

TIAGO APARECIDO VICENTIN

**DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM ATMÔMETRO
MODIFICADO NA SUPERFÍCIE EVAPORATIVA**

Botucatu

2018

TIAGO APARECIDO VICENTIN

**DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM ATMÔMETRO
MODIFICADO NA SUPERFÍCIE EVAPORATIVA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em
Agronomia/Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo
Sánchez Román

Coorientador: Prof. Dr. Luís Roberto
Almeida Gabriel Filho

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

V633d Vicentin, Tiago Aparecido, 1985-
Desenvolvimento e calibração de um atmômetro modificado na superfície evaporativa / Tiago Aparecido Vicentin.
- Botucatu: [s.n.], 2018
111 p.: fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román
Coorientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho
Inclui bibliografia

1. Manejo da irrigação. 2. Agrometeorologia. 3. Evapotranspiração. 4. Modelagem de sistemas. I. Sánchez Román, Rodrigo Máximo. II. Gabriel Filho, Luís Roberto Almeida. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

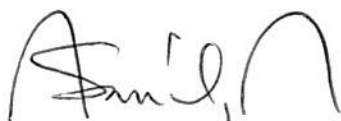
Título: “DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM ATMÔMETRO MODIFICADO NA SUPERFÍCIE EVAPORANTE.”

AUTOR: TIAGO APARECIDO VICENTIN

ORIENTADOR: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

COORDENADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

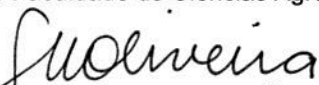
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. ENZO DAL PAI
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof.ª Dr.ª KASSANDRA SUSSI MUSTAFÉ OLIVEIRA
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. RADAMES JULIANO HALMEMAN
Ciência da Computação / Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Dr. JUAN SINFORIANO DELGADO ROJAS
./ Agro Ambiência Serv. Agr. Ltda

Botucatu, 30 de novembro de 2018.

Dedico esse trabalho a todos os pesquisadores do Brasil, que mesmo em momentos de crise, como o vivenciado nos últimos anos, mantiveram-se firme no propósito de fazer ciência.

Dedico essa obra à minhas avós, que no período de desenvolvimento deste trabalho se ausentaram desse mundo indo morar com Deus e ao meu avô Nestor que permaneceu forte ao meu lado.

in memoriam

Luiza Reghini

e

Nassir Lopes Vicentin

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora da Conceição Aparecida pela força, aos meus pais Aderson e Eliana, ao meu irmão Anderson, e a minha noiva Valéria pela ajuda e paciência durante essa conquista.

Ao meu coorientador Prof. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, pela amizade e honrosa ajuda no desenvolvimento estatístico desse trabalho.

Aos professores orientadores Odivaldo J. Seraphim e Rodrigo Sánchez Róman pela confiança em mim depositada.

Por fim aos amigos que estiveram presentes e que de alguma forma colaboraram com o desenvolvimento desse trabalho, cujo não poderia deixar de citar: William Bailo, Marcos Liodorio, Juan David, João Victor e Victor de Martin, e aos demais colaboradores da UNESP e amigos, meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“O conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou fenômeno
somente existira quando for possível medi-lo e expressa-lo por meios de
números”

William Thomson – Lord Kelvin
(1883)

RESUMO

O avanço da engenharia de irrigação nas últimas décadas melhorou e simplificou o funcionamento dos sistemas, permitindo intervenções rápidas para recarregar a água no solo e ajustes qualitativos e quantitativos de seus nutrientes. A irrigação em seu conceito automático vai muito além dos componentes físicos do sistema (válvulas, motores e bombas). Um sistema complexo como esse requer técnicas especiais de controle, que, por sua vez, devem ser analisadas e baseadas em uma estratégia de manejo que leve em conta os dados do solo, cultura, clima (ambiente) ou uma associação destes. Das quatro formas possíveis de gerenciamento ou monitoramento de irrigação, o gerenciamento por variáveis de ambiente é o mais prático, no entanto, isso não significa que seja uma variável fácil de obter. Um indicador que explica o comportamento do ambiente que é fundamental para a adoção adequada do manejo da irrigação é a evapotranspiração. Sua determinação, no entanto, requer técnicas específicas que vão desde uma simples medição de temperatura até uma série de variáveis climáticas que exigem alto investimento em sua operação e manutenção. Existem duas maneiras de obter o valor da evapotranspiração, são chamadas de formas diretas e formas indiretas. Métodos diretos são métodos que efetivamente medem a quantidade de água transpirada pela planta e evaporada do solo; os indiretos são os métodos que, por meio de um indicador ambiental associado a coeficientes, estimam o valor da evapotranspiração de referência. Da categoria dos métodos indiretos, o atmômetro é o objeto de estudo desse trabalho. Atuando principalmente na reestruturação da cápsula porosa, propõe-se a melhoria deste equipamento visando um procedimento para estimar a evapotranspiração de referência. Para verificar esta modificação calcula-se a correlação entre a capacidade de evaporação dos atmômetros, em função da posição da impermeabilidade da cápsula porosa (fator cápsula), modelando o valor de ETo em um conjunto de possibilidades que também considera os valores dos elementos climáticos, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar global.

Palavras-chave: Manejo da irrigação, agrometeorologia, evapotranspiração de referencia, estimativa de ETo , evapórímetro.

ABSTRACT

Irrigation management is adopted when controlling the application of water in a cultivar. The advance of irrigation engineering in the last decades has improved and simplified the functioning of the systems, allowing rapid interventions to recharge the water in the soil and qualitative and quantitative adjustments of its nutrients. Irrigation in its automatic concept goes far beyond the physical components of the system (valves, motors and pumps). A complex system like this requires special control techniques, which in turn must be analyzed and based on a management strategy that takes into account soil, crop, climate (environment) data or an association of these. Of the four possible forms of irrigation management or monitoring, management by environment variables is the most practical, however, this does not mean that it is an easy variable to obtain. An indicator that explains the behavior of the environment that is fundamental to the proper adoption of irrigation management is evapotranspiration. Their determination, however, requires specific techniques ranging from a simple temperature measurement to a series of climatic variables that require high investment in their operation and maintenance. There are two ways to get the value of evapotranspiration, they are called indirect forms and indirect forms. Direct methods are methods that effectively measure the amount of water transpired by the plant and evaporated from the soil; the indirect ones are the methods that, by means of an environmental indicator associated to coefficients, estimate the value of the reference evapotranspiration. From the category of indirect methods, the atmometer is the object of study of this work. Working mainly on the restructuring of the porous capsule, it is proposed the improvement of this equipment aiming at a procedure to estimate the reference evapotranspiration. To verify this modification, the correlation between the evaporation capacity of the atmometers, as a function of the position of the impermeability of the porous capsule (capsule factor), is calculated by modeling the ETo value in a set of possibilities that also considers the values of the climatic elements , temperature, relative humidity, wind speed and global solar radiation.

Keywords: Irrigation management, agrometeorology, reference evapotranspiration, ETo estimation, evaporimeter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evapotranspiração Real.....	34
Figura 2 - Evapotranspiração de Referência.....	35
Figura 3 - Evapotranspiração de Cultura.....	36
Figura 4 - Atmômetro de Livingston	39
Figura 5 - Atmômetro de Bellani.....	39
Figura 6 - Evaporímetro de Piché.....	40
Figura 7 - Forma para produção das cápsulas porosas	51
Figura 8 - Cápsula sem tratamento	52
Figura 9 – (A) Impermeabilização lateral e (B) Impermeabilização superior	52
Figura 10 – Tampa base de PVC	53
Figura 11 - localização dos tubos visores de leitura.....	53
Figura 12 - Distancias entre colunas e linhas.....	54
Figura 13 - Instrumentos instalados em campo na altura de 1 metro do solo ..	54
Figura 14 – Cápsulas de evaporação montadas na base de PVC	66
Figura 15 - Cápsula ATES com proteção montada na base de PVC	67
Figura 16 - Instrumentos instalados em campo.....	67
Figura 17 – Atmômetro evaporativo lateral e atmômetro evaporativo superior.	68
Figura 18 - Dados dos atmômetros de superfície evaporante lateral	69
Figura 19 - Dados dos atmômetros de superfície evaporante superior	69
Figura 20 - Dados da média de ETo e desvio padrão de todos atmômetros de superfície evaporativa lateral e dos valores de referência de ETo. ...	73
Figura 21 - Dados da média de ETo e desvio padrão de todos atmômetros de superfície evaporativa superior e dos valores de referência de Eto. .	73
Figura 22 - Boxplot agrupamento Atmômetro evaporativo lateral e atmômetro evaporativo superior.	74
Figura 23 – Correlação de Pearson entre a Radiação Solar Global e a Referência ETo.....	75
Figura 24 - Correlação de Pearson entre a Velocidade do Vento e a Referência ETo.....	76
Figura 25 - Correlação de Pearson entre a Temperatura Média do ar e a Referência ETo.....	76

Figura 26 - Correlação de Pearson entre a Umidade Relativa do ar e a Referência ETo.....	77
Figura 27 - Correlação de Pearson entre a Pluviosidade Acumulada e a Referência ETo.....	77
Figura 28 - Relação entre os dados de (EV) mensurados do atmômetro ATEL1 (a) e ATES1 (b) e evapotranspiração de referencia (ETo) ajustado via regressão linear $ETo = a_0 + a_1 \cdot EV$	78
Figura 29 – r de Pearson entre Evaporação (EV) dos atmômetros ATEL1 e ATES1 e a Referência ETo.	80
Figura 30 - r de Pearson entre valor estimado de Evapotranspiração ETo_ATEL1 e ETo_ATES1 e a Referência ETo.	80
Figura 31 - Superfícies tridimensionais representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL), fixando se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.	84
Figura 32 - Mapas de contorno das superfícies representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.	84
Figura 33 - Superfícies tridimensionais representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Superior (ATES), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.	85
Figura 34 - Mapas de contorno das superfícies representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Superior (ATES), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.	85
Figura 35 – R de Pearson para a estimativa da ETo utilizando a equação de regressões linear múltipla.....	86

Figura 36 - Dispersão entre os dados de evapotranspiração de referencia (ETo) estimados via regressão linear múltipla pelos atmômetros ATEL1 (a) e ATES1 (b) versus a evapotranspiração de referencia (ETo).	87
Figura 37 - Dispersão entre os dados de evapotranspiração de referencia (ETo) estimados via equação conjunta $ETo = a_0 + a_1.EV + a_3UR + a_5G$ dos atmômetros ATEL1 (a) e ATES1 (b) versus a evapotranspiração de referencia (ETo).....	90
Figura 38 - Dispersão entre os dados de evapotranspiração de referencia (ETo) estimados via equação conjunta $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR + a_5G$ dos atmômetros ATEL1 (a) e ATES1 (b) versus a evapotranspiração de referencia (ETo).	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados para construção dos atmômetros com seus respectivos custos.....	49
Tabela 2 - Detalhes dos componentes sensores utilizados na estação meteorológica.....	50
Tabela 3 – Representação dos componentes contidos em cada equação de regressão.....	55
Tabela 4 - Cálculo do “Rn” em função das estações do ano.....	60
Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Pearson significativas ($p < 0,05$) entre todos os dados dos atmômetros de superfície de evapotranspiração lateral bem como com a evapotranspiração de referência.	71
Tabela 6 - Coeficientes de correlação de Pearson significativas ($p < 0,05$) entre todos os dados dos atmômetros de superfície de evapotranspiração superior bem como com a evapotranspiração de referência.	72
Tabela 7 - Comparação das médias da Evaporação (EV) dos dois tipos de atmômetro.	74
Tabela 8 - Regressões lineares ($y = a_0 + a_1x$ ou $ET_o = a_0 + a_1.EV$) de todos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL) e superfície evaporativa Superior (ATES), onde x (ou EV) é o valor lido no atmômetro e y (ou ET_o) é a ET_o de referência estimado.	79
Tabela 9 - Regressões lineares múltiplas ($y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ ou $ET_o = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR$) de todos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL) e superfície evaporativa Superior (ATES), onde x_1 é o valor método pelo atmômetro, x_2 é a temperatura, x_3 é a umidade reativa e y é a ET_o de referência estimada.	82
Tabela 10 - Regressões lineares múltiplas ($y = a_0 + a_1x_1 + a_3x_3 + a_5x_5$ ou $ET_o = a_0 + a_1.EV + a_3UR + a_5G$) de todos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL) e superfície evaporativa Superior (ATES), onde x_1 é o valor medido pelo atmômetro, x_3 é a umidade relativa do ar, x_5 é a radiação solar global e y é a ET_o de referência estimada.	89

Tabela 11 - Modelos de regressão linear múltipla ($y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$ ou $ET_o = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR + a_4U_2 + a_5G$) de acordo com as variáveis escolhidas dentre T, UR, U2 e G de todos atmômetros de superfície evaporativa lateral (ATEL) e superfície evaporativa superior (ATES), onde x_1 é o valor aferido pelo atmômetro, x_2 é a temperatura, x_3 é a umidade relativa e y é a ET_o de referência..... 95

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Arctan	Arco tangente
AT	Atmômetro
ATEL	Atmômetro Superfície Evaporativa Lateral
ATES	Atmômetro Superfície Evaporativa Superior
EV	Evaporação
ea	Pressão de saturação de vapor KPa
es	Pressão atual de vapor KPa
ET	Evapotranspiração
ETo	Evapotranspiração de referência
ETo_ref	Conjunto de dados denominado Evapotranspiração de referência
ETc	Evapotranspiração de Cultura
ETr	Evapotranspiração Real
EUA	Estados Unidos da América
F	Fator Calculado do Teste F
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FCA	Faculdade de Ciências Agrônômicas
G	Radiação Global $MJ.m^{-2}$
Gext	Radiação Global Externa $MJ.m^{-2}$
Gint	Radiação Global Interna $MJ.m^{-2}$
GL	Números de Graus de Liberdade
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.
Kc	Coeficiente da cultura
Kp	Coeficiente do tanque
MAD	<i>Mean Absolute Deviation</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
mm	Escala milimétrica
MSD	<i>Mean Squared Deviation</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
°C	Graus célsius
ODS6	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável número seis
ONU	Organização das Nações Unidas
P valor	Nível descritivo ou probabilidade de significância
PM	Penman Monteith (referência ao método)
QM	Quadrado Médio
R	Coeficiente de correlação de <i>Pearson</i> " <i>p de Pearson</i> "
R ²	Coeficiente de determinação
Ra	Radiação solar no topo da atmosfera em $MJm^{-2}dia^{-1}$
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Quadrado Médio

Rn	Saldo de radiação diário em MJm ⁻² dia ⁻¹
Rnl	Saldo de radiação de ondas longas diário em MJm ⁻² dia ⁻¹
Rns	Saldo de radiação de ondas curtas diário em MJm ⁻² dia ⁻¹
Rs	Radiação solar incidente MJm ⁻² dia ⁻¹
Rso	Radiação solar incidente na ausência de nuvens MJm ⁻² dia ⁻¹
α	Albedo coeficiente de reflexão da vegetação
SQ	Soma de Quadrados
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo
Tmax	Temperatura Máxima
Tmin	Temperatura Mínima
Tq	Tanque
U2	Velocidade do vento
UR	Umidade Relativa do AR
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
WMO	International Glossary Of Hydrology

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	OBJETIVOS	30
3	REVISÃO DE LITERATURA	31
3.1	IRRIGAÇÃO E MANEJO DA IRRIGAÇÃO	31
3.1.1	Manejo da irrigação	31
3.2	EVAPORAÇÃO	33
3.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	34
3.4	MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DA ETo.....	36
3.5	ATMÔMETROS.....	38
3.6	A NECESSIDADE DE MODELAGEM DE SISTEMAS	42
3.7	HISTÓRICO DO INSTRUMENTO OBJETO DE ESTUDO	43
4	MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1	MATERIAIS.....	49
4.2	MÉTODOS.....	50
4.2.1	Associações de coeficientes para o desenvolvimento das regressões lineares.....	55
4.2.2	Método de Penman Monteith-FAO56 para o cálculo da evapotranspiração de referência	56
4.2.3	Calibração e verificação.....	61
4.2.4	Métodos de correção de dados baseados em regressão linear simples e múltipla	62
4.2.5	Método de análise do grau de ajuste do modelo	63
4.2.6	Métodos de análise de dados baseados no coeficiente de correlação de Pearson.....	63
4.2.7	Análises estatísticas e correção de dados	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.1	ATMÔMETRO DE CÁPSULA EVAPORANTE LATERAL E ATMÔMETRO DE CAPSULA EVAPORANTE SUPERIOR	66

5.2 COMPARAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO ATMÔMETRO DE SUPERFÍCIE EVAPORANTE LATERAL VERSUS ATMÔMETRO DE SUPERFÍCIE EVAPORANTE SUPERIOR .	68
5.3 ANÁLISE CORRELACIONAL ENTRE AS VARIÁVEIS MEDIDAS E A ETO DE REFERÊNCIA.....	75
5.4 AJUSTE DOS ATMÔMETROS EM RELAÇÃO À EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo).....	77
5.5 MODELAGEM DA ETO DE REFERÊNCIA EM FUNÇÃO DAS MEDIÇÕES DO ATMÔMETRO, DA TEMPERATURA MÉDIA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR.	81
5.6 MODELAGEM DA ETO DE REFERÊNCIA EM FUNÇÃO DAS MEDIÇÕES DA EVAPORAÇÃO DO ATMÔMETRO, UMIDADE RELATIVA DO AR E RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL.	88
5.7 ESTIMATIVA DA ETO DE REFERÊNCIA EM FUNÇÃO DAS MEDIÇÕES DA EVAPORAÇÃO DO ATMÔMETRO, TEMPERATURA MEDIA, UMIDADE RELATIVA DO AR E RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL.....	91
6 CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

A água e o solo, dentre outros muitos recursos envolvidos na produção agrícola, são elementos básicos nesse contexto, sendo assim, a sustentabilidade do atual modelo agrônômico depende do manejo responsável e sustentável desses recursos.

O uso eficiente da água é um efetivo desafio. Seu manutenção depende de políticas e decisões que elencam a distribuição não igualitária, a densidade populacional, a poluição, as mudanças climáticas, a demanda global e as guerras. Tudo isso, faz com que as questões relacionadas à água sejam um problema preocupante.

Em 2003, o *Executives Board for Coordination (EBC)*, órgão de coordenação do sistema Nações Unidas, criou um mecanismo interagência para nortear as ações e cumprir os objetivos em relação ao uso da água, denominado “ONU Água” esse mecanismo denota a importância crucial da água potável no desenvolvimento socioeconômico, classificando-a como um direito humano essencial, intrinsecamente relacionado à vida, à saúde e à alimentação. Esse esforço foi uma iniciativa para sensibilizar o mundo sobre a importância desse recurso.

Segundo a ONU (2017) a agricultura utiliza hoje 70% da água doce do mundo; para 2050 se prevê um aumento de mais 70% da produção agrícola e 19% do consumo mundial de água, número que pode variar de acordo com os progressos tecnológicos e decisões políticas adequadas.

Em um mundo onde as demandas de água doce estão crescendo continuamente e onde os recursos hídricos limitados são cada vez mais desgastados por excesso de captação, poluição e mudanças climáticas, negligenciar as oportunidades decorrentes da gestão melhorada de águas é nada menos que impensável. ONU (2017)

Segundo a Agência Nacional de águas (Brasil) (2017), existe no Brasil um potencial de exploração do território, por atividades agrícolas com foco na produção de alimentos, de aproximadamente 76,2 milhões de hectares. A área irrigada no Brasil é de 6,5 milhões de hectares.

A irrigação visa fornecer água para as culturas para atender às necessidades da água em todo seu ciclo. Por razões sazonais o regime pluviométrico de uma região pode sofrer alterações significantes. Marengo (2007) apresenta alterações no regime de chuvas da região amazônica em função dos fenômenos *El-Nino* e *La-*

Nina. Em relação ao El-Nino é apontado o episódio de 1982-1983, onde segundo Kayano e Moura (1986), foi um dos mais intensos a afetar o regime pluviométrico em toda a América do Sul. Segundo Brohan, Kennedy e Harris (2006) a temperatura do ar da superfície da Terra teve um aumento de 0,6 a 0,8 °C durante o século 20, juntamente com mudanças no ciclo hidrológico. Deste modo, ocasionalmente, as mudanças dos regimes pluviométricos regionais a que venha causar períodos de intensa estiagem, acarretam no aumento de áreas irrigadas. Toda via, se o aumento dessas áreas não for coordenado de forma responsável, o atual cenário dos recursos água e o solo tende a se agravar.

O futuro do Brasil, sendo um país produtor de alimentos e de grande extensão territorial, dependerá de decisões políticas e de avanços tecnológicos que deverão colaborar com a racionalização dos recursos utilizados na agricultura. Isso poderá em tese, atender à demanda requerida nesse cenário que se avizinha. Porém, para que esse futuro se torne promissor, sua construção deve ser iniciada no presente.

A busca de novas técnicas e tecnologias sempre esteve em evidência quando se teve como premissa vencer uma crise ambiental ou climática. Essa busca de novas tecnologias para obtenção de maior produtividade levou ao agricultor à prática da irrigação, sendo assim, para aumentar a produtividade visando atender uma demanda futura e superar os novos desafios, a atitude de buscar ou desenvolver novas tecnologias é imprescindível.

Constituído nos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) O “ODS6” (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável número seis), determina que até 2030, ações educacionais, tecnológicas e científicas devam ser aplicadas visando aumentar significativamente o rendimento do uso da água em todos os setores, garantindo extrações sustentáveis e o suprimento, visando diminuir de forma substancial o sofrimento das pessoas que são privadas desse recurso (ONU, 2015). Portanto, é verificado um aumento da concorrência na utilização da água. O aumento da população (indicador de pegada hídrica) e a depreciação qualitativa do recurso, se não corrigidos por ações constantes na educação, promovidos pela ciência e tecnologia, levará a uma realidade insustentável do mundo em que vivemos.

Segundo Vicentin et al. (2016), o aumento dos custos da energia e as longas estiagens estão entre os principais desafios enfrentados pelos produtores rurais do Sudeste e do Centro-Oeste Brasileiro. O uso racional dos recursos envolvidos no

processo produtivo agrícola é uma necessidade. A prática da irrigação com a premissa de aumentar a produtividade não só depende da simples ação de irrigar, mais sim de um estudo direcionado ao manejo correto dos recursos envolvidos. Nesse contexto, mensurar fenômenos físicos naturais como o da evapotranspiração, entre outros, serviriam de auxílio na tomada de decisões para promover a racionalização de tais recursos.

Uma das formas de promover a racionalização de um recurso é saber quantificar a demandada desse recurso dentro de uma cadeia produtiva. No caso do processo de produção agrícola, métodos de estimativa da demanda diária de água devem ser explorados e aplicados no manejo da irrigação.

Segundo Oliveira et al. (2008), boas práticas de irrigação e manejo contribuem para aumentar a produtividade, a qualidade dos produtos agrícolas e minimizam o uso de água. Essas adequadas práticas são aplicadas de forma mais eficaz quando associadas a um sistema de controle e automação.

Segundo Pereira et al. (2012), uma das formas de aumentar a eficiência da irrigação e agregar benefícios à agricultura, é através do uso de sensores de umidade do solo. Em análise aos tipos de sensores existentes e as tecnologias de leitura de parâmetros atmosféricos atuais, tem como fator limitante o alto custo. Se considerar os problemas operacionais que um sistema de sensores cabeados pode trazer em campo essa viabilidade tende a diminuir ainda mais. Segundo Santos et al. (2008) e Camargo (2012), o custo com cabos e a dificuldade de instalação e obtenção de dados, são empecilhos para o produtor que deseja monitorar, em tempo real, sua propriedade com sensores de umidade de solo. Propriedades que possuem grande extensão, em áreas agrícolas cultivadas, terão que demandar uma alta quantidade de sensores instalados monitorando o campo, isso torna o monitoramento caro e oneroso, tendo em vista que o custo com cabeamento aumenta em proporção a dimensão das áreas.

Um único sensor de umidade de solo confiável pode chegar a custar R\$4.000,00. Estações meteorológicas incapazes de integrar-se a um sistema de controle, apenas podendo disponibilizar dados atmosféricos para uso posterior, podem ter um custo próximo de R\$25.000,00 (MUNDOCLIMA, 2018).

A partir desse levantamento foi necessário pensar no equipamento que pudesse ter um custo relativamente barato a um baixo transtorno operacional. Vasconcelos (2013); Ayars e Phene (2017) indicam a aplicação de água na zona

radicular dos cultivares até a capacidade de campo do solo decidindo o quanto e quando deverá ser efetuada a irrigação, embasados num indicador do déficit hídrico. De modo que a irrigação é efetuada por breves períodos de infiltração, seguidos por longos períodos de redistribuição da água no solo mais a evapotranspiração; nesse contexto, a determinação da evapotranspiração aparece, mesmo que de forma indireta, um indicador mensurável interessante de ser explorado.

Vasconcelos (2013) afirma que um sistema de irrigação bem controlado deve aperfeiçoar a distribuição espacial e temporal da água. O mesmo autor defende que o uso de sistemas que lidem com irrigações frequentes deve ser automático redundante e robusto o suficiente para se adaptar às mudanças no clima e a possíveis falhas em seus componentes. Ou seja, o conceito de irrigação automática vai além dos componentes físicos do sistema (válvulas, motores e bombas). Para controlar um sistema complexo como este, as técnicas de controle devem ser analisadas e baseadas em uma estratégia de manejo que leve em conta também os dados do solo, da cultura e do clima. Assim, a evapotranspiração de referência de modo plausível, pode ajudar a estimar o déficit hídrico em função dos elementos climáticos do local.

De acordo com Keskin et al. (2004), a evapotranspiração de referência é um Indicador entorno do ciclo hidrológico de uma região. Em geral, a produtividade e o consumo de água das culturas, variações na disponibilidade de água proveniente do solo, e até mesmo a variação dos níveis de um reservatório pode ser determinada em função dos valores de evapotranspiração referência de uma região. Sendo assim, qualquer método ou equipamento que almeje o controle dedicado, automatizado ou de auxílio nas tomadas de decisões de sistemas irrigados, deverá considerar a evapotranspiração de referência como parâmetro de grande importância.

Presente no ciclo da água, a evaporação movimenta certa quantidade de água para o ar a partir de fontes como o solo, corpos d'água, rios e mares. O calor latente de vaporização aportado pela energia solar converte a água do estado líquido para o gasoso. O que ocorre é que a energia intensifica o movimento das moléculas e as partículas começam a escapar sob a forma de vapor.

A evaporação pode ser utilizada para determinar os níveis de água demandado por uma bacia hidrográfica. Este parâmetro é definido como uma variável hidrológica fundamental, dependente dos elementos climáticos (radiação

solar, temperatura do ar, pressão barométrica e umidade relativa do ar); assim como dos fatores, latitude, altitude, maritimidade, continentalidade, massas de ar, vegetação, correntes marítimas e até o relevo, que podem também, influenciar na intensidade que esse fenômeno ocorre.

A transpiração permite às plantas realizar seus ciclos fisiológicos. Como parte integrante da planta, as raízes, retiram a água do solo; pequenas válvulas microscópicas presentes nas superfícies das folhas chamadas estômatos, devolvem parte dessa água para atmosfera sob a forma de vapor d'água. O tipo de cultivar, o aporte de energia e a disponibilidade de água no solo são fatores de forte influência nessa variável.

A associação dos complexos fenômenos, evaporação e transpiração; é denominado evapotranspiração. Seu valor quantifica a água que foi transferida de superfícies cultivadas (sistema solo planta) para a atmosfera. Práticas em estudos de evapotranspiração exigem grandes quantidades de dados com abordagens probabilísticas, estatísticas e estocásticas.

O clima exerce grande influência vida vegetal, sobretudo por meio de seus elementos: umidade, precipitação, temperatura, radiação solar, insolação e ventos. Estes elementos estão fortemente associados às características geográficas estáticas e dinâmicas da paisagem, tais como: altitude, latitude, massas de ar, correntes marítimas, continentalidade, maritimidade, correntes marítimas e relevo, que de forma simbiótica influencia os fenômenos evaporativos e transpirativos de um local.

A substituição de um elemento sensor de umidade de solo, associado ao controle da lâmina de irrigação demandada, deve primeiramente considerar os elementos climáticos preponderantes a evapotranspiração. Um estudo direcionado de elementos climáticos que possam alimentar um modelo de estimativa para o valor de evapotranspiração de referência do local ETo associado a um atmômetro modificado na superfície evaporativa é tido como proposta desse trabalho.

2 OBJETIVOS

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um atmômetro modificado de baixo custo, que permita determinar os valores de evapotranspiração de referência (ET_o), em função dos elementos climáticos temperatura média, umidade relativa do ar média, velocidade média do vento, radiação solar incidente e nível de evaporação (EV) em um Evaporímetro tipo Atmômetro.

Os resultados poderão futuramente compor um sistema de manejo de irrigação embasado no valor diário da evapotranspiração de referência, obtida pelo equipamento aqui proposto.

Os objetivos específicos deste trabalho constituem:

- Aprimorar um equipamento comumente conhecido como atmômetro modificado de Altenhofen (1985), consistindo tal melhoramento na alteração da área e local de evaporação da cápsula porosa do equipamento.
- Calibrar o equipamento em relação à evapotranspiração de referência; visando sistematizar a relação entre os valores que são medidos (observados) pelos atmômetros de cápsula modificada e os valores indicados pelo modelo padrão de referência (FAO56).
- Ajustar os valores de evaporação (EV) verificados nos instrumentos por meio de regressão linear simples.
- Modelar equações para a estimativa da evapotranspiração de referência ET_o via regressão linear múltipla utilizando como entrada de dados, a leitura da evaporação (mm.dia⁻¹) provinda do instrumento atmômetro associado às médias diárias das variáveis preditivas adicionais: Temperatura (°C); Umidade relativa do ar (%); Velocidade do vento (m.s⁻¹) e Radiação solar incidente (MJ.m⁻².dia⁻¹).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Irrigação e manejo da irrigação

A irrigação tem como função suprir a necessidade hídrica das plantas. Adicionalmente, tem efetiva proteção contra geadas em plantações hortícolas, viveiros ou plantas jovens no campo, quando aplicada algumas horas antes da ocorrência (PINTO; ZULLO, 2018).

Segundo Griffiths; Parry (2002); Taiz; Zeiger (2009); Tejeda et al. (2014), o crescimento da parte aérea da planta tem como um dos fatores limitantes, a disponibilidade de água na sua zona radicular. Se faltar água por tempo suficiente, o desenvolvimento da planta será menor, tendo como consequência, folhas em quantidade e tamanho reduzidos, o que acarreta baixa na taxa de fotossíntese e na produção de energia e glicose. O tempo de estresse varia de acordo com cada espécie de planta. No entanto, se a irrigação não ocorrer a ponto de restabelecer a umidade do solo em um nível que permita à planta manter sua sobrevivência, esta, sofrerá severos danos devido ao *déficit* hídrico e morrerá.

Vicente et al. (2004) salientam que o estoque adequado de água e nutrientes na área das raízes das plantas, constitui um fator de produtividade e sempre foi objeto de estudos de distintos trabalhos. Estudos estes que levaram ao avanço da engenharia da irrigação que permitiu a operacionalização facilitada nos sistemas produtivos, no qual a recarga de água e a quantidade de nutrientes são melhores e mais rápidas nos ajustes quali-quantitativos desses fatores no solo.

Pesquisas de técnicas para a otimização da irrigação, com objetivo de reduzir o desperdício de água e energia, ganharam força nos últimos anos (LEVIDOW et al., 2014; SNYDER et al., 2015).

O manejo da irrigação é adotado no gerenciamento racional de qualquer projeto de irrigação, devendo considerar os aspectos sociais e ambientais da região e esforçar-se para maximizar a produtividade e eficiência de uso de recursos hídricos locais (CARVALHO, 2012).

3.1.1 Manejo da irrigação

Há quatro formas comuns de manejo ou monitoramento da irrigação, a saber: via planta, via solo, via clima ou a associação destes.

O manejo via planta, segundo Pires et. al. (1999), trata-se de um método promissor, porém de alta complexidade na aplicação. É utilizado apenas para fins de

pesquisa, geralmente tem elevado custo operacional, sendo um método de demanda de técnica especializada e de alto nível de automação. O manejo da água via solo, clima ou a associação de ambos são métodos mais práticos para o uso em campo quando comparados ao método via planta.

O manejo via solo estima a quantidade de água a ser aplicada e o momento da irrigação, a partir da quantidade de água aportada e extraída do solo em um período de tempo (REICHARDT, 1985). Este método se fundamenta no princípio da conservação de massa, onde, por amostragem, mede-se regularmente a umidade do solo em períodos distintos. Aplicando uma metodologia de cálculo simples é possível encontrar qual o balanço de água no solo entre um período e outro. Após isso é reposta a quantidade de água adequada para que o solo retorne ao valor máximo de armazenamento. A principal limitação operacional do método consiste na necessidade frequente de amostragens do solo retiradas no campo (PIRES, 1999).

O manejo via clima estima o consumo de água das plantas nas condições locais, extrapolando dados obtidos em experimentos científicos para outros locais. O chamado balanço hídrico é um dos métodos de manejo provenientes da associação dos métodos. O balanço hídrico associa informações do solo e da planta. Em que, sabendo a capacidade de armazenamento do solo e o consumo de água da planta é possível fazer uma estimativa da umidade atual do solo e definir o manejo da irrigação. A capacidade de armazenamento de água no solo pode ser determinada por meio das panelas de Richard, para assim definir a curva de retenção de água (PIRES et. al., 1999).

Beefpoint (2006) conclui que o gerenciamento de água em culturas, pode ser realizado de várias maneiras. A escolha do procedimento metodológico depende dos termos do entendimento do usuário que está aplicando o método. O método de melhor precisão nem sempre é o mais adequado e o uso de qualquer método de manejo de água é melhor do que nenhum método de gerenciamento de água.

Vicente et al. (2004) expõem certa preocupação na conduta de alguns integradores e produtores quanto à aplicação de novas tecnologias no campo. O autor aponta que apesar do aumento da demanda tecnológica no meio irrigante, a atividade prática sobressaiu às frentes de pesquisas. Esse comportamento por parte dos usuários e integradores tem conduzido a resultados insatisfatórios em relação à tecnologia. Com frequência são observadas falhas no dimensionamento hidráulico dos projetos, cálculos incorretos das necessidades hídricas dos cultivares para

condições agroecológicas e meteorológicas específicas, entre outros elementos imperceptíveis ao olhar dos produtores rurais, mas que influenciam no sucesso do plano de manejo de irrigação.

Nesse universo, torna-se necessário a preexistência do conhecimento científico em determinadas ações, de forma a instituir conhecimentos específicos no desenvolvimento de ferramentas e equipamentos que auxiliem no planejamento da atividade econômica e manejo da irrigação.

3.2 Evaporação

Do latim *evaporatĭo*, a evaporação é a ação ou o efeito de evaporar ou de se evaporar. Esse fenômeno que faz referência à conversão de um líquido em vapor. Conceitua-se em um processo físico em que as moléculas de uma substância se separam uma das outras no seu ponto de ebulição.

A evaporação é definida como uma variável hidrológica fundamental e é por meio desse fenômeno que a água presente nos oceanos, corpos hídricos e continentes é transportada até a atmosfera. O que ocorre é que a energia solar incidente no planeta intensifica o movimento das moléculas e as partículas começam a escapar sob a forma de vapor. Ou seja, substância em estado líquido adquire a energia necessária para vencer a tensão superficial. Existe uma troca contínua de moléculas presentes nos corpos d'água, e nos seres vivos, para a atmosfera e vice-versa. Isso significa que a todo o momento ocorre essa mudança de estado, onde energia cinética supera a força de coesão aplicada pela tensão superficial, esta mudança de estado requer uma troca de energia de aproximadamente 2510 J para cada grama de água evaporada (LINSLEY et al., 1982).

Desde sempre pesquisadores ao redor do mundo tentam determinar a evaporação real, por métodos indiretos, usando dados climatológicos aplicados em modelos matemáticos desenvolvidos ao longo de décadas de estudo. Dentre esses modelos podemos citar Kohler-Nordenson-Fox (1955), Kohler-Parmelee (1967), Priestley-Taylor (1972), Stewart-Rouse (1976), Linacre (1977), Warnaka-Pochop (1988). Esses modelos, no entanto, diferem significativamente na sua capacidade de estimativa da variabilidade da evaporação. Porém serviram de base para a concepção de novas modelagens como foi o caso de Bruin (1978) que utilizou do modelo simplificado de Priestley-Taylor combinando com a ideia de Penman formando uma equação utilizada na estimativa da evaporação. Andersen e Jobson

(1982), estimaram a evaporação usando o modelo de Morton e um mapa de evaporação produzido por Linsley et al. (1982); concluíram que o mapa é um pouco melhor que o modelo de Morton para medidas anuais de evaporação.

Dentre os métodos para estimativa da evaporação tidos como métodos diretos podemos citar a estimativa por tanque de evaporação. Este método foi usado e comparado em estudos de estimativa de evaporação por vários pesquisadores do mundo, entre eles podemos citar Choudhury (1999), Mckenzie-Craig (2001), Vallet-Coulomb et al. (2001) e Abtew (2001). Segundo Keskin; Terzi e Taylan (2004). Apesar das variações diárias de evaporação conterem intrinsicamente efeitos incontrolláveis, os modelos de evaporação foram baseados em concepções observáveis sem elementos incertos condicionados ao modelo. Práticas em estudos de evaporação local exigem grandes quantidades de dados e abordagens probabilísticas, estatísticas e estocásticas.

3.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) considera a evaporação e a transpiração dos vegetais. Define a transpiração de água das plantas e a perda de água que ocorre numa determinada área, sendo, um requisito fundamental para adoção de manejo da irrigação de forma adequada. A determinação da perda de água real Figura 1 na área de interesse é composta pela evaporação somada à transpiração, nas condições preponderantes da relação entre a disponibilidade de água, o solo, uma cultura de referência e a atmosfera. Esse valor é obtido diariamente e é chamado de Evapotranspiração Real (ETr).

Figura 1 - Evapotranspiração Real.

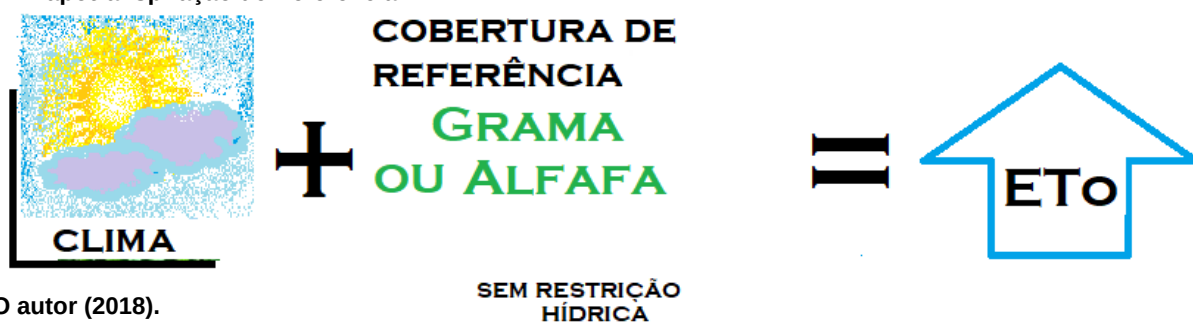


Fonte: O autor (2018).

Segundo a FAO (1998), a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, não vai além da disponibilidade da água no meio, é chamada

evapotranspiração de referência e é denominada como ETo, como ilustrado na Figura 2. É obtida pela medição direta da perda de água de determinadas gramíneas, com características específicas, previamente selecionadas, sob dadas condições climáticas. Após a publicação do Boletim da FAO 56 (Allen et. al., 1998), o método denominado Penman-Monteith FAO (PM-FAO) é recomendado como o método padrão, aceito internacionalmente, para determinar ETo. A cultura adotada como referência é uma cultura hipotética, de característica semelhante à da grama, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 70 s.m^{-1} .

Figura 2 - Evapotranspiração de Referência.

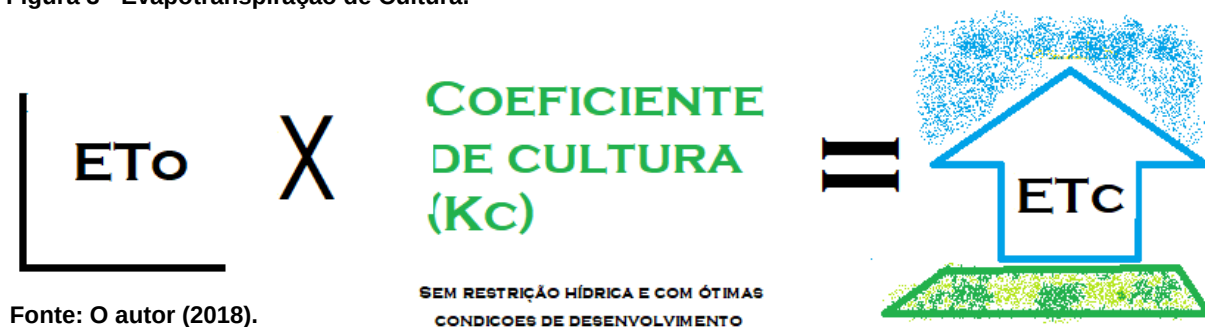


Fonte: O autor (2018).

A quantidade de água disponível no solo e a quantidade de energia disponível no meio são coeficientes limitantes à evapotranspiração. Deste modo se faz necessário conceituar e definir quando o sistema solo – planta está em plena capacidade, respondendo apenas em função da disponibilidade de energia existente no meio. Diferente da ETr, a medida da evapotranspiração a plena capacidade, é definida como evapotranspiração potencial (ETp), que representa o potencial de evapotranspiração, dada pela transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera sob condições padronizadas. A ETp representa o potencial de evapotranspiração em uma superfície natural totalmente coberta por vegetação baixa, de altura uniforme e com elevado índice de área foliar (IAF), de crescimento ativo, na fase adulta, com o solo no teor de umidade suficiente para o desenvolvimento pleno do cultivo. A denominação ETp (evapotranspiração potencial) caiu em desuso, e não pode ser encorajada devido a ambiguidades existentes entre a sua definição e a definição da Evapotranspiração de Referência (ETo).

O volume de água a ser suprido pelo sistema de irrigação deve ser embasado no valor estimado da evapotranspiração da cultura, ilustrada na Figura 3. A Evapotranspiração da cultura é dependente do tipo de cultura e pode ser estimado a partir da Evapotranspiração Referência (ET_o), usando de um coeficiente denominado coeficiente de cultura (K_c).

Figura 3 - Evapotranspiração de Cultura.



Em resumo, a ET_o é um fenômeno, tido como um indicador, que leva em conta o clima, o solo, a superfície do terreno plantado, em função de uma cultura padrão, de uma determinada região em estudo. Esse valor poderá ser obtido de forma direta ou indireta, sendo mais utilizada, a obtenção na forma indireta, obtida por instrumentos chamados evapórimetros.

3.4 Métodos para obtenção da ET_o

Segundo Carvalho et al. (2011), há muitos métodos para a estimativa da ET_o. A variedade de métodos se dá em razão de três importantes situações, sendo: a) A adequação do método e a simplificação de seu uso em função da indisponibilidade dos elementos meteorológicos disponíveis na região em que o método é aplicado; b) A grande variedade de parâmetros que influenciam a estimativa da ET_o local; c) O empirismo aplicando ferramentas estatísticas na composição de uma maior aplicabilidade de um método ao local de estudo.

Está descrita nesse subcapítulo alguns métodos elencados como importantes para o estudo. Maiores detalhes sobre outros métodos poderão ser encontrados no Glossário Internacional de Hidrologia (UNESCO, 2012).

Diversos métodos com diferentes graus de complexidade podem ser aplicados para obtenção do ET_o.

De forma geral, são duas as formas de obter o valor da evapotranspiração de referência (ET_o): formas direta e indireta. Dentre os métodos indiretos podemos citar os métodos de Penman, Camargo, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor, Penman-Monteith, Radiação Solar, Tanque Classe A, GGI3000, Classe U; os métodos dos tensiômetros, sondas TDR, sensores de umidade do solo, Atmômetros, etc. Os métodos diretos são os métodos que efetivamente medem a quantidade de água que foi transpirada pela planta e evaporada do solo, dentre esses métodos podemos citar os lisímetros de forma geral.

Dos métodos indiretos, podemos destacar os evaporímetros. Que podem ser atmômetros ou evaporímetros de Tanque. Estes medem a perda de água de uma superfície saturada padrão, denominada evaporação potencial (E_p) ou de superfícies naturais de água. Quando se deseja representar a evaporação potencial de um lago ou evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o) em função de evaporímetros, devem-se aplicar fatores de ajuste a esses equipamentos. A precisão desses instrumentos deve ser descrita de forma cuidadosa a fim de compreender as condições de medição do mesmo, portanto vale frisar a importância da busca desses fatores de ajustes e da calibração periódica desses instrumentos.

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) o evaporímetro Tanque Classe A, segue como o método de menor custo e menor complexidade operacional. Ainda segundo Oliveira et al. (2008), para o manejo da irrigação, um dos métodos mais utilizados para estimativa da ET_o é o Tanque Classe A. A evapotranspiração de referência é obtida, pela leitura do nível da água, com base na medição da evaporação da água em um Tanque padronizado, onde seu valor é calculado por meio de coeficientes específicos de clima, dimensões do tanque e da bordadura circundante (DOORENBOS e PRUITT, 1997; ALLEN et al., 1998). Segundo Sedyama (1996); os baixos custos de instalação e manutenção juntamente com sua praticidade, fortalecem a aplicação e uso desse equipamento. No entanto, problemas com aves, animais que bebem a água do tanque e o manejo do tanque são apontadas como as principais limitações desse método, pois causam distorções em suas leituras. Em regiões tropicais, a proliferação de larvas de mosquitos, vetores de doenças como dengue, malária e febre amarela também se torna problemática. Smith (1991) confirma resultados positivos na determinação da evapotranspiração de referência obtidos pelo método do Tanque Classe A, porém a tomada da leitura da lâmina de água evaporada e a conversão em valores de

evapotranspiração, por parte do produtor irrigante, exige certo conhecimento técnico sobre irrigação por parte do operador, isso acarreta dificuldades na aplicação do método para manejo da água de forma generalizada.

Como método mais preciso na estimativa da evapotranspiração de referência, segundo Doorenbos e Pruitt (1997), temos o método de Penman-Monteith (FAO, 1999), porém, necessita de dados climatológicos que nem sempre estão disponíveis, a exemplo do saldo de radiação (R_n) e o fluxo de calor no solo (G), esses dados só podem ser obtidos em estações meteorológicas convencionais completas e automáticas, que normalmente, demandam alto custo de implantação e mão de obra especializada e treinada para sua operação. Desta forma, ficando restrito a pesquisa e alguns produtores rurais.

Se os dados de entrada para o método Penman-Monteith (FAO, 1999) são inexistentes ou incompletos, o uso de métodos alternativos é aceito e justificado. Segundo Carvalho et al. (2011), a maioria dos trabalhos presentes na literatura, aponta como métodos mais estudados o Thornthwaite (TW), Hargreaves (HG), Blaney-Criddle (BC), Priestley-Taylor (PT), Turc (TC), Makkink (MK), Linacre (LN), Hamon (HM), Holdridge (HD), Radiação Solar (RS), Jensen-Haise (JH), Tanque Classe A (TCA) e por último e não menos importante o método Penman-Monteith (PM-FAO 56).

3.5 Atmômetros

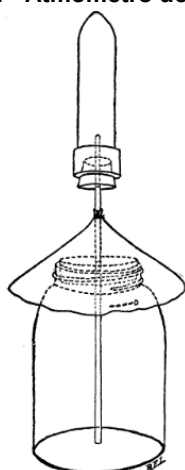
Os atmômetros seguem a mesma linha dos evaporímetros. Um atmômetro é um instrumento que mede a perda de água de uma superfície úmida e porosa, onde, a superfície de cerâmica porosa pode ter formato esférico ou cilíndrico; placas ou discos de papel-filtro também são utilizados como superfície de troca (WMO, 2012). Segundo Livingston (1910), denomina-se atmômetro qualquer instrumento usado para estimar ou medir diferentes intensidades de evaporação; os principais tipos de atmômetros são descritos a seguir.

O precursor do atmômetro que conhecemos hoje foi concebido há muito tempo, por volta do ano de 1892, pelo cientista Italiano, físico e presbítero Angelo Bellani. Bellani (1820), conforme descrito e citado por Livingston merece os créditos pelo pioneirismo em empregar um sólido encharcado de água conectado por um tubo capilar, a um tanque reservatório, dotado de visor de nível, disposto logo abaixo da cápsula. O mesmo princípio serviu de base para a construção dos atmômetros de

Piche-Cantoni e Babinet (LIVINGSTON, 1935). O uso dessa técnica se faz presente nos instrumentos atuais como no atmômetro modificado de Atenhofem (1985).

O atmômetro de Livingston, Figura 4, tem como elemento de troca um bulbo cerâmico de 2,5cm de diâmetro por 13 cm de comprimento conectado a um reservatório por um tubo de vidro ou metal, a pressão atmosférica sobre a superfície da água mantém a esfera saturada de água.

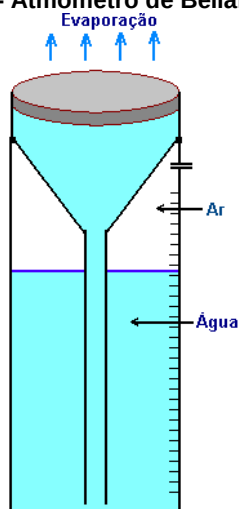
Figura 4 - Atmômetro de Livingston



Fonte: *Science New Series*, Vol. 28, No. 714 (Sep. 4, 1908), pp. 319-320

O atmômetro de Bellani, ilustrado na Figura 5, é composto por um disco cerâmico fixado no topo de um funil cerâmico, para onde a água é conduzida a partir de uma bureta graduada que atua como dispositivo de medição e reservatório.

Figura 5 - Atmômetro de Bellani

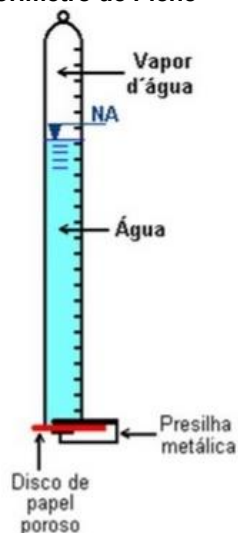


Fonte: livred, (2018).

O atmômetro de Piché, Figura 6, é um tubo de vidro com uma extremidade fechada e outra aberta, na qual se coloca um círculo de papel de filtro preso por uma

alça metálica. O evaporímetro é instalado e a água é evaporada através do papel de filtro. O rebaixamento do nível da água é notado dentro do tubo de vidro, pois o mesmo é graduado como uma bureta.

Figura 6 - Evaporímetro de Piché



Fonte: soilcontrol, (2018).



Fonte: soilcontrol, (2018).

Um método de manejo da irrigação por evaporímetro de Piché foi adaptado por Rassini (2002), que relacionou a evaporação da água do Piché à evapotranspiração de algumas culturas forrageiras, entre elas o capim Tanzânia (*Megathyrsus maximus*), capim “braquiário” (*B. Brizantha*) e alfafa (*Medicago sativa*). Segundo este autor, a variação do consumo de água das forrageiras estudadas foi de 55% a 72% da evaporação observadas no Tanque Classe A e no Piché. Ele ainda enfatiza que esses métodos são simples e de baixo custo, sobretudo se for usado o Piché.

Segundo a WMO (2012) os atmômetros são úteis em pesquisas em pequena escala, porém não é definida uma área específica para seu grau de atuação. Dentre suas vantagens estão apontadas o seu tamanho o baixo custo de aquisição e requer pouca água para entrar em operação. Redes densas de atmômetros podem ser instaladas em pequenas áreas para estudos de micro meteorologia.

Um dos principais apontamentos na operação dos atmômetros pela WMO está na problemática em manter a superfície evaporativa livre de impurezas, pois, a superfície suja afeta significativamente a taxa de evaporação, pássaros são os

principais responsáveis pela sujeira nas superfícies evaporativas, em alguns casos a cápsula deve ser substituída por uma cápsula nova, pois esse equipamento é permissível de calibração, porém não é permissível de ajuste. Além disso, o efeito das diferenças em suas medidas de evaporação é por vezes notável. Isto se aplica particularmente diferenças na exposição instrumento ao movimento do ar ao redor da superfície de evaporação, ou devido às áreas de sombra onde o instrumento encontra-se instalado. Para evitar tal problema, a área de instalação em potencial deve ser um local longe de edificações, sendo que, a edificação mais próxima deve estar distante, no mínimo cinco vezes o valor de sua altura de instalação, não deve ser instalado sobre concreto ou asfalto e embaixo de bicas ou goteiras (WMO, 2012).

Enquanto um tanque de evaporação mede a evaporação da água de uma superfície livre, um atmômetro mede a evaporação (EV) de uma superfície úmida e porosa. Estes equipamentos são utilizados desde 1900 para estudar a transpiração de plantas, no entanto nos anos 80, a placa de cerâmica foi coberta por uma tela verde ou GoreTex® para simular de forma mais precisa a transpiração de uma planta, esse instrumento é chamado de "Atmômetro modificado" de Altenhofen (1985), esta versão do atmômetro foi comparado por Broner e Law (1991) e por Altenhofen (1992) com o método de Penman ET e com o método FAO 56 (FAO, 1998).

Os autores observaram que a variabilidade entre os atmômetros foi pequena e a resposta da perda de água do instrumento foi semelhante à prevista pelas equações. Concluiu-se que o atmômetro poderia ser usado para estimar ETo para fins de manejo de irrigação.

O atmômetro modificado de Altenhofem é fabricado pela empresa ETgage™, com sede no Colorado, EUA. Está disponível com diferentes lonas de cobertura a fim de simular diferentes tipos de culturas de referência; é vendido nos EUA por aproximadamente US\$ 300,00 (junho, 2018).

3.6 A necessidade de modelagem de sistemas

De certa forma um modelo é a representação simplificada da realidade. Constrói-se um modelo com o objetivo de compreender melhor os sistemas em questão, sendo uma forma “mais fácil” e menos custosa de se experimentar um objeto ou situação quando comparados à utilização de sistemas reais.

Dentre as vantagens da criação de modelos, pode-se destacar as seguintes: a) Permitem a visualização do sistema como ele é ou como desejamos que seja; b) Permitem especificar a estrutura ou o comportamento de um sistema; c) Funcionam como um guia para a construção do sistema; d) Possibilita documentar todas as decisões tomadas, tal como os resultados obtidos.

O que leva a construção de modelos de um sistema complexo é a não possibilidade de compreendê-lo em sua totalidade (PUCPR, 2017). Os princípios que regem a modelagem de sistemas segundo Booch, Rumbaugh e Jacobson (2005) apontam que a escolha dos modelos criados afeta profundamente o problema específico em estudo, ou seja, a seleção de modelos propostos tem um forte impacto sobre a determinação da solução. De forma geral, cada modelo proposto, poderá assumir diferentes níveis de precisão.

Em relação aos modelos climatológicos ou agroclimáticos, a escolha de modelos poderá ser modificada, de maneira significativa, de acordo com a necessidade do estudo em aplicação. Cientistas distintos podem optar por avaliar a previsão de safra, em função do monitoramento da temperatura como fez Réaumur em 1735. Cada situação em estudo, cada elemento observável seja este na água, no solo, na planta ou na atmosfera, conduz a um tipo diferente de sistema, com inúmeras relações custo benefícios. A validade de um modelo agro meteorológico segue o princípio da modelagem computacional, que segundo Shimizu (1975), está associada à simplicidade e a complexidade do modelo, devendo este ser suficientemente simples permitindo sua manipulação e entendimento, e suficientemente complexo permitindo sua extrapolação e conclusão.

A aplicação “final” de um modelo dirigirá especial atenção para as funcionalidades do mesmo. Qual o melhor modelo agro meteorológico que você pode ter? Os melhores tipos de modelos são aqueles que permitem a escolha do nível de detalhamento das informações em função da representatividade dos dados utilizáveis no modelo, ou seja, um bom modelo é o modelo que seja capaz de funcionar com os dados confiáveis que se encontram disponíveis.

Ainda para Booch, Rumbaugh e Jacobson (2005), um modelo de excelência é diretamente relacionado com a realidade, e não é único e nem é suficiente. Qualquer sistema por mais específico que seja, é mais bem investigado e verificado por meio de um pequeno conjunto de modelos independentes.

Tecnicamente todos os modelos simplificam a realidade. Em determinadas aplicações é necessário garantir que o modelo não suprima elementos importantes do ambiente em questão. Outro aspecto importante arguido por Santos (2005) refere-se aos modelos velados em dados históricos de produtividades ou de safras. Onde se obtém tais dados de forma indireta, não se atentando a metodologias e sem o conhecimento acurado da área experimental, levando a resultados estatísticos significativos que nada tem a ver com a realidade.

Os modelos podem ser criados e estudados separadamente, mas continuam inter-relacionados quando buscam explicar a realidade, como por exemplo, a modelagem da ETo. Existem vários modelos distintos que consideram a temperatura média do ar, a exemplo: FAO 56 Penman-Monteith, Hargreaves-Samani (1985), Priestley-Taylor (1972), Makking (1957), Turc (1961). Assim cada método pode ser estudado independentemente, mas eles continuam inter-relacionados.

3.7 Histórico do instrumento objeto de estudo

A primeira cerâmica porosa foi proposta em 1813, pelo cientista escocês John Leslie. Foi adotado pelo sacerdote italiano Ângelo Bellani em 1820 e novamente em 1906 por Burton Edward Livingston, especialista em solo no Departamento de Solos do Departamento da Agricultura dos EUA.

Livingston (1910) sugeriu que um copo de argila branca porosa pode medir o “poder de evaporação do ar” e denotava uma problemática na operação do atmômetro, onde aparentemente havia certa dificuldade na forma de operação do atmômetro de corpo poroso. Pois de fato, a chuva incidente sobre o corpo de cerâmica exposto, penetrava no mesmo até o interior de seu reservatório, induzindo um fator indeterminável e desconhecido de evapotranspiração negativa.

Livingston observou que a proteção dos copos evaporativos contra a chuva em qualquer forma ou modo, sempre altera a exposição do sistema em relação às correntes de ar e a radiação solar incidente, isso colabora para diminuir o valor leitura do instrumento como medida do ambiente atmosférico das plantas. É possível determinar empiricamente a taxa na qual a água entrará no copo quando este for

completamente coberto por um filme de água. Esta taxa depende da porosidade e área superficial do copo e sobre o comprimento da coluna de água abaixo. Ocorre, no entanto, que durante uma tempestade a superfície não está de modo algum molhada continuamente. Rajadas de vento sopram a chuva contra um ou outro lado da superfície evaporativa, com uma brisa constante, um lado geralmente está seco e às vezes pode realmente estar perdendo água e somente quando a chuva cai verticalmente é que o copo fica uniformemente coberto com uma película de água. Durante o século XX pesquisadores esforçaram-se para sanar esse e outros problemas relativos ao uso e aplicação dessa tecnologia.

Carder (1960) estudou o atmômetro de placa de Bellani Black equipado com válvula de Livingston-Thone (uma válvula de lã e mercúrio utilizada desde 1920). Uma das características indesejáveis dessa válvula eram as frequentes obstruções que elas ocasionavam, sendo essas causadas por fungos, algas ou mesmo os fios de lã que se desprendiam e obstruíam seus capilares; mesmo com o uso de água destilada esse problema não era sanado. Carder fez seis montagens em campo com o objetivo de desenvolver um atmômetro tão desprovido possível das características desvantajosas inerentes ao uso da válvula de mercúrio e lã. O desempenho em campo de seis conjuntos diferentes de atmômetros foi determinado durante as estações de crescimento de 1956 a 1959. Para isso o autor utilizou o medidor de placa Bellani preto, equipado com a válvula de mercúrio e lã de Livingston-Thone como padrão e comparando-o com outras montagens, tais como, placa Bellani com válvula “U”, válvula de vidro temperado e válvula de mercúrio, além de duas outras diferentes usando protetores escudos (coberturas) de plástico em vez de válvulas. Uma montagem que funcionava no princípio de um medidor Piche e usando um disco poroso preto como almofada absorvente também foi testada. Carder observou que a resposta geral de todos os atmômetros para condições meteorológicas foram essencialmente à mesma as válvulas do tubo U e do tubo de vidro temperado estavam desobstruídas, desta forma, essas montagens provaram serem superiores em relação ao padrão. No entanto, esses tipos de válvulas não resolveram a dificuldade de operação. O uso de escudos (coberturas) para evitar essa dificuldade de operação aumenta a taxa de evaporação que fez com que os atmômetros equipados com um protetor respondessem significativamente fora de padrão. O conjunto de disco poroso preto também perdeu mais água por evaporação do que o padrão, mas sua resposta não foi significativamente diferente da montagem

convencional. O suporte de disco poroso preto não tem válvula nem cobertura, portanto era mais fácil de manter e operar do que os outros conjuntos. O autor provou que essa montagem funcionaria melhor que o modelo padrão e sem prever, também observou que essa montagem era menos suscetível ao dano causado pela geada. A investigação de Carder foi simples, porém, de muita representatividade na elaboração desse instrumento que mais tarde veio a ganhar novas características inseridas por outros pesquisadores.

A empresa ETgage Company (Loveland, CO, USA) desenvolveu no início da década de 1980 um atmômetro com a placa de evaporação cerâmica modificada. Essa placa foi coberta com uma tela verde para simular o balanço entre a quantidade de luz que é difundida ou refletida em uma superfície plantada, mais precisamente, um campo de alfafa. Esse instrumento foi utilizado em mais de 43 estados e 27 países, é comumente chamado de atmômetro de Altenhofen (1985). Consiste basicamente de uma superfície evaporante, composta de uma cápsula porosa coberta com uma lona especial de cor verde, ligada a um reservatório, onde a evaporação é quantificada através da variação do nível de água, por intermédio de uma escala graduada em milímetros. Estes atmômetros modificados destacam-se entre os demais modelos pela cobertura da cápsula porosa com a lona de cor verde, que tem como objetivo básico oferecer uma reflexão da radiação solar e uma resistência ao fluxo de vapor de água semelhante a um dossel vegetativo cultivado sem restrição hídrica, Pereira (1998) estudou o desempenho deste atmômetro e verificou que esse aparelho estima satisfatoriamente a ETo.

Hess (1996) testou quatro diferentes métodos para estimar ETo e o tempo de irrigação durante um ciclo de plantio em 1996, ressaltou ele que onde os dados meteorológicos diários estão disponíveis, a equação de Penman-Monteith (FAO, 1998) apresenta melhor estimativa da evapotranspiração de referência. O método Penman-Monteith demonstrou ser confiável em uma ampla gama de ambientes (ALLEN et al., 1994), desde que os próprios dados meteorológicos sejam confiáveis. Sendo as condições climáticas bastante consistentes espacialmente, os dados de uma estação meteorológica próxima, ou interpolados podem ser adequados. Onde exista variabilidade local significativa, como em zonas costeiras uma estação meteorológica automática no local é mais apropriada. Os resultados dos atmômetros de um único teste em 1996 feitos por Hess sugerem que, com manutenção cuidadosa e medições adequadas, os valores dia-dia podem diferir, pois o indicador

do instrumento só pode ser lido para ± 1 mm, no entanto, durante o período de um ciclo de irrigação típico (10 dias), os erros do dia-a-dia se cancelam e o impacto em um cronograma de irrigação é pequeno. Esse dispositivo seria um instrumento adequado para uso em culturas irrigadas menos sensíveis e onde o intervalo entre irrigações é maior. Deve-se ter certa cautela em seu uso, pois, a falta de manutenção do instrumento pode produzir resultados enganadores. Para o estudo de caso de Hess, o Tanque Classe A resultaria em excesso de irrigação significativo, não sendo recomendado para nada além de guia aproximado das taxas relativas de evapotranspiração.

Em função da grande área ocupada pelo Tanque Classe A, os pesquisadores, Fernandes, Cora e Araújo (2003), propuseram comparar valores das evapotranspirações de referência obtidas por estimativas de diferentes métodos, internamente e externamente a uma estufa, na região de Jaboticabal, SP, Brasil. Os autores compararam por análises de regressão linear simples os valores da ETo estimada pelo método do Tanque Classe A instalado dentro e fora da casa de vegetação versus métodos do Tanque reduzido e do atmômetro instalados no interior da casa de vegetação. Como resultado obtiveram valores de ETo estimada pelo Tanque Classe A interno, “Tanque Reduzido” e atmômetro correspondente a 56%, 69% e 63% da ETo estimada pelo Tanque Classe A externo, respectivamente. As regressões entre os valores das ETo estimados pelo Tanque Classe A e pelos outros dois métodos apresentaram valores do coeficiente de correlação (R^2) de 0,94 para o método do Tanque reduzido e de 0,91 para o método do atmômetro. As regressões entre os valores das ETo estimados pelo Tanque Classe A externo e aqueles estimados dentro casa de vegetação pelos diferentes métodos, apresentaram valor do coeficiente R^2 de 0,70 para o método do Tanque Classe A, de 0,66 para o método do Tanque Reduzido e de 0,62 para o método do Atmômetro. Os autores concluíram que esses resultados permitiram substituir o Tanque Classe A pelo Tanque Reduzido ou pelo atmômetro para estimativa da ETo aumentando a área útil da casa de vegetação.

Segundo Diop, Bodian e Diallo (2015), as estimativas de evapotranspiração de culturas de referência (ETo) com base na metodologia recomendada pela FAO exigem o conhecimento de vários dados meteorológicos em terras do mediterrâneo. Uma abordagem alternativa é o uso do atmômetro modificado que reduz o trabalho e a complexidade associada à programação de irrigação baseada em ETo. No

entanto, essas possibilidades foram postas à prova comparando atmômetros e Tanques Classe A em ambientes mediterrâneos com o intuito de estabelecer relações entre Penman-Monteith (PM) e os demais equipamentos. Para tal, foram realizados testes de campo durante cinco estações de irrigação em diferentes locais da costa leste e oeste do sul da Itália. Em todos os locais, foram encontrados valores elevados do coeficiente de correlação ao comparar as estimativas diárias de ETo com o atmômetro versus as de PM ETo. A dispersão de dados experimentais foi o resultado de leituras de atmômetros tomadas manualmente. Os modelos de regressão linear renderam coeficientes de interceptação que não diferiram de zero, em nenhum dos locais. Um relacionamento único poderia ser estabelecido entre o atmômetro e PM quando os dados de todos os locais foram agrupados, proporcionando um coeficiente de inclinação de 1,034. Ao comparar um lisímetro de pesagem de alta resolução durante uma estação de irrigação completa, encontrou-se uma inclinação não diferente da unidade. As comparações com o Tanque Classe 'A' indicaram uma pequena subestimação da ETo pelo atmômetro durante duas estações de irrigação consecutivas. Com base em evidências experimentais, os autores concluíram que o atmômetro pode ser usado para estimativas ETo confiáveis em condições mediterrâneas, tanto na fazenda quanto no nível de extensão, sempre que os dados meteorológicos padrão não estejam disponíveis.

Outro trabalho apresentado pelos autores, Diop, Bodian e Diallo (2015), objetivou testar os atmômetros modificados em relação ao método FAO 56. Para esse fim, os dados dos atmômetros foram comparados a evapotranspiração estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith, no intuito de avaliar a precisão dos atmômetros. Esse trabalho foi realizado no Arkansas. Para isso, medições de três atmômetros com superfície para gramado e três atmômetros com superfície para alfafa foram comparados à equação de alfafa e grama baseada em Penman Monteith (ETo_PM e ETr_PM), durante uma estação de plantio. A comparação entre evapotranspiração cumulativa medida por atmômetros e ETo_PM ou ETr_PM mostraram que os atmômetros grama e alfafa, respectivamente, subestimam a evapotranspiração em 12,5% e 15%, para alfafa deram o mesmo valor acumulado (636 mm). Já os atmômetros com cobertura para grama demonstraram diferentes resultados (atmômetros 1 e 3 (467 mm) e o atmômetro 2 deu 419 mm). Correlação entre ET dos atmômetros e as estimativas ETr_PM ou ETo_PM foram geralmente boas. Evaporação de atmômetros com a cobertura de alfafa mostrou maior

correlação com ETr_{PM} (R variando de 0,68 a 0,72) enquanto que a evaporação de atmômetros com cobertura de gramado apresenta a menor correlação (R variando de 0,49 a 0,68). Segundo os autores, os resultados indicaram que com a equação de regressão adequada e uma boa calibração, atmômetros poderiam ser usados para estimar ETo para requerimentos de água de culturas onde as estimativas de evapotranspiração não se encontram disponíveis a partir de estações meteorológicas.

Pereira e Coelho (1992) em estudo feito com atmômetros modificados da marca SEEI verificaram que as suas medidas de evaporação, com escala graduada em milímetros não possibilitavam uma quantificação precisa da evaporação para escala diária. Pereira (1998) confirmou esse fato quando comparou a evaporação (EV) do atmômetro modificado com a evapotranspiração de referência medida por um lisímetro de pesagem concluindo que o agrupamento de dados, necessitava um período de tempo igual ou superior a três dias, para compensar flutuações diárias. Pereira ainda observou a existência da dificuldade em visualizar precisamente a posição do menisco de água no tubo de vidro o que acarretava impossibilidade de leitura desse valor em um pequeno período de tempo, o que inviabiliza o emprego do atmômetro modificado em programas de controle mínimos da lâmina irrigação, onde se precisa medidas com décimo de milímetros. O autor, visando eliminar essa deficiência do equipamento, propôs um dispositivo de baixo custo e de fácil instalação com possibilidade de confecção pelo próprio usuário. Pereira, Coelho e Frizzone (2004) avaliaram o dispositivo desenvolvido por Pereira; concluíram que a leitura do atmômetro modificado apresentou uma precisão considerável nas medidas de evaporação na ordem de 0,16 mm, demonstrando superioridade em relação ao equipamento comercial padrão, que apresenta precisão de medida de 1,0mm. Os atmômetros com o dispositivo idealizado apresentaram precisão satisfatória para períodos de tempo diários de 2, 3 e 4 dias.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para a elaboração deste trabalho, se fez necessário determinar o tamanho amostral da distribuição das unidades em campo e assim determinar a quantidade total de equipamentos e recursos a serem empregados. De forma a tender qualquer distribuição específica, como regra prática, na estatística, é adotado pelo menos 20 unidades experimentais e um mínimo de 10 graus de liberdade para resíduos. Deste modo, a lista de materiais e custos utilizados na produção desses equipamentos está descriminada na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais utilizados para construção dos atmômetros com seus respectivos custos.

Item	Descrição/características	Quantidade	Valor em Reais
01	Tubo de PVC 75 mm (esgoto)	40 peças de 38 cm.	230,00
02	Cap Esgoto 75 mm	80 peças.	300,00
03	Tubo Acrílico 8x250mm	40 peças.	400,00
04	Conexão Cotovelo L Instantânea – Push-in (BSP) 8 mm x 1/8”.	80 peças.	500,00
05	Cápsula de evaporação Lateral	20 peças.	800,00
06	Cápsula de evaporação superior	20 peças.	800,00
07	Forma para fabricação das cápsulas (desenvolvimento).	01 peça.	300,00
08	Tubo capilar 6x350mm	40 peças.	10,00
09	Rolhas de borracha número 5	40 peças	45,00
10	Elemento de proteção das cápsulas (cobertura).	20 peças	10,00
11	Estacas de madeira 50x30x1500mm	20 peças	0,0 (Doação)
12	Verniz marítimo de cor transparente, brilhante, viscosidade 70+-10” CF4 A25°C, densidade 0,917 +- 0,020g.cm-3, sólidos 51,03+- 2% e brilho 95+-2UB	3,2 litros	60,00
-	Custo individual unidade completa	Unidade	~61,00

Os dados para o cálculo de ETo foram coletados pela Estação Meteorológica Automática do Lageado nas coordenadas Latitude 22°50’48,14”S Longitude 48°25’53,52”O e altitude 786m, do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade Ciências Agronômicas da UNESP. A Tabela 2 detalha os componentes sensores que atualmente são utilizados na estação meteorológica.

Tabela 2 - Detalhes dos componentes sensores utilizados na estação meteorológica

Variável	Modelo	Características técnicas	Fabricante
Temperatura e umidade relativa	HC2S3	Sensor de temperatura: PT100 RDE IEC751 1/3 class B Acurácia: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ a 23°C Intervalo de operação: -40°C a 100°C Sensor de umidade relativa: Retronic Hygremmer IN1 Acurácia: $\pm 0,8\%$ a 23°C	Campbell Scientific, INC.
Vento	MET one 034b WS	Velocidade do vento: Acurácia: $\pm 12\text{m/s}$ para velocidade do vento $<10,1$ $\pm 1,1\%$ da leitura para velocidades $>10,1\text{m/s}$ Intervalo de operação 75m/s Direção do vento: Acurácia: $\pm 4^{\circ}$ Intervalo de operação: 0 a 360° azimuth	Campbell Scientific, INC.
Chuva	TB4 Rain Gage	Resolução: $0,254\text{ mm}$ Acurácia: 2% no intervalo de operação	Campbell Scientific, INC.
Radiação Solar	CMP 3	Acurácia: $\pm 10\%$ para dias ensolarados Espectro de medida: de 310 a 2800 nm Temperatura de operação: -40°C a 80°C	Kipp & Zonen

Fonte: Estação Lageado (2017)

4.2 Métodos

A metodologia consiste na observação sistemática dos valores da evapotranspiração em cada unidade instalada em campo. Foi registrado diariamente e individualmente os valores da calibração de cada um dos atmômetros, posteriormente utilizando o método de regressão linear simples, buscou-se ajustar os valores calibrados com os valores do método padrão de estimativa de evapotranspiração FAO-56 Penman-Monteith (FAO 1998) para o mesmo período.

Primeiramente, apenas o fator cápsula porosa é posto à prova, desta forma foram desenvolvidos e estudados dois tipos atmômetros. O primeiro tipo de atmômetro é dotado de uma cápsula porosa de superfície de evaporação apenas em posição lateral e sem protetor de tecido, e foi denominado Atmômetro de Superfície Evaporativa Lateral (ATEL). O segundo tipo de atmômetro tem cápsula porosa de superfície de evaporação superior, dotada de protetor de tecido especial impermeabilizado que impede a sua saturação com água de chuva ou irrigação seguindo a mesma proposta do atmômetro modificado de Atenhofem (1985), sendo denominado de Atmômetro de Superfície Evaporativa Superior (ATES).

Definiu-se, portanto, 20 unidades experimentais para cada tipo de cápsula porosa colocadas em teste, totalizando assim 40 unidades experimentais distribuídas; sendo 20 equipadas com cápsula porosas de superfície de evaporação em posição lateral, e as outras 20 com cápsulas porosas de superfície de evaporação superior. Demais propriedades foram mantidas iguais.

A variável que foi observada e medida em cada unidade estatística é do tipo variável quantitativa contínua, ou seja, assume como possíveis valores, números em intervalos da reta real resultantes de mensurações realizadas diariamente, no horário das 9h da manhã.

A montagem do experimento se deu inicialmente com o desenvolvimento da forma para fabricação das cápsulas de porcelana porosa, Figura 7, para isso foi contratado um serviço especializado na área de prototipagem em componentes dessa natureza. Após isso, as peças de porcelana foram fundidas e caracterizadas como porcelana de base argilosa com 40% de porosidade, Figura 8.

Figura 7 - Forma para produção das cápsulas porosas



Fonte: O autor (2018).

Figura 8 - Cápsula sem tratamento

Fonte: O autor (2018).

Após a produção das cápsulas as mesmas foram selecionadas de forma casual para que recebessem os tratamentos a seguir: tratamento de cobertura lateral (Figura 9 (A)), que se refere à impermeabilização da lateral da cápsula porosa, feito pelo método de imersão, utilizando verniz marítimo; tratamento de cobertura superior (Figura 9 (B)), que se refere à impermeabilização da parte superior (cúpula) da cápsula porosa, pelo método de imersão, utilizando verniz marítimo. Ao todo foram aplicadas três camadas de verniz, utilizando o verniz descrito na Tabela 1. Feito isso, realizou-se a montagem das cápsulas nas tampas base dos devidos reservatórios, Figura 10.

Figura 9 – (A) Impermeabilização lateral e (B) Impermeabilização superior

(A) - ATES



(B) - ATEL

Fonte: O autor (2018)

Figura 10 – Tampa base de PVC



Fonte: O autor (2018).

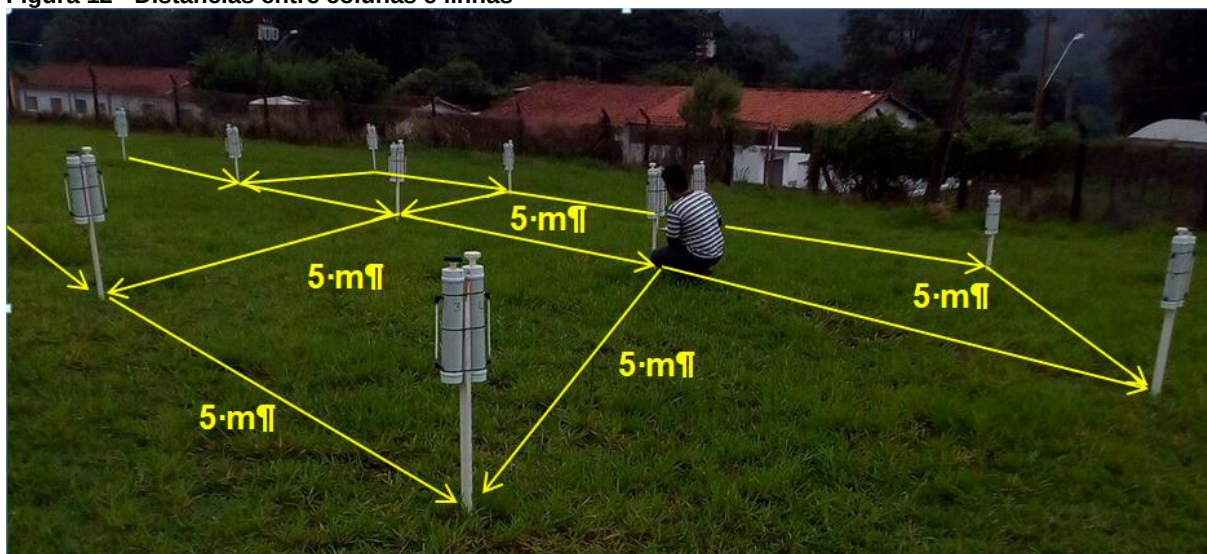
Cada atmômetro possui um reservatório onde se armazena a água que alimenta a cápsula porosa. Esse reservatório tem um vaso comunicante, feito em acrílico transparente, que serve para tomar as leituras de nível e evaporação. A leitura dos valores de evaporação (EV) dos atmômetros foi feita de forma manual, comparando-se o nível interno mostrado no tubo de acrílico, com uma escala milimetrada que é colada no mesmo. A Figura 11 ilustra a posição do visor de acrílico.

Figura 11 - localização dos tubos visores de leitura



A distribuição das unidades em campo seguiu o padrão de instalação proposto pela WMO (2012), ficando conforme ilustra a Figura 12, com 4 linhas 5 colunas, sendo as distâncias entre colunas e linhas de 5 m, totalizando 20 pontos.

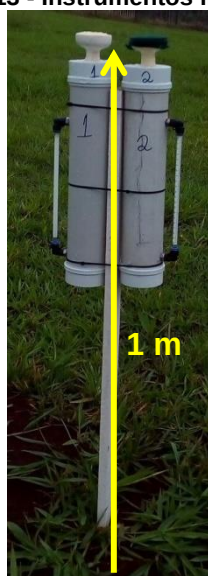
Figura 12 - Distancias entre colunas e linhas



Fonte: O autor (2018).

Em cada ponto foi cravado uma estaca de madeira de forma a sustentar e fixar dois instrumentos de medidas, Figura 13, que foram instalados de forma aleatória quanto a sua orientação com referência ao norte, selecionados entre um ATEL e um ATES. Os instrumentos após a instalação ficaram com sua cápsula na altura de 1m do solo, todos os mesmos foram numerados em sequência de forma a facilitar a leitura e marcações.

Figura 13 - Instrumentos instalados em campo na altura de 1 metro do solo



Fonte: O autor (2018).

4.2.1 Associações de coeficientes para o desenvolvimento das regressões lineares

Para se determinar todas as possibilidades de análises entre a combinação de elementos climáticos e a evaporação observada nos atmômetros, foi estabelecida conforme a Tabela 3 uma lista de coeficientes a serem consideradas para cada equação a ser gerada. Deste modo, o termo constante a_0 representa a interceptação da reta com o eixo vertical. Já os termos a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 representam a inclinação (coeficiente angular) em relação à variável (independente) explicativa associada. Seguindo na sequência, os termos coeficiente angular relacionam a variável a_1 - Evaporação (EV), a_2 - Temperatura média do ar (T), a_3 - Umidade relativa do ar média (UR), a_4 - Velocidade média do vento (U2) a dois metros de altura e a_5 - Radiação solar global (G).

É possível a combinação total de 16 equações para cada tipo de atmômetro, por serem dois os tipos de atmômetros, é obtido um total de 32 equações de estimativa de ETo com seus respectivos R^2 . O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados.

Das 16 equações possíveis, apenas uma possibilidade, a possibilidade de número 16, é tida como equação de regressão linear simples, ou seja, que contempla apenas os termos a_0 e a_1 ; as demais possibilidades são todas regressões lineares de múltiplos termos.

Tabela 3 – Representação dos componentes contidos em cada equação de regressão.

Possibilidade de Equação	ATEL							ATES						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2
1	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	
2	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•		
3	•	•	•	•		•		•	•	•	•		•	
4	•	•	•	•				•	•	•	•			
5	•	•	•		•	•		•	•	•		•	•	
6	•	•	•		•			•	•	•		•		
7	•	•	•			•		•	•	•			•	
8	•	•	•					•	•	•				
9	•	•		•	•	•		•	•		•	•	•	
10	•	•		•	•			•	•		•	•		
11	•	•		•		•		•	•		•		•	
12	•	•		•				•	•		•			
13	•	•			•	•		•	•			•	•	
14	•	•			•			•	•			•		
15	•	•				•		•	•				•	
16	•	•						•	•					

4.2.2 Método de Penman Monteith-FAO56 para o cálculo da evapotranspiração de referência

Há uma diversidade de estudos agro meteorológicos que utilizam os dados da evapotranspiração de referência (ET_o). Tais estudos incluem modelos de produção, balanços hídricos e zoneamentos agroclimáticos, assim como o manejo e o dimensionamento de sistemas de irrigação. O método considerado padrão para se estimar a ET_o, atualmente, é o método de Penman-Monteith, publicado no manual 56 da FAO (ALLEN et al., 1998). Para a aplicação do método são necessários dados de temperatura do ar (T) (máxima e mínima), velocidade do vento a 2 m de altura (U₂), umidade relativa do ar (UR), fluxo total diário de calor no solo (G) e do saldo de radiação (R_n). Segundo Conceição (2006) as estações automáticas que são utilizadas em áreas irrigadas possuem registros dessas variáveis na maior parte do tempo, porém, nem todas as estações meteorológicas disponíveis dispõem para o propósito de irrigação os sensores necessários para o registro dessas variáveis. Os valores de R_n e G são os mais indisponíveis quando se trata de registros.

De algum modo se faz necessário estimar uma ou mais variáveis tidas como indisponíveis, desta forma uma metodologia para a estimativa dessas variáveis faltantes é sugerida por Allen et al. (1998), onde é proposto que: deve-se considerar iguais à zero os valores de G quando o cálculo for diário os valores de R_n podem ser estimados com base nos valores de T_{max}, T_{min}, UR e da radiação solar incidente (R_s).

A estação meteorológica automática na fazenda Lageado, no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade Ciências Agrônômicas da UNESP, disponibiliza os seguintes dados para o cálculo de evapotranspiração de referência, a saber:

- Temperatura;
- Umidade relativa;
- Vento: Velocidade e Direção;
- Chuva;
- Radiação Solar;
- Pressão Atmosférica.

Segundo Allen et al. (1998), para a estimativa de ETo pelo método de Penman-Monteith-FAO 56 utiliza-se a seguinte expressão:

$$ET_{ToPM} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \cdot \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

em que:

- Δ é a declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$)
- R_n é o saldo de radiação diário ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$)
- G é o fluxo total diário de calor no solo ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$)
- γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$)
- U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1})
- e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa)
- e_a é a pressão atual de vapor (kPa)
- T é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$).

O roteiro de cálculo apresentado a seguir teve como referência a Circular Técnica 65 da Embrapa (2006). Quando se dispõe dos dados de " R_n " e " G ", o desenrolar do cálculo se dá pela seguinte metodologia:

Primeiramente os valores de " R_n ", " G ", " U_2 " e " T " são obtidos na estação meteorológica, posteriormente a isso, calcula-se os valores " Δ ", " γ ", " e_s " e " e_a ".

O valor de " Δ " é calculado pela seguinte expressão:

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

O coeficiente psicrométrico " γ " é calculado empregando-se a expressão:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P_{atm} \quad (3)$$

Porém a expressão acima necessita do valor de " P_{atm} ", que é a pressão atmosférica local em (kPa), essa por sua vez, pode ser calculada com base na

altitude do local "z" dada em metros (m) acima do nível do mar, conforme apresentado a seguir.

$$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \quad (4)$$

Os *déficits* de saturação "es" e "ea" devem ser calculados utilizando-se as expressões:

$$e_s = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \quad (5)$$

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad (6)$$

O valor da UR é a umidade relativa média do ar (%), que é medida pela estação meteorológica.

Estimativa do saldo de radiação (Rn)

Os valores de "Rn" poderão ser calculados tendo como base o método de Allen et al. (1998), onde valores das variáveis Tmax, Tmin, UR e da radiação solar incidente "Rs" medidas no local, são utilizados na obtenção dessa grandeza ou o método de Galvani et al. (1998) desenvolvido para a região de Botucatu que utiliza a Radiação Global.

O saldo de radiação (Rn) estimado seguindo o método, proposto por Allen et al. (1998), é apresentado a seguir.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

Sendo: "Rns" o saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e "Rnl" o saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$).

Para o cálculo do saldo de radiação de ondas curtas (Rns) é utilizado à expressão a seguir.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (8)$$

em que "Rs" é a radiação solar incidente ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$), medida na estação meteorológica, e " α " é o albedo (coeficiente de reflexão da vegetação), considerado igual a 0,23 para a cultura de referência (grama).

Cálculo do saldo de radiação de ondas longas (Rnl).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{\max} + 273,16)^4 + (T_{\min} + 273,16)^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

em que:

- é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 * 10^{-9} \text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$)
- Tmax e Tmin, a temperatura máxima e mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$).
- Rs é a radiação solar incidente ($\text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$)
- Rso é a radiação solar incidente na ausência de nuvens ($\text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$)
- ea é a pressão atual de vapor (kPa), calculada pela equação 2.6.

O valor de Rso é calculado pela expressão:

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

Sendo "z" a altitude em metros (m) e "Ra" é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

"Ra" é calculada pela seguinte equação:

$$R_a = \frac{118,08}{\pi} dr [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (11)$$

O valor de " φ " representa a latitude do local em radianos.

A distância inversa relativa entre a Terra e o Sol "dr" (rad) é calculada por:

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (12)$$

Em que "J" é o dia do ano.

A declinação solar " δ " (rad) é dada por:

$$\delta = 0,409 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (13)$$

O ângulo horário ao nascer do sol " ω_s " (rad) é calculado por:

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

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

O método apresentado necessita de um grande número de cálculos e ajustes de unidades, esses procedimentos podem acarretar em erros. Recomenda-se execução cuidadosa e revisão criteriosa. Outra questão é em relação à forma de obtenção das grandezas via estimativa. Apesar de ser uma metodologia postulada, quando se tem opção de medir diretamente um dado no local, o dado medido no local será mais próximo da realidade do que o dado estimado para o mesmo local. Por esse motivo, outra forma de obtenção da " R_n " foi utilizada por (AZEVEDO et al. (1997) GALVANI et al. (1998) e SENTELHAS et al. (1998)), onde respectivamente concluíram que para estudos correlacionados a evapotranspiração e balanço de energia, se faz possível estimar com excelente precisão o saldo de radiação (R_n), utilizando apenas os dados da radiação solar global incidente.

Galvani et al. (1998), verificaram que para as condições climáticas de Botucatu-SP, a relação do saldo de radiação R_n dentro de estufas foi de 0,576 para quando a estufa está com orientação Leste-Oeste e 0,558 para quando a orientação esta norte-sul. Numa área de gramado, utilizando o método de regressão linear, o autor calculou o saldo de radiação " R_n " em função da radiação global interna (G_{int}) e externa (G_{ext}) obtidas por leituras da radiação global dentro e fora de uma estufa, o saldo de radiação medido em condição interna foi chamado de (SR_{int}) e aqueles obtidos externamente chamados de (SR_{ext}), como resultado foram obtidas as seguintes relações:

Tabela 4 - Cálculo do " R_n " em função das estações do ano

Cálculo do " R_n " para os períodos de Outono e Inverno

Condições Internas	$SR_{int} = 0,612 * G_{int}$
Condições Externas	$SR_{ext} = 0,502 * G_{ext}$
Cálculo do " R_n " para os períodos de Primavera e Verão	
Condições Internas	$SR_{int} = 0,70 * G_{int}$
Condições Externas	$SR_{ext} = 0,66 * G_{ext}$

Fonte: GALVANI et al. (1998).

Como o experimento proposto foi instalado em campo nos períodos de 29/10/2017 a 23/12/2017, segundo apresentado na Tabela 4 - Cálculo do “Rn” em função das estações do ano, a relação utilizada para obtenção do “Rn” será a de condições externas para o período de primavera e verão.

4.2.3 Calibração e verificação.

Segundo definição da Resolução da Diretoria Colegiada RDC 217/2010

“calibração: conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões”

Ainda segundo a definição do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), Calibração é:

“Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecida por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação. NOTA 1 Uma calibração pode ser expressa por meio duma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração. Em alguns casos, pode consistir duma correção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma incerteza de medição associada. NOTA 2 Convém não confundir a calibração com o ajuste dum sistema de medição, frequentemente denominado de maneira imprópria de “autocalibração”, nem com a verificação da calibração. NOTA 3 Frequentemente, apenas a primeira etapa na definição acima é entendida como sendo calibração.”.

Em síntese a calibração é uma sequência de leitura regular, feita em um dispositivo de medição, a fim de comprovar sua eficácia. Este procedimento é chamado de calibração e ao contrário do que o nome sugere, não é um procedimento de manutenção ou ajuste para este dispositivo. A calibração apenas verifica a precisão do equipamento e os desvios e erros que possam existir entre a sua leitura e o valor real da grandeza. Isso inclui a verificação de que os resultados obtidos em alguns dos equipamentos utilizados para esse fim estão de acordo com os padrões estabelecidos pela autoridade competente.

No Brasil a autoridade competente regulamentadora do setor é o INMETRO para medidas e rastreabilidade ligadas a indústria de processos e ao comércio. Para medidas agrometeorologias no Brasil, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os procedimentos seguem normatização internacional da WMO.

A terminologia “Aferição”, usualmente citada quando se referia a Verificação e a Calibração foi abolida pelo VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia. Deste modo, nesse trabalho a terminologia adotada seguirá essa literatura.

4.2.4 Métodos de correção de dados baseados em regressão linear simples e múltipla

Inicialmente para cada sensor instalado, foi criada uma curva de regressão simples.

$$y = ax + b \quad (16)$$

onde x é o valor medido pelo atmômetro e y é o valor de ETo de referência.

Tais equações foram criadas buscando realizar um ajuste (correção/calibração) dos dados frente ao dado considerado padrão de referência fornecido pela estação meteorológica (método de Penman-Monteith).

Uma vez que cada um dos n atmômetros foi posicionado em locais diferentes um dos outros e muito próximos da estação, faz-se necessária tal ajuste dos mesmos em relação à grandeza real (ETo).

Posteriormente, buscando um ajuste com maior precisão, foi desenvolvido para cada atmômetro um modelo de regressão linear múltipla.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (17)$$

onde x_1 é o valor medido pelo atmômetro, x_2 é o valor da temperatura média e x_3 é a umidade relativa do ar média.

Por fim, buscando um único ajuste geral para todos atmômetros simultaneamente, foram desenvolvidos 16 modelos de regressão linear múltipla do tipo $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$, onde x_1 é o valor medido pelo atmômetro, x_2 é o valor da temperatura média, x_3 é a umidade relativa do ar média, x_4 é a velocidade do vento média e x_5 é a irradiância média. Vale ressaltar que cada um dos 16 modelos fazia a inclusão de parte das variáveis $x_i, i = 1, \dots, 5$.

4.2.5 Método de análise do grau de ajuste do modelo

Para a verificação da adequação dos modelos de regressão adotados, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2), com os respectivos valores de p associados, que possibilitaram classificar o modelo como significativo ao nível de 5%.

O teste é feito inicialmente calculando-se o valor de R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (18)$$

O teste é realizado após o cálculo do p -valor considerando-se $n - 1$ grau de liberdade. Caso $p < 0,05$, conclui-se que existe uma relação significativa entre os dados medidos experimentalmente e os obtidos pelo modelo, e assim, pode concluir que o modelo é adequado.

4.2.6 Métodos de análise de dados baseados no coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson, chamado de "coeficiente de correlação produto-momento" ou simplesmente de " ρ de Pearson" mede o grau e a direção da correlação (se positiva ou negativa) entre duas variáveis. Este coeficiente, normalmente representado por " ρ " assume apenas valores entre -1 e 1.

$\rho = +1$ - Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.

$\rho = -1$ - Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.

$\rho = 0$ - Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, por existir uma dependência não linear, o resultado pode ser investigado por outros meios.

É usado quando as duas variáveis em estudo são normalmente distribuídas. Esse coeficiente é afetado por valores extremos, o que pode exagerar ou diminuir a força do mesmo, portanto, é inadequada sua aplicação quando uma ou ambas as variáveis não são normalmente distribuídas. O próprio coeficiente de correlação é representado pela letra minúscula "r" ou pela letra grega minúscula rô, (ρ). A fórmula para calcular a amostra do coeficiente de correlação de Pearson é dada a seguir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (19)$$

Cabe observar que, como o coeficiente é concebido a partir do ajuste linear, então a fórmula não contém informações do ajuste, ou seja, é composta apenas dos dados.

4.2.7 Análises estatísticas e correção de dados

A coleta de dados do valor de evaporação (EV) dos instrumentos ATEL, ATES foi feita uma vez por dia, por 52 dias ininterruptos, juntamente com os dados da estação meteorológica que já se encontrava instalados no local.

A partir dessas medidas, foram feitos os cálculos para a determinação do valor da evapotranspiração de referência padrão diária (FAO 1998), fidedigno e passível de comparação com os valores observados nas unidades experimentais (ATEL e ATES).

A composição do nível de influência do fator testado se deu pela verificação dos valores de evaporação (EV) em (mm.dia⁻¹) observados em cada um dos tipos de instrumento que foram postos em teste. Pelo método de correlação de Pearson, *a priori*, buscou-se o grau de correlação e a direção da correlação existente (R) entre a medida de ETo referência e a medida da EV provinda dos Atmômetros desenvolvidos.

O modelo FAO-56 Penman-Monteith (FAO 1998) foi utilizado como valor de referência no procedimento de calibração de cada unidade experimental testada, ou seja, foi feita a comparação de cada um dos equipamentos com o valor da ETo padrão.

Esse procedimento serve para verificar se o mesmo se comporta em linha com afirmação de WMO (2012), de que o equipamento não permite calibração direta da cápsula. Deste modo, foram registradas informações meteorológicas reais no local visando criar uma base de dados de referência ao presente estudo, isto é, valores que pudessem ser utilizados para calcular a evapotranspiração ETo.

O conjunto de dados para o cálculo de referência ETo foram compostos pelas medidas dos seguintes elementos:

- Temperatura média (°C);
- Temperatura máxima (°C);
- Temperatura mínima (°C);
- Radiação Global (Mj. m⁻²);
- Umidade Relativa (%);
- Velocidade do Vento (m.s⁻¹);
- Pluviosidade (mm.dia⁻¹).

Uma vez que em cada dia foram obtidos 20 valores de evaporação (EV) para cada um dos tratamentos (ATEL e ATES), então para cada dia, considerou-se para efeito de banco de dados 20 valores idênticos da evapotranspiração (ETo) calculada em função dos dados da estação meteorológica.

Visando-se realizar uma comparação entre as duas classes de atmômetros aqui estudados, foi realizado um teste t pareado, comparando-se os tratamentos ATEL e ATES, com 1040 repetições (20 equipamentos x 52 dias) por tratamento.

Posteriormente, com o objetivo de realizar a calibração dos equipamentos, foram feitas análises de regressão simples, estabelecendo-se assim uma equação de correção para cada atmômetros da forma $y = ax + b$ (18), onde x é o valor medido pelo atmômetro e y é o valor de ETo de referência.

Para todas análises estatísticas realizadas, foi considerada uma significância de $p \leq 0,05$, e utilizado o *software* Minitab® 18.1 (Minitab, 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Atmômetro de Cápsula evaporante lateral e atmômetro de capsula evaporante superior

Como parte integrante do resultado desse trabalho o desenvolvimento e a construção dos 40 atmômetros, teve papel fundamental na elaboração e obtenção dos demais resultados. Com o propósito de provar ou não a influência do posicionamento da superfície de evaporação, esses instrumentos foram etiquetados e cada uma recebeu uma equação de ajuste corretivo, permitindo assim, a inclusão de cada unidade em um modelo matemático associado que pudesse representar a realidade. Como resultado da etapa de produção e montagem descrita na metodologia, foram obtidos os componentes ATEL e ATES Figuras Figura 14 e Figura 15. A camada de verniz é notada na parte superior da capsula do atmômetro de superfície evaporante lateral (ATEL) e na parte inferior da capsula atmômetro de superfície evaporante superior do (ATES).

Figura 14 – Cápsulas de evaporação montadas na base de PVC



Cápsula ATEL montada na base de PVC



Cápsula ATES montada na base de PVC

A Figura 15 mostra o instrumento ATES pronto e com a manta de tecido tipo Sarja na cor verde oliva.

Figura 15 - Cápsula ATES com proteção montada na base de PVC



Fonte: O autor (2018).

A Figura 16 mostra os instrumentos prontos e como ficaram distribuídas as unidades na área do experimento instaladas em campo.

Figura 16 - Instrumentos instalados em campo.



Fonte: O autor (2018).

A Figura 17 mostra em detalhe os atmômetros ATEL e ATES instalado na estaca de madeira.

Figura 17 – Atmômetro evaporativo lateral e atmômetro evaporativo superior.

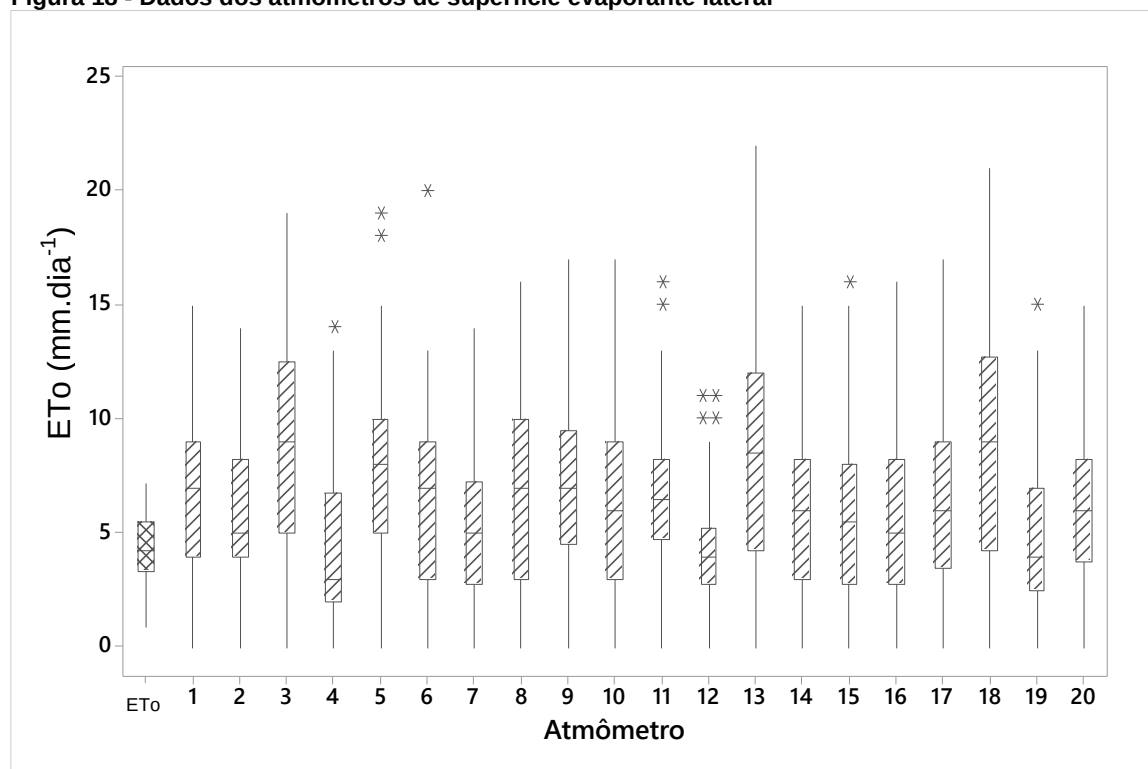


Fonte: O autor (2018).

5.2 Comparação do funcionamento do atmômetro de superfície evaporante lateral versus atmômetro de superfície evaporante superior

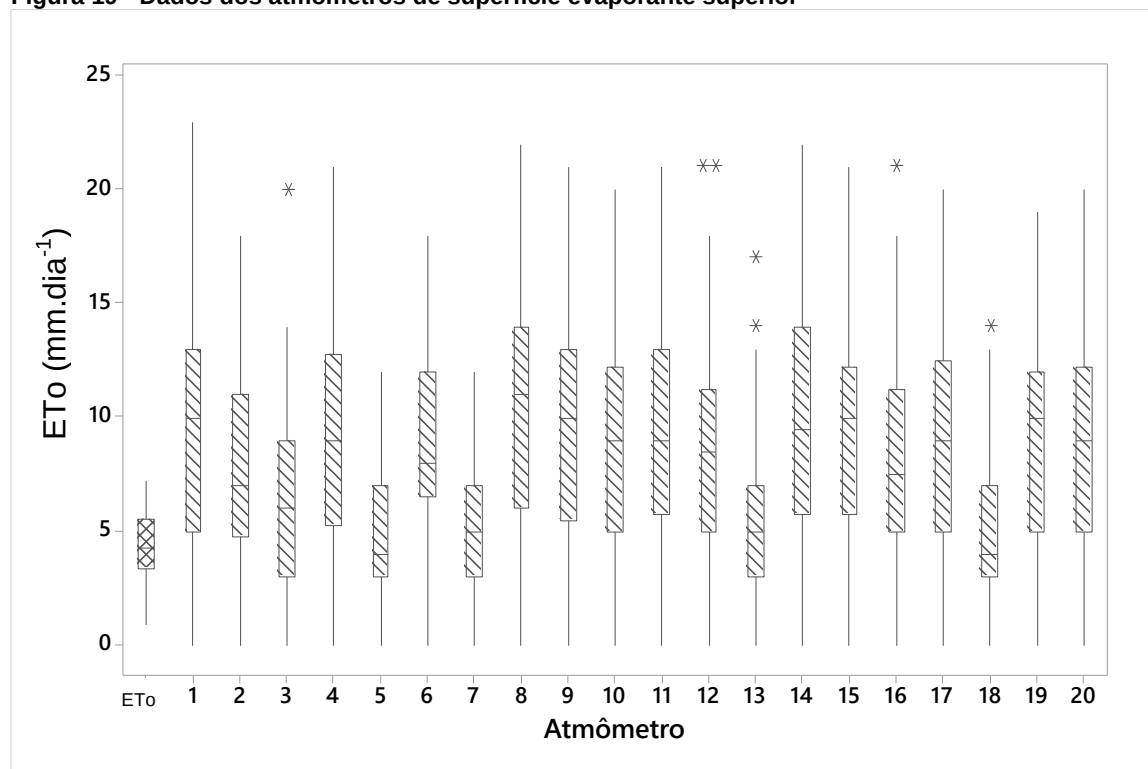
Nesta seção apresenta-se o comportamento de trabalho de cada atmômetro entre si e em relação à referência. O objetivo dessa seção é apresentar graficamente o comportamento e a análise correlacional entre os atmômetros (atmômetros entre si) e o valor de referência. Foge ao propósito desta seção expor o quanto um resultado explica o outro. As Figuras Figura 18 e Figura 19 apresentam respectivamente os valores de Evaporação (EV) que foram obtidas pela leitura diária dos atmômetros ATEL e ATES, bem como os valores de referência ETo.

Figura 18 - Dados dos atmômetros de superfície evaporante lateral



Fonte: O autor (2018).

Figura 19 - Dados dos atmômetros de superfície evaporante superior



Fonte: O autor

As Tabelas 5 e 6 representam as correlações existentes entre os atmômetros (atmômetros entre si) e o valor de referência. A primeira coluna de cada tabela expressa os coeficientes de correlação de Pearson de cada atmômetro com o valor de referência ETo.

Uma vez que 80% dos coeficientes assumem um r entre 0,7 e 0,8, pode-se afirmar, segundo Mukaka (2016), que está correlação é forte:

- 0,9 - para mais ou para menos indica uma correlação muito forte.
- 0,7 a 0,9 - positivo ou negativo indica uma correlação forte.
- 0,5 a 0,7 - positivo ou negativo indica uma correlação moderada.
- 0,3 a 0,5 - positivo ou negativo indica uma correlação fraca.
- 0 a 0,3 - positivo ou negativo indica uma correlação desprezível.

Fonte: Mukaka, (2016).

Mostra-se por essa análise, que uma regressão para a correção dos dados medidos, poderá retornar um valor muito próximo ao valor de referência ETo. Além disto, nas demais colunas são apresentadas as correlações de *Pearson* dos demais atmômetros entre si.

Nas Tabelas 5 e 6 os valores de r são na sua maioria superiores a 0,8. Sendo que, 89% dos valores de r assumidos para o atmômetro ATEL estão acima de 0,8 e 11% assumiram um r entre de 0,7 e 0,8. Para os instrumentos do tipo ATES 86% dos valores de r encontram-se acima de 0,8 e 13% assumiram valores de r entre 0,7 e 0,8. Esse comportamento denota uma forte correlação tanto entre os instrumentos do tipo ATEL, quanto para os atmômetros do tipo ATES indicando uniformidade na construção dos equipamentos.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Pearson significativas ($p < 0,05$) entre todos os dados dos atmômetros de superfície de evapotranspiração lateral bem como com a evapotranspiração de referência.

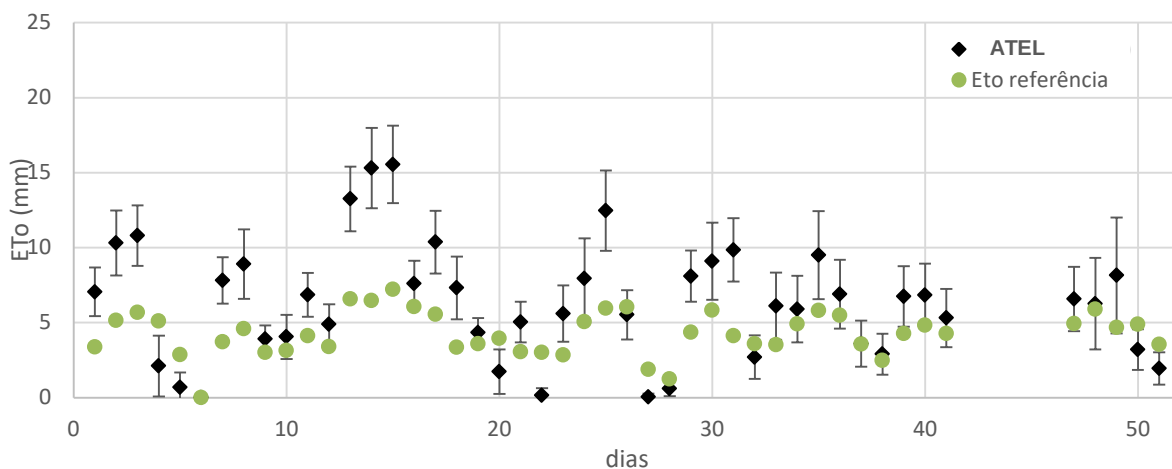
-	ETo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,80	0,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,80	0,93	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0,56	0,68	0,76	0,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,77	0,87	0,92	0,94	0,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,74	0,91	0,91	0,94	0,75	0,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0,76	0,86	0,92	0,90	0,85	0,94	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,82	0,97	0,97	0,97	0,77	0,93	0,95	0,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0,80	0,90	0,92	0,92	0,74	0,90	0,90	0,88	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,80	0,90	0,92	0,94	0,78	0,90	0,91	0,92	0,93	0,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0,78	0,92	0,93	0,91	0,79	0,91	0,94	0,89	0,95	0,92	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,65	0,76	0,84	0,79	0,85	0,89	0,79	0,93	0,82	0,83	0,83	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-
13	0,77	0,90	0,93	0,96	0,75	0,90	0,93	0,88	0,97	0,89	0,94	0,92	0,78	-	-	-	-	-	-	-
14	0,79	0,92	0,96	0,94	0,77	0,93	0,94	0,92	0,97	0,92	0,95	0,94	0,84	0,94	-	-	-	-	-	-
15	0,68	0,77	0,80	0,83	0,77	0,85	0,82	0,84	0,82	0,75	0,82	0,87	0,79	0,87	0,85	-	-	-	-	-
16	0,73	0,86	0,93	0,90	0,83	0,93	0,92	0,93	0,94	0,89	0,93	0,93	0,87	0,92	0,96	0,85	-	-	-	-
17	0,69	0,84	0,89	0,88	0,78	0,88	0,89	0,87	0,89	0,86	0,89	0,94	0,84	0,87	0,92	0,83	0,91	-	-	-
18	0,75	0,90	0,93	0,97	0,82	0,93	0,95	0,89	0,96	0,91	0,92	0,91	0,80	0,95	0,94	0,83	0,91	0,86	-	-
19	0,70	0,82	0,90	0,88	0,84	0,92	0,87	0,91	0,90	0,86	0,92	0,90	0,87	0,90	0,94	0,86	0,95	0,91	0,85	-
20	0,80	0,91	0,94	0,94	0,78	0,92	0,93	0,91	0,95	0,92	0,93	0,95	0,81	0,92	0,96	0,83	0,94	0,93	0,93	0,92

Tabela 6 - Coeficientes de correlação de Pearson significativas ($p < 0,05$) entre todos os dados dos atmômetros de superfície de evapotranspiração superior bem como com a evapotranspiração de referência.

-	ETo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,68	0,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,73	0,79	0,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0,78	0,89	0,94	0,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,73	0,84	0,90	0,75	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,67	0,86	0,90	0,72	0,86	0,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0,62	0,82	0,89	0,71	0,87	0,84	0,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,82	0,85	0,87	0,83	0,94	0,84	0,86	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0,80	0,78	0,82	0,83	0,94	0,77	0,79	0,76	0,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,78	0,91	0,92	0,79	0,92	0,86	0,91	0,88	0,93	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0,84	0,92	0,93	0,84	0,94	0,87	0,90	0,88	0,93	0,90	0,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,80	0,90	0,93	0,82	0,95	0,86	0,89	0,87	0,93	0,90	0,95	0,97	-	-	-	-	-	-	-	-
13	0,76	0,79	0,86	0,79	0,85	0,81	0,78	0,79	0,85	0,82	0,87	0,89	0,86	-	-	-	-	-	-	-
14	0,80	0,92	0,92	0,78	0,94	0,87	0,91	0,89	0,93	0,85	0,98	0,97	0,96	0,86	-	-	-	-	-	-
15	0,79	0,91	0,90	0,77	0,92	0,81	0,89	0,87	0,92	0,85	0,97	0,97	0,94	0,87	0,97	-	-	-	-	-
16	0,57	0,81	0,86	0,69	0,84	0,79	0,86	0,83	0,76	0,71	0,83	0,83	0,81	0,75	0,84	0,83	-	-	-	-
17	0,79	0,93	0,92	0,76	0,93	0,85	0,89	0,88	0,93	0,84	0,98	0,97	0,95	0,87	0,98	0,98	0,89	-	-	-
18	0,68	0,88	0,93	0,83	0,88	0,93	0,85	0,86	0,83	0,79	0,86	0,88	0,89	0,84	0,87	0,82	0,80	0,86	-	-
19	0,79	0,88	0,93	0,76	0,92	0,85	0,86	0,91	0,89	0,83	0,95	0,96	0,95	0,84	0,96	0,95	0,85	0,96	0,88	-
20	0,81	0,94	0,90	0,77	0,91	0,85	0,86	0,85	0,89	0,82	0,94	0,94	0,92	0,81	0,96	0,95	0,84	0,96	0,85	0,93

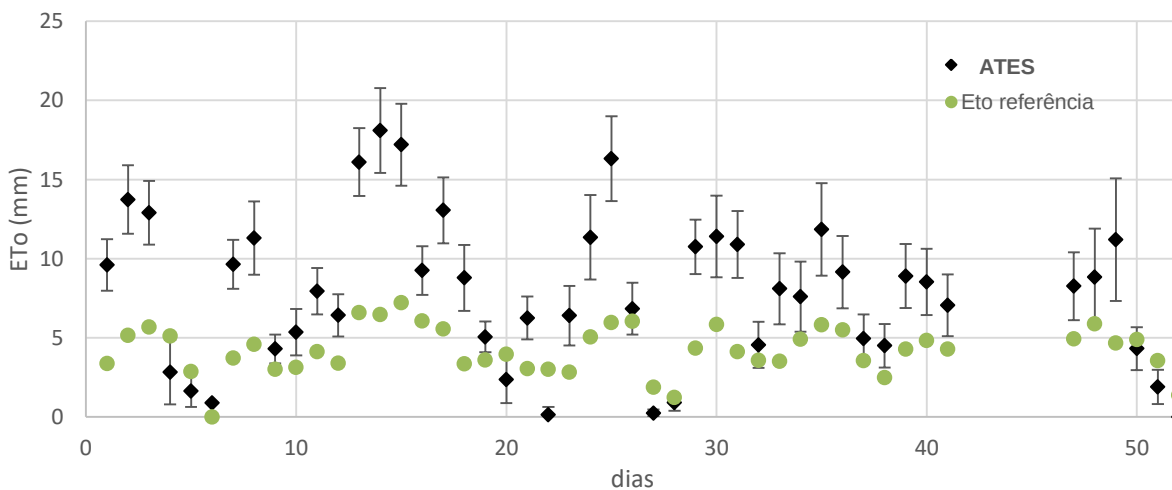
Os valores observados diariamente nos atmômetros de superfície de evaporação superior, em média, foram superiores aos valores observados nos atmômetros de superfície de evapotranspiração lateral, o que corresponde uma leitura mais próxima da verdade por parte desse tipo de instrumento. Esse comportamento pode ser verificado quando observamos e comparamos os gráficos das Figuras 20 e 21. Para melhor observar esse comportamento, os gráficos foram gerados com o mesmo fundo de escala.

Figura 20 - Dados da média de ETo e desvio padrão de todos atmômetros de superfície evaporativa lateral e dos valores de referência de ETo.



Fonte: O autor (2018).

Figura 21 - Dados da média de ETo e desvio padrão de todos atmômetros de superfície evaporativa superior e dos valores de referência de ETo.



Fonte: O autor (2018).

O diferente comportamento dos atmômetros se deu ao fato dos instrumentos utilizarem a mesma cápsula de cerâmica, porém, submetidas a diferentes tratamentos quanto à superfície evaporativa. A análise apresentada na Tabela 7 coloca em ênfase essas diferenças, demonstrando que as superfícies porosas

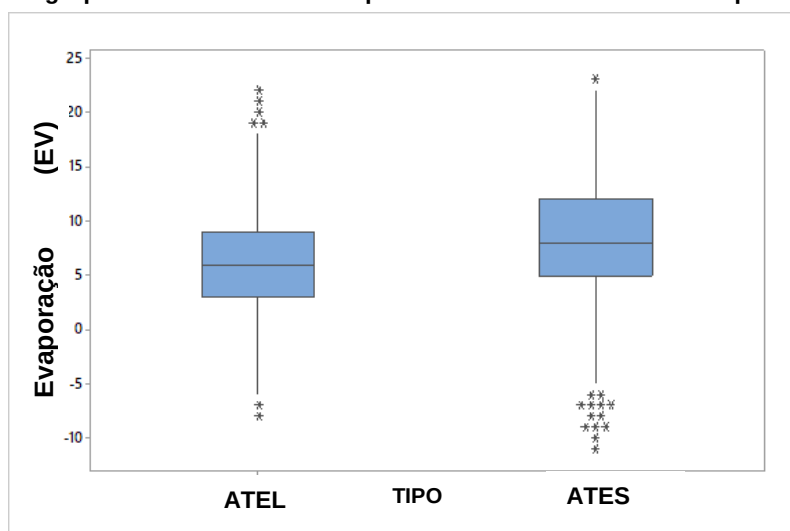
submetidas aos tratamentos de impermeabilização tiveram diferenças significantes nas leituras da evaporação (EV). Vale ressaltar que a análise de variância realizada objetivou estabelecer uma comparação entre a média de todos dados provindos dos instrumentos ATEL e a média de todos atmômetros ATES. Uma vez que, a cada dia, existia cerca de 20 dados de cada atmômetro, e somente 1 dado do valor de evapotranspiração de referência (ETo), não foi conveniente estatisticamente incluir uma comparação neste momento também com os valores de referência.

Tabela 7 - Comparação das médias da Evaporação (EV) dos dois tipos de atmômetro.

Tipo de Atmômetro	Evaporação
ATEL	$6,20 \pm 4,36$ b
ATES	$7,85 \pm 5,29$ a
Referência	$4,25 \pm 1,59$

O gráfico tipo *Boxplot* (Figura 22), tal como a Tabela 7, mostra que, além dos instrumentos ATEL terem menor média dos valores observados, possui também menor desvio padrão em relação aos instrumentos ATES, o que permite afirmar que os instrumentos do tipo (ATEL) são mais uniformes em relação à dispersão dos dados medidos.

Figura 22 - *Boxplot* agrupamento Atmômetro evaporativo lateral e atmômetro evaporativo superior.



Fonte: O autor (2018).

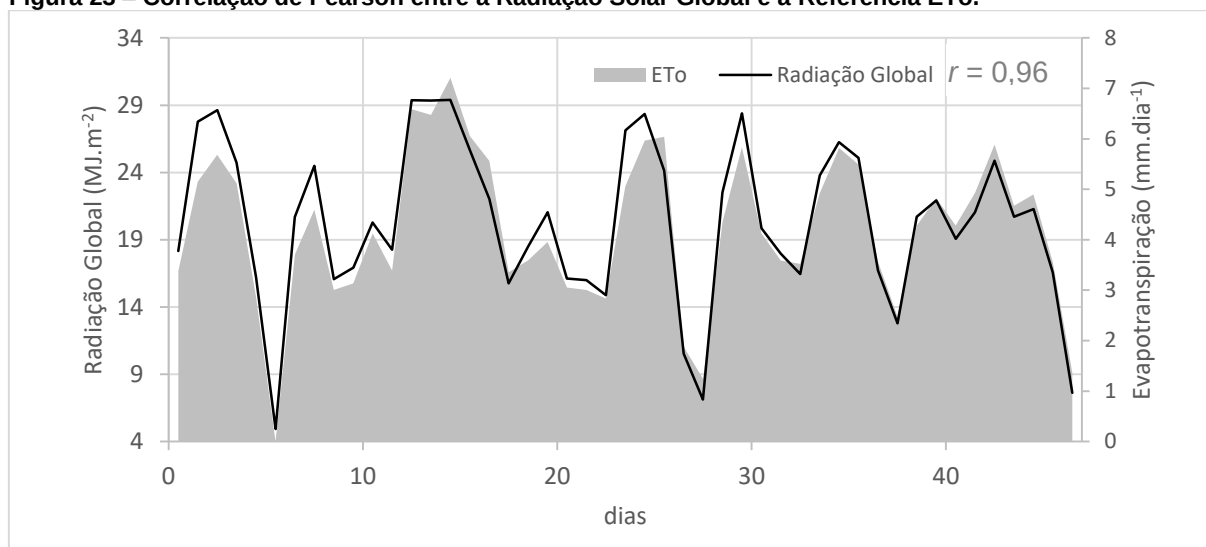
Todavia, tal diferença não implica que um tipo de atmômetro seja preferível em relação ao outro. Nas seções posteriores, são expostas as equações de ajuste de calibração de tais instrumentos e as formas de modelagem que permitiram uma aproximação fidedigna dos valores medidos por eles frente aos valores de ETo de referência. .

5.3 Análise correlacional entre as variáveis medidas e a ETo de referência

Esta seção visa apresentar utilizando o método de correlação de *Pearson* (r), o nível de força de correlação existente entre os elementos climáticos medidos e a evapotranspiração de referência.

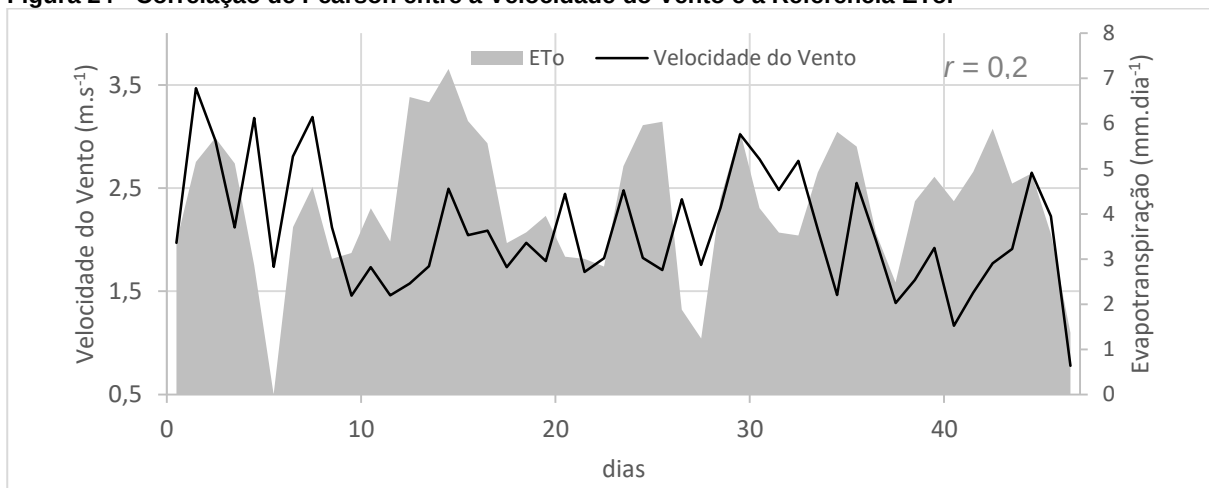
A Figura 23 apresenta a força de correlação entre Referência ETo e a Radiação Solar Global, nesse caso é notada uma correlação muito forte entre essas duas grandezas. Uma regressão para a correção dos dados medidos utilizando essas grandezas poderá retornar um valor muito próximo ao valor de referência.

Figura 23 – Correlação de Pearson entre a Radiação Solar Global e a Referência ETo.



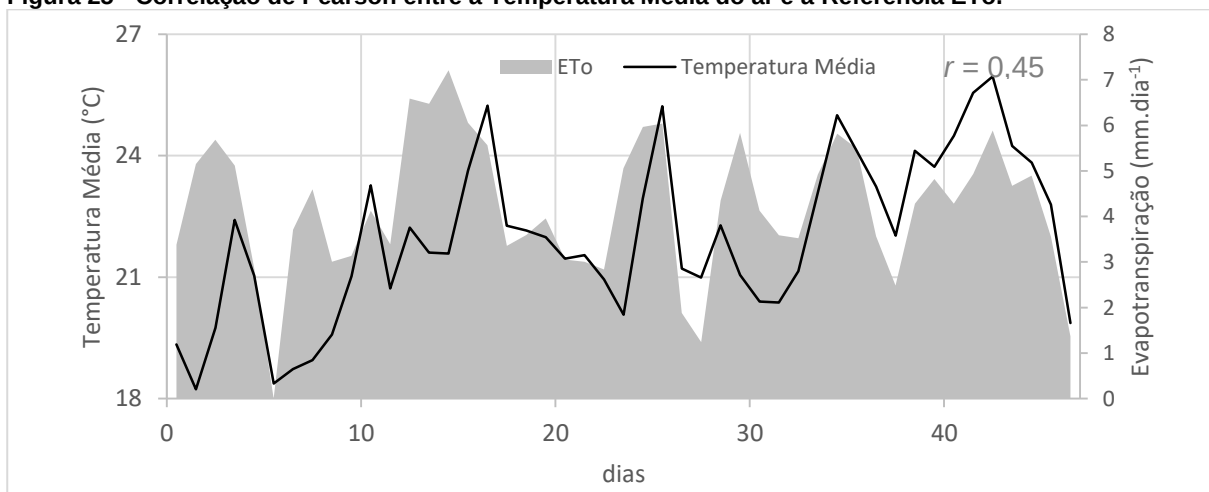
A Figura 24 apresenta a força de correlação entre a Referência ETo e a velocidade do vento, nesse caso, ao contrário do caso anterior, é notado uma fraca correlação entre essas duas grandezas, pois o r está abaixo de 0,3. Uma regressão para a correção dos dados medidos utilizando apenas essa grandeza poderá não ser uma opção considerável frente às outras grandezas associadas.

Figura 24 - Correlação de Pearson entre a Velocidade do Vento e a Referência ETo.



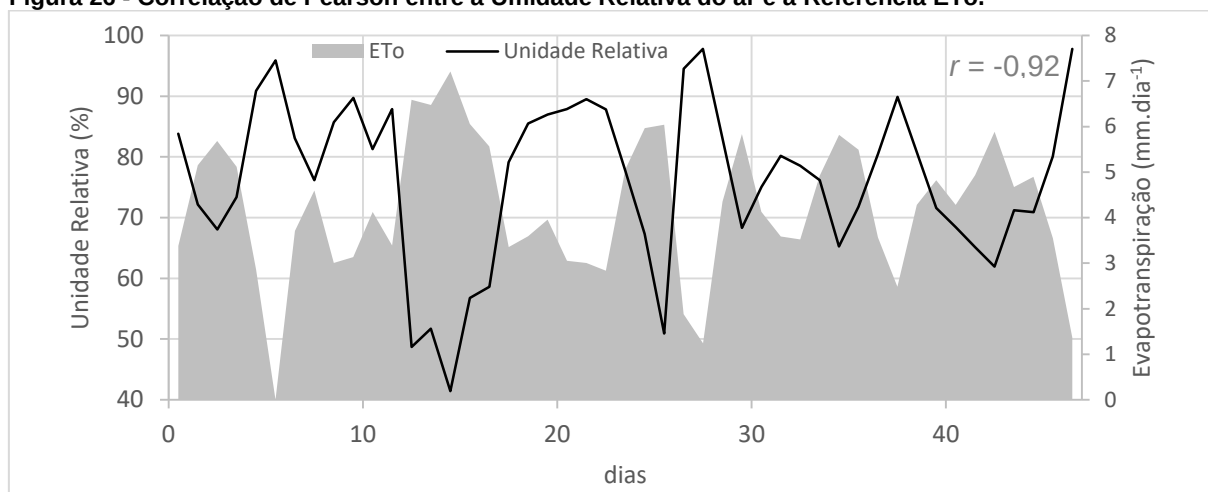
A Figura 25 apresenta a força de correlação entre Referência ETo e a Temperatura Média do Ar, nesse caso, o valor de r encontrasse entre 0,3 e 0,5, indicando uma correlação moderada entre essas duas grandezas.

Figura 25 - Correlação de Pearson entre a Temperatura Média do ar e a Referência ETo.



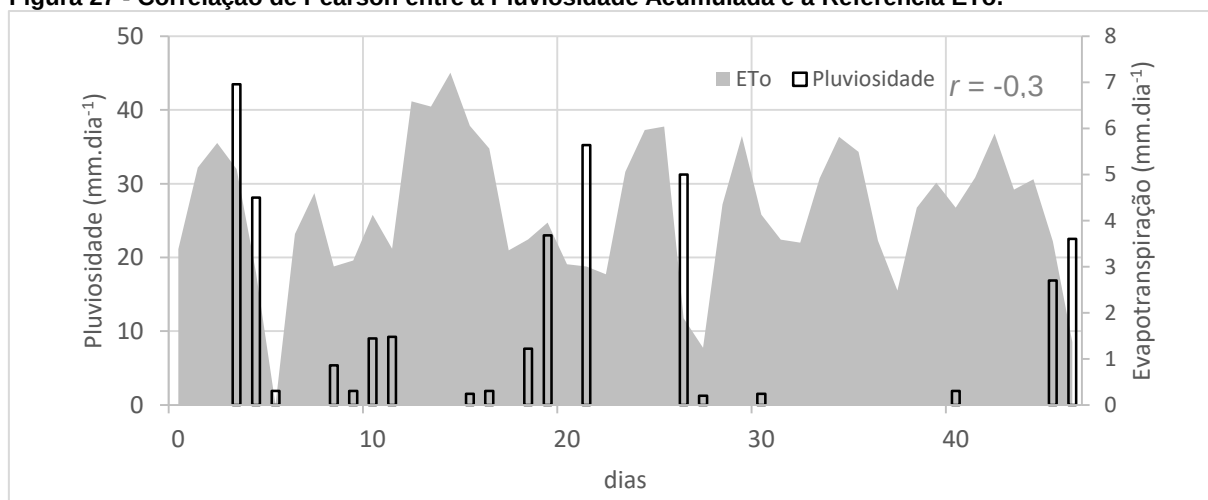
Na Figura 26 a correlação entre Referência ETo e a Umidade Relativa do Ar, nesse caso, apresenta um r de -0,92, indicando uma correlação muito forte, porém negativa. Isso indica que em uma regressão linear que considere essa grandeza como um fator, terá o coeficiente angular dessa grandeza negativo e com grande significância.

Figura 26 - Correlação de Pearson entre a Umidade Relativa do ar e a Referência ETo.



A Figura 27 apresenta a força de correlação entre Referência ETo e a Pluviosidade Acumulada, nesse caso é notada uma correlação no limítrofe desprezível entre essas duas grandezas. Entretanto é possível observar que dias seguidos de chuva podem acarretar baixos valores de evapotranspiração, a exemplo do sexto dia, em que os fatores Umidade Relativa Do Ar e Radiação Solar Global atingiram respectivamente valores de 96 % e 5 Mj.m^{-2} .

Figura 27 - Correlação de Pearson entre a Pluviosidade Acumulada e a Referência ETo.



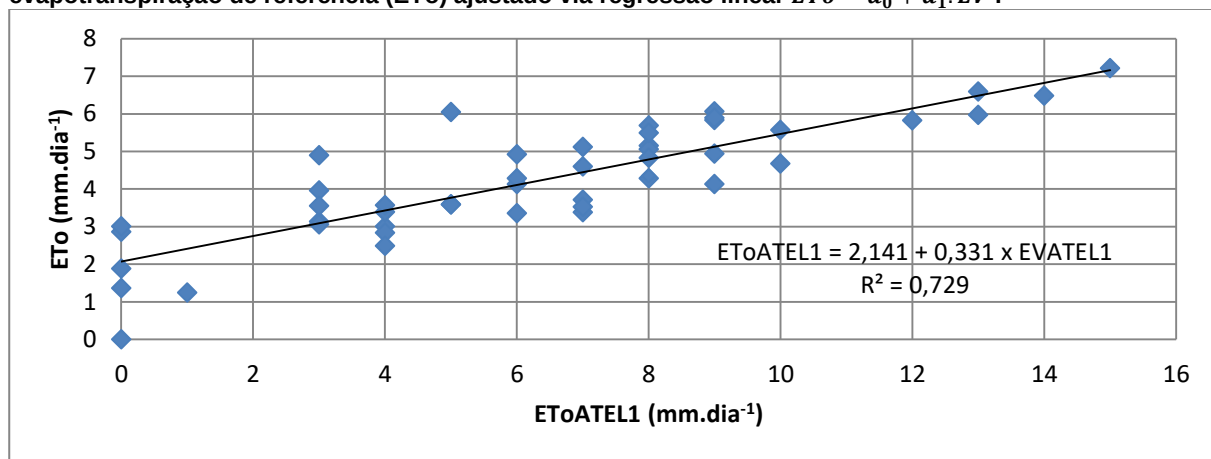
5.4 Ajuste dos atmômetros em relação à evapotranspiração de referência (ETo)

Visando realizar o ajuste dos equipamentos testados, buscou-se nessa seção, definir modelos de regressão linear para todos atmômetros, para a condição de não se dispor de nenhum dos dados dos elementos climáticos. Essa combinação trata-se da combinação de número 16 da Tabela 3, onde apenas temos disponível o valor de Evaporação (EV).

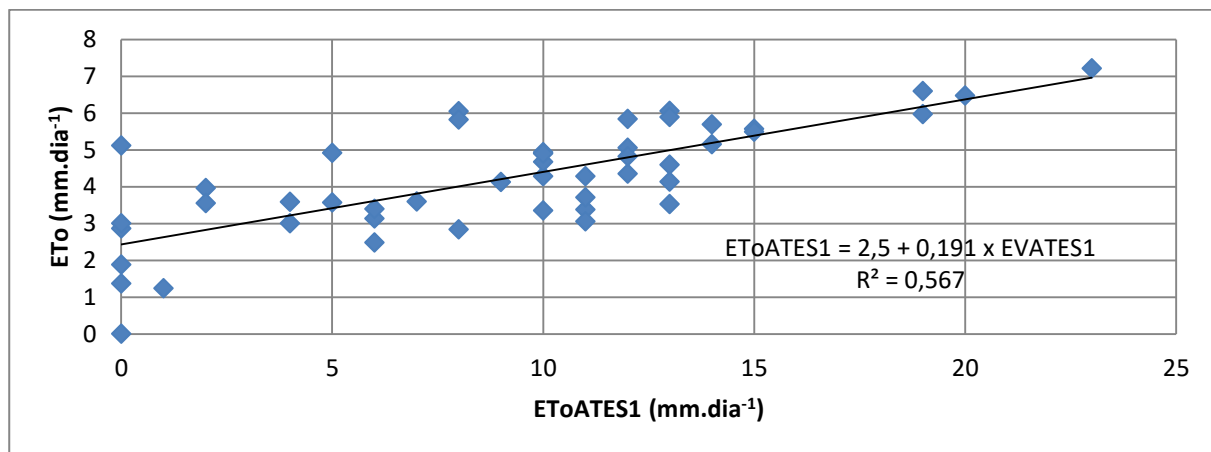
Como forma de visualização do comportamento de um dos atmômetros ATEL e ATES, a Figura 28 representa o resultado destas análises, revelando que o modelo para o atmômetro ATEL1 explica cerca de 73% dos dados observados, enquanto que o modelo para ATES1, explica somente 57%.

Em geral, os modelos apresentaram valores do coeficiente de determinação R^2 aproximadamente entre 0,5 e 0,8, o que não representam boas calibrações.

Figura 28 - Relação entre os dados de (EV) mensurados do atmômetro ATEL1 (a) e ATES1 (b) e evapotranspiração de referencia (ETo) ajustado via regressão linear $ETo = a_0 + a_1 \cdot EV$.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

A Tabela 8, além de apresentar as regressões individuais de cada instrumento, apresenta em seu último campo, uma regressão conjunta que fora obtida pela análise de todos os dados observados no período. Os coeficientes das equações de regressões conjuntas representaram-se similares. Com a análise conjunta de regressão criando-se uma equação de correção geral para cada tipo de atmômetro.

Tabela 8 - Regressões lineares ($y = a_0 + a_1x$ ou $ETo = a_0 + a_1.EV$) de todos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL) e superfície evaporativa Superior (ATES), onde x (ou EV) é o valor lido no atmômetro e y (ou ETo) é a ETo de referência estimado.

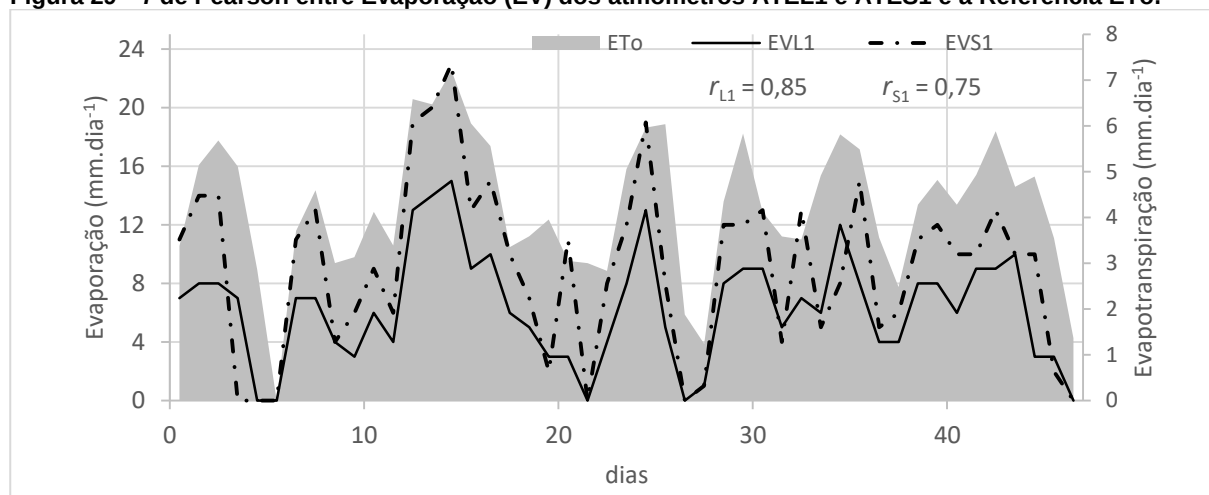
Atmômetro	ATEL			ATES		
	a0	a1	R ²	a0	a1	R ²
1	2,141	0,331	72,9%	2,5	0,191	56,7%
2	2,346	0,335	62,4%	2,772	0,191	45,2%
3	2,428	0,22	63,8%	2,664	0,249	52,7%
4	3,373	0,21	30,1%	2,452	0,208	59,1%
5	2,383	0,243	58,1%	2,63	0,335	51,5%
6	2,631	0,256	54,1%	2,635	0,199	43,4%
7	2,633	0,308	56,9%	2,733	0,295	37,4%
8	2,285	0,295	66,7%	2,038	0,217	66,2%
9	2,433	0,271	62,8%	2,206	0,219	63,5%
10	2,53	0,287	63,5%	2,365	0,218	60,5%
11	2,263	0,304	60,5%	2,112	0,236	70,2%
12	2,846	0,333	40,4%	2,395	0,217	62,7%
13	2,585	0,204	58,3%	2,716	0,279	56,0%
14	2,525	0,288	72,3%	2,46	0,198	63,1%
15	2,819	0,257	44,3%	2,436	0,206	61,7%
16	2,767	0,264	52,3%	3,007	0,159	31,1%
17	2,936	0,229	46,2%	2,532	0,201	61,0%
18	2,505	0,2	55,9%	2,819	0,29	45,4%
19	3,072	0,261	48,4%	2,338	0,232	61,0%
20	2,479	0,302	63,0%	2,4	0,214	64,0%
conjuntamente	2,6	0,249	56,8%	2,573	0,204	56,4%

Legenda: A linha "conjuntamente" representa as curvas de regressão geradas com dados de atmômetros cuja equação de calibração tenha um coeficiente de determinação (R^2) superior a 50%.

A possibilidade aqui apresentada, possibilidade de número 16 da Tabela 3, leva em consideração apenas o valor (EV) obtido pelos atmômetros; essa possibilidade é considerada a mais simples.

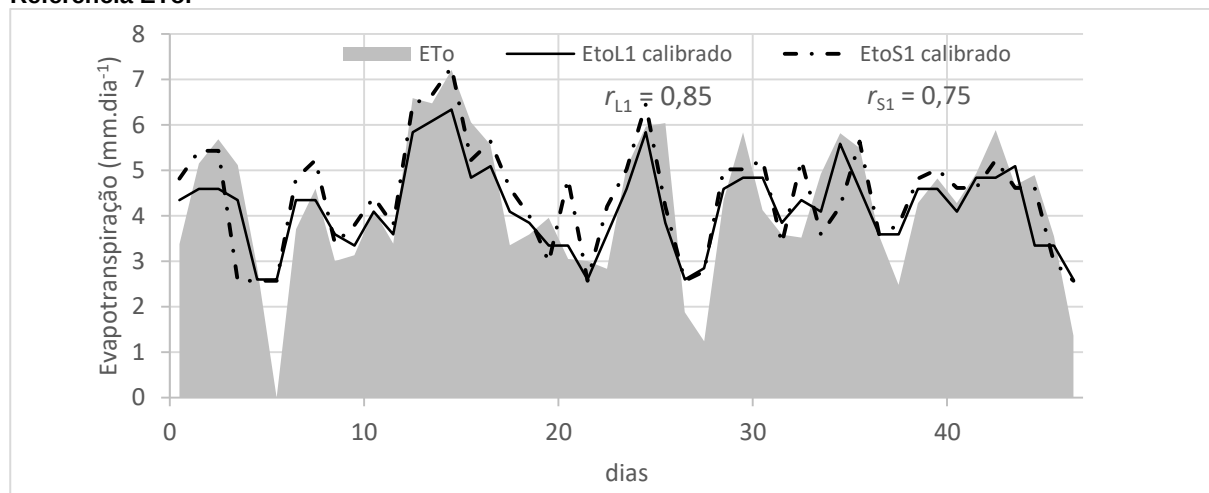
A Figura 29 apresenta o gráfico do comportamento do valor de Evaporação (EV) dos atmômetros ATEL1 e ATES1 em relação à Referência ETo. Todos os dois Atmômetros apresentam um r de *Pearson* para esse caso, acima de 0,7. O valor de R neste patamar denota uma forte correlação entre as grandezas.

Figura 29 – r de *Pearson* entre Evaporação (EV) dos atmômetros ATEL1 e ATES1 e a Referência ETo.



A Figura 30 apresenta o grau de correlação de *Pearson* na aplicação da equação de estimativa $ETo = a_0 + a_1.EV$ da Tabela 8, proveniente de uma Regressões simples de grau 2 para os atmômetros ATEL1 e ATES1.

Figura 30 - r de *Pearson* entre valor estimado de Evapotranspiração ETo_ATEL1 e ETo_ATES1 e a Referência ETo.



Tais constatações não acarretam necessariamente que os instrumentos não são passíveis de utilização. A próxima seção mostra um modelo matemático de estimativa de ETo que utiliza o valor medido do atmômetro (EV) em conjunto com os valores de temperatura média (T) e umidade relativa do ar média (UR).

5.5 Modelagem da ETo de referência em função das medições do atmômetro, da temperatura média e da umidade relativa do ar.

A obtenção dos valores de medida da umidade relativa do ar, considerado como método padrão segundo a *WMO* (2008), é obtido a partir da diferença entre as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido. Deste modo, um usuário que dispor de um psicrômetro digital ou de uma pequena estação de leitura de temperatura máxima e mínima poderá obter esses dados.

Baseado na acessibilidade que os dados de temperatura e umidade relativa oferecem frente aos dados de Velocidade do vento e Radiação solar Global (BROHAN, KENNEDY e HARRIS, 2006). Nesta seção, elabora-se um modelo matemático cujas variáveis de entrada são os valores medidos do atmômetro (EV), os dados de temperatura média (T) e umidade relativa do ar média (UR), apresentando como saída, o valor da evapotranspiração de referência (ETo). Foram feitas diversas análises de regressão, uma para cada atmômetro, constituindo assim uma série de regressões múltiplas (Tabela 9).

Tanto o instrumento ATES quanto os instrumentos ATEL, tiveram valores ótimos de R^2 (88% aproximadamente) quando submetidos ao ajuste do valor via regressão múltipla. Isso pode ser observado na Tabela 9, na coluna R^2 . Sendo assim, pode-se afirmar que este método mostrou ser eficiente, por se tratar de um modelo que denotou altos valores de R^2 ; mostrando uma maneira eficiente de obtenção de ETo.

Além disto, a Tabela 8 apresenta as equações de regressão para todos os atmômetros conjuntamente, sendo que para os do Tipo ATEL, a equação de regressão obtida $ETo = 9,205 + 0,063 L + 0,046 T - 0,084 UR$, tem $R^2 = 88\%$, enquanto que para a do tipo ATES, tem-se a equação $ETo = 9,324 + 0,053 S + 0,040 T - 0,084 UR$, com $R^2 = 88\%$, representando assim excelentes modelos para todos os atmômetros conjuntamente.

Tabela 9 - Regressões lineares múltiplas ($y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ ou $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR$) de todos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL) e superfície evaporativa Superior (ATES), onde x_1 é o valor método pelo atmômetro, x_2 é a temperatura, x_3 é a umidade reativa e y é a ETo de referência estimada.

Atmômetro	ATEL					ATES				
	a0	a1	a2	a3	R ²	a0	a1	a2	a3	R ²
1	8,476	0,111	0,031	-0,074	0,87	9,701	0,035	-0,086	0,04	0,85
2	7,644	0,118	0,072	-0,074	0,87	8,221	0,078	-0,081	0,065	0,87
3	9,152	0,056	0,039	-0,082	0,85	9,612	0,044	-0,087	0,051	0,85
4	11,172	0,027	0,006	-0,094	0,83	8,919	0,029	-0,078	0,071	0,88
5	7,321	0,083	0,090	-0,075	0,87	6,472	0,12	-0,073	0,135	0,88
6	9,787	0,056	0,034	-0,087	0,85	8,778	0,062	-0,084	0,063	0,87
7	8,125	0,093	0,073	-0,078	0,86	9,265	0,059	-0,088	0,075	0,85
8	8,070	0,100	0,060	-0,076	0,89	7,991	0,056	-0,076	0,078	0,90
9	8,588	0,082	0,050	-0,079	0,86	7,924	0,06	-0,075	0,078	0,88
10	8,586	0,085	0,051	-0,078	0,86	8,878	0,044	-0,081	0,063	0,86
11	9,188	0,071	0,046	-0,084	0,85	7,574	0,061	-0,071	0,087	0,87
12	8,288	0,102	0,084	-0,083	0,85	8,301	0,059	-0,077	0,066	0,86
13	9,851	0,037	0,041	-0,089	0,85	10,25	0,034	-0,092	0,044	0,85
14	8,329	0,089	0,060	-0,078	0,86	8,147	0,061	-0,076	0,064	0,86
15	11,075	0,019	0,021	-0,097	0,84	9,387	0,035	-0,083	0,05	0,85
16	8,195	0,082	0,075	-0,080	0,86	10,51	0,032	-0,094	0,026	0,84
17	11,406	0,020	-0,003	-0,094	0,84	9,822	0,014	-0,082	0,049	0,86
18	8,586	0,061	0,061	-0,081	0,87	6,56	0,13	-0,075	0,115	0,87
19	9,732	0,055	0,036	-0,085	0,85	8,596	0,039	-0,076	0,076	0,88
20	8,289	0,091	0,060	-0,077	0,86	8,524	0,049	-0,078	0,066	0,86
Conjuntamente	9,208	0,063	0,046	-0,084	0,88	9,324	0,053	0,040	-0,084	0,88

Legenda: a0 – coeficiente angular; a1 – coeficiente angular da evaporação no atmômetro (EV); a2 – coeficiente angular da temperatura média (T); a3 – coeficiente angular umidade da relativa média (UR).

As superfícies tridimensionais Figuras 31 e 33, mapas e contornos Figuras 32 e 34 para todos os Atmômetros ATEL e ATES, por suas equações conjuntas de regressões polinomiais múltiplas ($y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$), foram elaboradas a fim de ilustrar o comportamento dos atmômetros por tipo, frente aos elementos meteorológicos associados.

Uma vez que somente é possível plotar gráficos tridimensionais com apenas 2 variáveis dependentes. As Figuras 31 e 32 e apresentam as superfícies e mapas e contorno para a equação conjunta de ATEL. Análise semelhante foi realizada nas Figuras 33 e 34 para o Atmômetro superior ATES.

Tanto as superfícies quanto os mapas de contorno de ambos atmômetros os tipos de atmômetros têm comportamento semelhante. A primeira classe de gráficos de plano cartesiano é composta pelas variáveis T e EV. Para cada valor de EV ou quando fixando qualquer valor de EV, havendo um aumento da temperatura, essa condição acarreta um pequeno aumento no valor de ETo o comportamento da evaporação é de lenta resposta. Além disto, a evapotranspiração é menos sensível à mudança da temperatura, frente às leituras de Evaporação (EV) do atmômetro.

A segunda classe de gráficos representa o comportamento da Evapotranspiração frente às variáveis de umidade relativa (UR) e Evaporação (EV) do atmômetro. De acordo com as equações os valores de Evaporação (EV) são diretamente proporcionais à evapotranspiração e inversamente proporcionais à umidade relativa do AR (UR). As equações de regressão já prediziam este comportamento, uma vez que o coeficiente de Evaporação (EV) é positivo, e o da umidade relativa é negativo.

Por fim, a terceira classe de gráficos representa o comportamento da evapotranspiração frente às leituras de umidade relativa (UR) e temperatura média do ar (T). Novamente, de acordo com as equações de regressão e de acordo com os próprios mapas de contorno, observa-se uma relação inversamente proporcional entre a umidade relativa. Sendo a evapotranspiração mais uma vez menos sensível à mudança da temperatura.

Figura 31 - Superfícies tridimensionais representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.

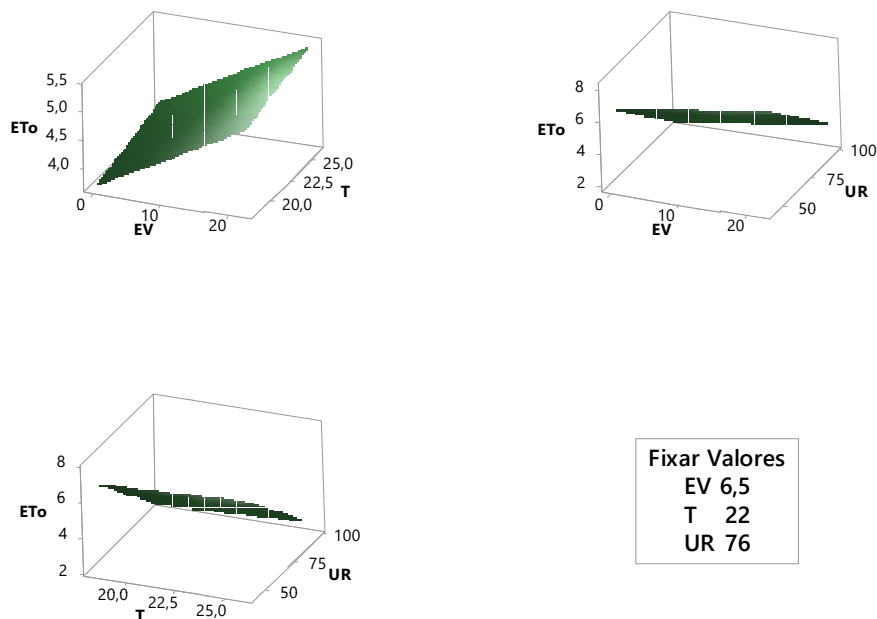


Figura 32 - Mapas de contorno das superfícies representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.

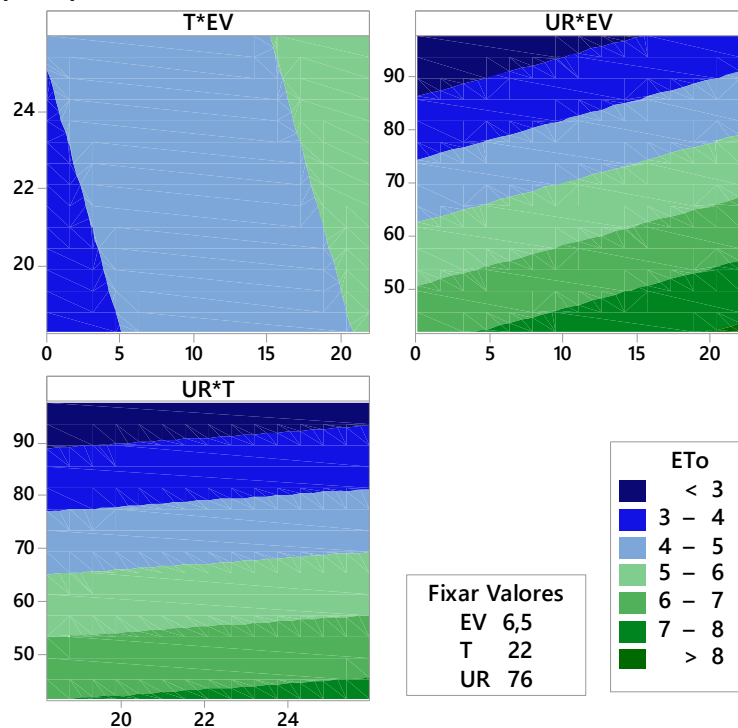


Figura 33 - Superfícies tridimensionais representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Superior (ATES), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.

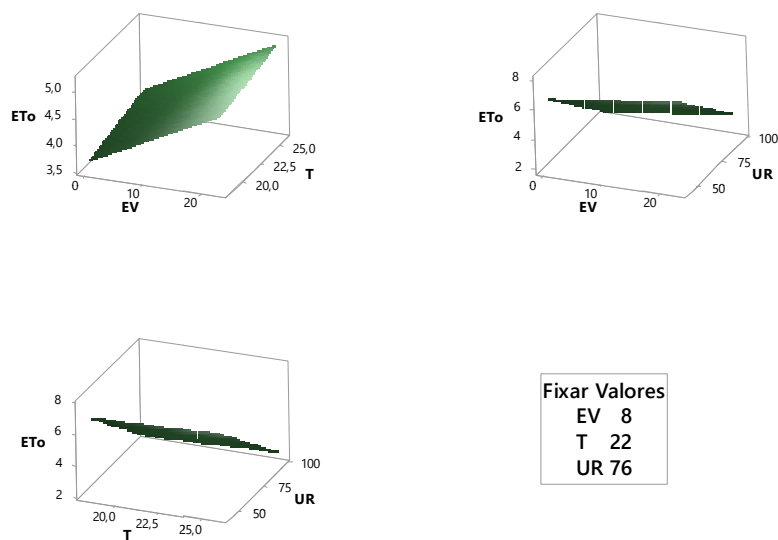
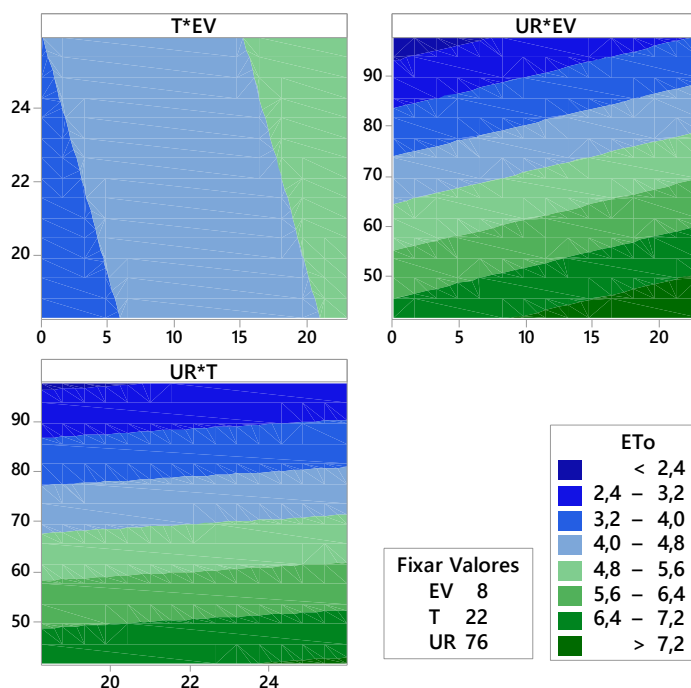


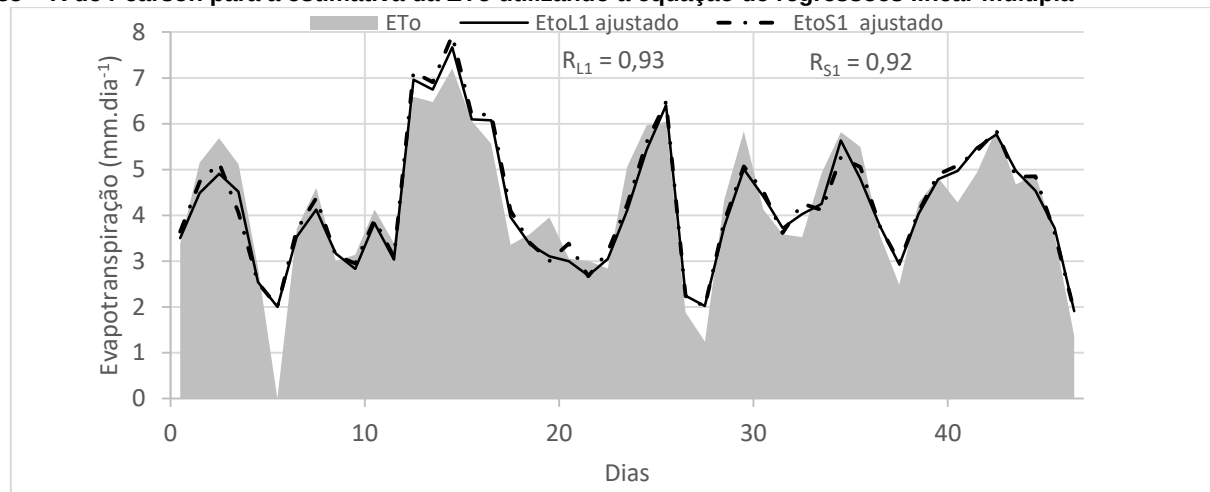
Figura 34 - Mapas de contorno das superfícies representando os valores ajustados da ETo de acordo com a variável temperatura (T), umidade relativa (UR) e valor aferido dos atmômetros de superfície evaporativa Superior (ATES), fixando-se em cada uma delas uma das variáveis em seu valor médio.



A Figura 35 apresenta, para os atmômetros ATEL1 e ATES2, um gráfico com os valores dos evapotranspiração estimada via equação de regressão linear múltipla $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR$ (Tabela 9). Os valores de R de Pearson para esse

modelo de estimativa estão na ordem de 0,93 e 0,92 respectivamente, denotando uma correlação muito forte entre a Referência ETo e os modelos equacionados.

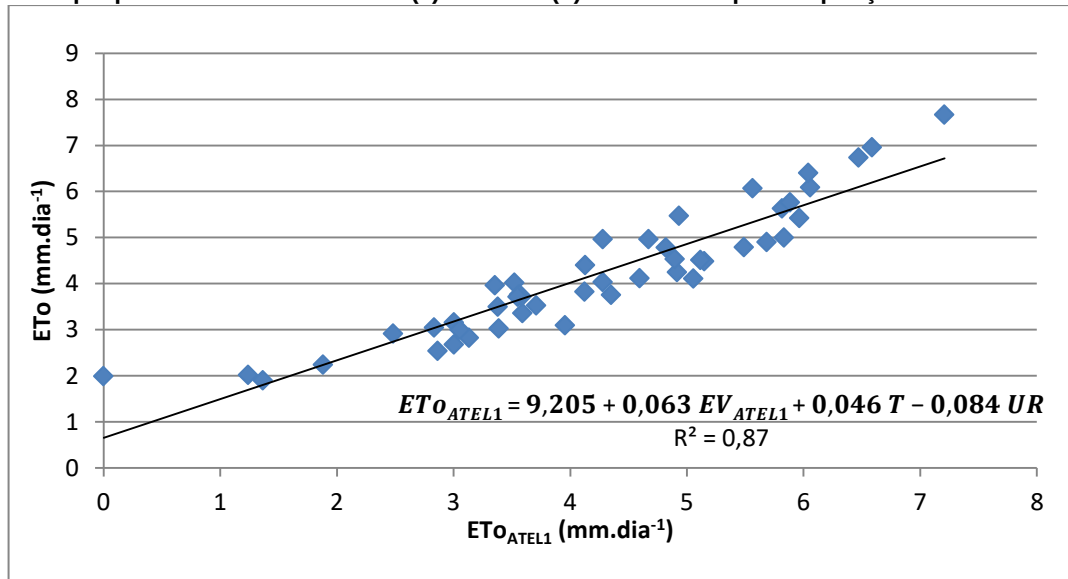
Figura 35 – R de Pearson para a estimativa da ETo utilizando a equação de regressões linear múltipla



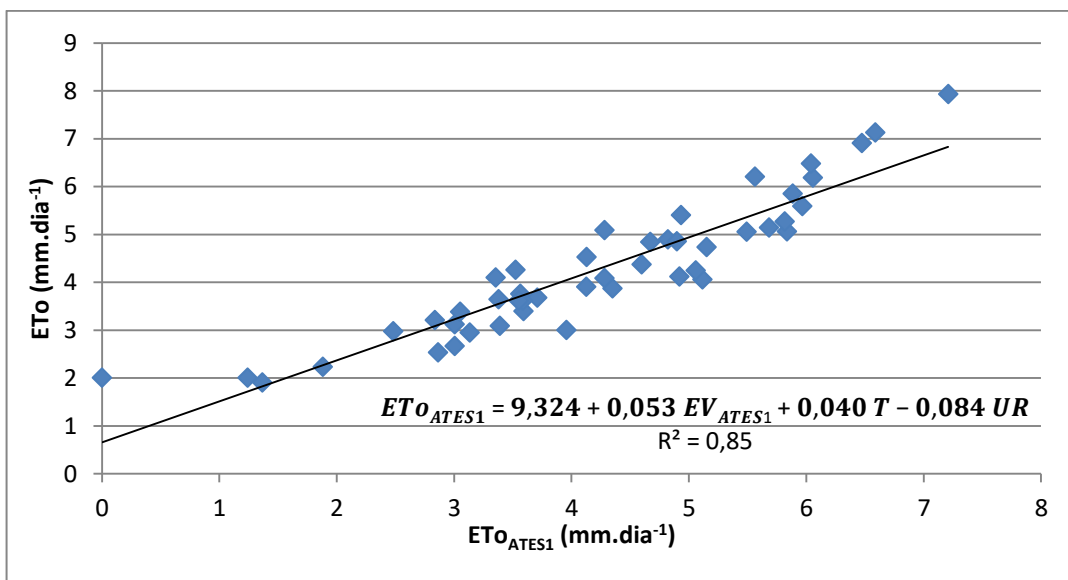
Legenda: $EToL1 \text{ ajustado} = ETo_{ATEL1}$; $EToS1 \text{ ajustado} = ETo_{ATES1}$.

A Figura 36 apresenta o gráfico de dispersão entre as variáveis, referência ETo versus ETo_ATEL1 (a) e referência ETo versus ETo_ATES1 (b) estimados via equação conjunta utilizando os dados dos atmômetros ATEL1 e ATES1 respectivamente. Para a estimativa de ETo_ATEL utilizou-se a equação $ETo_{ATEL1} = 9,205 + 0,063 EV_{ATEL1} + 0,046 T - 0,084 UR$, para a estimativa de ETo_ATES utilizou-se a equação $ETo_{ATES1} = 9,324 + 0,053 EV_{ATES1} + 0,040 T - 0,084 UR$. O Coeficiente de determinação R^2 desses modelos atingiram 87% para o instrumento ATEL1 e 85% para o instrumento ATES1. Essa modelagem é baseada na possibilidade de número 4 da Tabela 3, que por sua vez, necessita apenas dos dados de umidade relativa do ar e a temperatura média do ar.

Figura 36 - Dispersão entre os dados de evapotranspiração de referência (ETo) estimados via regressão linear múltipla pelos atmômetros ATEL1 (a) e ATES1 (b) versus a evapotranspiração de referência (ETo).



(a)



(b)

5.6 Modelagem da ETo de referência em função das medições da evaporação do atmômetro, umidade relativa do ar e radiação solar global.

Nesta seção, foram elaborados modelos matemáticos cujas variáveis de entrada foram os valores medidos do atmômetro, os dados umidade relativa do ar média e radiação solar global, apresentando como saída, o valor da evapotranspiração de referência.

Tal como realizado nas outras modelagens, foram feitas diversas análises de regressão, uma para cada atmômetro, constituindo assim uma série de regressões lineares múltiplas. A Tabela 10 trás na linha “conjuntamente” as equações de regressão para todos os dois tipos atmômetros, sendo que para ATEL, a equação de regressão obtida é $ETo = 5,070 - 0,015 EV_ATEL - 0,050 UR + 0,152 G$, que apresenta um $R^2 = 99\%$, enquanto para a do tipo ATES, tem-se a equação $Eto = 5,062 - 0,011 EV_ATES - 0,050 UR - 0,0151 G$, com $R^2 = 99\%$.

Tanto os instrumentos ATES quanto os instrumentos ATEL, tiveram valores ótimos de R^2 quando submetidos ao ajuste do valor via regressão linear múltipla. Sendo assim, pode-se afirmar que esta modelagem mostrou ser eficiente frente as modelagens anteriores propostas neste estudo. Este modelo apresenta altos valores de R^2 , o que denota o quão bem se pode predizer a variável resposta ETo a partir das variáveis preditoras: valores de evaporação medidos do atmômetro, umidade relativa do ar média e radiação solar global.

O uso da Equação de ajuste conjunto (conjunta) representa uma evolução quanto à calibração e quanto à obtenção do real valor da Evapotranspiração de referência, uma vez que tais únicas equações podem ser utilizadas para todos os equipamentos de cada tipo, não mais sendo necessária a calibração de cada equipamento individualente.

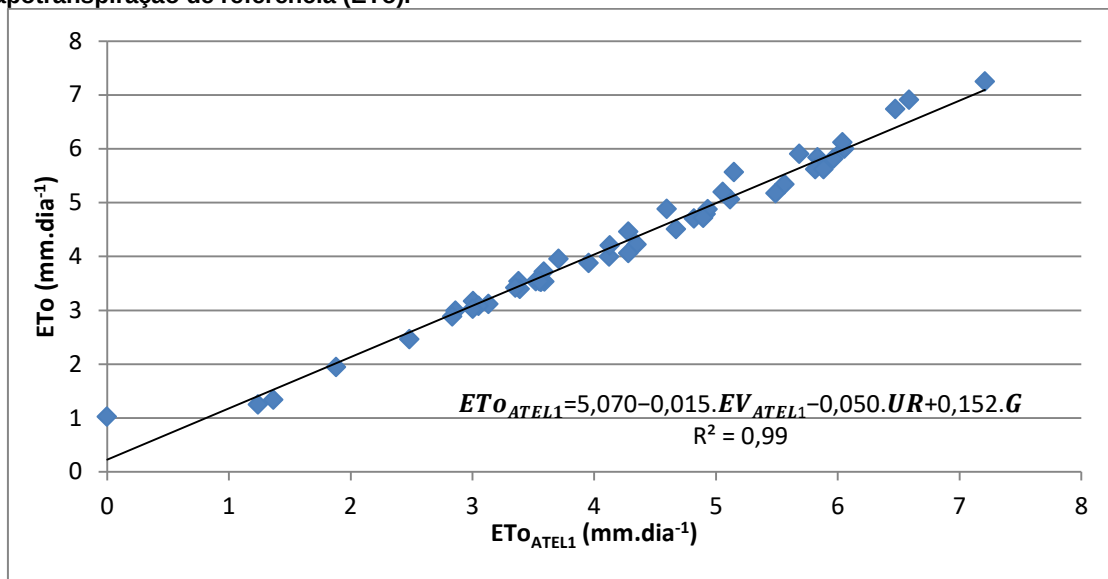
Tabela 10 - Regressões lineares múltiplas ($y = a_0 + a_1x_1 + a_3x_3 + a_5x_5$ ou $ET_o = a_0 + a_1.EV + a_3.UR + a_5G$) de todos atmômetros de superfície evaporativa Lateral (ATEL) e superfície evaporativa Superior (ATES), onde x_1 é o valor medido pelo atmômetro, x_3 é a umidade relativa do ar, x_5 é a radiação solar global e y é a ET_o de referência estimada.

Atmômetro	ATEL					ATES				
	a0	a1	a3	a5	R ²	a0	a1	a3	a5	R ²
1	5,046	-0,007	-0,050	0,148	98,8%	5,131	-0,009	-0,050	0,150	98,9%
2	5,094	-0,027	-0,051	0,155	98,9%	4,928	-0,019	-0,049	0,158	99,0%
3	5,064	-0,011	-0,050	0,151	98,9%	5,075	-0,016	-0,050	0,152	99,0%
4	5,060	-0,029	-0,050	0,153	99,1%	4,998	-0,010	-0,049	0,151	98,8%
5	4,866	-0,024	-0,049	0,162	99,2%	4,709	-0,033	-0,047	0,163	99,2%
6	5,124	-0,015	-0,051	0,151	98,9%	4,938	-0,017	-0,049	0,156	99,0%
7	5,168	-0,036	-0,052	0,157	99,1%	5,035	-0,033	-0,050	0,156	99,1%
8	5,245	-0,018	-0,052	0,150	98,9%	5,185	-0,014	-0,051	0,152	98,9%
9	4,996	-0,011	-0,049	0,152	98,9%	4,964	-0,015	-0,049	0,157	99,0%
10	5,116	-0,015	-0,051	0,151	98,9%	5,084	-0,012	-0,050	0,152	98,9%
11	4,986	-0,014	-0,049	0,151	99,0%	4,926	-0,011	-0,049	0,153	99,0%
12	5,008	-0,047	-0,050	0,159	99,2%	5,179	-0,019	-0,051	0,155	99,0%
13	5,309	-0,017	-0,052	0,150	98,9%	5,280	-0,021	-0,052	0,150	98,9%
14	5,117	-0,021	-0,051	0,153	98,9%	5,116	-0,014	-0,051	0,154	98,9%
15	5,338	-0,026	-0,053	0,150	99,0%	5,138	-0,010	-0,051	0,150	98,9%
16	5,065	-0,023	-0,050	0,155	99,0%	5,082	-0,016	-0,050	0,152	99,0%
17	5,313	-0,019	-0,052	0,148	98,8%	5,199	-0,011	-0,051	0,148	98,7%
18	4,914	-0,014	-0,049	0,156	98,9%	4,847	-0,044	-0,049	0,164	99,3%
19	5,237	-0,032	-0,052	0,154	99,0%	5,133	-0,018	-0,051	0,153	98,8%
20	5,184	-0,024	-0,051	0,154	98,9%	5,074	-0,009	-0,050	0,150	98,8%
Conjuntamente	5,070	-0,015	-0,050	0,152	99%	5,062	-0,011	-0,050	0,151	99%

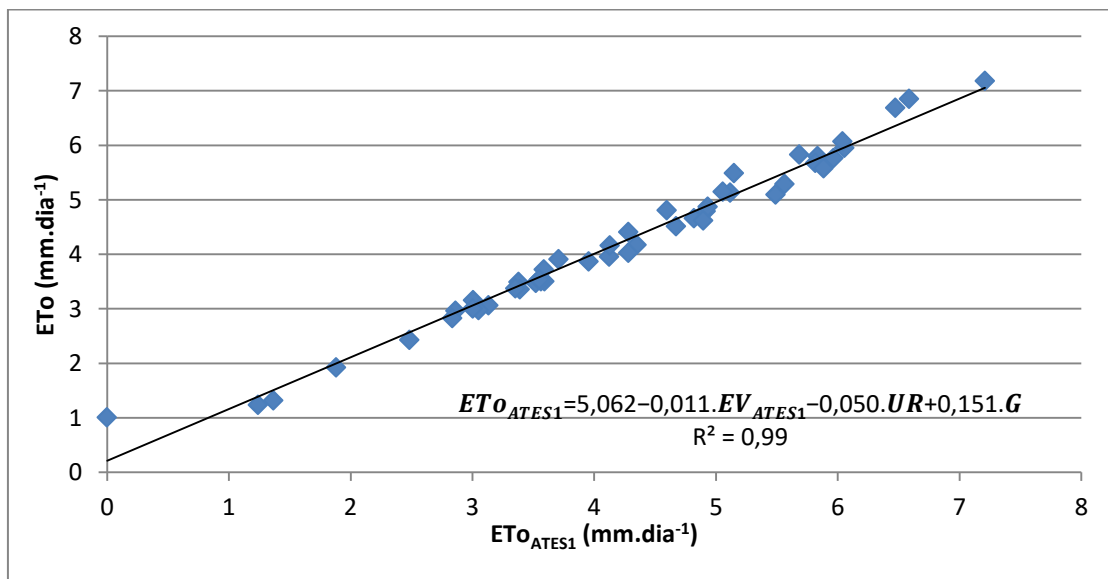
Legenda: a0 – coeficiente angular; a1 – coeficiente angular da evaporação no atmômetro (EV); a3 – coeficiente angular da umidade relativa média (UR); a5 – coeficiente angular da radiação solar global (G).

A Figura 37 apresenta o gráfico de dispersão entre as variáveis, referência ETo versus ETo_ATEL1 (a) e referência ETo versus ETo_ATES1 (b) estimados via equação conjunta da Tabela 10 utilizando como entrada de evaporação (EV) os dados dos atmômetros ATEL1 e ATES1 respectivamente. O Coeficiente de determinação R^2 desses modelos atingiram 99% para ambos os instrumentos. Essa modelagem é baseada na possibilidade de número 11 da Tabela 3, que por sua vez, necessita apenas dos dados de umidade relativa do ar e a radiação solar global.

Figura 37 - Dispersão entre os dados de evapotranspiração de referência (ETo) estimados via equação conjunta $ETo = a_0 + a_1.EV + a_3.UR + a_5.G$ dos atmômetros ATEL1 (a) e ATES1 (b) versus a evapotranspiração de referência (ETo).



(a)



(b)

A força de correlação entre a Referência ETo e a velocidade do vento conforme discutido na seção 5.3, apresenta uma fraca correlação entre essas duas grandezas, com um r de *Pearson* abaixo de 0,3. Uma regressão para a correção dos dados medidos utilizando essa grandeza poderá não ser uma opção considerável frente às outras grandezas associadas que estejam disponíveis. A medida da temperatura de forma corriqueira pode ser obtida sem a necessidade de se obter a leitura da Umidade relativa do AR. No entanto, à maioria dos sensores leem o valor de umidade relativa do ar e temperatura por meio de um único encapsulamento, desta forma, obter a leitura da Umidade relativa do AR sem se obter a medida da temperatura é inviável. Sendo, portanto, conveniente à leitura das duas grandezas proporcionadas pelo sensor. Deste modo, o modelo escolhido para a próxima seção, considera as medições de evaporação do atmômetro, associadas às medidas de temperatura média, umidade relativa do ar e radiação solar global.

5.7 Estimativa da ETo de referência em função das medições da evaporação do atmômetro, temperatura media, umidade relativa do ar e radiação solar global.

A Tabela 11 trás 32 modelos de regressão linear múltipla ($y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$ ou $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR + a_4U2 + a_5G$) de acordo com as variáveis x_1 , x_2 , x_3 , x_4 e x_5 disponíveis respectivamente dentre T , UR , $U2$ e G para todos atmômetros de superfície evaporativa lateral (ATEL) e de superfície evaporativa superior (ATES). Sendo os elementos da equação, a saber: a_0 o coeficiente angular da regressão; a_1 o coeficiente angular atmômetro (EV); a_2 o coeficiente angular temperatura média (T); a_3 o coeficiente angular umidade relativa média (UR); a_4 o coeficiente angular velocidade do vento (U2) e a_5 o coeficiente angular radiação solar global (G). Esses 32 modelos seguem a proposta descrita na seção 4.2.1 - Tabela 3.

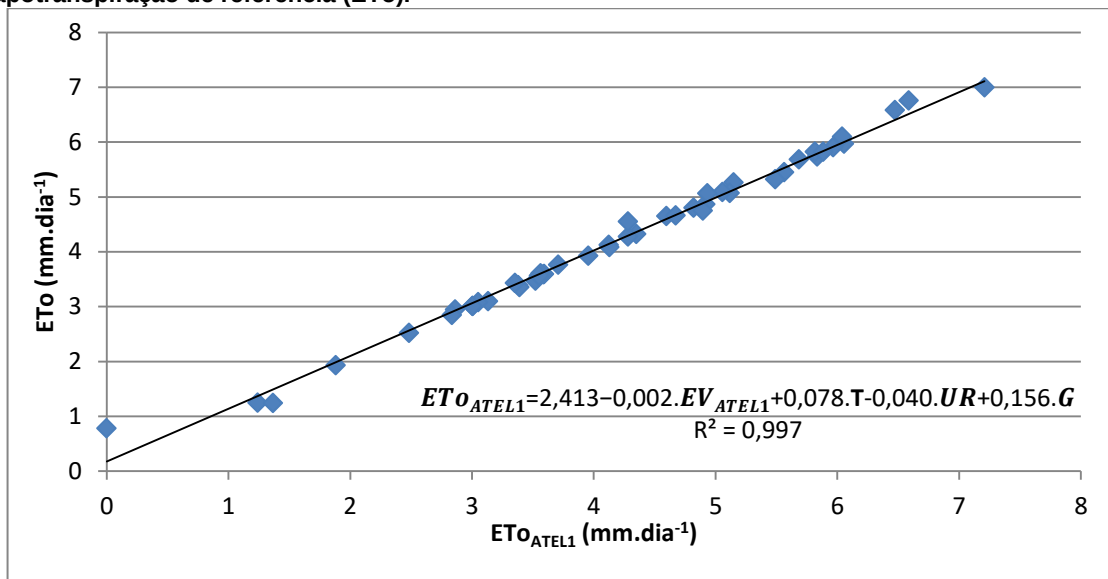
A Tabela 11 apresenta as equações dos modelos de estimativa de ETo, dentre estas, as equações 4, 16 e 11 foram expostas e detalhadas nas Tabelas 8, 9 e 10 respectivamente. Ressalta-se que cada uma das equações exportadas para a Tabela 11 foi gerada utilizando-se conjuntamente todos dados dos atmômetros ATEL ou ATES, representando assim um modelo de correção para qualquer atmômetro do tipo identificado associado a variável ambiental disponível ao usuário.

Devido à representação completa dos modelos nas seções anteriores e a singularidade do método de obtenção dos modelos matemáticos de regressões lineares múltiplas. Esta seção não apresenta a tabela geral de regressões lineares múltiplas para esse modelo, portanto, apenas a aplicação da Equação 3 da Tabela 11 será aqui discutida.

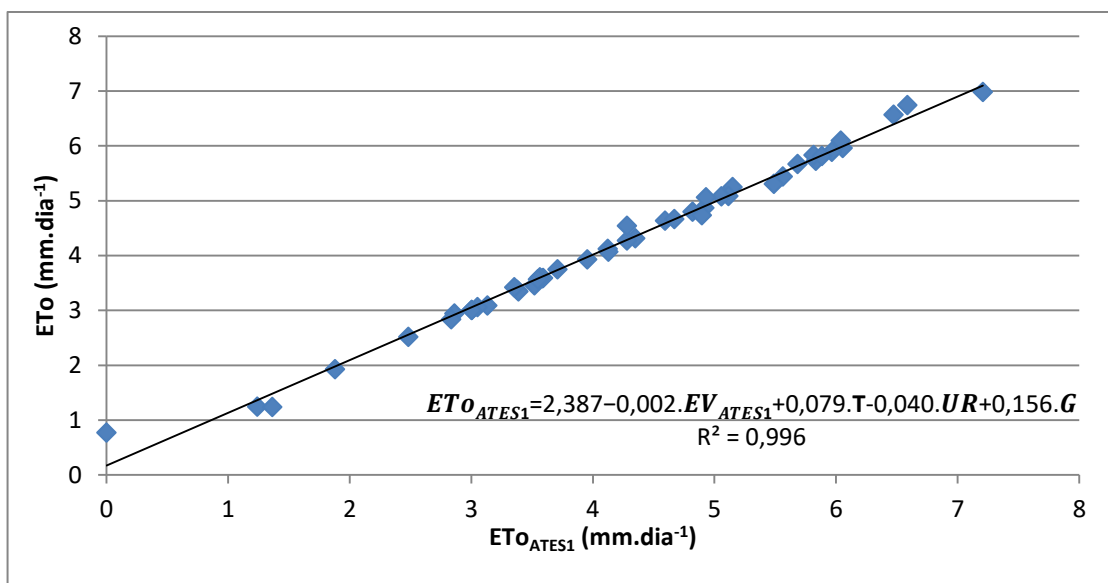
A Figura 38 apresenta o gráfico de dispersão entre as variáveis, referência ETo versus ETo_ATEL1 (a), e referência ETo versus ETo_ATES1 (b), estimados via Equação 3 da Tabela 11, utilizando como entrada de evaporação (EV) os dados dos atmômetros ATEL1 e ATES1 respectivamente. O Coeficiente de determinação R^2 desses modelos atingiu um $R^2 = 99,7\%$ para o instrumento ATEL1, seguido por um valor $R^2 = 99,6\%$ para o instrumento ATES1 ligeiramente inferior ao instrumento ATEL1.

O Coeficiente de determinação R^2 desses modelos, de certo modo, atingiram os patamares de aproximadamente 100% para ambos os instrumentos. Essa modelagem é baseada na possibilidade de número 3 da Tabela 3. Além disso, quando comparado à modelagem da Equação 1 esse modelo destaca-se por possuir praticamente o mesmo coeficiente de determinação R^2 , porém sua vantagem se qualifica por não considerar o coeficiente angular velocidade do vento (U_2) na sua modelagem. Corroborando a análise discutida na seção 5.3; de que é fraca a correlação entre a Referência ETo e a velocidade do vento (U_2) para esse caso apresentado nesse estudo.

Figura 38 - Dispersão entre os dados de evapotranspiração de referência (ETo) estimados via equação conjunta $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2.T + a_3.UR + a_5.G$ dos atmômetros ATEL1 (a) e ATES1 (b) versus a evapotranspiração de referência (ETo).



(a)



(b)

Legenda: a_0 – coeficiente angular; a_1 – coeficiente angular atmômetro (EV); a_2 – coeficiente angular temperatura média (T); a_3 – coeficiente angular umidade relativa média (UR); a_5 – coeficiente angular radiação solar global (G).

A Tabela 11 apresenta todas as possibilidades de análises entre a combinação de elementos climáticos e a evaporação observada nos atmômetros, sendo, 16 regressões lineares múltiplas, cada uma delas considerando-se um conjunto de variáveis aplicadas aos atmômetros ATEL ou ATES, portanto, é obtido um total de 32 equações de estimativa de ETo com seus respectivos R^2 .

Tabela 11 - Modelos de regressão linear múltipla ($y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$ ou $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2T + a_3UR + a_4U2 + a_5G$) de acordo com as variáveis escolhidas dentre T, UR, U2 e G de todos atmômetros de superfície evaporativa lateral (ATEL) e superfície evaporativa superior (ATES), onde x_1 é o valor aferido pelo atmômetro, x_2 é a temperatura, x_3 é a umidade relativa e y é a ETo de referência.

Equação	ATEL							ATES						
	a0	a1	a2	a3	a4	a5	R ²	a0	a1	a2	a3	a4	a5	R ²
1	2,289	-0,001	0,083	-0,040	0,031	0,154	0,997	2,261	-0,001	0,083	-0,040	0,032	0,155	0,997
2	6,307	0,062	0,116	-0,078	0,430	-	0,90	6,629	0,051	0,106	-0,078	0,408	-	0,90
3	2,413	-0,002	0,078	-0,040	-	0,156	0,997	2,387	-0,002	0,079	-0,040	-	0,156	0,996
4	9,208	0,063	0,046	-0,084	-	-	0,88	9,324	0,053	0,040	-0,084	-	-	0,88
5	-3,546	0,035	0,158	-	0,005	0,200	0,97	-3,592	0,026	0,158	-	0,002	0,204	0,97
6	-6,219	0,212	0,347	-	0,688	-	0,74	-5,966	0,173	0,337	-	0,663	-	0,73
7	-3,522	0,035	0,157	-	-	0,201	0,97	-3,583	0,025	0,157	-	-	0,204	0,97
8	-3,022	0,233	0,260	-	-	-	0,69	-2,857	0,191	0,251	-	-	-	0,67
9	4,970	-0,015	-	-0,048	-0,093	0,158	0,99	4,965	-0,011	-	-0,048	-0,091	0,158	0,99
10	10,285	0,045	-	-0,091	0,270	-	0,89	10,190	0,040	-	-0,089	0,259	-	0,89
11	5,070	-0,015	-	-0,050	-	0,152	0,99	5,062	-0,011	-	-0,050	-	0,151	0,99
12	10,699	0,054	-	-0,089	-	-	0,88	10,579	0,047	-	-0,088	-	-	0,88
13	0,010	0,020	-	-	-0,294	0,232	0,94	-0,010	0,015	-	-	-0,295	0,233	0,94
14	2,282	0,245	-	-	0,164	-	0,57	2,291	0,201	-	-	0,147	-	0,56
15	-0,401	0,025	-	-	-	0,220	0,93	-0,421	0,019	-	-	-	0,222	0,92
16	2,600	0,249	-	-	-	-	0,57	2,573	0,204	-	-	-	-	0,56

Legenda: a0 – coeficiente angular; a1 – coeficiente angular da evaporação do atmômetro (EV); a2 – coeficiente angular da temperatura média (T); a3 – coeficiente angular da umidade relativa média (UR); a4 – coeficiente angular da velocidade do vento (U2); a5 – coeficiente angular da radiação solar global (G).

6 CONCLUSÕES

Os valores observados nos atmômetros de superfície evaporativa superior (ATES), medida diariamente, em média foram superiores aos valores observados nos atmômetros de superfície de evapotranspiração lateral, o que corresponde uma leitura mais próxima da verdade por parte desse tipo de instrumento. O diferente comportamento dos atmômetros se deu ao fato dos instrumentos utilizarem a mesma cápsula de cerâmica, porém, submetidas a diferentes tratamentos quanto à superfície evaporativa. Além dos instrumentos superfície evaporativa lateral (ATEL) terem menor média dos valores observados, o mesmo, possui também, menor desvio padrão em relação aos instrumentos de superfície evaporativa superior (ATES). Desta forma, permite-se afirmar que os instrumentos superfície evaporativa superior (ATES) são mais uniformes em relação à dispersão dos dados medidos.

A análise correlacional entre os elementos climáticos medidos e a evapotranspiração de referência apontaram a Radiação Solar Global e a Umidade Relativa do Ar como elementos de forte correlação com a Evapotranspiração de Referência (ET_o). O elemento climático Temperatura Média do Ar, apresentou correlação moderada com a ET_o. Para o elemento climático Velocidade do Vento, ao contrário dos anteriores, é constatado uma fraca correlação com relação à ET_o, desta forma, não é uma opção considerável frente às outras grandezas associadas. A força de correlação entre a pluviosidade acumulada e a Referência ET_o, encontra-se no limítrofe desprezível. Entretanto, dias seguidos de chuva podem acarretar baixos valores de evapotranspiração, a exemplo do sexto dia de experimento, em que os fatores Umidade Relativa do Ar e Radiação Solar Global atingiram respectivamente valores de 96% e 5Mj.m⁻².

Cada uma das equações modeladas e expostas foi gerada utilizando-se conjuntamente todos os dados dos atmômetros da respectiva classe atmômetros de superfície evaporativa superior (ATES) ou atmômetros de superfície evaporativa lateral (ATEL).

A equação para estimativa da ET_o mais simples utiliza apenas o valor da evaporação EV dos atmômetros, ficando as equações conjuntas para o ATEL: $ET_{o_{ATEL}} = 2,600 + 0,249.EV_{ATEL}$ com um R² de 56,8% e para o

ATES: $ETo_{ATES} = 2,573 + 0,240.EV_{ATES}$ também com R^2 de 56,8%. Esse modelo assume uma posição precária quanto a estimativa da ETo, porem, um modelagem de ETo precária em torno de 57% é melhor do que a ausência total desta variável.

O modelos de estimativa da evapotranspiração ETo, baseados em regressões múltiplas, tendo como variáveis de entrada o valor de EV medido de cada atmômetro, junto com os dados de temperatura e umidade relativa do ar média. Apresentaram valores de R^2 na ordem de 88%, tanto para os instrumentos ATES quanto para os instrumentos ATEL. Tais modelos apresentaram, para o atmômetro ATEL, a equação $ETo_{ATEL} = 9,208 + 0,063.EV_{ATEL} + 0,046.T - 0,084.UR$, e para o atmômetro ATES, a equação $ETo_{ATES} = 9,324 + 0,053.EV_{ATES} + 0,040.T - 0,084.UR$. Com um R^2 igual a 88% esse modelamento assume uma posição intermediaria no quesito capacidade de estimativa. Não é o melhor dos modelos, porem, é a melhor opção quando se dispõe apenas dos valores de temperatura media e umidade relativa do ar.

Todo o modelo que compõe o coeficiente angular de radiação solar global (G) teve o coeficiente R^2 maior ou igual a 92%. Com destaque a exceção do atmômetro ATEL, que apresenta no modelo de equação de número 15 um R^2 de 93%.

Os modelos que associam a umidade relativa e a radiação solar global apresentaram coeficiente R^2 ótimo, da ordem de 99%. Desta forma, por incluir o coeficiente de temperatura do ar, a equação de modelagem $ETo = a_0 + a_1.EV + a_2.T + a_3.UR + a_5.G$, é eleita como modelo prático a ser aplicado. O modelo para o atmômetro ATEL leva a equação $ETo_{ATEL} = 2,413 - 0,002.EV_{ATEL} + 0,078.T - 0,040.UR + 0,156.G$, com R^2 da ordem de 99,7%. Já o atmômetro ATES leva em a equação $ETo_{ATES} = 2,387 - 0,002.EV_{ATES} + 0,079.T - 0,040.UR + 0,156.G$ com um R^2 de 99,7%. Ambos os modelos apresentam-se como excelentes estimadores de ETo, praticamente posicionam os dados estimados sobre a reta, com um R^2 de aproximadamente 1, sendo escolhido como o melhor modelo.

Os modelos múltiplos de estimativa de baixos coeficientes de correlação R^2 foram os modelos que consideravam apenas, o coeficiente

angular velocidade do vento (U_2) e o coeficiente Evaporação (EV). Porém, os modelos de ajuste simples que levaram em conta apenas o valor de (EV) também apresentaram baixos coeficientes de correlação R^2 . Essa constatação confirma o grau de irrelevância quanto aos valores de (U_2) na estimativa de ET_o , constatando a fraca correlação entre a ET_o e a Velocidade do Vento na situação deste estudo.

O modo de operação das equações de estimativa de ET_o a partir do instrumento atmômetro, associado a um ou mais dados dos elementos climáticos observados, permite que o usuário optar por uma das 16 equações da Tabela 11. Embasado na sua realidade e necessidade, após a escolha do modelo, o usuário deverá dispor dos registros diários desses elementos climáticos associados.

O método aqui exposto representa uma evolução quanto à calibração e quanto à obtenção do real valor da Evapotranspiração de Referência (ET_o), uma vez que tais únicas equações podem ser utilizadas para todos os equipamentos de cada tipo, não mais sendo necessária a calibração de cada equipamento individualmente. Portanto, pode-se afirmar que as modificações realizadas no atmômetro aumentaram a acurácia do evaporímetro proporcionando uma maneira eficiente de obtenção de ET_o .

REFERÊNCIAS

- ABTEW, W. Evaporation Estimation for Lake Okeechobee in South Florida. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v. 127, n. 3, p.140-147, jun. 2001. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2001\)127:3\(140\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2001)127:3(140)).
- AGUILERA, G. J.; MARTÍN, R. M. Água tratada magneticamente estimula a germinação e desenvolvimento de mudas de solanum lycopersicum l. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v.6, n.1., p.47-53, Mar, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL) (Brasil) (Org.). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada / Agência Nacional de Águas**. Brasília, 2017. 85 p. Disponível em: <<http://biblioteca.ana.gov.br/index.html>>. Acesso em: 30 mar. 2017.
- ALLEN, R. G.; SMITH, M.;PERRIER, A.; PEREIRA, L. S.. **An update for definition of reference evapotranspiration**. Icid, Bulletin. 1994
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALTENHOFEN, J. **A modified atmometer for on-farm evapotranspiration determination**. In: Conference on Advances in Evapotranspiration. Chicago, Illinois, 1985, Proceedings, Chicago, ASAE, 1985, p. 177-184.
- ALTENHOFEN, J. **ETgage: A field device for simulating ET**. In: Proceedings from the international exposition and technical conference, Irrigation Association, Fairfax, VA. Pag. 12-20. 1992
- ANDERSEN, M. E.; JOBSON, H. E.; Comparison of techniques for estimating annual lake evaporation using climatological data. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 18, n. 3, p.630-636, jun. 1982. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1029/wr018i003p00630>.

AYARS, J. E.; PHENE, C. J.; PHENE, R. C.; SUDUAN G.; DONG W.; DAY, K. R.; MAKUS, D. J. Determining pomegranate water and nitrogen requirements with drip irrigation. **Agricultural Water Management**, 2017, vol. 187, issue C, 11-23.

AZEVEDO, P.V.; TEIXEIRA, A.H.C.; SILVA, B.B.; SORES, J.M.; SARAIVA, F.A.M. Avaliação da reflectância e do saldo de radiação sobre um cultivo de videira europeia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.1-7, 1997

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. 247 p.

BEEFPOINT (Brasil). Beefpoint (Comp.). **Manejo da irrigação de pastagens**. 2006. Miguel Cavalcanti. Disponível em: <<https://www.beefpoint.com.br/manejo-da-irrigacao-de-pastagens-32183/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML: guia do usuário** - tradução de Fábio Freitas da Silva e Cristina de Amorim Machado. - Elsevier - Rio de Janeiro 2005

BROHAN, P.; KENNEDY, J.J.; HARRIS, I.; TETT, S.F.B.; Jones P.D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. **J. Geophys. Res.** 111: 2006 D12106. Bibcode:2006JGRD..11112106B. doi:10.1029/2005JD006548

BRONER, I.; LAW, R.A.P. Evaluation of modified atmometer for estimating reference ET. **Irrigation Science**, New York, v.12, p.21-6, 1991.

CAMARGO, A.P. **Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais**. 2012. 112p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARDER, A.C. Canada Department of Agriculture, Experimental Farm, Beaverlodge, Alberta. 1960.

CARDOSO, A. I. I.; HIRAKI, H. Avaliação de doses e épocas de aplicação de nitrato de cálcio em cobertura na cultura do rabanete. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 196-199, novembro 2001.

CARVALHO, D. F. de et al . Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da beterraba. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal , v. 31, n. 2, p. 269-277, Apr. 2011 . Available from
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000200007&lng=en&nrm=iso>. access
on 23 Jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000200007>.

CARVALHO, D.F.; OLIVEIRA, L.F.C. de. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa: Ed. UFV, 2012. 240p.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C.R.; PACCOLA, A.A. Legenda atualizada do Levantamento de Solos da Fazenda Lageado-Estação Experimental “Presidente Médici” **Boletim Cl. FCA/UNESP**, Botucatu, n.1, 1983. 95p.

CASPER, M. et al. Fuzzy logic-based rainfall—runoff modelling using soil moisture measurements to represent system state. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 52, n. 3, p.478-490, jun. 2007. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.3.478>.

CHOUDHURY, B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 216, n. 1-2, p.99-110, mar. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(98\)00293-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(98)00293-5).

CONCEIÇÃO, M.A.F. Modelos de estimativa do saldo de radiação na região noroeste do Estado de São Paulo. In: **CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 16., 2006, Goiânia. Anais... Viçosa - MG

CREMASCO, C. P. **Aplicação da Lógica Fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. 2008. ix, 97 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2008.

CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CATANEO, A. Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores Fuzzy para a avaliação energética de empresas de avicultura de postura. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.25, n.1, p.21-39, 2010.

DIOP, L.; BODIAN, A.; & DIALLO, D. . Use of atmometers to estimate reference evapotranspiration in Arkansas. **African Journal of Agricultural Research**, 10(48), 4376-4383.2015

DE BRUIN, H. A. R., 1978. A Simple Model for Shallow Lake Evaporation, **Journal of Applied Meterology**, Vol. 17, pp. 1132-1134.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Necessidades hídricas das culturas**. Trad. de H.R. Gheyj, J.E.C. Metri, F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1997. 204 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Circular Técnica 65**, Sete Lagoas, MG. 2005

FABER L.. **Estatística Aplicada**. 4ª Ed. Pearson, 2010.

FERNANDES, C.; CORA, J.E.; ARAUJO, J.A.C.de. Refence evapotranspiraton estimation inside greenhouses. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v.60, n.3, p.591-594, jul./set 2003.

FERRO, M. G. F.; COSTA, R. DE H.;JÚNIOR, J. P. F. DE A.; BARBOSA, A. L. P.; DOS SANTOS, M. A. L. Análise da cultura do rabanete submetida a diferentes níveis de salinidade e lâminas de irrigação. In. **INOVAGRI**, III, 2015, Fortaleza, Brasil, International Meeting, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION - FAO. **Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements - Irrigation and drainage**. Local: FAO, 56 p., 1998.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F.; CHACUR, M. G. M. Application of fuzzy logic for the evaluation of livestock slaughtering. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 813-825, 2011.

GALVANI, E.; DANTAS, R.T.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Parâmetros meteorológicos em cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.) cultivada em casas de vegetação com orientações leste-oeste, norte-sul e condições externas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.157- 63, 1998.

GALVANI, E. E.; PEREIRA, J.F.; BELMONT, A. **Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com Pepineiro.**

Bragantia, Campinas, v. 60, n.2, p.139-147, 2001. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052001000200010&lng=en&nrm=iso

GRIFFITHS, H.; PARRY, M.A.J. Plant Responses to Water Stress. **Annals of Botany**, v. 89, p. 801- 802, 2002.

GÜÇLÜ, Y. S.; SUBYANI, A. M.; ŞEN, Z. Regional fuzzy chain model for evapotranspiration estimation. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 544, p.233-241, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.045>.

HESS, T. M. Evapotranspiration estimates for water balance scheduling in the UK. **Irrigation News**, 25: 31-36.

HIDROLOGIA APLICADA. Evaporação, Transpiração e Evapotranspiração, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária PHD – **307 Hidrologia Aplicada**. 2006, Pg 2.

HUANG, Y.; LAN, Y.; THOMSON, S.J.; FANG, A.; HOFFMANN, W.C.; LACEY, R.E.; 2010. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. **Comput. Electron. Agric.** 71, 107–127.

ILIC, Milos et al. Water cycle estimation by neuro-fuzzy approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 135, p.1-3, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.025>.

INTERNATIONAL GLOSSARY OF HYDROLOGY **Glossaire international d'hydrologie**. Geneva: WMO, 2012

JANSSEN, P.H.M.; HEUBERGER, P.S.C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.83, n.1, p.55-56, 1995.

KAYANO, M.T.; MOURA, A.D. O El-Niño de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, 4(1-2): p201-214, 1986.

KESKIN M. E.; ÖZLEM T.; DILEK T. Fuzzy logic model approaches to daily pan evaporation estimation in western Turkey / Estimation de l'évaporation journalière du bac dans l'Ouest de la Turquie par des modèles à base de logique floue,

Hydrological Sciences Journal, 49:6, -1010, 2004.

KIM, Y.; REID, J. F.; ZHANG, Q. Fuzzy logic control of a multispectral imaging sensor for in-field plant sensing. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 60, n. 2, p.279-288, mar. 2008. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2007.09.008>.

KOHLER, M. A.; L. H. PARMELE. Generalized Estimates of Free- Water Estimates, **Water Resources Research**, Vol. 3, pp. 997-1005.1967

KOHLER, M. A.; NORDENSON, T. J.; FOX, W. E. Evaporation from Pans and Lakes, **U. S. Dept. Commerce**, Weather Bureau Research Paper 38.1955

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. **Gotha: Verlag Justus Perthes**, 1928. Wall-map: 150cmx200cm.

LATORRE, M. L. de et al. Optimization of fertirrigation efficiency in strawberry crops by application of fuzzy logic techniques. **Journal of Environmental Monitoring**, [s.l.], v. 7, n. 11, p.1085-1087, 2005. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/b508502k>.

LEVIDOW, L.; PIMBERT, M.; VANLOQUEREN, G. Agroecological Research: Conforming—or Transforming the Dominant Agro-Food Regime? **Agroecology and Sustainable Food Systems** 2014

LINACRE, E. T., A Simple Formula for Estimating Evaporation Rates in Various Climates, Using Temperature Data Alone. **Agricultural Meteorology**, Vol. 18, pp. 409-424. 1977

LINSLEY, R.K. KOHLER, M.A. & PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers**. New York, McGraw-Hill, 1982. 508p.

LIVINGSTON, B. E. A RAIN-CORRECTING ATMOMETER FOR ECOLOGICAL INSTRUMENTATION. **The Plant World - A Magazine of General Botany**.1910

LIVINGSTON, B. E. **Atmometers of Porous Porcelain and Paper, Their Use in Physiological Ecology**. 1935.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI (segunda edição). Brasília: **Ministério do Meio Ambiente**, 2007, v.1. p.214, 2007.

MAMDANI, E. H. ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **Int. J. Man-Machine Studies**, vol. 7, p. 1-13, 1975.

MCKENZIE, R. S.; CRAIG, A. R. Evaluation of river losses from the Orange River using hydraulic modeling. **J. Hydrol.** 241, 62–69.2001

MORTON, F. I. Climatological estimates of lake evaporation. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.64-76, fev. 1979. Wiley-Blackwell.
<http://dx.doi.org/10.1029/wr015i001p00064>.

MPALLAS, L.; TZIMOPOULOS, C.; PAPADEVANGELOU, G. Estimation of Evapotranspiration Using Fuzzy Systems and Comparison With the Blaney-Criddle Method. **Journal of Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 1, n. 4, p.181-186, 1 abr. 2008. Science Alert. <http://dx.doi.org/10.3923/jest.2008.181.186>.

MUSTAFA, N.B.A., 2009. Agricultural produce Sorting and Grading using Support Vector Machines and Fuzzy Logic. **IEEE Int. Conf. Signal Image Process. Appl.** (ICSIPA), 391–396.

MUNDOCLIMA (Ed.). **Estacoes-meteorológicas**. 2018. Disponível em: <www.mundoclima.com.br/estacoes-meteorologicas/>. Acesso em: 26 dez. 2018.

MUKAKA, M.M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawai Medical Journal**. PMC 3576830. Consultado em 28 de agosto de 2018.

NESPOLI, A.; COCHEV, J. S.; NEVES, J. M. A. S.; SEABRA JÚNIOR, S. Produção de hortaliças pela agricultura familiar de alta floresta, Amazônia mato-grossense. Campo-território: **revista de geografia agrária**, v. 10, n. 21, p. 159-191, ago., 2015.

ODHIAMBO, L. O.; YODER, R. E.; YODER, D. C. **Estimation of Reference Crop Evapotranspiration Using Fuzzy State Models**. 2001. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1452&context=biosysengfacpub>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

OLIVEIRA, R. A. et al. Desempenho do irrigômetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online]. 2008, vol.12, n.2, pp.166-173. ISSN 1415-4366

ONU. Assembleia Geral das Nações Unidas. **Relatório das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos**. 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>.

PASSAM, H.; TOCATLIDOU, A.; MAHAMAN, B., 2003. Methods for decision making with insufficient knowledge in agriculture. In: **EFITA 2003 Conference**. pp. 727–731.

PENMAN, N. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, London, Serie A, v.193, p.120-145, 1948.

PEREIRA, A.S. **Avaliação do desempenho de um atmômetro modificado na estimativa da evapotranspiração potencial**. Piracicaba, 1996. 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo

PEREIRA, A. S.; FRIZZONE, J. A.; COELHO, R. D. **Procedimentos para instalação e aumento da resolução de medida de um atmômetro modificado**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004.

PEREIRA, A.L. et al. Atributos do solo sob pastagens em sistema de sequeiro e irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.377-384, 2009. Disponível em: Acesso em: 15 out. 2012. doi: 10.1590/S1413- 70542009000200003.

PEREIRA, A.R.; COELHO, R.D. Determinação da evapotranspiração de referência (ET₀) através de atmômetros modificados em condições tropicais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 21, 1992, Santa Maria. Anais... Santa Maria: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. p. 636-647.

PEREIRA, A.R; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia Agrícola**. Edição revisada e ampliada, Piracicaba: USP, p. 191, 2007.

PEREIRA, F.A.C. **Desempenho do modelo de PenmanMonteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) em relação a um lisímetro de pesagem**. 1998. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PFEIFFER, L.; LIN, C.-Y., THE EFFECTS OF ENERGY PRICES ON AGRICULTURAL GROUNDWATER EXTRACTION FROM THE HIGH PLAINS AQUIFER. 2014. **Publications, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce**. 518

PINTO, H.s.; ZULLO JUNIOR, J. **GEADAS: CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA E CUIDADOS**. 2018. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br/artigos-especiais/geadas.html>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

PIRES, R.C.M; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; FUJIWARA, M.; CALHEIROS, R. O. Métodos e Manejo da Irrigação. **Centro de Ecofisiologia e Biofísica Instituto Agrônômicos**, 1999.

PRIESTLEY, C. H. B.; R. J. TAYLOR, 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters, **Monthly Weather Review**, Vol. 100, pp. 81-92

PUTTI, F. F.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO GABRIEL, C. P.; NETO, A. B.; BONINI, C. S. B.; RODRIGUES DOS REIS, A. A Fuzzy mathematical model to estimate the effects of global warming on the vitality of *Laelia purpurata* orchids. **Mathematical Biosciences**, v. 288, p. 124-129, 2017.

RASSINI, J. B.. Water management of irrigation for alfalfa in a Red-Yellow Latosol (Hapludox). **Pesq. agropec. bras.**[online]. 2002, vol.37, n.4, pp.503-507. ISSN 0100-204X.

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta Atmosfera**, 4ª Ed. Campinas: Fund. Cargill, 466p., 1985.

REN, C. et al. A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 164, p.85-94, out. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.185>.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. 3 ed. John Wiley and Sons, 2010.

SANTOS, C.A.B.; ESPINDOLA, J.A.A.; GUERRA, J.G.M.; FEITOSA, H.O.; MOURA, A.F.G.; RIBEIRO, R.L.D.; ALMEIDA, D.L.; COSTA, J.R. Efeito de coberturas mortas vegetais sobre o desempenho da cenoura em cultivo orgânico. **Seropédica: Embrapa Agrobiologia**, 2008. 4 p

SANTOS, M. A. **Parametrização de coeficientes de sensibilidade e teste de modelos agrometeorológicos de estimativa de quebra de produtividade do cafeeiro** (Coffea arabica L.). Disponível em:
<<http://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/dissertacoes/pb1805803.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

SCHUSTER, M. Z.; KAWAKAMI, J.; BROETTO, D.; SZYMCZAK, L. S.; RAMALHO, K. R. O. Influência do fotoperíodo e da intensidade de radiação solar no crescimento e produção de tubérculos de rabanete. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 2, p. 73-86, out. 2012.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R. **Meteorologia Agrícola. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, 1998. 131p.** (apostila)

SILVA, L. F. DE O.; DA CAMPOS, K. A.; MORAIS, A. R.; COGO, F. D.; ZAMBON, C. R. Tamanho ótimo de parcela para experimentos com rabanetes. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 5, p. 624-629, out. 2012.

SIQUEIRA, J.; ROCIO, V., 2011. Sistema pericial em Prolog no diagnóstico do potencial agrícola de solos. In: **VI Congresso Ibérico de Agro-Engenharia**, Universidade de Évora.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO. 45p. 1991.

SHIMIZU, T. **SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR DIGITAL**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1975. 107 p.

SNYDER N.W., et al. Production of stable isotope-labeled acyl-coenzyme A thioesters by yeast stable isotope labeling by essential nutrients in cell culture. **Anal Biochem** 474:59-65. 2015.

SNYDER, R.L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, p.977-980, 1992.

STEWART, R. B.; W. R. ROUSE, 1976. A Simple Method for Determining the Evaporation from Shallow Lakes and Ponds, **Water Resources Research**, Vol. 12, pp. 623-628.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TEJADA J.; GARCIA-CAIRASCO N.; ROQUE A.C. Combined Role of Seizure-Induced Dendritic Morphology Alterations and Spine Loss in Newborn Granule Cells with Mossy Fiber Sprouting on the Hyperexcitability of a Computer Model of the Dentate Gyrus. **PLoS Comput Biol** 10(5): e1003601.2014

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no século XXI** – São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VALLET-COULOMB, C.; DAGNACHEW, L.; GASSE, F.; TRAVI, Y.; CHERNET, T., 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africa from limited meteorological data. **Journal of hydrology** 245, 1–18

VASCONCELOS, H. S.. **Automação de sistema de irrigação em malha fechada utilizando rede sem fio de sensores capacitivos de umidade do solo.**

Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2013.

VIAIS NETO, D. S.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F.; BORDIN, D.; SILVA JUNIOR, J. F. Sistema baseado em regras fuzzy da altura do tomateiro em função da irrigação e da salinidade da água no momento da colheita. Quarto Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy. **Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional** – SBMAC. São Paulo, 2016.

VICENTE, A. S. C.; VICENTE, S. E. I. **Proposta para Manejo da Irrigação.** Belém. Pará. Amazônia Irrigação. 2004.

VICENTIN, T. A.; SERAPHIM, O. J.; HALMEMAN, R. J.; Oliveira Jr, A. J.; **Estimativa da Variabilidade Anual de Bombeamento D'água em Sistema Acionado por Energia Solar Fotovoltaica.** VI CBENS 2016, 2016

WARNAKA, K.; POCHOP, L. Analyses of equations for free water evaporation estimates. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 24, n. 7, p.979-984, Jul. 1988. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1029/wr024i007p00979>.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

ZACCARIA, D. MAIA, R. VIVAS, E. TODOROVIC, M. SCARDIG. Innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84-94, 2014

ZLOTOPOLSKI, V. The Impact of magnetic water treatment on salt distribution in a large unsaturated soil column, **International Soil and Water Conservation Research**, 2017.

ZUÑIGA ESCOBAR, O.; JIMÉNEZ, C. O.; BENAVIDES, J. A.; GUTIÉRREZ, M. A.; TORRES, C.; Efecto del agua magnetizada en el desarrollo y la producción de cúrcuma (*Curcuma longa* L.). **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 10, n. 1, p. 176-185, jul 2016.