61	+12,91
Julho	74,75	65,19	+12,79
Agosto	97,03	82,91	+14,55
Setembro	120,04	82,12	+ 31,59
Outubro	165,69	107,84	+ 34,92
Novembro	184,71	131,34	+ 28,89
Dezembro	218,98	153,79	+29,76

Fonte: O autor (2019).

Analisando a Tabela 13, percebe-se que os valores encontrados pelo sensor MODIS acabam superestimando a evapotranspiração em todos os meses do ano, variando de 12,79% no mês de julho à 31,59 % no mês de setembro.

Observa-se que os valores de evapotranspiração variam de 61,56 mm. mês⁻¹ (junho) a 218,98 mm. mês⁻¹ (dezembro). Assim como analisado nas Figuras 20 e 21, os maiores valores de evapotranspiração ocorrem nos meses de outubro a março, período no qual as temperaturas são mais elevadas.

Giacomoni (2005) em seu trabalho, propôs uma verificação dos resultados encontrados através das imagens do sensor utilizando um balanço hídrico simplificado, no qual ele despreza os termos de armazenamento e drenagem profunda, sendo assim, a estimativa das perdas por evapotranspiração é dada pela diferença entre a precipitação anual e a vazão no exutório da bacia. No entanto, o autor não conseguiu estabelecer uma tendência bem definida, uma vez que, ora os modelos superestimavam e ora subestimavam a evapotranspiração.

Ferreira e Dantas (2014) em estudo realizado no estado de Minas Gerais, estimam a evapotranspiração através de produtos do MODIS e de produtos SPOT/MSG e também trazem os valores encontrados a partir de dados das estações meteorológicas do INMET. Os autores citam que os valores estimados através dos produtos MODIS e dos produtos *Système Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) foram muito semelhantes, no entanto os valores encontrados a partir de dados das estações meteorológicas apresentaram as melhores correlações, possibilitando os melhores ajustes. Por fim, eles concluem que a aplicação de métodos para estimativa da evapotranspiração a partir de imagens ou produtos de satélites são a melhor forma para se monitorar a evapotranspiração em larga escala.

Comparando os resultados encontrados dos produtos do sensor MODIS com os demais métodos analisados, percebe-se que os resultados encontrados superestimam a ET quando comparados aos demais métodos utilizados neste trabalho. No entanto, a utilização das imagens obtidas por meio do Sensor fornece a distribuição espacial da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, o que não ocorre utilizando os métodos indiretos.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu realizar uma estimativa da evapotranspiração de referência na bacia hidrográfica Taquari-Antas, a partir da utilização de métodos indiretos e imagens do sensor MODIS, bem como definir o conjunto de métodos indiretos mais adequado para estimar a transferência de vapor de água para atmosfera na região de estudo.

Entre os métodos indiretos de cálculo da evapotranspiração, destaca-se o método de Penman-Monteith, visto que este mostra-se eficiente em diversas condições climáticas. No entanto, na impossibilidade de uso do mesmo devido à falta de algumas variáveis de entrada, os métodos mais recomendados para a região de estudo são o de Blaney-Criddle e o de Jensen-Haise, que obtiveram desempenho classificado como “ótimo” nas quatro estações meteorológicas utilizadas.

A estimativa da ET através do sensor MODIS, apresenta valores mais altos dos que foram estimados pelos sete métodos indiretos utilizados neste trabalho. Entretanto a utilização destas imagens permite a estimativa da evapotranspiração para grandes áreas, sendo possível realizar a determinação espacial desta variável.

Houve certa dificuldade na seleção das estações meteorológicas e na determinação do período de estudo, devido à falta de dados de radiação solar, sendo ela necessária para estimar a ETo no método de Penman-Monteith. Este dado até pode ser estimado, no entanto, os valores estimados acabam ficando bem distantes dos valores reais. Com isso, optou-se por trabalhar com a série histórica de três anos nos quais havia dado de radiação solar. Em geral, os resultados encontrados foram considerados coerentes, o que confere à metodologia utilizada um grande potencial de uso.

8. LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Como dito anteriormente, a maior limitação encontrada na execução deste trabalho foi a disponibilidade dos dados meteorológicos. Inicialmente, seriam trabalhadas oito estações meteorológicas, com uma série histórica de dez anos, no entanto, a falta de dados de radiação solar impediu que isso fosse executado. Ao final, foi possível trabalhar com quatro estações meteorológicas e com uma série histórica de três anos.

As sugestões para futuros estudos que abordem o presente tema são trabalhar com diferentes escalas de tempo; diária e mensal; possibilitando uma análise mais aprofundada e a comparação entre elas. Outra sugestão, é a definição do uso e cobertura do solo da bacia, para comparar a ET com base nos diferentes usos e coberturas do solo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Daniel Alves. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor Modis**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- ALLEN, R. G.; PERREIRA, L.S.D; SMITH, M. **Crop evaporation (irrigation and drainage paper 56)**. Roma: FAO, 301 p, 1998.
- ALMEIDA, B. M. et al. Comparação de métodos de estimativa da eto na escala mensal em fortaleza-ce. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], n. 2, p.93-98, 30 jun. 2010.
- ARAUJO, W. F. et al. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga, Mossoró**, v. 20, n.4, p. 84-88, jul/set. 2007.
- ASCE. **Consumptive use of water and irrigation water requerimentes**. Jensen, M. (Ed.). American Society of Civil Engineers, New York, 1973.
- BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga. **Revista Irriga**, Botucatu, SP, v.13, n.4, p. 449-466, 2008.
- BARKER; et al. **Modis Spectral Sensivity in Study: Requirements and Characterization**, 84p. October 1992.
- BARROS, V. R.; et al. 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, abr/jun. 2009.
- BERNARDO, Salassier.; SOARES, Antônio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Manual de Irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p.
- BORGES, Alisson. C. de; MENDIONDO, Eduardo. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinha Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.
- BORTOLIN, T. A., SANTOS, L. M., SILVA, A. G., SCHNEIDER, V. E. Desenvolvimento de uma aplicação web para estimativa de evapotranspiração potencial por diferentes métodos. In: Simpósio De Recursos Hídricos do Nordeste., 14, 2018. **Anais [...]**, ABRH, 2018.
- BRAGANÇA, R.; REIS, E. F.; GARCIA G.O.; PEZZOPANE, J. E. M. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no Estado do Espírito Santo. **Idesia**, v.28, n.2, p.125-137.
- BRITO, et al. Aplicação do produto de evapotranspiração do MODIS para uma área de pastagem na Amazônia ocidental. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.40, Edição Especial X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia 2018, p. 162-167.

BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na Campanha Gaúcha, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v. 36, n.4, p.780-793, 2014.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a Determinação da Evapotranspiração Potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, p. 164-213, 1962.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Teste de uma equação simples para estimativa da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura do ar. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 3., Campinas, **Anais [...]**, Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1983. P. 229-244.

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

CAMARGO, A.P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p.251-257, 1999

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 Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPAORÉ, H. et al. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 33, p. 127-140, 2008.

CARVALHO, L.G.de.; RIOS, G.F.A.; MIRANDA, W.L.; NETO, P.C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n. 3, p 456-465, jul. 2011.

CAVALCANTI JUNIOR, E.G. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Mossoró-RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.87-92, 2010.

CHANG, J. H. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine, 1968. 304 p.

CONCEIÇÃO, Fagner Goes da. **Estimativa da evapotranspiração de referência por dados de satélite e de estações meteorológicas para o estado de minas gerais**, 2012. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras. Lavras.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MARIN, Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.2, p.229- 236, 2003

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modelling approaches. **Irrigation and Drainage System**, v. 19, p. 223-249, 2005.

CRUZ, Jasmin Teixeira da. **Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração para Brasília- DF**. 2016. 45p. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade de Brasília, Brasília.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. (Irrigation and drainage paper, 24).

DOORENBOS, J; PRUITT, W.O. 1990. **Las necessidade de agua de los cultivos**. Roma: FAO. 194p.

ER-RAKI, S.; et al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as alternative of ground meteorological parameters? **Journal of Arid Environments**, Amsterdam, v.74, n.12, p.1587-1596, 2010.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ**. 2006. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FERREIRA, E.; DANTAS, A.A.A. Estimativa da evapotranspiração atual a partir de produtos de sensoriamento remoto usando o método do triângulo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.19, n.1, p. 73-81, 2014.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160p

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª edição. São Paulo. Oficina de Textos, 2011. p. 130.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**, Ed. rev. Atual. São Paulo: ed. Edgard Blucher, 1988 p.177-194.

GIACOMONI, M. H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**, 2005. 193f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GIACOMONI, M. H.; MENDES, C.A.B. Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelo de balanço de energia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 4, p. 33-42, 2008.

GONÇALVES, F. M.; FEITOSA, H. O.; CARVALHO, C.M.; GOMES FILHO, R.R.; VALNIR JÚNIOR, M. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral - CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, v.3, n.2, p.71-77, 2009.

GOTARDO, J. T.; RODRIGUES, L. N.; GOMES, B. M. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration: an approach to the management of water resources within an experimental basin in the Brazilian. **Revista Engenharia Agrícola**, v.36, n.6, p.1016-1026, 2016.

HARGREAVES, G. H. **Precipitation dependability and potentials for an agricultural production for Northeast Brazil**. Cusushash: EMBRAPA and Utah State University, 1974. 123p.

JENSEN, M. E. (ed). **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: ASCE. 215p. 1973.

JUNG, L.H.; BISCAVO, G.A.; OLIVEIRA, G.Q.; ALVES, M.A.; GIACON, G.M. Estimativa da evapotranspiração de referência em uma região do Alto Pantanal. **Magistra**, Cruz das Almas, v.28, n.2, p.168-177, abr/jun. 2016.

JUNIOR, D.D.F.; LOPES, A.D.; OLIVEIRA, G.Q.; JUNG, L.H. Métodos Empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquiduana, MS. **Revista Irriga**, Botucatu, v.17, n.4, p.418-434, out/dez 2012.

JUSTICE, C.O.; et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. New York, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, July 1998.

KAN, Akemi. **Estimativa de Evapotranspiração Real com Base na Análise de Recessão dos Hidrogramas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado em Ciências) Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Tecnologia e Ciências Exatas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

KLEIN, R.M. 1978. **Mapa fitogeográfico do estado de Santa Catarina**. In: Reitz, R. (ed.). Flora Ilustrada Catarinense. Herbário Barbosa Rodrigues, Itajaí. 24p.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F.M. **Lições de hidrologia**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, p. 77-121, 1992.

LIMA, Sueli Fátima Ferreira. **Comparação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para o município de Ribeirão Preto – SP**. 1991. 169f Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LIMA, et al. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Revista Ceres**, Viçosa, v.61, n.1, p.17-27, jan/fev, 2014.

LIMA JUNIOR, J.C.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, J.B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da

evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, p.447-454, jul-set, 2016.

LÓPEZ-URREA, R.; OLLALA, F.M.S.; FABEIRO, C. MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, n.1, p. 15-26, 2006.

LORENZI, K. S. **Evapotranspiração de referência entre métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite no estado de Santa Catarina**. 2010. 48f. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

MAGNA ENGENHARIA, **Plano de Gerenciamento da Bacia do Rio Dos Sinos**, 1997

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referencia a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraíba, CE**. 2002. 95f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz: Universidade de São Paulo, 2002.

MOURA, A. R. C.; et al. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no Estado de Pernambuco- Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.2, p. 181-191, 2013.

MU, Q.; HEINSCH, F.A.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 111, n. 4, p. 519-537, Apr. 2007.

NARASHIMAN, T.N. Hydrological Cycle and Water Budgets. In Encyclopedia of Inland Waters. **Anais [...]** Los Angeles: Elsevier, 2009, p. 714-720.

NICACIO, Rosilene Mendonça. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. 2008. 337f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª edição. Editora Blucher, 2010. p. 388.

OLIVEIRA, L. M. M. DE.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; AZEVEDO, J.R.G.; SANTOS, F.X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife; v. 3, n. 1, p 58-67, 2008.

OLIVEIRA, L. M. M. DE.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, B.B.; ANTONINO, A.C.D.; MOURA, A.E.S.S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande; v.18., n. 10, p. 1039-1046, 2014.

PAIVA, C. M. de S.; PINHEIRO, A. da S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 42-51, 2016.

PALARETTI, L. F. ; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C. Comparação entre método de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões citrícolas Paulistas. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 34, n.1, p. 38-47, 2014.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceeding Royal Society**, London, v.193, p.120-143. 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, A. P. An analysis of the criticism of the Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 46, p. 149-157, 1989.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N.A.V.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, SP. Editora FAELQ, 1997.

PEREIRA, D.P.; YANAGI, S.N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; SILVA, L.A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, dez. 2009.

PÉRICO, E; ECKHARDT, R.R. **Zoneamento econômico-ambiental do Vale do Taquari**, Lajeado: UNIVATES, 2007.

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

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURU, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campo. Parêntese, 2009.

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, p.81-92, 1972.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. 1ª edição. São Carlos. EESC/USP, 1998. p 125.

RIO GRANDE DO SUL, Relatório Técnico Plano de Bacia do Rio Taquari Antas. 2011, 233p.

RUHOFF, A.L. et al. MOD16: Desafios e limitações para a estimativa global de evapotranspiração. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5124.

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.

- SANTOS, Wesley Batista dos. **Análise espectro-temporal de produtos do sensor MODIS como diagnóstico para a cafeicultura de precisão**. 2015. 72f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras. Lavras.
- SCHUTTEMEYER, D. et al. Satellite-based actual evapotranspiration over drying semiarid terrain in West Africa. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, p. 97-111, 2007.
- SELLERS, W. D. **Physical Climatology**. University of Chicago, Chicago, 1965.
- SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canadá. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.
- SILVA, B. C. da; COSTA CALHEIROS, H. Águas Superficiais. In Ciências Ambientais para Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, p. 85–122.
- SILVA, G.H. et al. Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. **Revista brasileira de Engenharia. Agrícola e Ambiental**. v.22, n.2, p.83-89, fev 2018.
- SILVA, K.O.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; FOLEGATTI, M.V. Análise de métodos de estimativa de evapotranspiração na otimização de sistemas de drenagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n. 2, p. 161-165, 2005.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica, In: TUCCI, C. E. M. (org). Hidrologia: Ciência e Aplicação, 2ª Ed. Porto Alegre, RS: Editora da Universidade (UFRGS)/Edusp/ABRH. p 35-52, 2009.
- SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Manejo da irrigação do feijoeiro: Uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central. Goiânia: **Embrapa Arroz e Feijão**, 1994. 46p.
- STEINER, T.A.; HOUER, T.A.; SCHEIDER, A.D. Lysimetric evaluation of daily potential evapotranspiration models for grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 240-247, 1991.
- SYPERRECK, V.L.G. et al. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.603-609, 2008.
- TABARI, H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 24, n. 10, p. 2311-2337, 2010.
- TAGLIAFERRE, C.; et al. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis- BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n.1, p. 103-111, jan./mar. 2010.

TANAKA, Adriana Aki et al. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v.51, n.2, p.91-104, fev/2016.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T.. Determinação da evapotranspiração através de imagens de satélites de diferentes resoluções com e sem banda termal. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. Washington, D.C.: **Transactions of the American Geophysical Union**, 1944. p.686-693.

TUCCI, E. M.; et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª edição. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH, 2007. p. 943.

TURCO, J.E.P.de; FARIA, M.T. de; FERNANDES, E.J. Influência da forma de obtenção do saldo de radiação na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 3, P. 215-228, ago/out. 2005.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: 2006. Versão Digital, 443p.

VESCOVE, H.V.; TURCO, J.E.P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara- SP. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v.25, n.3, p.713-721, set/dez. 2005.

XU, C-Y; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n.18, p 3717-3734, 2005.

WILLMOTT, C.J.; et al. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.0, n.C5, p.8995-9005, 1985.

YODER, R.E.; ODHIAMBO, L.O.; WRIGTH, W.C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v.21, n.2, p. 197-202, 2005.

APÊNDICE A – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM BENTO GONÇALVES - RS

(continua)

MÊS	ANO	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
					mm.mês ⁻¹			
JAN	2008	161,89	168,79	121,24	145,96	183,02	122,12	113,00
FEV	2008	142,29	152,36	105,15	128,19	163,59	109,42	100,64
MAR	2008	132,06	142,34	94,16	111,89	147,54	99,05	97,32
ABR	2008	98,17	111,98	61,18	84,28	97,65	70,90	64,51
MAI	2008	76,31	85,38	41,32	58,90	68,51	53,46	45,90
JUN	2008	49,01	50,98	28,43	42,61	37,70	33,10	28,15
JUL	2008	70,18	78,73	40,42	54,02	61,44	46,67	46,15
AGO	2008	81,75	88,30	48,24	70,22	74,42	59,28	46,69
SET	2008	92,02	95,80	54,90	83,37	83,68	67,84	43,99
OUT	2008	99,27	105,69	84,22	102,65	100,37	75,01	70,11
NOV	2008	147,34	155,80	104,98	135,49	164,98	114,79	92,82
DEZ	2008	165,34	183,31	122,74	153,33	189,79	128,97	109,23
JAN	2009	149,89	158,89	117,58	142,76	174,39	118,15	105,67
FEV	2009	121,69	123,77	104,68	118,19	141,37	93,09	100,83
MAR	2009	123,78	131,47	97,01	113,92	144,73	96,63	99,77
ABR	2009	106,34	122,29	65,54	87,04	116,39	82,40	70,47
MAI	2009	73,58	84,07	45,25	63,46	70,78	52,38	50,48
JUN	2009	53,39	57,54	28,14	43,51	45,95	39,37	26,78
JUL	2009	54,66	54,41	28,52	42,71	38,90	34,95	24,96
AGO	2009	92,79	96,11	53,27	75,72	76,80	56,10	55,79
SET	2009	75,19	79,85	59,38	77,67	69,41	53,93	49,50
OUT	2009	120,22	126,20	85,58	118,84	129,29	93,98	71,78
NOV	2009	121,69	128,31	120,06	134,26	135,41	87,63	111,54
DEZ	2009	146,99	157,49	126,14	146,82	182,28	121,75	114,76
JAN	2010	131,42	134,70	126,99	139,49	159,06	104,26	119,06
FEV	2010	138,66	145,07	120,36	126,38	164,39	104,36	115,48
MAR	2010	117,73	123,91	94,16	109,31	135,65	90,93	96,33
ABR	2010	89,50	98,28	62,32	78,42	88,81	62,99	65,06
MAI	2010	51,82	52,55	40,82	48,91	47,76	35,93	41,98

JUN	2010	57,19	57,88	32,54	46,49	44,37	36,07	35,57
JUL	2010	63,32	71,12	34,61	54,47	52,06	42,16	37,52
AGO	2010	80,34	77,89	44,39	64,98	61,98	49,86	42,15
SET	2010	91,28	97,51	63,27	82,16	83,96	64,99	54,92
OUT	2010	110,97	116,93	78,97	110,71	115,89	89,47	62,43
NOV	2010	142,83	155,38	100,05	139,76	156,66	113,05	85,91
DEZ	2010	162,12	177,22	121,73	152,25	188,67	128,03	110,41

(conclusão)

APÊNDICE B – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM SÃO JOSÉ DOS AUSENTES - RS

(continua)

MÊS	ANO	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
					mm.mês ⁻¹			
JAN	2008	107,54	129,94	91,29	119,27	136,13	106,29	84,52
FEV	2008	104,84	123,67	81,47	109,88	126,95	98,23	78,45
MAR	2008	100,56	115,87	74,12	98,17	115,13	88,83	77,26
ABR	2008	86,51	104,78	48,45	73,81	81,04	68,09	54,61
MAI	2008	74,25	89,21	32,22	54,91	59,67	55,48	40,34
JUN	2008	54,56	59,04	22,38	38,90	34,35	35,45	28,09
JUL	2008	87,56	106,16	34,72	55,80	62,90	54,13	46,47
AGO	2008	85,52	104,76	39,87	67,05	70,00	63,18	45,67
SET	2008	73,57	82,43	39,82	73,95	64,01	64,15	36,78
OUT	2008	79,69	95,33	65,15	92,01	82,19	72,27	59,16
NOV	2008	87,11	103,95	75,89	100,62	107,73	88,62	67,63
DEZ	2008	122,99	151,33	90,51	125,94	145,01	115,09	82,96
JAN	2009	110,21	132,22	91,71	118,59	129,93	101,15	82,72
FEV	2009	97,939	112,46	84,73	106,28	115,11	85,49	81,95
MAR	2009	104,47	121,17	78,59	102,81	120,14	90,80	81,02
ABR	2009	90,80	110,62	52,34	77,09	93,49	75,67	57,82
MAI	2009	71,55	87,25	36,08	59,61	62,46	53,88	43,50
JUN	2009	58,87	67,47	21,68	42,82	41,33	42,22	24,89
JUL	2009	59,69	66,82	21,94	43,91	37,94	41,20	24,08
AGO	2009	97,67	112,17	40,54	68,17	72,73	63,06	44,24
SET	2009	62,99	76,98	46,54	72,83	59,98	53,71	43,16
OUT	2009	100,74	120,37	67,88	108,40	108,64	90,17	60,51
NOV	2009	111,13	131,8998	87,28	122,07	127,58	92,98	92,88
DEZ	2009	123,89	150,6501	99,88	131,25	151,01	114,29	92,48
JAN	2010	99,82	115,4027	101,19	119,78	124,85	92,12	96,46
FEV	2010	114,18	134,5461	90,91	111,35	137,11	98,37	91,82
MAR	2010	95,86	113,63	75,33	92,64	114,68	88,44	77,56
ABR	2010	71,62	85,35	49,00	67,02	69,79	56,98	54,28
MAI	2010	43,71	52,08	32,23	44,88	42,41	37,63	38,08

JUN	2010	54,76	59,66	25,35	42,88	39,57	37,65	32,44
JUL	2010	69,01	84,29	28,16	50,38	49,28	46,55	35,36
AGO	2010	77,30	82,02	33,95	58,95	55,31	49,79	38,04
SET	2010	79,68	96,96	48,99	76,79	66,31	60,93	47,22
OUT	2010	90,27	107,92	59,74	97,58	93,21	85,36	51,54
NOV	2010	114,99	138,39	77,96	121,48	123,41	103,00	69,22
DEZ	2010	113,69	142,33	92,70	124,33	134,59	106,24	84,73

(conclusão)

APÊNDICE C – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM LAGOA VERMELHA - RS

(continua)

MÊS	ANO	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
					mm.mês ⁻¹			
JAN	2008	157,03	169,40	115,85	148,34	180,42	124,39	106,13
FEV	2008	142,46	158,01	99,59	134,41	158,95	109,80	94,24
MAR	2008	129,37	142,54	89,18	116,27	143,19	99,84	89,59
ABR	2008	93,89	108,08	58,65	83,22	90,56	68,00	60,45
MAI	2008	76,41	87,48	40,07	62,94	67,18	54,64	43,54
JUN	2008	50,34	52,77	27,80	43,95	38,52	34,79	28,05
JUL	2008	80,49	95,77	41,65	62,58	71,88	56,39	48,59
AGO	2008	86,29	95,19	48,59	73,26	75,83	61,11	48,35
SET	2008	91,57	95,12	52,78	86,84	79,19	67,32	42,27
OUT	2008	99,82	108,76	82,39	105,33	99,56	75,98	69,00
NOV	2008	140,58	153,39	110,13	135,92	152,07	108,17	88,04
DEZ	2008	175,42	202,65	117,44	163,13	192,60	133,49	106,84
JAN	2009	153,92	168,74	112,86	149,98	174,53	121,59	100,66
FEV	2009	122,77	127,11	102,30	27,75	132,01	88,18	98,12
MAR	2009	135,60	148,94	94,68	123,89	152,20	103,75	97,15
ABR	2009	123,17	146,96	66,57	98,73	122,56	87,60	71,84
MAI	2009	77,38	91,00	45,13	67,78	71,49	54,44	49,46
JUN	2009	56,64	65,05	27,57	48,01	48,58	43,73	25,81
JUL	2009	59,72	63,28	28,97	48,89	43,93	41,53	25,15
AGO	2009	87,79	99,38	49,22	77,01	79,76	62,54	47,36
SET	2009	70,43	75,43	56,74	79,02	64,32	51,76	45,87
OUT	2009	121,36	131,31	85,63	124,09	129,37	95,17	72,39
NOV	2009	137,24	150,86	119,55	145,58	149,87	98,53	111,61
DEZ	2009	161,65	180,00	124,42	156,41	190,98	129,49	115,00
JAN	2010	133,08	138,59	121,60	144,28	159,23	106,91	113,96
FEV	2010	138,43	147,94	110,91	131,27	171,31	113,03	107,14
MAR	2010	121,68	134,29	89,92	114,89	138,71	96,43	90,12

ABR	2010	89,02	99,19	60,68	81,15	83,44	60,90	62,74
MAI	2010	56,92	60,30	39,85	53,54	50,87	40,45	40,64
JUN	2010	56,91	62,28	32,04	47,81	48,87	41,25	34,87
JUL	2010	65,01	75,77	34,76	56,14	55,46	46,74	37,52
AGO	2010	83,84	86,11	44,08	70,93	69,01	56,18	42,72
SET	2010	93,48	102,58	61,78	87,51	86,98	69,28	53,86
OUT	2010	114,72	127,61	76,58	116,71	116,32	92,67	60,84
NOV	2010	148,21	164,73	97,65	141,29	156,21	115,05	83,99
DEZ	2010	157,40	180,25	116,13	152,82	174,26	120,26	105,57

(conclusão)

APÊNDICE D – TABELA COM A SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) MENSAL PELOS DIFERENTES MÉTODOS, EM RIO PARDO- RS

(continua)

MÊS	ANO	EToPM	EToBC	EToC	EToHS	EToJH	EToM	EToT
					mm.mês ⁻¹			
JAN	2008	177,83	194,19	141,18	161,06	212,16	133,43	132,48
FEV	2008	147,55	165,21	123,29	138,97	173,26	108,37	118,64
MAR	2008	137,99	153,33	105,65	122,68	158,69	100,86	109,75
ABR	2008	93,31	111,37	64,05	89,13	98,35	68,01	66,93
MAI	2008	74,64	84,09	45,91	63,04	67,37	49,22	50,27
JUN	2008	45,19	47,76	29,58	41,81	36,74	30,26	26,65
JUL	2008	55,79	64,03	41,41	48,09	48,96	33,92	45,45
AGO	2008	70,65	76,57	48,17	68,47	66,71	51,83	42,12
SET	2008	93,18	100,34	61,13	86,85	92,84	70,44	47,93
OUT	2008	106,59	117,56	93,10	108,61	110,06	77,01	77,82
NOV	2008	163,88	181,19	121,99	149,87	190,39	123,94	111,25
DEZ	2008	182,89	208,16	139,81	169,93	212,05	135,23	128,54
JAN	2009	165,15	181,64	135,91	154,62	198,71	126,43	124,58
FEV	2009	133,08	143,10	119,81	137,17	165,26	103,58	114,57
MAR	2009	124,11	135,09	105,39	118,06	149,97	95,28	110,67
ABR	2009	103,66	124,57	70,65	96,49	113,38	75,99	77,48
MAI	2009	73,32	85,28	48,81	66,68	71,58	49,79	55,89
JUN	2009	56,18	61,45	30,51	48,34	46,93	37,75	28,59
JUL	2009	54,72	61,45	29,27	49,95	44,33	38,86	23,92
AGO	2009	83,45	95,99	54,34	79,77	83,04	58,63	54,05
SET	2009	76,27	80,56	64,07	79,49	70,75	52,32	52,81
OUT	2009	127,46	136,52	93,09	126,68	138,11	96,84	76,66
NOV	2009	107,36	116,42	126,04	130,09	116,20	72,25	116,40
DEZ	2009	154,37	168,11	142,99	155,04	187,70	118,66	130,88
JAN	2010	149,01	156,70	150,35	152,44	184,57	113,91	139,29
FEV	2010	147,86	158,95	136,92	142,70	180,57	108,09	134,69
MAR	2010	131,99	142,20	112,81	123,76	152,67	95,14	117,44
ABR	2010	92,07	103,61	69,43	88,54	91,81	61,39	73,61
MAI	2010	58,88	64,013	45,95	55,72	54,511	38,50	48,02

JUN	2010	50,35	54,91	34,34	46,82	45,72	34,83	35,13
JUL	2010	62,11	71,73	35,98	54,27	50,99	39,21	35,91
AGO	2010	67,49	69,79	45,85	63,21	55,20	42,84	39,64
SET	2010	85,81	94,29	66,73	80,64	78,55	57,38	55,30
OUT	2010	122,90	133,11	87,67	122,35	127,89	92,30	69,39
NOV	2010	153,65	173,87	109,64	151,95	165,14	111,71	95,29
DEZ	2010	178,69	203,18	138,17	166,89	211,77	135,62	127,45

(conclusão)