

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO SERTÃO PERNAMBUCANO**

***CAMPUS* PETROLINA ZONA RURAL**

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**SAE-ET_o: SISTEMA DE APOIO AO ESTUDO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

JOÃO RAFAEL MOURA DE ASSIS

PETROLINA, PE

2019

JOÃO RAFAEL MOURA DE ASSIS

**SAE-ET_o: SISTEMA DE APOIO AO ESTUDO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao IF SERTÃO-PE *Campus*
Petrolina Zona Rural, exigido para a obtenção
de título de Engenheiro Agrônomo.

PETROLINA, PE

2019

A848

Assis, João Rafael Moura de Assis.

SAE-ETo: Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de referência / João Rafael Moura de Assis. - 2019.

63 f.: il.; 30 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia)-Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2019.

Bibliografia: f. 53-57.

1. Climatologia agrícola. 2. Meteorologia agrícola. 3. Sistema informatizado. I. Título.

CDD 630.2515

JOÃO RAFAEL MOURA DE ASSIS

**SAE-ET_o: SISTEMA DE APOIO AO ESTUDO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao IF
SERTÃO-PE *Campus* Petrolina Zona Rural, exigido
para a obtenção de título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: ____ de _____ de ____.

Professor (Membro da banca examinadora)

Professor (Membro da banca examinadora)

Professor (Orientador)

RESUMO

O SAE-ETo foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar estudantes e profissionais da área no estudo do fenômeno da evapotranspiração de referência, constituindo-se de uma ferramenta ímpar no campo da agroclimatologia. O sistema foi concebido em ambiente de planilhas Excel® e comporta as diretrizes e informações necessárias à aplicação de vinte diferentes modelos matemáticos de determinação da ETo, de forma individual e simultânea, sendo executável com o fornecimento de dados mínimos através de processos lógicos e uso de equações alternativas, informando ao usuário os resultados de todas as equações executadas e permitindo a análise dos resultados gerados a partir de gráficos e análises de regressão, promovendo estudos completos e diversificados. Possui um banco de dados dinâmico com 16 elementos meteorológicos da normal climatológica do INMET (1981-2010) para 340 estações de diferentes regiões do território brasileiro, além de dados complementares pertinentes ao tema. Seu desenvolvimento se deu de forma a promover uma interface simples, em língua portuguesa e de fácil interação, com um manual do usuário e comentários que orientam ao pleno uso do mesmo, tendo confiabilidade atestada por cálculos manuais e compatibilidade atestada para aplicação em leitores de planilha gratuitos e dispositivos de baixo desempenho computacional.

Palavras-chave: Programa computacional; planilhas de Excel; modelos matemáticos; normais climatológicas; Penman-Monteith FAO

DEDICATÓRIA

In memoriam de

Jaime,

Margarida,

Renê,

Edilton,

Manoel e

Silvio César.

Suas luzes me trouxeram até aqui e continuam a me guiar.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, pela dádiva da vida e por seus cuidados. Sua semente germinou e segue em busca da luz do sol.

Às famílias Moura e Assis, raízes que me definem, das quais me orgulho e vivo para propagar.

A família Rodrigues, minha primeira raiz petrolinense, a qual me deu forças para aclimatar, vegetar e florescer nas condições semiáridas.

Aos meus queridos amigos, plantas companheiras que sempre estiveram ao meu lado nesta jornada, mesmo em momentos de desequilíbrio ecológico.

Ao IF Sertão-PE, que me acolheu, nutriu e podou, guiando-me a alcançar maiores produtividades.

A todo o corpo docente do *Campus* Petrolina Zona Rural, por sua dedicação a um ensino público de qualidade. De forma especial, aos meus orientadores, abelhas que seguem polinizando o conhecimento no Sertão Pernambucano.

A todos os técnicos administrativos e funcionários terceirizados, agentes de controle biológico que se dedicam a manter a instituição harmônica, saudável e produtiva.

Aos meus colegas de alojamento, plantas de um mesmo talhão, com os quais compartilhei nutrientes, resistências e enfermidades.

Às instituições de fomento à pesquisa e extensão, pela concessão de recursos financeiros que permitem a resiliência do desenvolvimento acadêmico e científico mesmo em tempos de cólera.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para esta realização. A resiliência da caatinga não é definida pela adaptação de um único indivíduo, mas pelo esforço conjunto de todos os seus agentes. Sintropia.

EPÍGRAFE

“Ensinar não é transferir conhecimento,
mas criar as possibilidades para a sua
própria produção ou a sua construção.”

-Paulo Freire

"As leis da natureza são dadas, não nos cabe
criá-las ou modificá-las. Temos de agir de
forma benéfica para todos os participantes,
todos os atingidos, de modo a voltarmos a ser
considerados seres úteis e bem-vindos no
sistema."

-Ernst Gotsch

“Tudo depende da hora
Fruto, semente e flor
Mas o sonho de mudar o mundo
Ao menos muda o sonhador”

-Humberto Gessinger

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 1: Tela de abertura do SAE-ETo	31
Figura 2: Ambiente inicial de MENU do SAE-ETo.....	33
Figura 3: Ambiente do SAE-ETo que fornece o manual do usuário.....	34
Figura 4: Ambiente do SAE-ETo que fornece os dados complementares às equações.	35
Figura 5: Ambiente do SAE-ETo que permite a conversão de unidades.	35
Figura 6: Banco de dados nativo do SAE-ETo contendo as normais climatológicas do INMET.....	36
Figura 7: Dados ausentes para um determinado parâmetro, sendo apresentado o símbolo “-”.....	37
Figura 8: Dados complementares às normais, referentes às estações meteorológicas do INMET.....	37
Figura 9: Ambiente do SAE-ETo destinado à determinação dos dados de referência.	38
Figura 10: Dados de referência sendo apresentados em uma aba de aplicação equacional.....	38
Figura 11: Ambiente destinado à coleta de dados das normais climatológicas do INMET.....	39
Figura 12: Equações aplicadas pelo sistema para obtenção dos valores de radiação solar.....	40
Figura 13: Ambiente destinado à inserção de dados oriundos de estação meteorológica automática.....	40
Figura 14: Ambiente de aplicação do modelo de Penman-Monteith com destaque para os resultados.....	41
Figura 15: Ambiente do SAE-ETo destinado à aplicação simultânea dos modelos equacionais.....	44

Figura 16: Exemplo de situação em que ocorrem dados inexistentes, neste caso, para a cidade de Nova Friburgo-RJ.....	45
Figura 17: Resultados obtidos por diferentes modelos, neste caso, para a cidade de Petrolina-PE. Abaixo, destaque para o hiperlink de acesso ao ambiente de análise gráfica dos resultados.	46
Figura 18: Ambiente de análise gráfica vinculado à aplicação simultânea das equações.....	46
Figura 19: Gráfico gerado a partir dos resultados obtidos na aplicação simultânea das equações. Destaque para o comando de seleção que possibilita a alteração facilitada da estação utilizada.....	47
Figura 20: Gráficos de dispersão gerados para comparar cada modelo equacional ao de PM-FAO.	47
Figura 21: Gráficos de dispersão gerados para os modelos PM-FAO, KH e PT em função de modelo de PM-FAO para a cidade de Petrolina-PE, com destaque para as relações funcionais entre as variáveis e seus coeficientes de determinação.....	48
Figura 22: SAE-ETo sendo utilizado no programa WPS®.	51

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Artifícios do programa Excel® utilizados para o desenvolvimento do SAE-ETo.....	23
Tabela 2: Relação dos modelos de estimativa da ETo adotados no SAE-ETo.....	25
Tabela 3: Equações complementares utilizadas para determinar a ETo.	28
Tabela 4: Resultados obtidos na validação do sistema SAE-ETo, onde são apresentados os valores obtidos através deste, da execução manual dos cálculos e do sistema PROCAL_ETo (Sousa, 2012).	49
Tabela 5: Dados utilizados para validação do sistema.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviação	Significado
BC	Blaney-Criddle
BL	Benavides-Lopez
CA	Camargo
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
HA	Hargreaves
HM	Hargraves modificado
HN	Hamon
HS	Hargreaves-Samani
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IV	Ivanov
JH	Jensen-Haise
KH	Kharrufa
LI	Linache
MK	Makkink
NC	Normais climatológicas
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PE	Penman
PM-FAO	Penman-Monteith parametrizado pela FAO
PT	Priestley-Taylor
RS	Radiação Solar
SAE-ETo	Sistema de apoio ao estudo da evapotranspiração de referência
TCA	Tanque Classe A
TM	Thornthwaite modificado
TU	Turc
TW	Thornthwaite

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$a_s; b_s$	Coeficientes de localização de Angström-Prescott
c_b	Coeficiente regional de ajuste da equação de Blaney-Criddle
C_p	Calor específico do ar seco à pressão constante
c_r	Coeficiente c do método da radiação solar
d_r	Distância relativa inversa terra-sol
e	Base do logaritmo neperiano
$e^\circ (T_i)$	Pressão de saturação de vapor à dada temperatura
e_a	Pressão de vapor atual
E-EP	Evaporação total – Evaporímetro de Piche
e_s	Pressão de saturação de vapor
ET_p	Evapotranspiração potencial
Ev	Evaporação do tanque classe A
G	Fluxo de calor no solo
G_{sc}	Constante solar
$i; a$	Índices de calor de Thornthwaite
I	Insolação
$I\%$	Porcentagem de insolação diária em relação à insolação teórica anual
IT	Insolação total
ITd	Insolação total diária
J	Dia juliano
k	Coeficiente de localização de Hargreaves
K	Fator de ajuste de Camargo
k_p	Coeficiente do tanque classe A
N	Fotoperíodo
n	Nebulosidade
NDM	Número de dias no mês
P	Pressão atmosférica local
$p\%$	Porcentagem mensal de horas anuais de luz solar
PA	Precipitação acumulada
P-B	Pressão atmosférica ao nível do barômetro

Símbolo	Significado
P-M	Pressão atmosférica ao nível do mar
R _a	Radiação solar extraterrestre
R _n	Saldo de radiação à superfície
R _{nl}	Saldo de radiação de ondas longas
R _{ns}	Saldo de radiação solar de ondas curtas
R _s	Radiação solar global
R _{so}	Radiação solar em dias sem nuvens
T _i	Temperatura do ar
T _m	Temperatura média do ar
T _{max}	Temperatura máxima do ar
T _{m-BS}	Temperatura média compensada de bulbo seco
T _{m-BU}	Temperatura média compensada de bulbo úmido
T _{min}	Temperatura mínima do ar
T _o	Temperatura do ponto de orvalho
U ₂	Velocidade do vento à 2 metros de altura do solo
UR	Umidade relativa do ar
UR _{max}	Umidade relativa do ar máxima absoluta
UR _{min}	Umidade relativa do ar mínima absoluta
V _v	Velocidade do vento
w _p	Fator de ponderação de Priestley-Taylor
w _r	Fator de ponderação do método da radiação solar
Z	Altitude local
α	Albedo ou coeficiente de reflexão
á	Coeficiente do fator aerodinâmico de Priestley-Taylor
γ	Constante psicrométrica
Δ	Declinação da curva de pressão de saturação
δ	Declinação do sol
ε	Razão entre o peso molecular do vapor d'água pelo ar seco
λ	Calor latente de vaporização
σ	Constante solar de Stefan-Boltzmann
φ	Latitude
ω _s	Ângulo horário do nascer do sol

SÚMARIO

Página

RESUMO.....	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Evapotranspiração.....	15
2.2. Métodos de estimação da ETo	17
2.3. Padrões climatológicos normais	18
2.4. Softwares temáticos	20
3. OBJETIVOS.....	22
3.1. Objetivo Geral.....	22
3.2. Objetivos específicos.....	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. Ferramenta utilizada.....	23
4.2. Banco de dados utilizado	24
4.3. Modelos equacionais para estimação da ETo	25
4.4. Equações complementares	27
4.5. Validação de compatibilidade e dos resultados obtidos	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. Interface e escopo do sistema.....	31
5.1.1. Manual do usuário.....	34
5.1.2. Dados tabelados	34
5.1.3. Conversor de unidades	35
5.1.4. Banco de dados das normais climatológicas do INMET	35
5.1.5. Dados de referência para aplicação dos modelos equacionais	38
5.1.6. Coleta de dados da normal climatológica.....	39
5.1.7. Inserção de dados oriundos de estação meteorológica automática.....	40
5.2. Aplicação equacional.....	41
5.2.1. Aplicação individual dos modelos equacionais	41
5.2.1.1. Modelo de Penman-Monteith FAO 56.....	42
5.2.2. Aplicação simultânea dos modelos equacionais	44
5.3. Validação dos resultados obtidos	49
5.4. Compatibilidade do sistema.....	51
6. CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS.....	53
APÊNDICE	58
ANEXOS	63

1. INTRODUÇÃO

A água tem sido insumo de extrema importância na viabilidade da agricultura contemporânea, devido especialmente, a demanda crescente de alimentos, eventos climáticos extremos e ingerência de uso da mesma (GRASSI, 2001; IPCC, 2014).

Cenários futuros sugerem crises hídricas ainda maiores e possibilidade de colapso em diversas regiões do globo terrestre. Para minimizar estes efeitos necessita-se de racionalização de uso da água em todos os segmentos da sociedade (indústria, agricultura etc.) (BEZERRA *et al.*, 2010; TANAKA *et al.*, 2016).

Propostas de melhor aproveitamento da água em projetos agrícolas versam na estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c), a partir da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultura (K_c) (CARVALHO *et al.*, 2011). Thornthwaite (1948) propôs este termo (evapotranspiração) para representar os processos conjuntos de evaporação e de transpiração que ocorrem naturalmente numa superfície vegetada. Logo, a compreensão da ET_o é fundamental para o adequado dimensionamento de projetos e no manejo de irrigação (PEREIRA *et al.*, 1997).

Dada sua importância, a ET_o pode ser determinada de diferentes formas: direta, com a utilização de lisímetros (tanques inseridos no solo, cheios do mesmo solo do local e com uma determinada vegetação); ou de forma indireta, por meio de modelos físico-matemáticos de estimativa (ALVES SOBRINHO *et al.*, 2011). No entanto, para Ferraz *et al.* (2008), o uso da forma direta de determinação é limitado às instituições de ensino e pesquisa, tendo em vista os altos custos de aquisição e manutenção dos lisímetros, o que reforça o interesse em se obter tais resultados a partir de modelos equacionais.

Segundo Carvalho *et al.* (2015), a partir de resultados de inúmeros estudos conduzidos nas últimas décadas, a equação combinada de Penman-Monteith (PM), modificada por Allen *et al.* (1998) e recomendada pela FAO (*Food and Agriculture Organization*), é a que melhor representa os fatores físicos e fisiológicos que regem o processo da evapotranspiração. Contudo, para sua aplicação, são necessários dados

de radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, dificultando assim o seu emprego (PALARETTI *et al.*, 2014). Dessa maneira, é de grande valia a existência e emprego de métodos simplistas de estimativa de ETo (FANAYA JÚNIOR *et al.*, 2012).

Tais métodos são normalmente baseados em princípios físicos, equações empíricas ou ambos (LOBATO, 2019). E por assim serem, as suas performances podem diferir de um ambiente para outro, principalmente quando empregados em condições climáticas diferentes das quais foram concebidos (SENTELHAS *et al.*, 2010). Para estes casos, avaliações de acurácia e emprego de calibrações ou ajustes podem ser suficientes para potencialização de seus usos (OLIVEIRA *et al.*, 2001; TAGLIAFERRE *et al.*, 2010).

Na procura por solução para as dificuldades supracitadas, diversos trabalhos foram realizados visando o desenvolvimento de softwares que calculem a ETo e, ou, gerem cenários de calibração para diversos modelos (FOX Jr. *et al.*, 1992; SMITH, 1992; BOSS, 1996; ALLEN, 2000; SILVA *et al.*, 2005; MARIANO *et al.*, 2011; GONÇALVES *et al.*, 2012; FAO, 2012; SOUSA, 2012; SILVA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2018; VIANA e MEDEIROS, 2018). Contudo, frente aos diferentes objetivos de cada desenvolvedor (modelos, ambiente e linguagem de programação, etc.) os softwares desenvolvidos apresentam uma série de empecilhos de uso, a citar, idioma, complexidade de interface, demanda de dados de entrada, custo de licença, etc., e quase sempre omissão das equações e parâmetros usados. Estes fatos, segundo Sousa (2012), fazem do desenvolvimento de aplicativos uma recorrente busca por ferramentas mais completas e práticas.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema computacional com interface simplificada que comporte diretrizes para aplicação de diversos modelos de determinação da ETo, associados a um banco de dados nativo e ferramentas de comparação e calibração dos modelos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As atividades agrícolas demandam grandes quantidades de água e, sendo cada vez mais preocupante a sua escassez, esforços têm sido empregados no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a sua economia em todo o planeta (MAGALHÃES & CUNHA, 2012).

Para que a disponibilização de água aos cultivos seja feita de forma precisa, se faz necessária a compreensão do balanço hídrico no solo. Este, segundo Pereira *et al.* (2007), é a contabilização da variação de armazenamento de água no solo, num dado intervalo de tempo, representando o quantitativo de entrada, como a precipitação, a irrigação e o orvalho, e saída, como o escoamento superficial, a drenagem profunda e, principalmente, a evapotranspiração (ET).

2.1. Evapotranspiração

A ET é o componente mais impactante no balanço de água em ecossistemas agrícolas, além de ser um fator chave nos estudos de avaliação ambiental, no manejo de bacias hidrográficas e na estimativa da necessidade hídrica das culturas (RAZIEL & PEREIRA, 2013; CARVALHO *et al.*, 2015; TANAKA *et al.*, 2016). Para Alencar *et al.* (2011), pode-se definir de maneira simplificada a ET como um processo simultâneo e dinâmico de mudança do estado físico da água pela evaporação no solo e pela transpiração das plantas.

Os principais elementos climáticos que afetam a ET são: radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento (ALENCAR *et al.*, 2015). O tipo, a densidade, a variedade e a fase de crescimento da cultura também afetam a evapotranspiração, já que diferenças na resistência estomática, altura da cultura, rugosidade do dossel, refletividade e cobertura do solo pela vegetação resultam em diferentes valores de ET sob as mesmas condições climáticas e de solo (ALLEN *et al.*, 1998).

Carvalho *et al.* (2011), em uma revisão acerca do desenvolvimento conceitual e metodológico do tema, destacam que o termo amplamente conhecido por ET foi introduzido na década de 1940 por Thornthwaite & Wilm (1944). Nesta mesma década

foram publicadas duas importantes contribuições: “*An approach towards a rational classification of climate*”, de Warren Thornthwaite (1948) e “*Natural evaporation from open water, bare soils and grass*”, de Howard Penman (1948). Para Camargo & Camargo (2000), o trabalho de Thornthwaite pode ser classificado como uma pesquisa analítica, empírica e fundamentada na análise de fatos, enquanto o trabalho desenvolvido por Penman traz uma abordagem sintética, científica e firmada no conhecimento físico que rege o fenômeno. Anos depois, baseando-se na contribuição de Penman, Monteith propôs uma metodologia para estimativa direta da evapotranspiração da cultura (ET_c), denominada de Penman-Monteith. Ao fim da década de 1970, foi introduzido o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) por Doorenbos & Pruitt (1977), em substituição ao termo ET_p.

Contudo, para Carvalho *et al.* (2011), somente em 1990 houve de fato uma revolução conceitual e prática acerca da ET. Neste ano, no período de 28 a 31 de maio, a Food and Agriculture Organization (FAO) promoveu, em Roma, Itália, um encontro de especialistas na área, para atender a vários objetivos, dentre eles, o de analisar os conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET, com enfoque no estabelecimento de uma nova definição para a cultura de referência e o método que pudesse estimar a ET, para esta referência (PEREIRA *et al.* 1997).

A partir de então, a proposição conceitual da ET_p tornou-se, de fato, a ET_o. O método recomendado para sua estimativa foi o desenvolvido por Penman-Monteith, que, após parametrização, passou a denominar-se Penman-Monteith FAO (PM-FAO) (CARVALHO *et al.*, 2011). Os parâmetros adotados para a cultura hipotética de referência são os seguintes: resistência ao transporte de vapor d'água igual a 69 s.m⁻¹, coeficiente de reflexão (albedo) igual a 0,23 e altura padrão de 12 cm.

Assim, a partir dos valores de ET_o e com o uso de um coeficiente de cultivo (K_c), que varia de acordo com o tipo de cultura e seu estágio fenológico, é possível determinar a ET para qualquer espécie de interesse agrícola, sendo denominada de evapotranspiração da cultura (ET_c) (MOURA *et al.*, 2013). Esta, é definida como a transferência de vapor d'água para a atmosfera observada em uma determinada cultura, isenta de doenças e pragas, desenvolvendo-se sob ótimas condições de solo, incluindo umidade e fertilidade (FERNANDES *et al.*, 2010). Desta forma, a ET_o

tornasse uma ferramenta essencial ao correto dimensionamento e manejo de projetos agrícolas, contribuindo para à racionalização do uso de água pelo setor.

2.2. Métodos de estimação da ETo

Embora a ET, sob o aspecto conceitual, possa ser relativamente simples, quando se parte para os aspectos práticos de sua medição e estimativa, ainda nota-se a dificuldade e complexidade em apresentar uma solução que seja plenamente satisfatória e, portanto, continuam surgindo constantes estudos, visando dar uma resposta mais consistente ao problema (CARVALHO *et al.*, 2011).

Em contraposição a conceituação, a medição da ET é realizada por meio de técnicas e princípios físicos complexos (ALLEN *et al.*, 2011a). A forma direta de obtenção desta se dá pelo uso de equipamentos como os lisímetros de pesagem (CARVALHO *et al.*, 2015). No entanto, devido aos elevados custos de aquisição e manutenção destes equipamentos, seu emprego restringe-se basicamente às instituições de ensino e pesquisa (FERRAZ *et al.*, 2008).

Para uso prático, as equações ou modelos de estimativas da ETo são os mais empregados. Sendo o modelo de Penman-Monteith, modificada por Allen *et al.* (1998) (PM-FAO), o que melhor representa os fatores físicos e fisiológicos que regem o processo da ET e, de modo geral, que mais se aproxima dos valores obtidos com a lisimetria (JENSEN *et al.*, 1990; CARVALHO *et al.*, 2015).

O modelo de Penman-Monteith (PM-FAO), no entanto, apresenta o inconveniente de demandar muitos dados (variáveis meteorológicas) e grande quantidade de cálculos (ORTEGA, 2009; CONCEIÇÃO, 2010; SOUSA, 2012). Sua acurácia sofre significativa redução na falta ou imprecisão de dados (DROOGERS & ALLEN, 2002). Trajkovic & Kolakovic (2009) comentam que é comum, em países subdesenvolvidos, a inexistência de dados confiáveis de radiação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, e, portanto, o modelo de PM-FAO pode não se sobressair perante os demais modelos.

Considerando a grande variedade de modelos, há aqueles que têm uma boa base física e teórica, mas requerem vários parâmetros que não estão sempre disponíveis para uso, como os métodos de Priestley-Taylor (PT) e PM-FAO. Por outro lado, há aqueles mais simples, exigindo apenas a temperatura do ar (Holdridge e

Thornthwaite) e, adicionalmente, a latitude do lugar (Hargreaves & Samani) (VEGA & JARA 2009). Pereira *et al.* (2007) ainda destacam a variabilidade existente em função da escala de tempo requerida (horária, diária, decendial, quinzenal, mensal, entre outras). Métodos empíricos, como os de Thornthwaite e de Camargo, estimam bem a ETo na escala mensal, ao passo que os métodos que envolvem o saldo de radiação apresentam boas estimativas também na escala diária.

Os métodos empíricos são fundamentados em correlações estatísticas e geralmente são adequados para uma condição climática ou região específica (GAVILÁN *et al.*, 2006; AHMADI; FOOLADMAND, 2008; FOOLADMAND; AHMADI, 2009). Porém, por mais rigoroso que seja o procedimento que envolve a determinação da ET por um método empírico, este é limitado, necessitando de novas calibrações, quando a fórmula é aplicada em outro local distinto dos utilizados para definição da sua expressão original (FERRAZ *et al.*, 2008).

Para Tanaka *et al.* (2016), o desenvolvimento de calibrações locais e regionais, aliadas a avaliações de desempenho estatístico dos modelos, são importantes para avaliar os erros nas estimativas da ETo e nortear a escolha dos métodos que melhor se adequem à disponibilidade local de dados meteorológicos e ao nível de precisão exigido (TAGLIAFERRE *et al.*, 2010; CARVALHO *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2011; CARVALHO *et al.*, 2015).

Carvalho *et al.* (2011) concluem em seu trabalho que, quando há disponibilidade de dados para o método PM-FAO, este deve ser o recomendado como padrão, tendo em vista sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial. Caso contrário, deve-se averiguar um método que esteja de acordo com os dados disponíveis e sua adequação às condições climáticas do local.

2.3. Padrões climatológicos normais

Um artifício de estudo amplamente consolidado, afim de se compreender e caracterizar as condições climáticas de um determinado local, é o uso de padrões climatológicos normais, mais conhecidos como normais climatológicas (NC). Estas são definidas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” (OMM, 1989). Ou seja, as NC são o resultado

médio de uma longa série de dados meteorológicos observados em um dado local, que fornecem um panorama sobre ventos, temperatura, regime pluviométrico e uma série de outros elementos que marcam as suas condições, servindo de subsídio para diversos setores da sociedade em processos de gestão e tomadas de decisão, principalmente no que se refere às atividades agrícolas e pecuárias.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão responsável pela produção das NC no Brasil, enfatiza em sua última publicação que o uso das NC não se limita apenas à agroclimatologia, e sim ao complexo que envolve o bem-estar humano e animal (INMET, 2018). Isso se dá ao fato de que praticamente todas as atividades humanas são influenciáveis pelas condições climáticas, do setor produtivo à saúde pública, das atividades esportivas ao lazer, sendo as informações fornecidas pelas NC pertinentes a todas estas esferas, direta ou indiretamente.

Os dados mais recentes disponíveis à consulta pública são da NC referente ao período compreendido entre 01 de janeiro de 1981 a 31 de dezembro de 2010, correspondentes a 438 estações meteorológicas do país, em operação naquele período (INMET, 2018). Estes dados estão disponíveis no site da entidade, distribuídos sistematicamente na forma de tabelas em função dos diferentes elementos climáticos estudados, que segundo o próprio órgão:

[...] a organização dos dados em tabelas torna a consulta autoexplicativa, permitindo ao usuário a obtenção de informações diretas e derivadas, além de inúmeras possibilidades de construção de gráficos e tabelas para variáveis isoladas ou combinadas entre si, conduzindo a estudos climáticos com diferentes objetivos e configurações [...]
(INMET, 2018, p. 5)

Os dados de ET, por sua vez, são fornecidos pelas NC do INMET como valores de ET_p, obtidos de forma indireta através do método empírico proposto por Thornthwaite, que considera apenas os valores de temperatura média, ajustados através da insolação máxima diária (INMET, 2018). Este método, no entanto, tem aplicabilidade limitada, não apresentando valores consistentes para todas as regiões do território nacional (FERNANDES *et al.*, 2010).

Embora existam no Brasil duas grandes redes de observação meteorológica (INMET e o Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE), ainda há muitas regiões produtoras agrícolas

não cobertas pelas mesmas (MOURA et al., 2013). Ainda, devido a questões de equipamentos e software, esses dados são disponibilizados com variações de unidades ou de elementos (variáveis) meteorológicos em si. Dados como radiação solar global, nebulosidade e insolação, dentre outros, são facultados entre as estações. Essas variações dificultam o uso dos dados chegando a constituir-se de erros potenciais em interpretação e convenções (SOUSA, 2012).

2.4. Softwares temáticos

Diversos pesquisadores como Fox Jr. *et al.* (1992), Smith (1992), Boss (1996), Allen (2000), Silva *et al.* (2005), Mariano *et al.* (2011), Gonçalves *et al.* (2012), FAO (2012), Sousa (2012), Silva *et al.* (2016), Santos *et al.* (2018) e Viana & Medeiros (2018), desenvolveram sistemas computacionais que permitem o cálculo da ETo, visando tornar seu uso mais simples e prático. As limitações de cada software, todavia, tanto em termos de dados solicitados, idioma, plataforma ou ambiente de desenvolvimento, dados de saída, interação e praticidade, faz do desenvolvimento destes aplicativos, uma eterna busca por ferramentas cada vez mais completas e práticas (SOUSA, 2012).

Alguns sistemas foram desenvolvidos comportando apenas a equação de PM-FAO, como o Smai (MARIANO *et al.*, 2011) e o PROCAL-ETo (SOUSA, 2012). Outros, englobam outras equações, como o EToCalc (SANTOS *et al.*, 2018) que abrange, além da PM-FAO, as equações de Blaney-Criddle (BC), Hargreaves-Samani (HS), Camargo (CA), Linacre (LI), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Radiação Solar (RS) e Priestley-Taylor (PT), e o SEVAP (SILVA *et al.*, 2005), que comporta as equações de PM-FAO, Hargreaves (HA), Thornthwaite (TW), JH, LI, MK, PT e Tanque Classe A (TCA).

Quanto à linguagem de desenvolvimento há grande variabilidade. São observados trabalhos desenvolvidos em ambiente de planilha Excel® (SOUSA, 2012; SANTOS *et al.*, 2018), linguagem Lazarus® (SILVA *et al.*, 2016), linguagem C Sharp (GONÇALVES *et al.*, 2012; VIANA & MEDEIROS. 2018), linguagem Delphi® (SILVA *et al.*, 2005), ou linguagem diversa, como o SMAI (MARIANO *et al.*, 2011), que utiliza, além do C Sharp, as linguagens C++, *Object Pascal* e Java. Ainda são observados trabalhos como o EvapoWeb, desenvolvido pela Universidade Federal de Lavras

(UFLA-MG), que comporta de forma online (html) as diretrizes para o cálculo da ETo pelos métodos de PM-FAO, LI, HS, JH, MK e TCA.

Estes sistemas, entretanto, funcionam de forma “fechada”, realizando todos os cálculos de forma automática e informando ao usuário, muitas vezes, apenas o resultado da ETo. Alguns destes, não informam as diretrizes usadas no sistema para obtenção da ETo e de seus parâmetros, visto que existem diversas metodologias de aplicação equacional e os resultados podem variar consideravelmente em função disto. Além de que, os dados parciais gerados pelas equações complementares não são informados, fazendo com que o aproveitamento de toda a sua funcionalidade seja limitado. Estes fatos se devem, em parte, ao objetivo de cada desenvolvedor. A maior parte dos trabalhos destina-se a utilização de agropecuaristas e profissionais da área no manejo prático da irrigação, de forma a facilitar a sua rotina diária. Nesta situação, justifica-se o fornecimento direto dos dados finais (ETo).

Contudo, frente ao exposto acerca da complexidade do fenômeno (ALLEN *et al.*, 1998), a variabilidade espacial e temporal da eficiência dos modelos equacionais (FERRAZ *et al.*, 2008) e a ausência de bancos de dados completos (MOURA *et al.*, 2013), evidencia-se a necessidade de desenvolvimento de novas ferramentas que auxiliem a compreensão da ETo e do desempenho de diferentes equações de menor exigência paramétrica em regiões distintas, de forma a contribuir com a capacitação de profissionais habilitados a enfrentar esta problemática.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Desenvolver um sistema computacional que comporte as diretrizes necessárias para o estudo dos modelos de determinação da evapotranspiração de referência.

3.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema computacional que permita determinação da ETo através dos modelos de Benavides-Lopez, Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves, Hargreaves modificado, Hargreaves-Samani, Hamon, Ivanov (Romanenko), Jensen-Haise, Kharrufa, Linacre, Makkink, Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Radiação, Tanque classe A, Thornthwaite, Thornthwaite modificado e Turc.
- Desenvolver mecanismos que permitam a comparação dos valores gerados pelos modelos com saída em gráficos e análises de regressão;
- Desenvolver banco de dados que armazene e apresente as variáveis climatológicas da última normal climatológica do INMET para todo o território brasileiro;
- Desenvolver interface simplificada, em língua portuguesa, composta por abas e ferramentas que facilitem a manipulação do programa;
- Garantir a compatibilidade do sistema em plataformas de uso gratuito.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em ambiente virtual de programação e não apresenta funcionalidade especificada para nenhum local físico.

O sistema desenvolvido, acrônimo SAE-ETo, foi concebido com base no programa de planilhas eletrônicas Excel®, pertencente ao pacote Microsoft Office.

4.1. Ferramenta utilizada

Diferentes modelos equacionais foram incorporados a uma pasta de trabalho (arquivo .xls) do SAE-ETo que dispõe de diferentes planilhas/abas com funções distintas. Estas funções variam entre a aplicação direta dos modelos e fornecimento de ferramentas complementares.

As funções e ferramentas do programa Excel® utilizadas para automação do sistema são apresentadas na Tabela 1. Foi tomado o cuidado de concentrar a utilização de funções simples e generalistas, que estejam presentes em plataformas semelhantes ao Excel®, porém de acesso gratuito. Com isto, garante-se funcionalidade do sistema em diferentes condições de uso.

Tabela 1: Artifícios do programa Excel® utilizados para o desenvolvimento do SAE-ETo.

Grupo	Artifício	Descrição
Funções	SE	Especifica um teste lógico a ser executado.
	E	Retorna VERDADEIRO se todos os seus argumentos forem VERDADEIROS.
	OU	Retorna VERDADEIRO se um dos argumentos for VERDADEIRO.
	SEERRO	Retornará um valor especificado se uma fórmula for avaliada para um erro; do contrário, retornará o resultado da fórmula.
	SOMA	Retorna a soma dos valores em um conjunto de células.
	MÉDIA	Retorna a média dos argumentos.
	MÍNIMO	Retorna o valor mínimo em uma lista de argumentos.
	MÁXIMO	Retorna o valor máximo em uma lista de argumentos.
	ACOS	Retorna o arco cosseno de um número.
	EXP	Retorna e elevado à potência de um número especificado.
	RAIZ	Retorna uma raiz quadrada positiva.
	ABS	Retorna o valor absoluto de um número.

Continua...

Tabela 1: Artifícios do programa Excel® utilizados para o desenvolvimento do SAE-ETo.

Grupo	Artifício	Descrição
	TRUNCAR	Trunca um número para um inteiro.
	CONCATENAR	Une duas ou mais cadeias de caracteres de texto em uma cadeia de caracteres.
	CONVERTER	Converte um número de um sistema de medida em outro.
	RADIANOS	Converte graus em radianos.
	GRAUS	Converte radianos em graus.
	PI	Retorna o valor de pi.
	ÍNDICE	Retorna um valor ou a referência a um valor de dentro de uma tabela ou intervalo.
	CORRESP	Pesquisa um item em um intervalo de células e, em seguida, retorna a posição relativa desse item no intervalo.
Ferramentas	Hiperlinks	É um link a partir de um documento que quando clicado conduz a outra página do mesmo arquivo, de outros arquivos ou da web.
	Combobox/ Caixa de seleção	Exibe uma lista de valores que o usuário pode escolher.
	Filtros/classificações	O uso de filtros permite ocultar temporariamente parte dos dados em uma tabela. Logo, permite a seleção e ordenação de dados específicos dentro de um conjunto maior.
	Gráficos	Permitem a visualização gráfica de dados, facilitando a sua interpretação.
	Comentários	São informações adicionadas a uma célula específica. Um indicador aparece no canto das células que têm um comentário. Quando o cursor é passado sobre a célula, o comentário é exibido.
	Dicas de tela	Textos complementares vinculados à hiperlinks que explicitam a função do mesmo quando o cursor é passado sobre a célula.
Design	Formatação de células	Permite configurar a aparência das células quanto a cor, contorno, fonte, dimensões, entre outros.
	Bloquear células	Impede a alteração do conteúdo das células através de senha.
	Congelar painéis	Mantem um dado conjunto de células inicial sempre visível durante a apreciação da planilha.

Fonte: Adaptado de Microsoft Support (2019).

4.2. Banco de dados utilizado

O banco de dados do SAE-ETo comporta dados públicos do INMET para a última normal climatológica publicada, 1981 a 2010 (INMET, 2018).

Devido ao banco de dados do sistema ser baseado unicamente em normais climatológicas, e que estas já passaram por um rigoroso processo de tratamento pelo INMET, optou-se por não fazer um novo tratamento dos mesmos.

4.3. Modelos equacionais para estimação da ETo

O sistema foi parametrizado para realizar a estimação da ETo a partir de 20 modelos equacionais, desenvolvidos para ambientes com características climáticas distintas. Estes modelos foram selecionados de acordo com as suas citações na literatura, e de modo a englobar, dentro das suas possibilidades, toda a heterogeneidade climática do território nacional brasileiro.

Na Tabela 2 encontram-se apresentados os modelos com suas equações, coeficientes (quando houver), unidades de medida e respectivas referências bibliográficas.

Tabela 2: Relação dos modelos de estimativa da ETo adotados no SAE-ETo.

Método	Referência (original e/ou citação)	Nº
Benavides-Lopez	Benavides e Lopez (1970)	
Equação	$ET_o = 1,21 * 10 * \frac{(7,45 * T_m)}{(234,7 + T_m)} * [1 - (0,01 * UR)] + 0,21 * T_m - 2,3$	1
Blaney-Criddle	Blaney e Criddle (1950)	
Equação	$ET_o = \frac{c * p_{\%} * 0,457 * T_m + 8,13}{NDM}$	2
Camargo	Camargo (1971)	
Equação	$ET_o = 0,01 * R_a * T_m * K$	3
Coeficiente	$K = 1,00$ se $T_m \leq 23,5^{\circ}C$ $K = 1,05$ se $23,5^{\circ}C < T_m < 24,5^{\circ}C$ $K = 1,10$ se $24,6^{\circ}C < T_m < 25,5^{\circ}C$ $K = 1,15$ se $25,6^{\circ}C < T_m < 26,5^{\circ}C$ $K = 1,20$ se $26,6^{\circ}C < T_m < 27,5^{\circ}C$ $K = 1,30$ se $T_m > 27,5^{\circ}C$	3.1
Hargreaves	Hargreaves (1974)	
Equação	$ET_o = 0,408 * 0,0023 * (T_m + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * R_a$	4
Hargreaves modificado	Back (2008)	
Equação	$ET_o = \frac{R_a}{\lambda} * (1,8 * T_m + 32) * 0,0006 * \sqrt{(100 - UR)}$	5
Hargreaves-Samani	Hargreaves e Samani (1985); Garcia, <i>et al.</i> (2019)	
Equação	$ET_o = \frac{0,0023 * R_a * (T_m + 17,7) * \sqrt{(T_{max} - T_{min})}}{\lambda}$	6

Continua...

Tabela 2: Relação dos modelos de estimativa da ETo adotados no SAE-ETo.

Método	Referência (original e/ou citação)	Nº
Hamon	Hamon (1961)	
Equação	$ET_o = \left(\frac{N}{12}\right)^2 * \left(\frac{4,96 * e^{(0,62 * T_m)}}{100}\right) * 25,4$	7
Ivanov	Romanenko (1961)	
Equação	$ET_o = 0,006 \cdot (25 + T_m)^2 \cdot \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$	8
Jensen-Haise	Jensen e Hayse (1963)	
Equação	$ET_o = \frac{R_s \cdot (0,025 * T_m + 0,08)}{\lambda}$	9
Kharrufa	Kharrufa (1985)	
Equação	$ET_o = 0,43 * I_0 * T_m^{1,3}$	10
Linacre	Linacre (1977)	
Equação	$ET_o = \frac{700 * \frac{(T_m - 0,006 * Z)}{(100 - \phi)} + 15 * (T_m - T_o)}{(80 - T_m)}$	11
Makkink	Makkink (1957)	
Equação	$ET_o = \frac{R_s}{\lambda} * \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} + 0,12$	12
Penman	Penman (1948)	
Equação	$ET_o = \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} * (R_n - G) + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} * 2,7 * (1 + 0,864 * U_2) * (e_s - e_a)$	13
Penman-Monteith	Allen et al. (1998)	
Equação	$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T_m + 273} * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * U_2)}$	14
Priestley-Taylor	Priestley e Taylor (1972)	
Equação	$ET_o = \frac{\alpha * w_p * (R_n - G)}{\lambda}$	15
Coeficiente	$w_p = 0,407 \text{ se } 0^\circ\text{C} < T_m < 16^\circ\text{C}$ $w_p = (0,483 + 0,01 * T_m) \text{ se } 16,1^\circ\text{C} < T_m < 32^\circ\text{C}$	15.1
Radiação	Doorembos & Pruitt (1977); Doorembos & Kassam (1994)	
Equação	$ET_o = c * w_r * R_s$	16

Continua...

Tabela 2: Relação dos modelos de estimativa da ETo adotados no SAE-ETo.

Método	Referência (original e/ou citação)	Nº
Coeficiente	$w_r = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)}$	16.1
Tanque Classe A	Pereira et al. (1997)	17
Equação	$ET_o = Ev * Kp$	
Thornthwaite	Thornthwaite (1948)	
Equação	$ET_o = 16 * \left(10 * \frac{T_m}{i}\right)^a * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{1}{30}\right)$ <p style="text-align: center;"><i>Se $0^\circ C < T_m < 26,5^\circ C$:</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Se $T_m \geq 26,5^\circ C$:</i></p> $ET_o = (-415,85 + 32,24 * T_m - 0,43 * T_m^2) * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{1}{30}\right)$	18
Coeficientes	$i = \sum_{n=1}^{12} (0,2 * T_n)^{1,514}$ $a = 6,75 * 10^{-7} * i - 7,71 * 10^{-5} * i^2 + 1,7912 * 10^{-2} * i + 0,49239$	18.1
Thornthwaite modificado	Camargo et al. (1999)	19
Equação	$ET_o = 16 * \left\{10 * \frac{[0,36 * (3 * T_{max} - T_{min})]}{i}\right\}^a * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{1}{30}\right)$	
Turc	Turc (1961)	20
Equação	$ET_o = 0,013 * \frac{T_m}{(T_m + 15)} * (23,8846 * Rs + 50) * at$	
Coeficiente	$at = 1 \text{ se } UR \geq 50\%$ $at = \left(1 + \frac{50 - UR}{70}\right) \text{ se } UR < 50\%$	20.1

Em que: ETo – evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹); Tm – temperatura média (°C); Tmax – temperatura máxima (°C); Tmin – temperatura mínima (°C); To – temperatura do ponto de orvalho (°C); Tn – Temperatura do mês “n” (°C); es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão de vapor atual do ar (kPa); UR – umidade relativa do ar (%); λ – Calor latente de vaporização (MJ.m⁻²); γ – constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹); Δ - declinação da curva de pressão de saturação (kPa.°C⁻¹); G – fluxo de calor no solo (MJ.m⁻².dia⁻¹); U2 – velocidade do vento a 2,00 m de altura (m.s⁻¹) N – fotoperíodo (horas); φ - latitude local (graus); Z – altitude (m); Ra – radiação solar extraterrestre (MJ.m⁻².dia⁻¹); Rs – radiação solar global (MJ.m⁻².dia⁻¹); Rn – saldo de radiação à superfície (MJ.m⁻².dia⁻¹); á – coeficiente do fator aerodinâmico de Priestley-Taylor (%); e – base do logaritmo neperiano (2,7182818284590...); NDM – número de dias no mês; cb – Coeficiente regional de ajuste da equação de Blaney-Criddle; p% – porcentagem mensal de horas anuais de luz solar (%); K – Fator de ajuste de Camargo (adimensional); I% - Porcentagem de insolação máxima diária (N) em relação ao horário de insolação teórico (%); wp – Fator de ponderação de Priestley-Taylor (adimensional); wr – fator de ponderação do método da radiação solar; cr – Coeficiente c do método da radiação solar, tabelado (adimensional); Ev – evaporação do tanque classe A (mm.dia⁻¹); kp – coeficiente do tanque classe A, tabelado (adimensional); i , a - Índices de calor de Thornthwaite (adimensional); at – coeficiente de ajuste de Turc (adimensional);

4.4. Equações complementares

Para os parâmetros requeridos nos modelos que não se tratavam de variáveis meteorológicas passíveis de medição, foram aplicadas as equações da Tabela 3.

Tabela 3: Equações complementares utilizadas para determinar a ET_o.

Parâmetro	Unidade de saída	Nº
Temperatura média pelo método dos extremos	°C	
Equação	$T_m = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$	21
Calor latente de vaporização	MJ.mm ⁻¹	
Equação	$\lambda = 2,501 - (2,361 * 10^{-3}) * T_m$	22
Pressão atmosférica	kPa	
Equação	$P = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,0065 * Z}{293}\right)^{5,26}$	23
Pressão de saturação de vapor a uma temperatura específica	kPa	
Equação	$e^\circ(Ti) = 0,6108 * \exp\left[\frac{17,27 * Ti}{Ti + 237,3}\right]$	24
Constante psicrométrica do ar	kPa.°C ⁻¹	
Equação	$\gamma = \frac{C_p * P}{\varepsilon * \lambda}$	25
Declividade da curva de pressão de saturação	kPa.°C ⁻¹	
Equação	$\Delta = \frac{4098 * e^\circ(Tm)}{(Tm + 237,3)^2}$	26
Pressão de saturação de vapor	kPa	
Equação	$e_s = \frac{e^\circ(Tmax) + e^\circ(Tmin)}{2}$	27
Pressão de vapor atual do ar	kPa	
Equação	$e_a = e^\circ(Tm) * \frac{UR}{100}$	28
Dia juliano	dia do ano	
Equação	$J' = \left\{ \left[\text{inteiro} \left(\frac{275 * M}{9} - 30 + D \right) \right] - 2 \right\}$ $J = J' + 2$ quando M < 3	29*
Ajuste	$J = J' + 1$ quando M ≥ 3 para anos bissextos $J = J'$ quando M ≥ 3 para anos normais	29.1
Declinação do sol	radianos	
Equação	$\delta = 0,409 * \text{sen} \left(\frac{2 * \pi * J}{365} - 1,39 \right)$	30
Distância relativa inversa terra-sol	radianos	
Equação	$dr = 1 + 0,033 * \cos \left(\frac{2 * \pi * J}{365} \right)$	31
Ângulo horário do nascer do sol	radianos	
Equação	$\omega_s = \cos^{-1}[-tg(\phi) * tg(\delta)]$	32
Fotoperíodo	horas	
Equação	$N = \frac{24}{\pi} * \omega_s$	33

Continua...

Tabela 3: Equações complementares utilizadas para determinar a ET_o.

Parâmetro	Unidade de saída	Nº
Velocidade do vento a 2m de altura	m.s ⁻¹	
Equação	$U_2 = Vv * \frac{4,87}{\ln(67,8 * Z_v - 5,42)}$	34
Radiação solar extraterrestre	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	
Equação	$R_a = \frac{24*60}{\pi} * G_{sc} * dr * [\omega_s * \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) * \cos(\delta) * \text{sen}(\omega_s)]$	35
Radiação solar global	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	
Equação	$R_s = \left(a_s + b_s * \frac{I}{N} \right) * R_a$	36
Saldo de radiação de ondas curtas	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	
Equação	$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s$	37
Radiação solar em dias sem nuvens	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	
Equação	$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * Z) * R_a$ $R_{so} = (a_s + b_s) * R_a$	38
Saldo de radiação de ondas longas	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	
Equação	$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max} + 273,16)^4 + (T_{min} + 273,16)^4}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$	39
Saldo de radiação à superfície	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	
Equação	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$	40
Erro-percentageal	%	
Equação	$\exists \% = \frac{\text{Valor estimado} - \text{Valor real}}{\text{Valor real}} * 100$	41

Em que: **P** – pressão atmosférica local (kPa); **Z** – altitude (m); **Tm** – temperatura média (°C); **Tmax** – temperatura máxima (°C); **Tmin** – temperatura mínima (°C); **Ti** – temperatura, seja média, mínima ou máxima (°C); **e°(Tm)** – pressão de saturação de vapor a temperatura média (kPa); **e°(Tmax)** – pressão de saturação de vapor a temperatura máxima (kPa); **e°(Tmin)** – pressão de saturação de vapor a temperatura mínima (kPa); **e°(Ti)** – pressão de saturação de vapor a uma dada temperatura (kPa); **e_s** – pressão de saturação de vapor (kPa); **e_a** – pressão de vapor atual do ar (kPa); **UR** – umidade relativa do ar (%); **λ** – Calor latente de vaporização (MJ.m⁻²); **γ** – constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹); **Δ** - declinação da curva de pressão de saturação (kPa.°C⁻¹); **U₂** – velocidade do vento a 2,00 m de altura (m.s⁻¹); **Z_v** – altura de obtenção dos dados de velocidade do vento (m); **V_v** – velocidade do vento medida a uma dada altura do solo (Z_v) (m.s⁻¹); **J** – dia juliano; **J'** – dia juliano desajustado; **δ** – declinação do sol (radianos); **dr** – distância relativa inversa da terra ao sol (radianos); **ω_s** – ângulo de radiação do sol (radianos); **N** – fotoperíodo (horas); **φ** - latitude local (radianos); **I** – insolação; **a_s** e **b_s** – coeficientes que expressam a fração de radiação que chega a superfície da terra em dias nublados e sem nuvens, respectivamente (adimensional); **R_a** – radiação sola extraterrestre (MJ.m⁻².dia⁻¹); **R_s** – radiação solar global (MJ.m⁻².dia⁻¹); **R_{ns}** – saldo de radiação solar de ondas curtas (MJ.m⁻².dia⁻¹); **R_{so}** – radiação solar em dias sem nuvens (MJ.m⁻².dia⁻¹); **R_{nl}** – saldo de radiação de ondas longas (MJ.m⁻².dia⁻¹); **R_n** – saldo de radiação à superfície (MJ.m⁻².dia⁻¹); **α** – albedo/coeficiente de reflexão (%); **C_p** – calor específico do ar seco à pressão constante (1,013.10⁻³ MJ.m⁻².dia⁻¹); **ε** – razão entre o peso molecular do vapor d'água pelo ar seco (0,622); **π** – valor de pi (3,14159265); **G_{sc}** – constante solar (0,082 MJ.m⁻².dia⁻¹); **n** – nebulosidade (décimos); **σ** – Constante solar de Stefan-Boltzmann (4,903.10⁻⁹ MJ.K⁻⁴.m⁻².dia⁻¹)

*O termo “inteiro” nesta equação refere-se ao truncamento do número.

Fonte: Adaptado de Allen (1998) e FAO (2012).

4.5. Validação de compatibilidade e dos resultados obtidos

A compatibilidade do sistema foi avaliada através da sua execução no programa de uso gratuito WPS Office®, ver.11.2.0.9031, sendo observado o comportamento deste na execução de suas funções.

Para validação do sistema proposto usou-se do artifício de comparação de resultados com um sistema de objetivo similar, PROCAL_ETo (SOUSA, 2012), e cálculos manuais. No apêndice deste trabalho encontram-se discriminados os cálculos realizados para os dados referentes ao dia 15 de janeiro de 2019 na cidade de Petrolina-PE, usados na validação do SAE-ETo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Interface e escopo do sistema

O **SAE-ETo** – Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (**ETo**), auxilia a compreensão e aprofundamento deste fenômeno por apresentar de forma simplificada, os fatores e elementos climáticos que o influenciam, bem como diferentes modelos equacionais que o estimam e diferentes formas de avaliação dos resultados obtidos. Para tanto, foi apresentada numa interface simplificada, escrita em língua portuguesa, em pasta de trabalho de planilhas eletrônicas do Excel® (porém, compatível com softwares equivalentes de uso gratuito), na qual os diversos ambientes do sistema estão distribuídos em abas distintas e ligados através de células contendo hiperlinks, equivalentes a “botões” conferindo facilidade de navegação ao usuário. A exemplo, o botão iniciar, na tela de abertura do programa, Figura 1.

Figura 1: Tela de abertura do SAE-ETo



A disposição do conteúdo no SAE-ETo foi feita de forma vertical dentro de uma tela de 15,6 polegadas (tamanho do display em proporção padrão 16:9, com um zoom de 100%), dispensando a necessidade de uma rolagem horizontal. Assim, mesmo que o usuário utilize o sistema em dispositivos com tamanhos de tela distintos, através da

barra de zoom ele poderá promover o ajuste necessário e navegar na aba somente com o uso da rolagem vertical.

Todas as abas, com exceção à tela de abertura, apresentam em seu limite superior um painel congelado com um conjunto de linhas que atuam como cabeçalho, com os principais hiperlinks de navegação e informações do sistema. Também, foram inseridos comentários e explicações de cada ambiente, como o significado dos símbolos, unidades de medida, equações e processos lógicos do programa.

Optou-se por utilizar uma paleta de cores em tons escuros para o escopo do sistema, atribuindo cores na escala de cinza para menor cansaço visual, juntamente a tons verdes e vermelhos, que remetem à identidade visual dos Institutos Federais. As cores de preenchimento das células estão relacionadas às suas funções, sendo:

- Cor verde: para células contendo hiperlinks que direcionam o usuário aos diferentes ambientes do sistema. As fontes são apresentadas na cor preta ou equivalentes, afim de garantir o contraste necessário a uma leitura pouco desgastante.
- Cor branca: para células de entrada de dados. Nelas, o usuário deve fornecer as informações necessárias para que o sistema efetue as suas funções. São acompanhadas de legendas que demonstram a função da respectiva célula no ambiente e a unidade na qual os dados devem ser informados.
- Tons de cinza: para todas as demais células do sistema que não estão compreendidas nas funções acima citadas. Os tons mais escuros representam o plano de fundo do sistema. As células com contorno na cor branca apresentam as respostas geradas para as informações fornecidas e as demais células cumprem papel complementar.

A fonte adotada como padrão para todo o sistema foi a *Consolas*. Esta decisão se deu única e exclusivamente pelo fato de ser uma fonte universal, presente em todos os sistemas operacionais de dispositivos computacionais, evitando assim, a possibilidade de incompatibilidade do mesmo e garantindo uma maior liberdade de uso. As cores utilizadas variam dentro da escala de cinza, partindo-se do princípio da garantia de contraste. Logo, células com preenchimento em tons claros apresentam

fonte em tons escuros, e células com preenchimento em tons escuros apresentam tons claros de fonte.

No ambiente da tela inicial (Figura 2) são apresentadas as primeiras informações ao usuário quanto às formas de uso e manipulação, além de um conjunto de hiperlinks que direcionam o usuário às ferramentas do sistema, sendo:

- Manual do usuário;
- Dados tabelados;
- Conversor de unidades;
- Banco de dados das normais climatológicas do INMET;
- Dados de referência para aplicação dos modelos equacionais;
- Coleta de informações do banco de dados, e;
- Inserção de dados provenientes de estação meteorológica automática.

Figura 2: Ambiente inicial de MENU do SAE-ETo.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano | Campus Petrolina Zona Rural

Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)

Autor: João Rafael Moura de Assis
Técnico em agropecuária (IPPE)
Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)

Início | Manual do usuário | Dados de referência | Normais climatológicas | Dados complementares | Conversor

Olá! Seja bem-vindo ao SAE-ETo

Este é um sistema de planilhas que objetiva auxiliar o estudo dos modelos equacionais para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o).

A navegação no sistema pode ser feita através dos hiperlinks, que são apresentados como células de fundo verde.

Recomendamos ao usuário que ao utilizar o sistema pela primeira vez seja feita a leitura atenta do manual do usuário. Nele estão descritas a natureza do sistema, suas ferramentas e formas de manipulação.

Em caso de dúvidas, erros ou sugestões, favor, entrar em contato com o desenvolvedor do sistema.

João Rafael Moura de Assis
E-mail: sintropiaagro@gmail.com
Telefone: (081) 9 9504 4801

Ferramentas do sistema

Manual do usuário	Dados tabelados	Conversor de unidades
-------------------	-----------------	-----------------------

Banco de dados - Normais Climatológicas do INMET (1981-2010)

Coleta de dados da Normal Climatológica	Inserção de dados de estação meteorológica	Dados de referência para uso nas equações
---	--	---

Aplicação individual

Benavides-Lopez	Ivanov	Priestley-Taylor
Blaney-Criddle	Jensen-Haise	Radiação
Camargo	Kharrufa	Tanque Classe A
Hargreaves	Linache	Thorntwaite
Hargreaves modif.	Makkink	Thorntwaite modif.
Hargreaves-Samani	Penman	Turc
Hamon	Penman-Monteith (FAO 56)	

Aplicação simultânea

Aplicação simultânea dos modelos e análise gráfica
--

Abaixo destes, encontram-se os botões de acesso aos modelos equacionais para determinação da ET_o, bem como ao ambiente do sistema que permite a aplicação simultânea dos mesmos, sendo nomeados da seguinte forma:

- Benavides-Lopez;
- Blaney-Criddle;
- Camargo;
- Hargreaves;
- Hargreaves modificado;
- Hargreaves-Samani;
- Hamon;
- Ivanov;

- Jensen-Haise;
- Kharrufa;
- Linache;
- Makkink;
- Penman;
- Penman-Monteith (FAO 56);
- Priestley-Taylor;
- Radiação;
- Tanque Classe A;
- Thornthwaite;
- Thornthwaite modificado;
- Turc, e;
- Aplicação simultânea dos modelos e análise gráfica.

5.1.1. Manual do usuário

Nesta aba são fornecidas ao usuário as informações necessárias à compreensão completa acerca do funcionamento do sistema (Figura 3). Nela, é discorrido o funcionamento lógico de cada ambiente, além de uma descrição das equações utilizadas, sejam elas de estimação da ETo ou de parâmetros parciais necessários à mesma.

Figura 3: Ambiente do SAE-ETo que fornece o manual do usuário.

The screenshot shows the user manual interface for the SAE-ETo system. At the top, there is a header with the logo of the Instituto Federal de Pernambuco, the system name 'Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)', and the author's name 'João Rafael Moura de Assis'. Below the header is a navigation menu with options like 'Manual do usuário', 'Dados de referência', and 'Normais climatológicas'. The main content area is titled 'Manual do usuário do SAE-ETo' and contains introductory text. To the right, there is a QR code and a button labeled 'Arquivos complementares'. Below the text, there are five green buttons: 'Ferramentas', 'Dados de referência', 'Banco de dados', 'Aplicação individual dos modelos', and 'Aplicação simultânea dos modelos'. At the bottom, there is a section titled 'Cores de preenchimento das células e suas funções' with two buttons: 'Verde' and 'Branca'.

5.1.2. Dados tabelados

A aba dados tabelados reúne todas as tabelas de dados complementares necessárias a modelos específicos do programa. A exemplo, na Figura 4 encontra-se ilustrada a tabela de dados dos coeficientes de tanque (K_p), usados no modelo do tanque classe A.

Figura 4: Ambiente do SAE-ETo que fornece os dados complementares às equações.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural		Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)				Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)		
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor					
Dados complementares tabelados										
Tabela de valores de coeficiente do tanque (Kp) para determinações em tanque classe A								Valores do coeficiente de reflexão/albedo (α)		
Velocidade do vento (Vv)	Posição do tanque R ¹ (m)	Tanque circulado por grama			Tanque circulado por solo nu			Informar		
		Umidade	relativa	média	Umidade	relativa	média	Abacaxi		
		Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Água		
		< 40%	40-70%	>70%	< 40%	40-70%	>70%	Alface	0,22	
Fraca	1	0,55	0,65	0,75	0,70	0,80	0,85	Algodão	0,21	
	< 2 m/s	10	0,65	0,75	0,85	0,60	0,70	0,80	Areia seca	0,4
	<172,8 km/dia	100	0,71	0,80	0,85	0,55	0,65	0,75	Areia úmida	0,25
Moderada	1000	0,75	0,85	0,85	0,50	0,60	0,70	Arroz	0,12	
	2-5 m/s	10	0,50	0,60	0,65	0,65	0,75	0,80	Batata	0,2
	>172,8 km/dia	100	0,60	0,70	0,75	0,55	0,65	0,70	Feijão	0,24
<432,0 km/dia	1000	0,65	0,75	0,80	0,50	0,60	0,65	Floresta	0,125	
Forte	1	0,45	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70	Gramma	0,25	
	5-8 m/s	10	0,55	0,60	0,65	0,50	0,55	0,75	Milho	0,195
	>432,0 km/dia	100	0,60	0,65	0,75	0,45	0,50	0,60	Nuvens	0,7
<691,2 km/dia	1000	0,65	0,70	0,75	0,40	0,45	0,55	Solo cinza	0,15	
Muito forte	1	0,40	0,45	0,50	0,50	0,60	0,65	Solo claro seco	0,35	
	> 8 m/s	10	0,45	0,55	0,60	0,45	0,50	0,55	Solo escuro	0,1
									Sorgo	0,2
								Tomate	0,23	

5.1.3. Conversor de unidades

O diretório conversor de unidades (Figura 5) é destinado ao convertimento de unidades distintas às demandadas pelo sistema.

Figura 5: Ambiente do SAE-ETo que permite a conversão de unidades.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural		Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)				Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)	
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor				
<p>Clique aqui para acessar a fórmula, suas respectivas siglas e unidades</p> <p>Clique aqui para acessar os dados complementares da equação</p> <p>INSTRUÇÕES: Insira o valor e selecione a unidade a ser convertida, os resultados serão informados nos espaços abaixo</p>									
Temperatura 25 °C 25,000000 °C 77,000000 °F 298,150000 K		Pressão 10 atm 1013,25 kPa 10132,5 hPa 1013250,000000 Pa 10,000000 atm 7600,021002 mm Hg		Tempo 1 seg 1,000000 seg 0,016667 min 0,000278 horas 0,000012 dias 0,000000 anos		Distância 10 pol 10,000000 pol 0,833333 pe 254,000000 mm 25,400000 cm 0,254000 m 0,000254 km		Radiação 10 nós 10,000000 nós 5,144444 m/s 18520,000000 m/h 18,520000 km/h 11,507794 mph	
Direção do vento 2 ° Norte		Angulação 9 23 18 9,388333333 °		Angulação 9,388333333 ° 0,163857328 rad		Velocidade 1 seg 1,000000 seg			

5.1.4. Banco de dados das normais climatológicas do INMET

Para que as informações da última normal climatológica do INMET (1981-2010) fossem acessadas de forma facilitada pelo usuário, reuniram-se em uma única subplanilha (Figura 6) todas as informações meteorológicas pertinentes das 340 estações meteorológicas adotadas no programa (Anexo 1). Tais informações se resumem a:

- Temperatura máxima;
- Temperatura mínima;

- Temperatura média compensada - Bulbo seco;
- Temperatura média compensada - Bulbo úmido;
- Temperatura do ponto de orvalho;
- Umidade relativa do ar;
- Umidade relativa do ar máxima absoluta;
- Umidade relativa do ar mínima absoluta;
- Precipitação acumulada;
- Pressão atmosférica ao nível do barômetro;
- Pressão ao nível médio do mar;
- Intensidade do vento;
- Insolação total;
- Nebulosidade;
- Evaporação total evaporímetro Piche, e;
- Evapotranspiração potencia

Figura 6: Banco de dados nativo do SAE-ETo contendo as normais climatológicas do INMET.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural	Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)		Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônômica (IF Sertão-PE)																																					
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor																																					
<p>Normal Climatológica para o período de 1981 e 2010 - INMET</p> <p>Lista variáveis contidas no banco de dados, suas respectivas legendas e unidades</p> <table border="0"> <tr> <td>Tmax</td><td>Temperatura máxima, em °C</td> <td>P-B</td><td>Pressão atmosférica ao nível do barômetro, em hPa</td> </tr> <tr> <td>Tmin</td><td>Temperatura mínima, em °C</td> <td>P-M</td><td>Pressão ao nível médio do mar, em hPa</td> </tr> <tr> <td>Tm-BS</td><td>Temperatura média compensada - Bulbo seco, em °C</td> <td>Vv</td><td>Intensidade do vento, em m.s⁻¹</td> </tr> <tr> <td>Tm-BU</td><td>Temperatura média compensada - Bulbo úmido, em °C</td> <td>IT</td><td>Insolação total, em horas</td> </tr> <tr> <td>To</td><td>Temperatura do ponto de orvalho, em °C</td> <td>n</td><td>Nebulosidade, em décimos</td> </tr> <tr> <td>UR</td><td>Umidade relativa do ar, em %</td> <td>E-EP</td><td>Evaporação total Evaporímetro Piche, em mm</td> </tr> <tr> <td>URmax</td><td>Umidade relativa do ar máxima absoluta, em %</td> <td>ETp</td><td>Evapotranspiração potencial, em mm</td> </tr> <tr> <td>URmin</td><td>Umidade relativa do ar mínima absoluta, em %</td> <td></td><td></td> </tr> <tr> <td>PA</td><td>Precipitação acumulada, em mm</td> <td></td><td></td> </tr> </table> <p>Outros Dados complementares</p>							Tmax	Temperatura máxima, em °C	P-B	Pressão atmosférica ao nível do barômetro, em hPa	Tmin	Temperatura mínima, em °C	P-M	Pressão ao nível médio do mar, em hPa	Tm-BS	Temperatura média compensada - Bulbo seco, em °C	Vv	Intensidade do vento, em m.s ⁻¹	Tm-BU	Temperatura média compensada - Bulbo úmido, em °C	IT	Insolação total, em horas	To	Temperatura do ponto de orvalho, em °C	n	Nebulosidade, em décimos	UR	Umidade relativa do ar, em %	E-EP	Evaporação total Evaporímetro Piche, em mm	URmax	Umidade relativa do ar máxima absoluta, em %	ETp	Evapotranspiração potencial, em mm	URmin	Umidade relativa do ar mínima absoluta, em %			PA	Precipitação acumulada, em mm		
Tmax	Temperatura máxima, em °C	P-B	Pressão atmosférica ao nível do barômetro, em hPa																																							
Tmin	Temperatura mínima, em °C	P-M	Pressão ao nível médio do mar, em hPa																																							
Tm-BS	Temperatura média compensada - Bulbo seco, em °C	Vv	Intensidade do vento, em m.s ⁻¹																																							
Tm-BU	Temperatura média compensada - Bulbo úmido, em °C	IT	Insolação total, em horas																																							
To	Temperatura do ponto de orvalho, em °C	n	Nebulosidade, em décimos																																							
UR	Umidade relativa do ar, em %	E-EP	Evaporação total Evaporímetro Piche, em mm																																							
URmax	Umidade relativa do ar máxima absoluta, em %	ETp	Evapotranspiração potencial, em mm																																							
URmin	Umidade relativa do ar mínima absoluta, em %																																									
PA	Precipitação acumulada, em mm																																									
Estação	UF	Variável	Unidade	Janeir	Fevere	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembr	Outubr	Novemb	Dezemb	Anual																										
ACARAU	CE	E-EP	mm	153,5	107,8	76,2	65,3	89,2	106,5	158	207,1	227	239,4	224,5	210	1864,5																										
ACARAU	CE	ETp	mm	190,6	169,4	175,9	163,6	167,7	156,8	-	168,8	172,9	189	185,3	197,7	-																										
ACARAU	CE	IT	horas	202,7	164,5	151	153,3	203,7	237	262,1	291,4	289,5	304,9	288,7	266,2	2815																										
ACARAU	CE	n	décimos	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	-	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	-																										
ACARAU	CE	PA	mm	113,5	173,1	321,1	308,9	142,3	64,6	25,1	5,3	2,3	2,1	2,5	14,5	1175,3																										
ACARAU	CE	P-B	hPa	1008	1008,5	1008,3	1008,6	1009,3	1010,6	-	1010,6	1010,4	1009,2	1008,2	1008,2	-																										

Frente às dificuldades técnicas e estruturais inerentes a execução de um levantamento de dados deste porte, tanto espacial quanto temporal, é natural que se encontrem lacunas, em períodos mensais isolados ou de forma completa, para alguns elementos em determinadas estações. Assim, quando estes estão ausentes, é apresentado o símbolo “-” em sua lacuna (Figura 7). Quando a informação de um dado mês for ausente, para aquele parâmetro não será informado o valor anual.


Figura 7: Dados ausentes para um determinado parâmetro, sendo apresentado o símbolo “-”.

Menu		Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor
To	Temperatura do ponto de orvalho, em °C				n	Nebulosidade, em décimos
UR	Umidade relativa do ar, em %				E-EP	Evaporação total Evaporímetro Piche, em mm
URmax	Umidade relativa do ar máxima absoluta, em %				ETp	Evapotranspiração potencial, em mm
URmin	Umidade relativa do ar mínima absoluta, em %					
PA	Precipitação acumulada, em mm				Outros	Dados complementares

Estação	UF	Variável	Unidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agos	Set	Out	Nov	Dez	Anual
ACARAU	CE	E-EP	mm	153,5	107,8	76,2	65,3	89,2	106,5	158	207,1	227	239,4	224,5	210	1864,5
ACARAU	CE	ETp	mm	190,6	169,4	175,9	163,6	167,7	156,8	-	168,8	172,9	189	185,3	197,7	-
ACARAU	CE	IT	horas	202,7	164,5	151	153,3	203,7	237	262,1	291,4	289,5	304,9	288,7	266,2	2815
ACARAU	CE	n	décimos	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	-	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	-
ACARAU	CE	PA	mm	113,5	173,1	321,1	308,9	142,3	64,6	25,1	5,3	2,3	2,1	2,5	14,5	1175,3
ACARAU	CE	P-B	hPa	1008	1008,5	1008,3	1008,6	1009,3	1010,6	-	1010,6	1010,4	1009,2	1008,2	1008,2	-
ACARAU	CE	P-M	hPa	1010	1010,5	1010,3	1010,6	1011,3	1012,6	-	1012,6	1012,4	1011,2	1010,1	1010,2	-
ACARAU	CE	Tmax	°C	31,7	31,1	30,7	30,6	31,3	31,6	32,2	32,7	32,9	32,8	32,8	32,8	31,9
ACARAU	CE	Tm-BS	°C	27,5	27,3	26,8	26,7	26,9	26,6	-	27,2	27,7	27,8	27,9	28	-
ACARAU	CE	Tm-BU	°C	25,3	25,5	25,5	25,5	25,4	24,7	-	24	24,3	24,6	24,9	25	-
ACARAU	CE	Tmin	°C	23,4	23,4	23,3	23,3	23	22,3	21,9	22,4	23,1	23,3	23,3	23,6	23
ACARAU	CE	To	°C	24,3	24,6	24,8	25	24,8	23,8	-	22,5	22,9	23,2	23,5	23,7	-
ACARAU	CE	UR	%	81,6	83,9	87,8	89,1	87,7	84,4	-	74,3	76,3	76,8	76,2	77,6	-
ACARAU	CE	URmax	%	98,8	99	98	99	99,3	98	-	93	99	97,5	97	97	-
ACARAU	CE	URmin	%	64,5	67	66,5	4	69	53	-	59,5	59	53	59,8	61,3	-
ACARAU	CE	Vv	m.s ⁻¹	3,8	3,4	2,6	2,5	2,8	3,5	-	5,1	5,7	5,5	5,4	4,8	-

Adicionalmente, em uma aba anexa à esta (Figura 8), são apresentados dados complementares para as mesmas estações, como as datas de início e fim de operação, além de fatores climáticos necessários às equações, sendo latitude, longitude e altitude. Estas informações estão à disposição do usuário para consulta e também são utilizadas pelo sistema nas ferramentas de coleta de dados e para execução das equações de forma simultânea.

Figura 8: Dados complementares às normais, referentes às estações meteorológicas do INMET.

Menu		Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor		
 Normal Climatológica entre os anos de 1981 e 2010 - INMET Dados complementares das estações meteorológicas								
Nome da Estação	UF	Código	Latitude	Longitude	Atitude	Início Operação	Fim Operação	Situação
ACARAU	CE	82294	-2,88	-40,13	16,5	01/01/1923	18/03/2011	Desativada
AGUA BRANCA	AL	82989	-9,28	-37,90	605,34	05/05/1928		Desativada
AGUA CLARA	MS	83615	-20,43	-52,87	316,45	01/09/1971	08/12/2000	Desativada
AIMORES	MG	83595	-19,49	-41,08	82,74	01/06/1972	16/07/2014	Desativada
ALAGOINHAS	BA	83249	-12,15	-38,43	130,92	01/01/1931		Desativada
ALCOMAT	MT	83302	-14,25	-59,25	690	01/08/1986	01/05/1999	Desativada
ALEGRE	ES	83645	-20,76	-41,49	150	01/07/1975	01/09/1998	Desativada
ALFREDO CHAVES	ES	83043	-20,63	-40,73	110	01/12/1976	31/12/2006	Desativada
ALTAMIRA	PA	82353	-3,22	-52,22	74,04	24/04/1927		Desativada
ALTO DA BOA VIST	RJ	83007	-22,97	-43,28	347	01/06/1966		Desativada
ALTO LONGA (PILC	PI	82605	-5,20	-42,25	150	01/09/1973		Desativada
ALTO PARNAIBA	MA	82970	-9,10	-45,93	285,05	21/08/1976		Desativada
AMAPA	AP	82029	2,05	-50,80	10			Desativada
ANDRADINA	SP	83621	-20,92	-51,38	379	24/03/1976	31/03/1997	Desativada
ANGRA DOS REIS	RJ	83788	-23,02	-44,33	3	01/07/1913		Desativada
ANTONIO PRADO	RS	83917	-28,82	-51,28	700			Desativada
APODI	RN	82590	-5,62	-37,82	150	18/12/1962		Desativada
AQUIDAUANA	MS	83608	-20,47	-55,80	207,44	01/05/1976	22/12/2000	Desativada

Para que os dados sejam consultados e trabalhados de forma aberta pelo usuário, no início da lista encontram-se, sob os tópicos, ferramentas de filtro, onde é possível fazê-lo a partir das estações, estados, parâmetros ou períodos de tempo.

5.1.5. Dados de referência para aplicação dos modelos equacionais

Considerando a quantidade de dados utilizados e os números ambientes do sistema, desenvolveu-se uma faixa auxiliar de referência com informações dos principais dados utilizados na aplicação dos modelos. As informações contidas nesta faixa são determinadas em uma aba própria (Figura 9) e ficam disponíveis em todas as abas (Figura 10). Os dados são temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação, nebulosidade e evapotranspiração.

Figura 9: Ambiente do SAE-ETo destinado à determinação dos dados de referência.

Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)

Autor: João Rafael Moura de Assis
Técnico em agropecuária (IFPE)
Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)

Menu Manual do usuário Dados de referência Normais climatológicas Dados complementares Conversor

Dados de referência

Estes dados aparecerão em todas as abas equacionais para facilitar as suas aplicações

Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
28,00	33,30	23,30	54,00	2,90	96,83	39,34	0,60	7,95
°C	°C	°C	%	m.s ⁻¹	kPa	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	décimos	mm

Selecione aqui quais dados serão apresentados: → Normal climatológica

Inserção manual dos dados de referência

Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000	7,0000	8,0000	9,0000
°C	°C	°C	%	m.s ⁻¹	kPa	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	décimos	mm

Dados coletados na normal climatológica para a estação PETROLINA para o mês de JANEIRO

Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
28,00	33,30	23,30	54,00	2,9000	96,8300	39,3410	0,60	7,95
°C	°C	°C	%	m.s ⁻¹	kPa	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	décimos	mm

Coleta de dados da normal climatológica

Figura 10: Dados de referência sendo apresentados em uma aba de aplicação equacional.

Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)

Autor: João Rafael Moura de Assis
Técnico em agropecuária (IFPE)
Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)

Menu Manual do usuário Dados de referência Normais climatológicas Dados complementares Conversor

Equação de Priestley-Taylor

Clique aqui para acessar a fórmula, suas respectivas siglas e unidades
Clique aqui para acessar os dados complementares da equação

Dados de referência

Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
28,00	33,30	23,30	54,00	2,9000	96,8300	39,3410	0,60	7,95
°C	°C	°C	%	m.s ⁻¹	kPa	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	décimos	mm

Inserção de dados para aplicação das equações pelo sistema

Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Radiação	Evapotranspiração
28,00	33,30	23,30	54,00		7,95
°C	°C	°C	%	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	mm

Latitude: Graus 9 Minutos 23 Segundos Hemisfério Sul
Altitude: 370,46 m
Coef. de localização: a_s, b_s
Coeficiente de reflexão: Informar

Data: Dia 15 Mês 1 Ano 2015
ITd: 8,023 horas
Adotado: 0,25, 0,50
Adotado: 23, 0,23

O dado de evapotranspiração não é utilizado para estimação da ETo, visto que é também uma estimativa, porém, é utilizado de forma complementar para determinação do erro percentual (ϵ) (Equação 41) para o resultado obtido, utilizando-o como referência de valor exato.

A determinação destes valores pode ser feita das seguintes formas: manual, com a inserção dos dados na própria aba; normal climatológica, com a seleção dos dados para um dado período de tempo em uma estação específica, em aba anexa (coleta de dados da normal climatológica), e; estação meteorológica automática, através da inserção de dados provenientes de uma estação, quando estes forem disponíveis, em aba anexa (inserção de dados de estação meteorológica automática).

5.1.6. Coleta de dados da normal climatológica

Esta seção (Figura 11) foi desenvolvida para facilitar a coleta de dados a partir das NC, para uso na faixa de dados de referência. Para tal, dispõe de ferramentas de seleção que atuam como controles de busca e permitem a coleta de dados de uma estação específica para um certo período de tempo. Após a escolha do usuário o sistema retorna todos os dados disponíveis para aquela estação, permitindo inclusive a sua consulta isolada, sem necessariamente objetivar o uso da ferramenta de dados de referência.

Figura 11: Ambiente destinado à coleta de dados das normais climatológicas do INMET.

Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)
 Autor: João Rafael Moura de Assis
 Técnico em agronegócio (IFPE)
 Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)

Menu Manual do usuário **Dados de referência** Normais climatológicas Dados complementares Conversor

Coleta de dados da normal climatológica do INMET (1981-2010) ?

Dados coletados	Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
	28,00	33,30	23,30	54,00	2,9000	96,8300	39,3410	0,6	7,95
	°C	°C	°C	%	m.s-1	kPa	MJ.m ² .dia ⁻¹	décimos	mm

Selecione uma estação meteorológica: Estação meteorológica adotada: **PETROLINA**
 Selecione um período de tempo: Período de tempo adotado: **JANEIRO**

Nome da estação: PETROLINA Altitude: 370,46 m Latitude: -9,3833 ° Longitude: -40,483 °
 -0,1638 rad. -0,7066 rad.

Dados coletados da normal climatológica

Estação	UF	Variáveis	Unidade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual
PETROLINA	PE	Tmax	°C	33,3	33	32,6	32,2	31,4	30	29,7	30,7	32,7	34,1	34,2	33,9	32,3
PETROLINA	PE	Tmin	°C	23,3	23,3	23,4	23	22,1	20,6	20	20,1	21,1	22,5	23	23,5	22,2
PETROLINA	PE	Tm-BS	°C	28	27,8	27,5	27,2	26,3	24,9	24,4	25,1	26,7	28,4	28,6	28,4	26,9
PETROLINA	PE	Tm-BU	°C	21,6	21,9	22,1	21,8	21	20	19,2	19,1	19,7	20,2	21	21,4	20,8
PETROLINA	PE	To	°C	18,5	19	19,5	19,3	18,2	17,2	16,2	15,7	15,8	15,8	16,9	17,9	17,5
PETROLINA	PE	UR	%	54	57,6	59,9	60,1	58,5	60,2	58,3	53	47,4	43,8	47,3	51,4	54,3
PETROLINA	PE	URmax	%	94,8	90,8	93,5	92,8	89,3	87	80,8	81,8	80	89,8	94,5	88,5	94,8
PETROLINA	PE	URmin	%	29	35	35,5	35,3	35,8	40	36,5	34,8	25,8	23,3	27,5	33,8	23,3

Adicionalmente, visto que as normais climatológicas do INMET não fornecem os valores de radiação para as estações, nesta aba são aplicadas equações (30, 31, 32, 33, 35, e 36) que permitem a sua determinação através das informações existentes (Figura 12).

Figura 12: Equações aplicadas pelo sistema para obtenção dos valores de radiação solar.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural	Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETO)					Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)							
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor										
PETROLINA	PE PA	mm	91	90,7	114,1	44	12,6	5,5	4	1,4	2,7	10,6	52	54	482,6
PETROLINA	PE P-B	hPa	968,3	968,7	968,5	969,6	971,1	973	973,9	973,7	972	969,9	968,2	968,4	970,4
PETROLINA	PE P-M	hPa	1009,7	1010,2	1010,1	1011,2	1012,9	1015,2	1016,2	1015,8	1013,7	1011,3	1009,6	1009,9	1012,2
PETROLINA	PE Vv	m.s ⁻¹	2,9	2,9	2,7	3	3,3	3,6	3,7	3,8	3,7	3,4	3,1	3	3,3
PETROLINA	PE IT	horas	248,7	223,6	233,5	234,5	232,2	218,6	242,3	270,7	276,4	285,7	264,2	263,8	2994,2
PETROLINA	PE n	décimos	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
PETROLINA	PE E-EP	mm	280,1	233,4	217,5	216,8	228,7	228	262,9	308	345,4	387,8	344,1	314,2	3366,9
PETROLINA	PE ETP	mm	246,3	209,7	212,9	181,9	177,2	134,1	125,4	151,2	195	251,2	257,3	257,7	200

Seleção dos coeficientes a _s e b _s :		PADRÃO	Coeficientes adotados: a _s 0,25 b _s 0,5													
Valores calculados a partir de dados coletados da normal climatológica																
Estação	UF	Variáveis	Unidade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Annual
PETROLINA	PE	J	ad.	15,00	46,00	74,00	105,00	135,00	166,00	196,00	227,00	258,00	288,00	319,00	349,00	182,00
PETROLINA	PE	δ	rad.	-0,370	-0,230	-0,047	0,166	0,329	0,407	0,375	0,239	0,037	-0,169	-0,335	-0,407	0,403
PETROLINA	PE	dr	ad.	1,032	1,023	1,010	0,992	0,977	0,968	0,968	0,976	0,991	1,008	1,023	1,032	0,967
PETROLINA	PE	ws	rad.	1,635	1,610	1,579	1,543	1,514	1,500	1,506	1,531	1,565	1,599	1,628	1,642	1,500
PETROLINA	PE	N	horas	12,490	12,296	12,060	11,789	11,569	11,456	11,503	11,692	11,953	12,215	12,440	12,545	11,461
PETROLINA	PE	ITd	horas	8,023	7,986	7,532	7,817	7,490	7,287	7,816	8,732	9,213	9,216	8,807	8,510	8,203
PETROLINA	PE	Ra	MJ/m ² /dia	39,341	39,217	37,861	34,729	31,321	29,373	30,065	32,977	36,379	38,495	39,131	39,155	29,419
PETROLINA	PE	Rs	MJ/m ² /dia	22,470	22,539	21,289	20,196	17,969	16,685	17,730	20,558	23,115	24,145	23,634	23,069	17,883
PETROLINA	PE	ETp	mm	7,945	7,489	6,868	6,063	5,716	4,470	4,045	4,877	6,500	8,103	8,577	8,313	6,667

5.1.7. Inserção de dados oriundos de estação meteorológica automática

Nesta aba permite-se que o usuário insira dados provenientes de uma estação meteorológica automática (Figura 13), quando esta for presente, para que sejam utilizados nos cálculos.

Figura 13: Ambiente destinado à inserção de dados oriundos de estação meteorológica automática.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural	Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETO)					Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)							
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor										
Inserção de dados oriundos de estação meteorológica automática															
Dados inserido	Temp. média 26,86 °C	Temp. máxima 31,80 °C	Temp. mínima 21,50 °C	Umidade 61,04 %	Vel. do vento 1,7042 m.s ⁻¹	Pressão atmosf. 101,1498 kPa	Radiação 16,2465 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	Nebulosidade 5,5 décimos	Evapotranspiração 4,49 mm.dia ⁻¹						
Inserção de dados de estação meteorológica automática															
Hora	Temp. média °C	Temp. máxima °C	Temp. mínima °C	Umidade %	Vel. do vento m.s ⁻¹	Pressão atmosf. hPa	Radiação MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	Nebulosidade décimos	Evapotranspiração mm						
00:30	25,3	25,5	25	67,00	2,7	1012,1	0	3	0,00						
01:00	24,7	25,1	24,3	71,00	2,2	1011,6	0	4	0,08						
01:30	24,1	24,3	23,9	73,00	1,8	1011,3	0	6	0,00						
02:00	23,6	23,8	23,4	74,00	1,3	1011,2	0	7	0,05						
02:30	23,2	23,4	23	76,00	0,9	1011	0	4	0,00						
03:00	22,8	23	22,6	77,00	0,9	1010,9	0	3	0,03						
03:30	22,4	22,6	22,2	80,00	0,4	1011,2	0	2	0,00						
04:00	22,1	22,2	21,9	81,00	0	1011,2	0	4	0,03						
04:30	21,9	21,9	21,8	82,00	0	1011,6	0	8	0,00						
05:00	21,8	21,8	21,8	83,00	0,4	1011,8	0	7	0,03						
05:30	21,7	21,8	21,5	84,00	0,4	1012,1	0	8	0,00						
06:00	21,6	21,6	21,5	84,00	0,9	1012,4	0,39	5	0,00						
06:30	21,9	22,4	21,6	81,00	1,8	1012,7	2,62	4	0,00						

5.2. Aplicação equacional

Os ambientes de aplicação das equações são divididos em dois grupos distintos. O primeiro, apresenta individualmente cada modelo de estimação da ETo, juntamente à todas as equações parciais necessárias à sua utilização. O segundo grupo, compreendido por um conjunto de abas de atuação concatenada, apresenta a possibilidade de aplicação simultânea de diversos modelos equacionais. Ambas as situações são discutidas a seguir.

5.2.1. Aplicação individual dos modelos equacionais

As abas de aplicação individual seguem um mesmo layout geral (Figura 14) e comportam todas as diretrizes necessárias para utilização da equação em questão. Nelas, são apresentados hiperlinks de acesso a informações do referido modelo, tais como sua fórmula e dados complementares tabelados. Abaixo destes, encontram-se os dados de referência discutidos no item 5.1.5.

Figura 14: Ambiente de aplicação do modelo de Penman-Monteith com destaque para os resultados.

Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)
 Autor: João Rafael Moura de Assis
 Técnico em agropecuária (IFPE)
 Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)

Equação de Penman-Monteith
 Clique aqui para acessar a fórmula, suas respectivas siglas e unidades
 Clique aqui para acessar os dados complementares da equação

Dados de referência								
Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
28,00	33,30	23,30	54,00	2,9000	96,8300	39,3410	0,60	7,95
°C	°C	°C	%	m.s ⁻¹	kPa	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	décimos	mm

Inserção de dados para aplicação das equações pelo sistema								
Temp. média	Temp. máxima	Temp. mínima	Umidade	Vel. do vento	Pressão atmosf.	Radiação	Nebulosidade	Evapotranspiração
28,00	33,30	23,30	54,00	2,9000	96,8300		0,6	7,95
°C	°C	°C	%	m.s ⁻¹	kPa	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	décimos	mm

Graus Minutos Segundos Hemisfério
 Latitude 9 23 0 Sul
 Altitude 370,46 m
 Coef. de localização a_s b_s
 Dia Mês Ano 15 1 2019
 ITd 8,02258 horas
 Adotado 0,25 0,50
 Coeficiente de reflexão Informar 23
 Informe em % 23
 Adotado 0,23

Resultados obtidos																	
Tm	28	°C	Δ (Tm)	0,2201	kPa/°C	N	12,4903	horas	U2	2,1691	m/s	Rs	22,4697	MJ/m ² /dia	Rn	13,5089	MJ/m ² /dia
e° (Tm)	3,7799	kPa	Y	0,0644	kPa/°C	dr	1,0319	rad	P	96,83	kPa	Rns	17,3017	MJ/m ² /dia			
e° (Tmáx)	5,1154	kPa	Es	3,9881	kPa	φ	-0,1638	rad	ωs	1,6350	rad	Rso	29,7972	MJ/m ² /dia	ETo	6,1032	mm/dia
e° (Tmín)	2,8608	kPa	Ea	2,0412	kPa	δ	-0,3702	rad	Ra	39,3410	MJ/m ² /dia	Rnl	3,7928	MJ/m ² /dia	ETo	23,23	%

Em seguida são solicitados os dados de entrada, que variam em função do modelo em questão. Algumas informações devem ser dadas pelo usuário nas células de entrada, outras são feitas com a utilização de comandos de seleção que estão diretamente associados com os respectivos dados. Ao lado de cada célula de entrada está descrita a unidade de grandeza na qual o dado deverá ser informado, havendo incompatibilidade do mesmo para dados informados em outras unidades que não a

solicitada. Ademais, quando existe um processo lógico sendo aplicado em função dos dados disponibilizados, este é explicitado através dos comentários na respectiva célula. Nestas mesmas situações é apresentado ao lado o valor adotado pelo sistema em função do teste lógico.

Após a introdução destes dados, o sistema aplicará automaticamente todas as diretrizes necessárias para obtenção da ETo. Os resultados de cada etapa são descritos na faixa de resultados obtidos (destaque na Figura 14 em forma de retângulo amarelo) e finalizam com o dado de ETo e erro percentual (\exists).

Para uma melhor compreensão do funcionamento destes ambientes no sistema, tomou-se como exemplo a aba destinada à aplicação do modelo PM-FAO (Figura 14), descrita a seguir.

5.2.1.1. Modelo de Penman-Monteith FAO 56

Os dados de entrada solicitados nesta aba são os seguintes: T_m ; T_{max} ; T_{min} ; UR; Vv; P; R_a ; n; ET; ϕ ; data; Z; Zv; G; ITd; a_s ; b_s ; e; α . A partir destas informações o sistema aplicará uma série de equações simultaneamente, descritas abaixo:

- T_m – Se o usuário informar este valor, o sistema o utilizará para aplicação nas equações subsequentes. Caso contrário o sistema aplicara a equação 21 para obtenção da T_m pelo método dos extremos.
- $e^o(T_i)$ – Com os valores de T_m , T_{max} e T_{min} será aplicada a equação 24 para obtenção dos valores de pressão de saturação de vapor a temperatura média, máxima e mínima, $e^o(T_m)$, $e^o(T_{max})$ e $e^o(T_{min})$ respectivamente.
- Δ – A partir do resultado obtido na equação 24 para $e^o(T_m)$ e a própria T_m é aplicada a equação 26 para obtenção da declividade da curva de pressão de saturação, Δ .
- P – Se este dado for informado, o sistema o utilizará nas equações subsequentes, senão, utilizará o valor de Z informado para aplicação da equação 23.
- Y – Com o valor de P é aplicada a equação 25 para obtenção da constante psicrométrica, Y.
- e_s – A partir dos resultados da equação 24 para T_{max} e T_{min} é aplicada a equação 27 para obtenção da pressão de saturação de vapor, e_s .

- e_a – com o valor informado de UR e o resultado da equação 24 para T_m é aplicada a equação 28 para obtenção da pressão de vapor atual do ar, e_a .
- J – O dia juliano é determinado em função da data informada, utilizando-se a equação 29 e posterior correção com a equação 29.1 em função do ano em questão, se bissexto ou não.
- δ – A partir do resultado obtido na equação 29.1 é aplicada a equação 30 para determinação da declinação do sol no referido dia, δ .
- d_r – Com o mesmo resultado da equação 29.1, aplica-se a equação 31 para obtenção da distância relativa inversa terra-sol, d_r .
- ϕ – As coordenadas locais informadas pelo usuário em graus ($^\circ$), minutos ($'$) e segundos ($''$) são inicialmente convertidas em graus e décimos para posterior conversão em radianos com a função RADIANOS do Excel. A partir do hemisfério é determinado se o valor será positivo (norte) ou negativo (sul).
- ω_s – A partir dos valores de ϕ e δ , obtido na equação 30, é aplicada a equação 32 para obtenção do ângulo horário do nascer do sol, ω_s .
- N – O fotoperíodo do referido dia é obtido através da equação 33, utilizando-se o resultado obtido na equação 32
- U_2 – A partir dos valores informados de V_v e Z_v é aplicada a equação 34 para obtenção da velocidade do vento a 2 metros de altura do solo, U_2 .
- R_a – Caso não tenha sido informada pelo usuário, para determinar a radiação solar extraterrestre o sistema utilizará a equação 35 com os valores de δ , d_r e ω_s obtidos das equações 30, 31 e 32, respectivamente, além da ϕ .
- a_s e b_s – Caso o usuário não informe os valores dos coeficientes de localização de Angström-Prescott, o sistema assumirá os valores padrão de 0,25 e 0,5 para a_s e b_s , respectivamente.
- R_s – Com o resultado obtido na equação 35 e os valores adotados de a_s e b_s é aplicada a equação 36 para obtenção da radiação solar global, R_s .
- R_{ns} – A partir do resultado da equação 36 e o valor informado para α é aplicada a equação 37 para obtenção do saldo de radiação de ondas curtas, R_{ns} .
- R_{so} – A equação 38 é aplicada a partir do resultado da equação 35 e o dado informado para Z, para determinação da radiação solar em dias sem nuvens. Caso o valor de Z não tenha sido informado pelo usuário, o sistema aplicará a

equação 38.1 que utiliza os valores assumidos para a_s e b_s para determinação da R_{so} .

- R_{nl} – Com os valores obtidos nas equações 28, 36 e 38 e os dados informados para T_{max} e T_{min} é aplicada a equação 39 para determinação do saldo de radiação de ondas longas, R_{nl} .
- R_n – A equação 40 é aplicada para determinar o saldo de radiação à superfície e para tal utiliza o resultado das equações 37 e 39.
- E_{To} – Por fim, com os valores assumidos para T_m e G e os resultados obtidos nas equações 25, 26, 27, 28, 34 e 40, aplica-se a equação 14 para obtenção do valor da E_{To} pelo método de Penman-Monteith.
- \exists – Com o resultado obtido na equação 14 e o valor informado de E_{To} é aplicada a equação 41 para determinação do erro-percentual.

5.2.2. Aplicação simultânea dos modelos equacionais

Este ambiente distingue-se dos descritos anteriormente em layout e funcionalidade (Figura 15). Seu objetivo é aplicar simultaneamente todos os modelos a partir das normais climatológicas contidas no banco de dados nativo do sistema.

Figura 15: Ambiente do SAE-ETo destinado à aplicação simultânea dos modelos equacionais.

Aplicação simultânea das equações a partir da normal climatológica do INMET (1981-2010)

Selecione uma estação meteorológica: Estação meteorológica adotada: PETROLINA

Dados complementares da estação

Nome da estação: PETROLINA Altitude: 370,46 m Latitude: -9,3833 ° Longitude: -40,483 °
 -0,1638 rad. -0,7066 rad.

Dados coletados da normal climatológica

Estação	UF	Variáveis	Unidade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual
PETROLINA	PE	Tmax	°C	33,3	33	32,6	32,2	31,4	30	29,7	30,7	32,7	34,1	34,2	33,9	32,3
PETROLINA	PE	Tmin	°C	23,3	23,3	23,4	23	22,1	20,6	20	20,1	21,1	22,5	23	23,5	22,2
PETROLINA	PE	Tm-B5	°C	28	27,8	27,5	27,2	26,3	24,9	24,4	25,1	26,7	28,4	28,6	28,4	26,9
PETROLINA	PE	Tm-BU	°C	21,6	21,9	22,1	21,8	21	20	19,2	19,1	19,7	20,2	21	21,4	20,8
PETROLINA	PE	To	°C	18,5	19	19,5	19,3	18,2	17,2	16,2	15,7	15,8	15,8	16,9	17,9	17,5
PETROLINA	PE	UR	%	54	57,6	59,9	60,1	58,5	60,2	58,3	53	47,4	43,8	47,3	51,4	54,3

Inicialmente o usuário deve selecionar uma das estações meteorológicas. Com isto, o sistema retorna os dados disponíveis para estação em questão no banco de dados. São apresentados os valores mensais e anual. Quando um dos dados for ausente o sistema retornará "-". Quando não houver dados disponíveis para nenhum dos meses em um determinado parâmetro, o sistema retornará "Dados inexistentes"

(Figura 16). Caso algum dos dados ausentes for essencial à aplicação das equações posteriores, estas não serão devidamente executadas.

Figura 16: Exemplo de situação em que ocorrem dados inexistentes, neste caso, para a cidade de Nova Friburgo-RJ.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrobrás Zona Rural		Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)												Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)	
Menu		Manual do usuário		Dados de referência			Normais climatológicas			Dados complementares			Conversor				
Selecione uma estação meteorológica:				NOVA FRIBURGO								Estação meteorológica adotada: NOVA FRIBURGO					
Nome da estação: NOVA FRIBURGO				Altitude: 856,6 m				Latitude: -22,25 °				Longitude: -42,517 °					
								-0,3883 rad.				-0,7421 rad.					
Dados coletados da normal climatológica																	
Estação	UF	Variáveis	Unidade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual	
NOVA FRIBURGO	RJ	Tmax	°C	27,9	28,5	27	26,1	23,7	22,5	22,2	23,2	23,5	25	25,8	26,2	25,1	
NOVA FRIBURGO	RJ	Tmin	°C	17,8	17,7	17,5	16,1	13	10,6	9,9	10,8	12,9	14,9	16,2	17	14,5	
Dados inexistentes	-	Tm-BS	°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	Tm-BU	°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	To	°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	UR	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	URmax	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	URmin	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	PA	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	P-B	hPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	P-M	hPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	Vv	m.s ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	IT	horas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dados inexistentes	-	n	décimos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
NOVA FRIBURGO	RJ	E-EP	mm	76,2	75,1	70,7	65,1	59,6	54	63,2	75,1	67,3	68,7	68,4	69,7	813,1	
Dados inexistentes	-	ETp	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Posteriormente, o usuário deverá informar os valores de G e Z_v , além de selecionar os valores de a_s , b_s , α e λ . Com estas informações, o sistema aplicará uma série de equações e retornará os seguintes parâmetros: IT_d ; J ; $P-B$; Y ; $e^\circ(T_m)$; $e^\circ(T_{max})$; $e^\circ(T_{min})$; e_s ; e_a ; $\Delta(T_m)$; δ ; dr ; ω_s ; N ; U_2 ; λ ; R_a ; R_s ; R_{ns} ; R_{so} ; R_{ni} ; R_n , e ; ET_p . Para efeitos de cálculo, foi convencionado utilizar o décimo quinto (15º) dia de cada mês para sua representação. Em seguida o sistema determina os coeficientes especiais $p\%$, c , K , $l\%$, W , i e a para execução das equações de Blaney-Criddle, Camargo, Kharrufa, Priestley-Taylor e Thornthwaite, respectivamente.

Na sequência, com base nos resultados gerados o sistema faz a aplicação de todos os modelos em estudo para cada mês e valor anual, com exceção ao método do tanque classe A, visto suas particularidades.

No fim da página encontra-se um hiperlink de acesso a um ambiente anexo (Figura 17), que tem por finalidade proporcionar a análise gráfica dos resultados obtidos. Nesta aba (Figura 18), os dados apresentados estão vinculados à aba anterior e são passíveis de alteração através de um comando de seleção, que determina a estação meteorológica analisada. Logo, caso o usuário o utilize, fará a alteração automática dos resultados apresentados de forma simplificada.

Figura 17: Resultados obtidos por diferentes modelos, neste caso, para a cidade de Petrolina-PE. Abaixo, destaque para o hiperlink de acesso ao ambiente de análise gráfica dos resultados.

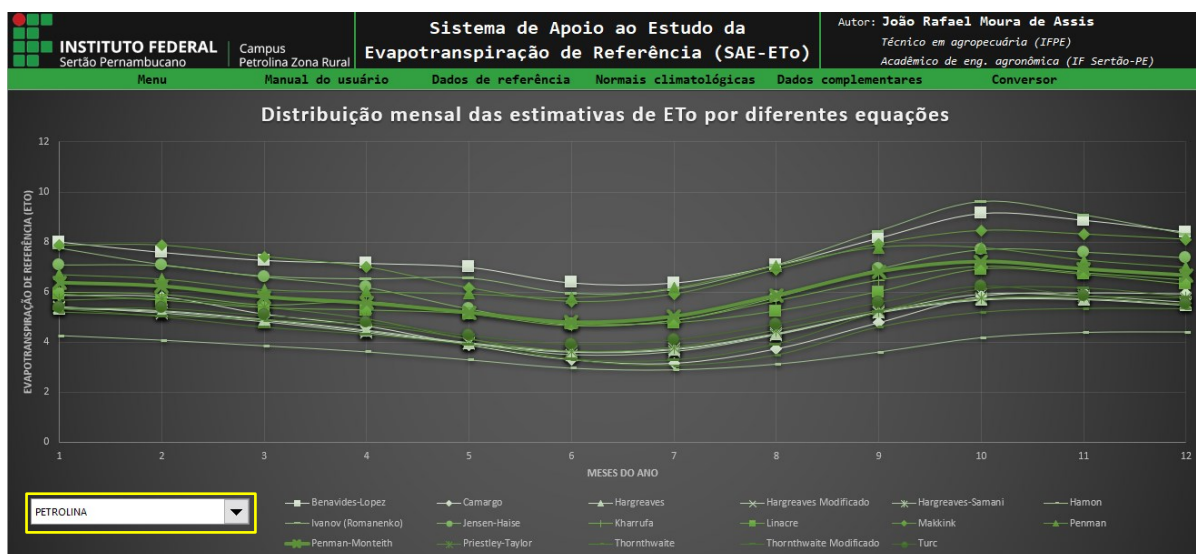
INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural	Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETO)							Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)						
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor											
Valores da Evapotranspiração de referência determinados por diferentes equações																
Método	Sigla	Variáveis	Unidade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual
Benavides-Lopez	BL	ETo	mm.dia ⁻¹	7,99975	7,58584	7,26628	7,14749	6,99268	6,37027	6,36397	7,0643	8,15021	9,13259	8,86621	8,39307	7,58516
Camargo	CA	ETo	mm.dia ⁻¹	5,88122	5,81968	5,12877	4,65179	3,88408	3,29426	3,15247	3,72886	4,78099	5,83916	5,97865	5,93933	3,89602
Hargreaves	HA	ETo	mm.dia ⁻¹	5,34686	5,22653	4,88168	4,44816	3,95273	3,60852	3,7081	4,32222	5,17404	5,68406	5,70211	5,47437	3,92181
Hargreaves Modificado	HM	ETo	mm.dia ⁻¹	5,4178	5,16144	4,8126	4,37298	3,93824	3,4973	3,61949	4,2876	5,19859	5,91307	5,847	5,59308	3,93696
Hargreaves-Samani	HS	ETo	mm.dia ⁻¹	5,38219	5,26004	4,91156	4,47408	3,9723	3,62148	3,71961	4,33858	5,20167	5,72384	5,74313	5,51267	3,94352
Hamon	HN	ETo	mm.dia ⁻¹	4,25987	4,07754	3,85012	3,6111	3,28905	2,95676	2,89044	3,11867	3,5994	4,1768	4,38557	4,4051	3,35049
Ivanov (Romanenko)	IV	ETo	mm.dia ⁻¹	7,75284	7,09226	6,63154	6,52327	6,55291	5,94614	6,10578	7,07823	8,43564	9,61546	9,0843	8,31515	7,38588
Jensen-Haise	JH	ETo	mm.dia ⁻¹	7,09356	7,06176	6,60739	6,19433	5,33864	4,69856	4,87957	5,79595	6,922	7,6983	7,60221	7,37687	5,42323
Kharrufa	KH	ETo	mm.dia ⁻¹	5,99258	5,90971	5,49607	5,62284	5,15748	4,67286	4,88194	5,65844	6,46958	7,01224	6,7621	6,47472	5,81648
Linacre	LI	ETo	mm.dia ⁻¹	5,91273	5,6644	5,3669	5,27163	5,13189	4,73001	4,76481	5,23503	6,00642	6,90933	6,69847	6,29887	5,62942
Makkink	MK	ETo	mm.dia ⁻¹	7,87211	7,87386	7,42307	7,01004	6,17948	5,63798	5,93104	6,9114	7,92257	8,45668	8,3155	8,1077	6,18518
Penman	PE	ETo	mm.dia ⁻¹	6,69925	6,52569	6,10498	6,01315	5,93574	5,78603	6,17083	7,04539	7,77938	7,76918	7,27735	6,98857	6,05834
Penman-Monteith	PM-FAO	ETo	mm.dia ⁻¹	6,37046	6,23191	5,80184	5,56103	5,18856	4,80235	5,03507	5,86949	6,8141	7,2086	6,91097	6,66202	5,30583
Priestley-Taylor	PT	ETo	mm.dia ⁻¹	5,68849	5,74782	5,4025	4,93354	4,11837	3,63361	3,78354	4,48045	5,27777	5,76243	5,83034	5,78879	3,91051
Thornthwaite	TW	ETo	mm.dia ⁻¹	5,19562	5,0585	4,8763	4,68098	4,12019	3,29948	3,0624	3,47386	4,59593	5,18973	5,3384	5,32968	4,46529
Thornthwaite Modificado	TM	ETo	mm.dia ⁻¹	5,34617	5,0271	4,60997	4,32115	3,91496	3,34288	3,30084	3,93544	5,22084	6,12858	6,18058	5,81808	4,45016
Turc	TU	ETo	mm.dia ⁻¹	5,3558	5,35628	5,06748	4,804	4,27083	3,9167	4,09929	4,72065	5,58433	6,23943	5,85839	5,50787	4,27789

Figura 18: Ambiente de análise gráfica vinculado à aplicação simultânea das equações.

INSTITUTO FEDERAL Sertão Pernambucano		Campus Petrolina Zona Rural	Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETO)							Autor: João Rafael Moura de Assis Técnico em agropecuária (IFPE) Acadêmico de eng. agrônoma (IF Sertão-PE)						
Menu	Manual do usuário	Dados de referência	Normais climatológicas	Dados complementares	Conversor											
Análise gráfica da aplicação simultânea das equações																
Selecione uma estação meteorológica: PETROLINA										Estação meteorológica adotada: PETROLINA						
Método	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual			
Benavides-Lopez	7,99975	7,58584	7,26628	7,14749	6,99268	6,37027	6,36397	7,0643	8,15021	9,13259	8,86621	8,39307	7,58516			
Camargo	5,88122	5,81968	5,12877	4,65179	3,88408	3,29426	3,15247	3,72886	4,78099	5,83916	5,97865	5,93933	3,89602			
Hargreaves	5,34686	5,22653	4,88168	4,44816	3,95273	3,60852	3,7081	4,32222	5,17404	5,68406	5,70211	5,47437	3,92181			
Hargreaves Modificado	5,4178	5,16144	4,8126	4,37298	3,93824	3,4973	3,61949	4,2876	5,19859	5,91307	5,847	5,59308	3,93696			
Hargreaves-Samani	5,38219	5,26004	4,91156	4,47408	3,9723	3,62148	3,71961	4,33858	5,20167	5,72384	5,74313	5,51267	3,94352			
Hamon	4,25987	4,07754	3,85012	3,6111	3,28905	2,95676	2,89044	3,11867	3,5994	4,1768	4,38557	4,4051	3,35049			
Ivanov (Romanenko)	7,75284	7,09226	6,63154	6,52327	6,55291	5,94614	6,10578	7,07823	8,43564	9,61546	9,0843	8,31515	7,38588			
Jensen-Haise	7,09356	7,06176	6,60739	6,19433	5,33864	4,69856	4,87957	5,79595	6,922	7,6983	7,60221	7,37687	5,42323			
Kharrufa	5,99258	5,90971	5,49607	5,62284	5,15748	4,67286	4,88194	5,65844	6,46958	7,01224	6,7621	6,47472	5,81648			
Linacre	5,91273	5,6644	5,3669	5,27163	5,13189	4,73001	4,76481	5,23503	6,00642	6,90933	6,69847	6,29887	5,62942			
Makkink	7,87211	7,87386	7,42307	7,01004	6,17948	5,63798	5,93104	6,9114	7,92257	8,45668	8,3155	8,1077	6,18518			
Penman	6,69925	6,52569	6,10498	6,01315	5,93574	5,78603	6,17083	7,04539	7,77938	7,76918	7,27735	6,98857	6,05834			
Penman-Monteith	6,37046	6,23191	5,80184	5,56103	5,18856	4,80235	5,03507	5,86949	6,8141	7,2086	6,91097	6,66202	5,30583			
Priestley-Taylor	5,68849	5,74782	5,4025	4,93354	4,11837	3,63361	3,78354	4,48045	5,27777	5,76243	5,83034	5,78879	3,91051			
Thornthwaite	5,19562	5,0585	4,8763	4,68098	4,12019	3,29948	3,0624	3,47386	4,59593	5,18973	5,3384	5,32968	4,46529			
Thornthwaite Modificado	5,34617	5,0271	4,60997	4,32115	3,91496	3,34288	3,30084	3,93544	5,22084	6,12858	6,18058	5,81808	4,45016			
Turc	5,3558	5,35628	5,06748	4,804	4,27083	3,9167	4,09929	4,72065	5,58433	6,23943	5,85839	5,50787	4,27789			

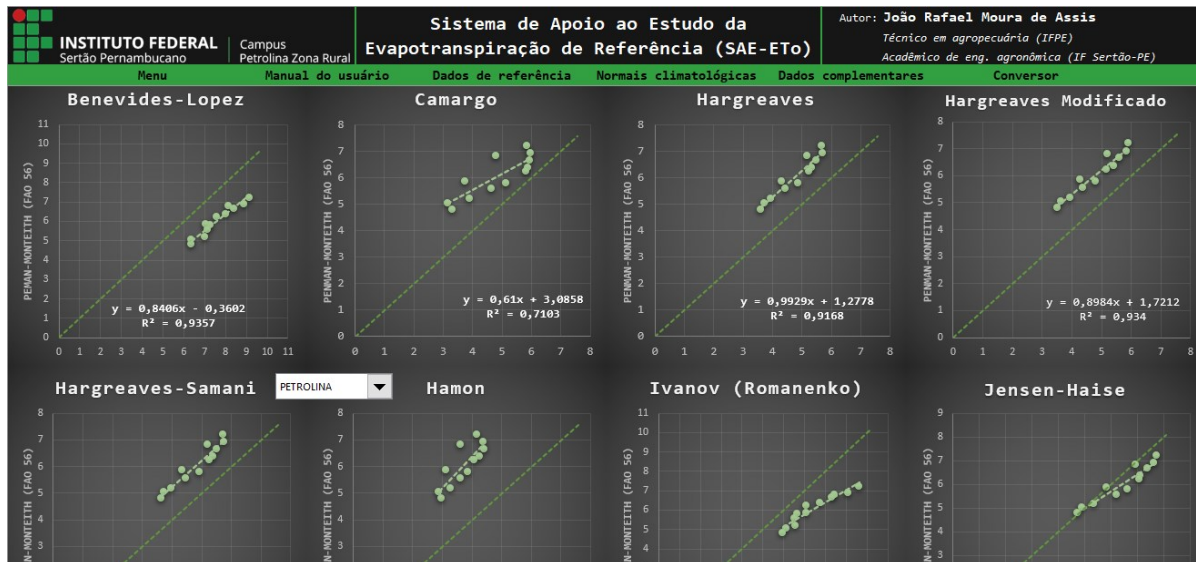
O primeiro gráfico apresentado engloba todos os modelos na forma de linhas, estas sendo distinguidas em função de uma escala de cores monocromática verde e indicadores distintos (Figura 19). É possível utilizar a função de filtro do gráfico para escolher quais modelos são apresentados, facilitando estudos isolados e comparações. O modelo de referência, PM-FAO, apresenta uma linha com maior espessura em relação às demais.

Figura 19: Gráfico gerado a partir dos resultados obtidos na aplicação simultânea das equações. Destaque para o comando de seleção que possibilita a alteração facilitada da estação utilizada.



Os demais gráficos apresentados são de dispersão e tem como objetivo comparar isoladamente cada modelo ao método de PM-FAO (Figuras 20 e 21).

Figura 20: Gráficos de dispersão gerados para comparar cada modelo equacional ao de PM-FAO.



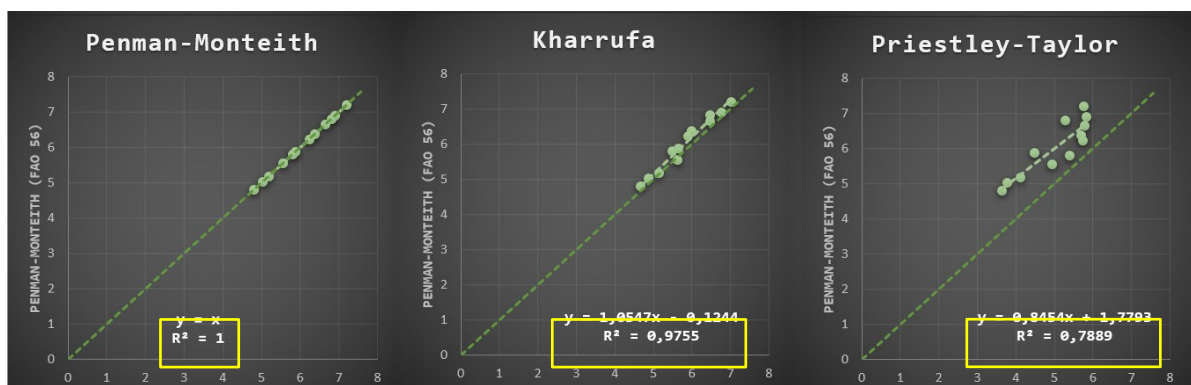
Nestes, é aplicado um modelo de regressão linear simples, sendo os dados gerados pelo método de referência (PM-FAO) relacionados ao eixo Y e o método a ser comparado relacionado ao eixo X. A maior linha, diagonalmente centralizada, representa a reta formada pelos dados do modelo de referência. A segunda linha de tendência, menor e de posição variável, é formada em função dos resultados gerados pelo modelo em comparação, representados pelos pontos dispersos no gráfico.

Na área de plotagem de cada gráfico é exibido um quadro contendo a relação funcional entre as duas variáveis (Figura 21), sendo apresentada a função da reta, $Y = aX + b$, que correlaciona o método comparado (X) ao método de referência (Y), em que o símbolo “a” representa o coeficiente angular da reta e o símbolo “b” representa a constante de ajuste gerada entre estas. Logo, para um particular valor da variável X, a função indica o valor da variável Y.

Adicionalmente, dentro do mesmo quadro, é apresentado abaixo da função da reta o valor do coeficiente de determinação (R^2). Este, é a medida de ajustamento da regressão linear em relação aos valores observados, variando entre 0 e 1. Seu objetivo é indicar o quanto a regressão gerada consegue explicar os dados utilizados para sua composição. Assim, quanto maior for a proximidade do valor do R^2 a 1, mais ajustada será a regressão. Na Figura 21, onde o método de PM-FAO é comparado a ele mesmo, a relação resultante é $Y=X$ e $R^2=1$. Já com relação à calibração em si, regressões com coeficientes angulares próximos de 1 representam o grupo de modelos que mais se aproximam do modelo de referência, salvo raros casos, valores acima da unidade significam que os modelos inicialmente subestimam a ETo e a regressão gerada tende a elevar o valor da informação para se equiparar ao dados de referência (ETo de PM-FAO).

Com esta análise é possível compreender o princípio da calibração de equações para diferentes ambientes, em função de um método de referência, realizadas, é claro, a partir de uma longa série de dados locais em trabalhos aplicados. Na Figura 21 são apresentados os gráficos dos modelos de PM-FAO, KH e PT, respectivamente, todos relacionados aos dados da cidade de Petrolina-PE. Observasse, por exemplo, que apesar do método de KH ter uma menor exigência paramétrica, este apresentou um melhor desempenho quando comparado ao método de PT, de maior exigência paramétrica. Logo, é possível afirmar que, sob esta perspectiva, justifica-se seu uso para as condições locais quando houver limitação na disponibilidade de dados. O caso do coeficiente angular para a regressão de calibração de PT ser inferior à 1 e a regressão apresentar-se acima da linha diagonal é um dos raros casos em que isso ocorre.

Figura 21: Gráficos de dispersão gerados para os modelos PM-FAO, KH e PT em função de modelo de PM-FAO para a cidade de Petrolina-PE, com destaque para as relações funcionais entre as variáveis e seus coeficientes de determinação.



5.3. Validação dos resultados obtidos

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados gerados na validação do sistema, onde se utilizou a execução manual dos cálculos (Apêndice 1) e a aplicação no software PROCAL-ET_o (Sousa, 2012), equivalente ao SAE-ET_o no que se refere à equação de PM-FAO. Os campos com "--" representam que estes não são executados pelo programa ou não são disponibilizados ao usuário.

Tabela 4: Resultados obtidos na validação do sistema SAE-ET_o, onde são apresentados os valores obtidos através deste, da execução manual dos cálculos e do sistema PROCAL_ET_o (Sousa, 2012).

Cálculo	Equação	Resultados obtidos		
		Execução manual	SAE-ET _o	PROCAL_ET _o
ET _o BL	1	7,999747 mm.dia ⁻¹	7,999747 mm.dia ⁻¹	--
ET _o BC	2	4,927634 mm.dia ⁻¹	4,927634 mm.dia ⁻¹	--
ET _o CA	3	5,844951 mm.dia ⁻¹	5,844951 mm.dia ⁻¹	--
ET _o HA	4	5,346863 mm.dia ⁻¹	5,346863 mm.dia ⁻¹	--
ET _o HM	5	5,384395 mm.dia ⁻¹	5,384395 mm.dia ⁻¹	--
ET _o HS	6	5,337323 mm.dia ⁻¹	5,337324 mm.dia ⁻¹	--
ET _o HN	7	4,259869 mm.dia ⁻¹	4,259869 mm.dia ⁻¹	--
ET _o IV	8	7,752840 mm.dia ⁻¹	7,752840 mm.dia ⁻¹	--
ET _o JH	9	7,153625 mm.dia ⁻¹	7,153626 mm.dia ⁻¹	--
ET _o KH	10	5,992582 mm.dia ⁻¹	5,992580 mm.dia ⁻¹	--
ET _o LI	11	5,912727 mm.dia ⁻¹	5,912726 mm.dia ⁻¹	--
ET _o MK	12	7,215954 mm.dia ⁻¹	7,215959 mm.dia ⁻¹	--
ET _o PE	13	6,475736 mm.dia ⁻¹	6,475725 mm.dia ⁻¹	--
ET _o PM-FAO	14	6,103241 mm.dia ⁻¹	6,103241 mm.dia ⁻¹	6,10 mm.dia ⁻¹
ET _o PT	15	5,300886 mm.dia ⁻¹	5,300886 mm.dia ⁻¹	--
ET _o RS	16	7,195300 mm.dia ⁻¹	7,195302 mm.dia ⁻¹	--
ET _o TW	18	5,195616 mm.dia ⁻¹	5,195616 mm.dia ⁻¹	--
ET _o TM	19	5,346174 mm.dia ⁻¹	5,346175 mm.dia ⁻¹	--
ET _o TU	20	4,966317 mm.dia ⁻¹	4,966317 mm.dia ⁻¹	--
T _m ext.	21	28,3 °C	28,3 °C	--
λ	22	2,434892 MJ.mm ⁻¹	2,434892 MJ.mm ⁻¹	--

Continua...

Tabela 4: Resultados obtidos na validação do sistema SAE-ETo, onde são apresentados os valores obtidos através deste, da execução manual dos cálculos e do sistema PROCAL_ETo (Sousa, 2012).

Cálculo	Equação	Resultados obtidos		
		Execução manual	SAE-ETo	PROCAL_ETo
P	23	96,996901 kPa	96,996901 kPa	--
e°(Tm)	24	3,779932 kPa	3,779930 kPa	--
e°(Tmax)	24	5,115413 kPa	5,115413 kPa	--
e°(Tmin)	24	2,860821 kPa	2,860821 kPa	--
γ	25	0,064367 kPa.°C ⁻¹	0,064478 kPa.°C ⁻¹	--
Δ	26	0,220080 kPa.°C ⁻¹	0,220080 kPa.°C ⁻¹	0,2201 kPa.°C ⁻¹
e _s	27	3,988117 kPa	3,988117 kPa	--
e _a	28	2,041163 kPa	2,041162 kPa	--
J	29	15° dia do ano	15° dia do ano	--
δ	30	-0,370216 rad.	-0,370216 rad.	-37,02 rad.
dr	31	1,031906 rad.	1,031906 rad.	--
ω_s	32	1,634976 rad.	1,634976 rad.	--
N	33	12,490296 horas	12,490295 horas	12,49 horas
U ₂	34	2,169058 m.s ⁻¹	2,169058 m.s ⁻¹	--
R _a	35	39,341018 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	39,341019 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	--
R _s	36	22,469721 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	22,469724 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	22,47 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹
R _{ns}	37	17,301685 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	17,301687 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	--
R _{so}	38	29,797248 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	29,797250 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	--
R _{nl}	39	3,792802 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	3,792803 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	--
R _n	40	13,508883 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	13,508884 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	13,51 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹

Em que: **ETo BL** – evapotranspiração de referência pelo método de Benavides-Lopez; **ETo BC** – evapotranspiração de referência pelo método de Blaney-Criddle; **ETo CA** – evapotranspiração de referência pelo método de Camargo; **ETo HA** – evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves; **ETo HM** – evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves modificado; **ETo HS** – evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves-Samani; **ETo HN** – evapotranspiração de referência pelo método de Hamon; **ETo IV** – evapotranspiração de referência pelo método de Ivanov (Romanenko); **ETo JH** – evapotranspiração de referência pelo método de Jensen-Haise; **ETo KH** – evapotranspiração de referência pelo método de Kharrufa; **ETo LI** – evapotranspiração de referência pelo método de Linacre; **ETo MK** – evapotranspiração de referência pelo método de Makkink; **ETo PE** – evapotranspiração de referência pelo método de Penman; **ETo PM-FAO** – evapotranspiração de referência pelo método de **ETo BL** – evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO; **ETo PT** – evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor; **ETo RS** – evapotranspiração de referência pelo método de Radiação Solar; **ETo TW** – evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite; **ETo TM** – evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite modificado; **ETo TU** – evapotranspiração de referência pelo método de Turc; **P** – pressão atmosférica local; **Tm ext** – temperatura média obtida pelo método dos extremos; **e°(Tm)** – pressão de saturação de vapor a temperatura média; **e°(Tmax)** – pressão de saturação de vapor a temperatura máxima; **e°(Tmin)** – pressão de saturação de vapor a temperatura mínima; **e_s** – pressão de saturação de vapor; **e_a** – pressão de vapor atual do ar; λ – Calor latente de vaporização; γ – constante psicrométrica; Δ – declinação da curva de pressão de saturação; **U₂** – velocidade do vento a 2,00 m de altura; δ – declinação do sol; **dr** – distância relativa inversa da terra ao sol; ω_s – ângulo de radiação do sol; **N** – fotoperíodo; **R_a** – radiação solar extraterrestre; **R_s** – radiação solar global; **R_{ns}** – saldo de radiação solar de ondas curtas; **R_{so}** – radiação solar em dias sem nuvens; **R_{nl}** – saldo de radiação de ondas longas, e; **R_n** – saldo de radiação à superfície; -- ; utilizado para demonstrar onde não se aplica.

Quando se comparam os resultados do SAE-ETo com a execução manual dos cálculos, em algumas situações são observadas variações na sexta casa decimal

após a vírgula, sendo as equações 6, 9, 10, 11, 12, 16, 19, 24, 28, 33, 35, 36, 37, 39 e 40. Maiores variações são observadas para as equações 13 e 38, onde os números diferiram na penúltima casa decimal após a vírgula. As variações observadas podem ser atribuídas ao fato de que o SAE-ETo, diferentemente da execução manual com a calculadora, executa as equações em sequência com seus valores íntegros, sem promover arredondamento.

Os valores apresentados pelo programa PROCAL_ETo, por sua vez, apresentam arredondamento para apenas duas casas decimais após a vírgula. Quando se promove um arredondamento equivalente aos dados gerados pelo SAE-ETo, estes são idênticos.

Os resultados observados demonstram uma boa consistência do sistema no que se refere à execução das equações.

5.4. Compatibilidade do sistema

Quando utilizado na plataforma WPS® o sistema se mostrou consistente e estável, com todas as suas funções sendo devidamente executadas. Não foram observadas variações na paleta de cores e fonte adotadas, sendo apresentado o mesmo layout original (Figura 22), comprovando sua compatibilidade.

Figura 22: SAE-ETo sendo utilizado no programa WPS®.

The screenshot shows the SAE-ETo software interface within WPS Office. The interface is titled 'Sistema de Apoio ao Estudo da Evapotranspiração de Referência (SAE-ETo)' and is authored by João Rafael Moura de Assis. It features a menu bar with options like 'Manual do usuário', 'Dados de referência', 'Normais climatológicas', 'Dados complementares', and 'Conversor'. The main area is titled 'Equação de Penman-Monteith' and contains several sections:

- Dados de referência:** A table with columns for Temp. média (28,00 °C), Temp. máxima (33,30 °C), Temp. mínima (23,30 °C), Unidade (%), Vel. do vento (2,9000 m.s⁻¹), Pressão atmosf. (96,8300 kPa), Radiação (39,3410 MJ.m⁻².dia⁻¹), Nebulosidade (0,60 décimos), and Evapotranspiração (7,95 mm).
- Inserção de dados para aplicação das equações pelo sistema:** A table with the same columns as the reference data, showing the same values.
- Localização:** Fields for Latitude (9° 23' 0" Sul), Longitude (15° 1' 15" W), Altitude (370,46 m), and Coef. de localização (0,25, 0,50).
- Resultados obtidos:** A table with columns for Tm (28 °C), Δ (Tm) (0,2201 kPa/°C), N (12,4903 horas), U2 (2,1691 m/s), Rs (22,4697 MJ/m²/dia), Rn (13,5089 MJ/m²/dia), e° (Tm) (3,7799 kPa), Y (0,0645 kPa/°C), dr (1,0319 rad), P (97,00 kPa), Rns (17,3017 MJ/m²/dia), e° (Tmáx) (5,1154 kPa), Es (3,9881 kPa), φ (-0,1638 rad), ws (1,6350 rad), Rso (29,7972 MJ/m²/dia), ETo (6,1839 mm/dia), e° (Tmín) (2,8608 kPa), Ea (2,0412 kPa), φ (-0,3702 rad), Ra (39,3410 MJ/m²/dia), Rn1 (3,7928 MJ/m²/dia), and ETo (23,22 %).

6. CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido:

- Constitui-se de uma ferramenta ímpar no campo da agroclimatologia, principalmente no que se refere ao estudo do fenômeno da ETo.
- Comporta as diretrizes e informações necessárias à aplicação de vinte diferentes modelos matemáticos de determinação da ETo, de forma individual e simultânea.
- Permite a análise dos resultados gerados na aplicação simultânea das metodologias a partir de gráficos e regressões matemáticas.
- Informa ao usuário os resultados de todas as equações executadas pelo sistema, permitindo estudos completos e derivados.
- É executável com o fornecimento de dados mínimos, apresentando processos lógicos com o uso de equações alternativas.
- Apresenta um banco de dados dinâmico com diversos elementos meteorológicos para todas as regiões do território brasileiro.
- Permite a entrada de dados distintos aos armazenados, bem como oriundos de estação meteorológica automática.
- Possui interface simples e de fácil interação, com ferramentas auxiliares, manual do usuário e comentários que orientam ao pleno uso do mesmo.
- Tem compatibilidade garantida para o programa de uso gratuito WPS®.
- Não necessita de instalação e é compatível com dispositivos de baixo desempenho computacional (hardware e software).

REFERÊNCIAS

- AHMADI, S.H.; FOOLADMAND, H.R. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. **Irrigation Science**, v.26, n. 4, p.303-312. 2008.
- ALENCAR, L. P. de; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Rev. Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.35, n.1, p. 39-50, jan./fev. 2015.
- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C. WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para três localidades no Norte de Minas Gerais. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 19, p. 437-449. Viçosa – MG, 2011.
- ALLEN R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G. **REF-ET**: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE Standardized Equations [Windows ver. 2.0]. University of Idaho, 2000.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v.98, p.899-920, 2011a. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.015.
- ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D.B.B.; OLIVEIRA, P.T.S. de; REBUCCI, L.C.S.; PERTUSSATTI, C.A. Estimativa da evapotranspiração de referência através de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, p.197-203, 2011.
- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.4, p. 449 - 466, 2008.
- BENEVIDES, J. G.; LOPEZ, D. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.
- BEZERRA, J.R.C.; AZEVEDO, P.V. de; SILVA, B.B. da; DIAS, J.M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marrom, irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.625-632, 2010. DOI: 10.1590/ S1415-43662010000600009.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: USDA, 1950. 48 p. (Technical paper, n. 96).
- BOSS, M. G.; VOS, J.; FEDDES, R. **A Criwar 2.0**: A simulation model crop irrigation water requirement. Wageningen: ILRI, 1996, 117p. ILRI Publication 46.
- CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125137, 2000.
- CAMARGO, A.P. **Balço hídrico no estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: IAC, 1971. 24p. (Boletim, n. 116).
- 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 super-úmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, L. W.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de Referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, vol. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CARVALHO, D.F. de; ROCHA, H.S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, p.1-11, 2015. DOI: 10.1590/ S0100-204X2015000100001.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.4, p. 619-626, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande, p. 306-310, 1994.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

DROOGERS, P.; ALLEN, R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage System**, v.16, p.33-45, 2002. DOI: 10.1023/A:1015508322413.

FANAYA JÚNIOR, E.D.; LOPES, A. S.; OLIVEIRA, G. Q.; JUNG, L. H. Métodos Empíricos para Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Aquidauana, MS. **Irriga**, v. 17, n. 4, p. 418 - 434, 2012.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The ETo Calculator: Evapotranspiration from a reference surface**. Reference Manual [ver. 3.2]. Land and Water Division, Rome, Italy, 2012.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2010. 44 p. (Documentos, 263)

FERRAZ, P. de A. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) para Região de Rio Branco - Acre**. 2008. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco-Acre, 2008.

FOOLADMAND, H.R.; AHMADI, S.H. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ETo in south of Iran. **Irrigation and Drainage**, v.58(2), p.234-245, 2009.

FOX Jr., F. A.; SCHERER, T.; SLACK, D. C.; CLARK, L. J. **Arizona irrigation scheduling – (AZSCHED)**. Users manual. Cooperative Extension. Version 1.01. University of Arizona, Tucson, Publication number: 191049, 1992, 119p.

GARCIA, *et al.* 2019. Options for Reference Evapotranspiration Estimation in Northern Espírito Santo and Eastern Minas Gerais States, Brazil. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 29, n. 02, p. 1-14.

GAVILÁN, P.; LORITE, I.J.; TORNERO, S.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agriculture Water Management**, v.81, p.257-281, 2006.

GONÇALVES, F. M. *et al.* **Manejo móvel: Uma ferramenta facilitadora no manejo da irrigação localizada por gotejamento**. INOVAGRI – International Meeting, Fortaleza-CE, 2012.

GRASSI, M.T. **As águas do planeta Terra**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Ed. Especial. Campinas. p. 31 – 40. 2001.

HAMON, W. R. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 87, p. 107-120, 1961

HARGREAVES, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 701-704, 1974

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 1, n. 2. p. 96-99, 1985.

INMET (Org.). **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL, PERÍODO 1981-2010**. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 18 de nov. 2019.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Apresentação**: Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 18 de nov. 2019.

IPCC. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. (Manuals and reports on engineering practice, n. 70).

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation Drainage Division**, American Society of Civil Engineers, Reston, v. 89, n. 1, p. 15-41, 1963.

KHARRUFA, N. S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. Beiträge zur Hydrologie: Sonderheft, **Kirchzarten**, v. 5, n. 1, p. 39-47, 1985.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature alone. **Agricultural Meteorology**, v. 18, p. 409-429, 1977.

LOBATO, W. T. dos S. **Equações empíricas para determinação da evapotranspiração de referência no nordeste paraense**. 2019, 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Capitão Poço, 2019.

MAGALHÃES, F. F.; CUNHA, F. F. Desempenho do software Sevap na estimativa da evapotranspiração no Estado de Mato Grosso do Sul. **Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 16, p. 151-160, 2012.

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.5, p. 290-305, 1957.

MARIANO, J. C. Q.; *et al.* **Software para cálculo da evapotranspiração de referência diária pelo método de Penman-Monteith**. CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, XXI. Petrolina-PE, 2011.

MICROSOFT SUPPORT. **Funções do Excel** (por categoria). Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Funções-do-Excel-por-categoria-5F91F4E9-7B42-46D2-9BD1-63F26A86C0EB>>. Acesso em: 12 de nov. 2019.

MOURA, A.R.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; AZEVEDO, J.R.G.; SILVA, B.B.; OLIVEIRA, L.M.M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – BRASIL. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, 181 - 191, 2013.

OLIVEIRA, L. F. C. et al. Estudo comparativo de modelos de estimativa de evapotranspiração de referência para algumas localidades do estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 121-126, 2001.

OMM, Organização Meteorological Mundial. **Calculation of monthly and anual 30-year standard normals**. WMO-TD No. 341, WCDP-No.10. WMO, Geneva, Suíça, 1989.

ORTEGA, S. F.; IRMAK, S.; CUENCA, R. H. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, New York, v. 28, n.1, p. 1-3, 2009.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise da sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, p. 299-306, 2014.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 193, p. 120–145, Apr. 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Edição Revista e Ampliada. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Exatas, 2007.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. 1ed. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, p. 8192, 1972.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L.S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, v.121, p.1-18, 2013.

ROMANENKO, V. A. **Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area**. Kiev: Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, 1961. 3 p.

SANTOS, I. L. N.; *et al.* **Software para determinação da evapotranspiração de referência**. V WINOTEC, Sobral-CE, 2018.

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, Canada. **Agricultural Water Management**, v.97, p.635-644, 2010. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.12.001.

SILVA, B. L. da; NEVES, B. R.; SANTOS JUNIOR, E. P. dos. **Software de estimativa da evapotranspiração**. 68ª Reunião Anual da SBPC, 2016.

SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.547-553, 2005.

SMITH, M. CROPWAT. **A computer program for irrigation planning and management**. Rome: FAO, 1992, 126p. (Irrigation and Drainage, Paper 46).

SOUSA, J. S. C. PROCAL_ETO: Programa computacional para cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 380 - 395, 2012.

SOUZA, A. P.; CARVALHO, D. F.; SILVA, L. B. D.; ALMEIDA, F. T.; ROCHA, H. S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.; ROCHA, F.; SANTOS, L. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunapolis BA. **Revista Caatinga**, v.23, n.1. p.103-111, 2010.

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

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, DC, v. 25, n. 5, p. 686-693, 1944.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 23, n. 14, p. 3057-3067, 2009.

TURC, L. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 12, n. 1, p. 13-49, 1961.

UFLA-MG. **EvapoWeb**: Programa para Cálculo de Evapotranspiração de Forma Fácil. Disponível em: < evapotranspiracao.com.br/index.html >. Acesso em: 18 de nov. 2019.

VEGA, E. C.; JARA, J. C. Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (costa y región andina) del Ecuador. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 390-403, jul./set. 2009.

VIANA, P. T.; MEDEIROS, A. M. M. **Programa para cálculo da evapotranspiração por métodos**. XLVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2018, Brasília-DF, 2018.

APÊNDICE

Memorial de cálculos da validação do sistema

Determinação da ETo pelos métodos de BL, BC, CA, HN, HM, HA, HS, IV, JH, KH, LI, MK, PE, PM-FAO, PT, RS, TW, TM e TU para cidade de Petrolina em 15 de janeiro de 2019, a partir de dados normais.

Tabela 5: Dados utilizados para validação do sistema

Elemento	Valor	Elemento	Valor	Elemento	Valor
T _{m jan}	28°C	Estação	Petrolina-PE	Data	15/01/2019
T _{m fev}	27,8°C	Φ	9° 23' 0" S	Z	370,46 m
T _{m mar}	27,5°C	Φ	-0,1638 radianos	P-B	96,83 kPa
T _{m abr}	27,2°C	T _{max}	33,3 °C	UR	54 %
T _{m mai}	26,3°C	T _{min}	23,3 °C	UR _{max}	94,8 %
T _{m jun}	24,9°C	T _m	28 °C	UR _{min}	29 %
T _{m jul}	24,4°C	T _o	18,5 °C	V _v	2,9 m.s ⁻¹
T _{m ago}	25,1°C	ITd	8,022580 horas	Z _v	10m
T _{m set}	26,7°C	n	0,6 décimos	α	0,23
T _{m out}	28,4°C	λ	2,45 MJ.mm ⁻¹	G	0 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹
T _{m nov}	28,6°C				
T _{m dez}	28,4°C				

Execução manual dos cálculos com o auxílio de uma calculadora científica

- Temperatura média pelo método dos extremos:

$$T_m = \frac{33,3 + 23,3}{2} = 28,3 \text{ °C}$$

- Calor latente de vaporização:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 * 10^{-3}) * 28 = 2,434892 \text{ MJ.mm}^{-1}$$

- Pressão atmosférica:

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,0065 * 370,46}{293} \right)^{5,26} = 96,996901 \text{ kPa}$$

- Pressão de saturação de vapor à temperatura média:

$$e^{\circ}(T_m) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * 28}{28 + 237,3} \right] = 3,779932 \text{ kPa}$$

- Pressão de saturação de vapor à temperatura máxima:

$$e^{\circ}(T_{\text{máx}}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * 33,3}{33,3 + 237,3} \right] = 5,115413 \text{ kPa}$$

- Pressão de saturação de vapor à temperatura mínima:

$$e^{\circ}(T_{\text{mín}}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * 23,3}{23,3 + 237,3} \right] = 2,860821 \text{ kPa}$$

- Constante psicrométrica do ar:

$$\gamma = \frac{1,013 * 10^{-3} * 96,83}{0,622 * 2,45} = 0,064367 \text{ kPa. } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

- Declividade da curva de pressão de saturação:

$$\Delta = \frac{4098 * 3,779932}{(28 + 237,3)^2} = 0,220080 \text{ kPa. } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

- Pressão de saturação de vapor:

$$e_s = \frac{5,115413 + 2,860821}{2} = 3,988117 \text{ kPa}$$

- Pressão de vapor atual do ar:

$$e_a = 3,779932 * \frac{54}{100} = 2,041163 \text{ kPa}$$

- Dia juliano

$$J' = \left\{ \left\lceil \text{inteiro} \left(\frac{275 * 1}{9} - 30 + 15 \right) \right\rceil - 2 \right\} = 13$$

$$J = 13 + 2 = 15^{\circ} \text{ dia do ano}$$

- Declinação do sol

$$\delta = 0,409 * \sin \left(\frac{2 * \pi * 15}{365} - 1,39 \right) = -0,370216 \text{ radianos}$$

- Distância relativa inversa terra-sol

$$dr = 1 + 0,033 * \cos \left(\frac{2 * \pi * 15}{365} \right) = 1,031906 \text{ radianos}$$

- Ângulo horário do nascer do sol

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\text{tg}(-0,163770) * \text{tg}(-0,370216)] = 1,634976 \text{ radianos}$$

- Fotoperíodo

$$N = \frac{24}{\pi} * 1,634976 = 12,490296 \text{ horas}$$

- Velocidade do vento a 2 metros de altura

$$U_2 = 2,9 * \frac{4,87}{\ln(67,8 * 10 - 5,42)} = 2,169058 \text{ m. s}^{-1}$$

- Radiação solar extraterrestre

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * 0,082 * 1,031906 \\ * [1,634976 * \sin(-0,163770) * \sin(-0,370216) + \cos(-0,163770) \\ * \cos(-0,370216) * \sin(1,634976)] = 39,341018 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ dia}^{-1}$$

- Radiação solar global

$$R_s = \left(0,25 + 0,50 * \frac{8,022580}{12,490296}\right) * 39,341018 = 22,469721 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ dia}^{-1}$$

- Saldo de radiação de ondas curtas

$$R_{ns} = (1 - 0,23) * 22,469721 = 17,301685 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ dia}^{-1}$$

- Radiação solar em dias sem nuvens

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * 370,46) * 39,341018 = 29,797248 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ dia}^{-1}$$

- Saldo de radiação de ondas longas

$$R_{nl} = 4,903 * 10^{-9} \left[\frac{(33,3 + 273,16)^4 + (23,3 + 273,16)^4}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{2,041163}) \\ * \left(1,35 * \frac{22,469721}{29,797248} - 0,35 \right) = 3,792802 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ dia}^{-1}$$

- Saldo de radiação à superfície

$$R_n = 17,301685 - 3,792802 = 13,508883 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Benavides-Lopez

$$ET_o = 1,21 * 10 * \frac{(7,45 * 28)}{(234,7 + 28)} * (1 - (0,01 * 54)) + 0,21 * 28 - 2,3 = 7,999747 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Blaney-Criddle

$$ET_o = \frac{0,83 * 8,7950 * (0,457 * 28 + 8,13)}{31} = 4,927634 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Camargo

$$ET_o = \frac{0,01 * 39,341018 * 28 * 1,3}{2,45} = 5,844951 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves

$$ET_o = 0,408 * 0,0023 * (28 + 17,8) * (33,3 - 23,3)^{0,5} * 39,341018 = 5,346863 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves Modificado

$$ET_o = \frac{39,341018 * (1,8 * 28 + 32) * 0,0006 * \sqrt{(100 - 54)}}{2,45} = 5,384395 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves-Samani

$$ET_o = \frac{0,0023 * 39,341018 * (28 + 17,7) * \sqrt{(33,3 - 23,3)}}{2,45} = 5,337323 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Hamon

$$ET_o = 0,55 * \left(\frac{12,490296}{12} \right)^2 * \left(\frac{4,96 * e^{(0,062 * 28)}}{100} \right) * 25,4 = 4,259869 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Ivanov

$$ET_o = 0,006 * (25 + 28)^2 * \left(1 - \frac{54}{100} \right) = 7,752840 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Jensen-Haise

$$ET_o = \frac{22,469721 * (0,025 * 28 + 0,08)}{2,45} = 7,153625 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Kharrufa

$$I_{\%} = \frac{8,022580 \text{ horas}}{4380 \text{ horas. ano}^{-1}} * 100 = 0,183164\%$$

$$ET_o = 0,43 * 0,183164 * 28^{1,3} = 5,992582 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Linacre

$$ET_o = \frac{700 * \left(\frac{28 - 0,006 * 370,46}{100 - (-9,3833^{\circ})} \right) + 15 * (28 - 18,5)}{(80 - 28^{\circ}C)} = 5,912727 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Makkink

$$ET_o = \frac{22,469721}{2,45} * \frac{0,220080}{(0,220080 + 0,064367)} + 0,12 = 7,215954 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Penman

$$ET_o = \frac{0,064367}{0,064367 + 0,220080} * (13,508883 - 0) + \frac{0,064367}{0,064367 + 0,220080} * 2,7 * (1 + 0,864 * 2,169058) * (3,988117 - 2,041163) = 6,475736 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0,408 * 0,220080 * (13,508883 - 0) + 0,064367 * \frac{900}{28 + 273} * 2,169058 * (3,988117 - 2,041163)}{0,220080 + 0,064367 * (1 + 0,34 * 2,169058)} = 6,103241 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor

$$w_p = (0,483 + 0,01 * 28) = 0,763$$

$$ET_o = \frac{1,26 * 0,763 * (13,508883 - 0)}{2,45} = 5,300886 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método da Radiação

$$w_r = \frac{0,220080}{(0,220080 + 0,064367)} = 0,773712$$

$$ET_o = \frac{1,014 * 0,773712 * 22,469721}{2,45} = 7,195300 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite

$$ET_o = -415,85 + 32,24 * 28 - 0,43 * 28^2 * \left(\frac{12,490296}{12}\right) * \left(\frac{1}{30}\right) = 5,195616 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite Modificado

$$i = \sum_{n=1}^{12} [(0,2 * 28)^{1,514}; (0,2 * 27,8)^{1,514}; (0,2 * 27,5)^{1,514}; (0,2 * 27,2)^{1,514}; (0,2 * 26,3)^{1,514}; (0,2 * 24,9)^{1,514}; (0,2 * 24,4)^{1,514}; (0,2 * 25,1)^{1,514}; (0,2 * 26,7)^{1,514}; (0,2 * 28,4)^{1,514}; (0,2 * 28,6)^{1,514}; (0,2 * 28,4)^{1,514}] = 153,838745$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * 153,838745^3 - 7,71 * 10^{-5} * 153,838745^2 + 1,7912 * 10^{-2} * 153,838745 + 0,49239 = 3,880815$$

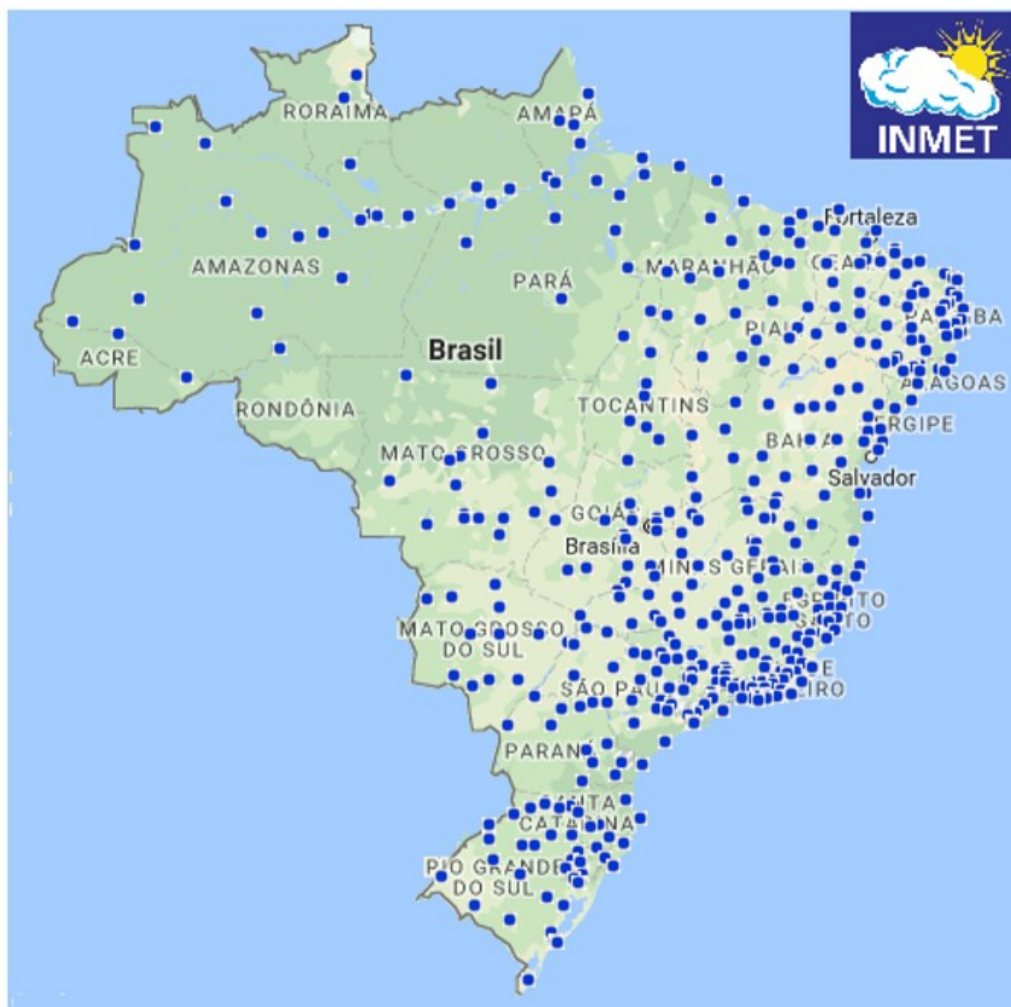
$$ET_o = 16 * \left\{ 10 * \frac{[0,36 * (3 * 33,3 - 23,3)]}{153,838745} \right\}^{3,880815} * \left(\frac{12,490296}{12}\right) * \left(\frac{1}{30}\right) = 5,346174 \text{ mm. dia}^{-1}$$

- Evapotranspiração de referência pelo método de Turc

$$ET_o = 0,013 * \frac{28}{(28 + 15)} * (23,8846 * 22,469721 + 50) * 1 = 4,966317 \text{ mm. dia}^{-1}$$

ANEXOS

Anexo 1: Localização das estações meteorológicas do INMET utilizadas na normal climatológica (1981-2010) contida no banco de dados.



Fonte: INMET (2018).