

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

VANESSA DE ARRUDA SOUZA

**VALIDAÇÃO DE MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO
DE UM MODELO A PARTIR DE DADOS *IN SITU* E REMOTOS PARA CULTIVOS
DE ARROZ IRRIGADO NO SUL DO BRASIL**

Porto Alegre, RS, Brasil.
2017

VANESSA DE ARRUDA SOUZA
METEOROLOGISTA

**VALIDAÇÃO DE MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO
DE UM MODELO A PARTIR DE DADOS *IN SITU* E REMOTOS PARA CULTIVOS
DE ARROZ IRRIGADO NO SUL DO BRASIL**

**Tese apresentada como um dos requisitos
para obtenção do grau de Doutora em
Sensoriamento Remoto, área de
concentração em Ciências Atmosféricas.**

Orientadora: Prof^a. Dra. Rita de Cássia Marques Alves

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Débora Regina Roberti (UFSM)

Porto Alegre, RS, Brasil.
2017

À minha família que sempre me orientou e ajudou a vencer cada dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus a oportunidade de poder estudar e aprimorar meus conhecimentos.

Um agradecimento especial ao meu pai, mesmo não estando mais presente entre nós, sempre me ajudou e me apoiou nos estudos, assim como minha mãe que me dá amor e forças para seguir em frente e vencer cada dificuldade, ajudando a me aprimorar e crescer tanto de forma pessoal como profissional.

Aos meus avós que não estão mais presentes, mas sempre mostraram a importância dos estudos para minha vida.

Aos meus irmãos Leonardo e Alfeu por toda a compreensão, força e incentivo ao longo da minha trajetória.

Aos meus amigos, em especial: Fernanda Souza, Tamíres Zimmer, Daniele Aimi, Michel Stefanello, e aos colegas de Laboratório LuMet por toda força e ajuda na conclusão deste trabalho.

À minha orientadora Dra. Rita de Cássia Marques Alves pela amizade, conselhos, compreensão nas horas difíceis, e ajuda na conquista deste título.

À minha co-orientadora Dra. Débora Regina Roberti, que sempre me acolheu e ajudou durante toda minha trajetória acadêmica. E pela nossa amizade que vem desde o início de minha graduação.

Aos meus professores pelo ensinamento transmitido e aos auxílios.

À banca composta pelos professores Anderson Ruhoff, Denise Fontana, Luís Gustavo Nogueira Martins, e Dirceu Herdies, por aceitarem o convite para defesa de meu doutorado e pelos conselhos transmitidos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERS), CNPq e FINEP pelo suporte financeiro.

Ao programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por viabilizar a realização deste trabalho.

Enfim, muito obrigada de coração a todos que me apoiaram e acreditam no meu trabalho.

“A dúvida é o princípio da sabedoria.”
Aristóteles

RESUMO

O arroz irrigado está entre os principais cereais produzidos no mundo. Determinar a evapotranspiração (ET) para as grandes áreas de arroz irrigado é um desafio devido a pouca disponibilidade de dados. Diversos Modelos de ET vêm sendo desenvolvidos com a intenção de monitorar áreas agrícolas, porém poucos estudos experimentais são realizados sobre áreas de arroz irrigado. Este trabalho tem como objetivo geral estimar a ET sobre cultivos de arroz irrigado através de um modelo que utiliza informações meteorológicas *in situ* (Priestley-Taylor) e outro remoto (MOD16). O Priestley-Taylor (PT) é um modelo de ET que utiliza informações de temperatura do ar e componentes relacionadas ao balanço de energia, juntamente com um parâmetro adimensional α . O modelo MOD16 foi criado para monitorar a ET em grandes áreas, utilizando informações meteorológicas de um banco de dados de reanálise juntamente com dados remotos. Ambos os métodos não apresentam calibração e validação sobre áreas de arroz irrigado no Sul do Brasil. Neste trabalho validamos estes dois modelos a partir de dois sítios experimentais com medidas de ET através da técnica de *Eddy Covariance*. Os resultados encontrados nesta pesquisa mostraram-se satisfatórios quando comparado o método PT com dados experimentais, recomendando-se a utilização de 1,22 do parâmetro α . A simplificação no método PT realizada a partir das componentes do balanço de energia, com substituição pela variável de radiação global através de uma regressão linear, mostrou-se válida apresentando erros poucos expressivos, e com valor de 1,18 para parâmetro α . Já o modelo de ET MOD16 mostrou-se pouco preciso sobre as áreas de arroz irrigado. A validação de ET MOD16 foi realizada sobre uma área de 3 x 3 km e pixel central, resultando em menor subestimativa do modelo para o pixel central em relação aos dados de *Eddy Covariance*. Além disso, a correlação foi realizada em função das variáveis ambientais, encontrando maior correlação do dado experimental com as componentes do balanço de energia, enquanto o MOD16 apresentou maior correlação com a temperatura do ar. Por fim, sugerem-se melhorias na parametrização da energia disponível no modelo de ET MOD16. Além disso, a aplicação do método simplificado de PT é indicada sobre áreas de arroz irrigado.

Pavavras-chave: Evapotranspiração, arroz irrigado, MODIS.

ABSTRACT

Irrigated rice is among principal produced cereals in the world. Determining the evapotranspiration (ET) for large areas of irrigated rice is a challenge task, due to poor data availability. Several ET models have been developed with the intention of monitoring agricultural areas, however few experimental studies are accomplished on areas of irrigated rice. This study aims to estimate ET on irrigated rice crops using a model which employs meteorological information in situ (Priestley-Taylor) and one remote (MOD16). Priestley-Taylor (PT) is a model of ET that uses air temperature and related components to the energy balance as information and a dimensionless parameter α . The MOD16 model was designed to monitor ET in large areas using meteorological information obtained from the reanalysis database together with remote data. Both methods do not present calibration and validation on areas of irrigated rice in Southern Brazil. In this work we validate these two models from two experimental sites with ET measurements employing the Eddy Covariance technique. The results found in this research was satisfactory when compared to the PT method with experimental data. It was suggested 1.22 for the α parameter. The simplification in the PT method performed from the components of the energy balance, with substitution for the global radiation variable using a linear regression. It was validated with few expressive errors, with a value of 1.18 for α parameter. On the other hand, the MOD16 model did not showed good accuracy on the areas of irrigated rice. The validation of ET MOD16 was performed over an area of 3 x 3 km and central pixel, resulting in a small underestimation of the model for the central pixel in relation to Eddy Covariance data. In addition, was performed the correlation in function of the environmental variables, finding a higher correlation of the experimental data with the components of the energy balance, while the MOD16 showed a high correlation with the air temperature. Finally, it was suggested improvements in the parameterization of the available energy in the model of ET MOD16, and to indicate the application of the simplified method of PT on the areas with irrigated rice.

Keywords: Evapotranspiration, rice paddy, MODIS.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO I – ASPECTOS INTRODUTÓRIOS	1
I.1 INTRODUÇÃO	1
I.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
I.2.1 Cultura do Arroz.....	4
I.2.2 Evapotranspiração (ET).....	6
I.2.3 Métodos para estimativa da Evapotranspiração	8
I.2.3.1 Método Penman-Monteith (PM)	8
I.2.3.2 Método Priestley-Taylor (PT)	11
I.2.3.3 Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos	11
I.2.4 Característica da Evapotranspiração sobre áreas agrícolas	12
I.2.5 Dados de Sensoriamento Remoto: Sensor MODIS.....	14
I.2.6. Técnicas de Sensoriamento Remoto no auxílio do estudo de áreas agrícolas	16
I.3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
I.3.1 Sítios experimentais de Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul-RS.....	18
I.3.2 Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet)	21
I.3.3 Produto MOD16: Produto Global de Evapotranspiração.....	22
I.3.4 Metodologia empregada.....	24
I.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
CAPÍTULO II – RESULTADOS NA FORMA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS SUBMETIDOS OU A SEREM SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO	33
ARTIGO 1:.....	34
SIMPLIFICAÇÃO DA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O ARROZ IRRIGADO UTILIZANDO O MÉTODO PRIESTLEY-TAYLOR.....	34
ARTIGO 2:.....	57
WHAT DRIVES EVAPOTRANSPIRATION OVER IRRIGATED CROPLAND? A COMPARISON BETWEEN FLUX TOWER MEASUREMENTS AND MODIS REMOTE SENSING ESTIMATIONS	57
CAPÍTULO III – RESULTADOS NA FORMA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS EM PERÍODICOS INDEXADOS	73

III. ARTIGO 1 – VALIDAÇÃO DO PRODUTO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO MOD16 PARA UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO EM CACHOEIRA DO SUL – RS ..73	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Área plantada e produtividade do arroz no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Safras de 1921/22 até 2016/17. Fonte: IRGA, 2017.	5
2. Mapa das regiões com cultura de arroz no Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de KLERING (2012).	6
3. Variação diurna dos componentes do balanço para uma superfície bem irrigada transpirante com cobertura de céu limpo. Fonte: adaptado de ALLEN et al., (1998).	8
4. Representação simplificada da resistência superficial e da resistência aerodinâmica com o fluxo de vapor d'água. Fonte: adaptado de ALLEN et al., (1998).	10
5. Relação entre evapotranspiração relativa com o desenvolvimento da planta. Fonte: Adaptado de ALLEN et al., (1998).	13
6. Localização dos sítios experimentais da Rede SULFLUX. Os locais com linha em vermelho as estações micrometeorológicas encontram-se desativadas.	19
7 Sítio experimental do Projeto SULFLUX. (a) Cultivo de arroz irrigado em Cachoeira do Sul; (b) Torres Micrometeorológicas.	20
8 Dados do produto MOD16 de evapotranspiração global para o período de 2000 a 2006, primeira versão (acima) e melhorias do produto ET-MODIS (abaixo). Fonte: MU; ZHAO; RUNNING, 2011.	23

LISTA DE TABELAS

Página

1. Especificações do espectroradiômetro do MODIS para as Bandas 1 a 36. Fonte: Rudorff *et al.*, (2007). 15

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBERS - *China-Brazil Earth Resources Satellite*
CEI - *Crop Enhancement Index*
CS – Cachoeira do Sul
EOS – *Earth Observing System*
ET – Evapotranspiração
ETc – Evapotranspiração de Cultura
ET-MODIS – Evapotranspiração MODIS
ETo – Evapotranspiração de referência
ETr – Evapotranspiração real
ETs – Evapotranspirações
FAS – *Foreign Agricultural Service*
GMAO – *Global Modelling and Assimilation Office*
INMet – Instituto Nacional de Meteorologia
IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz
IV – infravermelho
Kc – coeficiente da cultura
L_μMet – Laboratório de Micrometeorologia
Landsat - *Land Remote Sensing Satellite*
LSA-SAF – *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility*
MCD43B2/B3 – *Albedo Product*
Mercosul – Mercado Comum do Sul
MERRA – *Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications*
METRIC – *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*
MOD12Q1 – *Land Cover classification/Land Cover Change Product*
MOD15A2 – *Leaf are Index, Fraction of Photosynthetically Active Radiation Product*
MOD16 – Produto de Evapotranspiração MODIS
MODIS – *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*
MSG – *Meteosat Second Generation*
NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

OMM – Organização Meteorológico Mundial
PM – Método Penman-Monteith
PS – Paraíso do Sul
PT – Método Priestley-Taylor
RAE – energia residual disponível
RS – Rio Grande do Sul
SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm over Land*
SEBS – *Surface Energy Balance System*
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SULFLUX – Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas
UFMS – Universidade Federal de Santa Maria
USDA – *United States Department of Agriculture*
VIS – visível

LISTA DE SÍMBOLOS

z_h – altura da medida da umidade

z_m – altura da medida do vento

c_p – calor específico do ar a pressão constante

λ – calor latente de evaporação

z_{0m} – comprimento de rugosidade da cultura para transporte de momento

z_{0h} – comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível

κ – constante de Von Karman

γ – constante Psicrométrica

ρ_a – densidade média do ar a pressão constante

d – deslocamento do plano zero

q' – desvio em relação à média da umidade específica do ar

ω' – flutuações da velocidade vertical do vento

IAF – índice de área foliar

ρ_w – massa específica da água

e_a – pressão atual de vapor

r_a – resistência aerodinâmica

r_l – resistência estomática da folha

r_s – resistência superficial

R_n – saldo de radiação

u_z – velocidade do vento na altura z

e_s – pressão de vapor de saturação

Δ – inclinação da curva de pressão de vapor

G – fluxo de calor no solo

H – fluxo de calor sensível

R_g – radiação solar global

T – Temperatura do ar

α – parâmetro ambiental

A – partição da energia disponível entre o fluxo de calor sensível, latente e no solo para a superfície

s – inclinação da curva de pressão de vapor

β – razão de Bowen

λET – Fluxo de calor latente

CAPÍTULO I – ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

I.1 INTRODUÇÃO

O Arroz (*Oryza sativa*) é um dos principais cereais produzidos no mundo, principalmente de forma irrigada por inundação. Planejar e gerenciar o uso dos recursos hídricos vem se tornando cada vez mais importante, visto o cenário de mudanças globais e o aumento do uso da água. Somente a agricultura de forma irrigada consome aproximadamente 70% da água doce de rios, lagos e aquíferos (ROSEGRANT; CAI, 2002).

O Brasil encontra-se entre os dez principais países produtores de arroz. Somente o estado do Rio Grande do Sul produz aproximadamente 71% do seu total (CONAB, 2017). Enquanto que na Ásia o arroz é semeado duas vezes ao ano, no Brasil o cultivo ocorre apenas durante a estação primavera-verão, ficando o solo descoberto e com crescimento de vegetação espontânea (TIMM et al., 2014). As áreas de plantio de arroz irrigado, de modo geral, demandam um grande volume de água, afetando diretamente o balanço hídrico da região.

O processo de Evapotranspiração (ET) está entre os principais componentes do ciclo hidrológico, representando a taxa evaporativa da superfície e a transpiração das plantas. Além disso, é uma importante variável climatológica e ambiental, apresentando complexidade na mensuração devido à grande variabilidade na escala de tempo e espaço, dependendo da cobertura vegetal, clima, topografia, propriedades do solo, entre outros fatores (ALLEN et al., 1998; MU et al., 2007).

A ET está relacionada diretamente com a taxa de vapor d'água na atmosfera podendo alterar o regime de chuva na região, e também com o balanço de energia, ambos associados ao fluxo de calor latente (λET). Durante a conversão da água líquida para o estado gasoso, o processo de ET consome grande quantidade de energia que chega à superfície (RAMOELO et al., 2014). Em cultivos agrícolas sob a forma de sistema irrigado, a ET consome cerca de 60 a 80% do saldo de radiação na fase de crescimento vegetativo (SUYKER; VERMA, 2009).

Para culturas agrícolas a estimativa da ET máxima, também chamada de Evapotranspiração de Cultura (ET_c), baseia-se no método Penman-Monteith (PM) utilizando

a ET de referência (ET_o), que é determinada a partir de uma superfície vegetada (gramado) mantida sobre condições ideais de crescimento, cobrindo totalmente o solo e sem restrição hídrica; e com Coeficiente da Cultura (K_c) variando de acordo com as características da planta e condições hídricas (ALLEN et al., 1998). Entretanto, a utilização deste método requer diversos parâmetros meteorológicos e de cobertura vegetal dificultando sua aplicação.

O Método Priestley-Taylor (PT) representa uma simplificação do método PM, que utiliza apenas variáveis meteorológicas e a energia disponível (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972). Na literatura diversos trabalhos têm sido realizados aplicando este método sobre diferentes tipos de cobertura da superfície: os autores GAVIN; AGNEW (2004) aplicaram o método PT para regiões alagadas e campos úmidos na Inglaterra; ARASTEH; TAJRISHY (2008) realizaram estudos sobre uma superfície d'água no Irã; KUSTAS; STANNARD; ALLWINE (1996) realizaram estudos sobre pastagens e terras cultiváveis; CASTELLVI et al. (2001) avaliaram o método sobre gramíneas de referência na Espanha. PRIESTLEY; TAYLOR (1972) avaliaram o método sobre uma superfície saturada, definindo o parâmetro adimensional presente na equação (α) igual a 1,26. Entretanto, a variação do parâmetro α varia de acordo com as condições climáticas de cada região e da cobertura da superfície, sendo desconhecido em cultivos de arroz irrigado em regiões subtropicais.

Outras formas de monitorar a ET, principalmente em grandes áreas agrícolas, vem sendo exploradas através de técnicas de sensoriamento remoto, auxiliando no estudo da variabilidade de ET, e sendo frequentemente comparadas com medidas de *Eddy Covariance* (FANG et al., 2016). Estas técnicas de sensoriamento remoto variam em escala espacial e temporal para todo o globo, sendo algumas delas: SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm over Land*), SEBS (*Surface Energy Balance System*), METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*), utilizadas por diversos pesquisadores: ALLEN et al. (2011, 2007); CARRILLO-ROJAS et al. (2016); JANG et al. (2013); LIOU; KAR (2014); RUHOFF et al. (2012).

O sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*) está presente nos satélites Terra e Aqua, disponibilizando diversos produtos remotos, entre eles o MOD16. O Produto MOD16 é uma das mais recentes técnicas remotas desenvolvida para facilitar o monitoramento da variabilidade temporal e espacial da ET, disponibilizando dados de λET e ET a cada 8 dias, mensal e anual, sem a necessidade de manipulação de imagens para obter o resultado final. Este produto foi desenvolvido por MU et al. (2007), utilizando dados provenientes de sensoriamento remoto para a superfície e dados meteorológicos a partir de

um modelo global. Melhorias nos resultados do MOD16 foram realizadas por MU; ZHAO; RUNNING (2011, 2013) acrescentando as variáveis de condutância estomática, aerodinâmica, entre outros. Entretanto, este produto foi calibrado utilizando dados da rede AmeriFlux, em que grande parte dos dados de fluxo são de sítios experimentais sobre a América do Norte.

Diversos estudos têm sido realizados a fim de verificar a acurácia do dado MOD16 sobre o globo. RAMOELO et al. (2014) utilizaram dois sítios experimentais com dados de fluxo sobre a África do Sul para validar a ET do produto MODIS; KIM et al. (2012) verificaram a qualidade dos dados MOD16 com 17 torres de *Eddy Covariance* para a Ásia; VELPURI et al. (2013) utilizaram 60 torres de fluxo sobre os Estados Unidos para validar a ET mensal do produto MOD16; HU; JIA; MENENTI (2015) compararam o produto MOD16 com medidas de 15 torres de fluxo para a Europa; RUHOFF et al. (2013) avaliaram o desempenho do produto MOD16 sobre áreas agrícolas, plantações de cana-de-açúcar e savanas naturais na região da Bacia Rio Grande (Brasil) encontrando resultados mais precisos para estação seca e menos precisos durante a estação chuvosa. Apesar da ET MOD16 ser validada sobre diversas áreas do globo, ainda há pouco conhecimento de sua acurácia sobre cultivos agrícolas. Conforme BIGGS et al. (2015), este produto precisa de mais testes em agricultura irrigada com alta evaporação do solo, destacando-se os cultivos de arroz irrigado.

A grande variabilidade de métodos para estimativa de ET tanto de forma remota como utilizando dados de *Eddy Covariance* têm sido pouco explorados e validados sobre áreas de arroz irrigado (BALDOCCHI et al., 2016), principalmente no sul do Brasil. Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral validar o modelo remoto de ET MOD16 e calibrar o método PT a partir de dados de *Eddy Covariance* sobre áreas de arroz irrigado no sul do Brasil, bem como avaliar a variabilidade interanual de ET.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Calibrar o parâmetro ambiental α da equação de Priestley-Taylor para o arroz irrigado;
2. Simplificar e validar método Priestley-Taylor a partir das componentes de energia disponível sobre diferentes sítios experimentais de arroz irrigado;
3. Validar do modelo ET MOD16 sobre áreas de arroz irrigado no Sul do Brasil;
4. Analisar as variáveis ambientais de controle dominantes no processo de ET, tanto modelado MOD16 como de *Eddy Covariance*.

I.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I.2.1 Cultura do Arroz

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo, com 75% desta produção oriunda do sistema de cultivo irrigado, servindo como alimento básico para aproximadamente 3 bilhões de pessoas. O continente asiático lidera a produção mundial (produzindo ~ 90% do arroz no mundo), cultivando o grão duas vezes no ano (TIMM et al., 2014). Conforme D'ARCO (2007), a China é o maior produtor (cerca de 30% da produção mundial) e também o maior consumidor mundial de arroz.

O Brasil encontra-se entre os dez países com maior produção mundial de arroz, cultivando o grão somente uma vez ao ano, durante a estação primavera-verão. O sistema de irrigação no país teve início na década de 1900, justamente para a produção de arroz no Rio Grande do Sul (ANA, 2014). Além disso, a cultura destaca-se pela grande demanda de água no estado, utilizando a irrigação em mais de 1,1 milhões de ha (EMATER/RS, 2017).

Dados divulgados pelo FAS/USDA, para a safra de 2014/15, mostram um aumento de 0,57% na área destinada à orizicultura no mundo, e incremento de 0,41% na produção. Entre os países do Mercosul o Brasil destaca-se com 79,3% da produção (média das safras de 2008/09 a 2014/15), seguido pelo Uruguai, Argentina e Paraguai (SOSBAI, 2014).

A safra brasileira de 2016/17 apresentou uma área de aproximadamente 1,9 milhões de hectares plantados, inferior a safra de 2015/16 que foi de 2 milhões de hectares. Entretanto, apesar da redução da área plantada, houve um aumento da produção de 10,6 milhões de toneladas da safra de 2015/16 para 12 milhões de toneladas de arroz (CONAB, 2017; IBGE, 2017). Este fato de redução da área, está ligado ao aumento da irrigação resultando em geral em aumento do uso da água, que por conseguinte leva a um investimento neste setor e um aumento substancial da produtividade e do valor da produção, diminuindo a pressão pela incorporação de novas áreas para cultivo (ANA, 2014).

A região sul do Brasil foi responsável por 81,4% da produção no país, e somente o Estado do Rio Grande do Sul, durante a safra de 2016/17, produziu 71% deste total (CONAB, 2017). O arroz no Estado é produzido por aproximadamente 131 municípios localizados na

metade sul, onde 232 mil pessoas vivem de forma direta ou indireta da exploração dessa cultura (SOSBAI, 2007). A área plantada no Estado, juntamente com a produtividade de arroz é apresentada na Figura 1. Conforme os dados do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) a partir da safra de 2010/11 a área plantada apresentou um pequeno decréscimo em relação as seguintes, no entanto, a produtividade manteve-se quase que constante, exceto durante a safra de 2015/16.

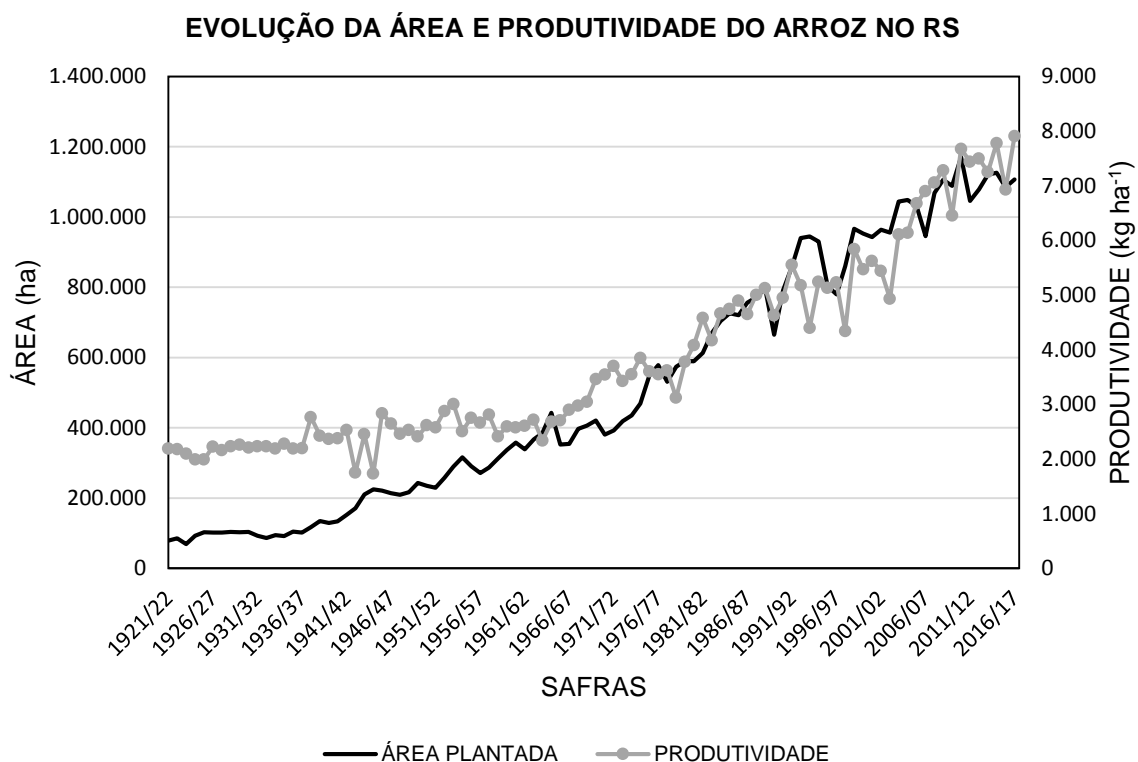


FIGURA 1. Área plantada e produtividade do arroz no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Safras de 1921/22 até 2016/17.

Fonte: IRGA, 2017.

Atualmente a área de cultivo no território gaúcho está dividida em seis regiões político-administrativas segundo o IRGA (Figura 2). Durante a safra de 2016/17 a região com maior produtividade de arroz foi a Zona Sul, com 8.460 kg ha⁻¹, seguida pela Fronteira Oeste e Campanha (IRGA, 2017). Grande parte destas áreas estão localizadas na região do Bioma Pampa, onde ocorreu a substituição da vegetação natural por monoculturas agrícolas e florestais (PILLAR et al., 2009).

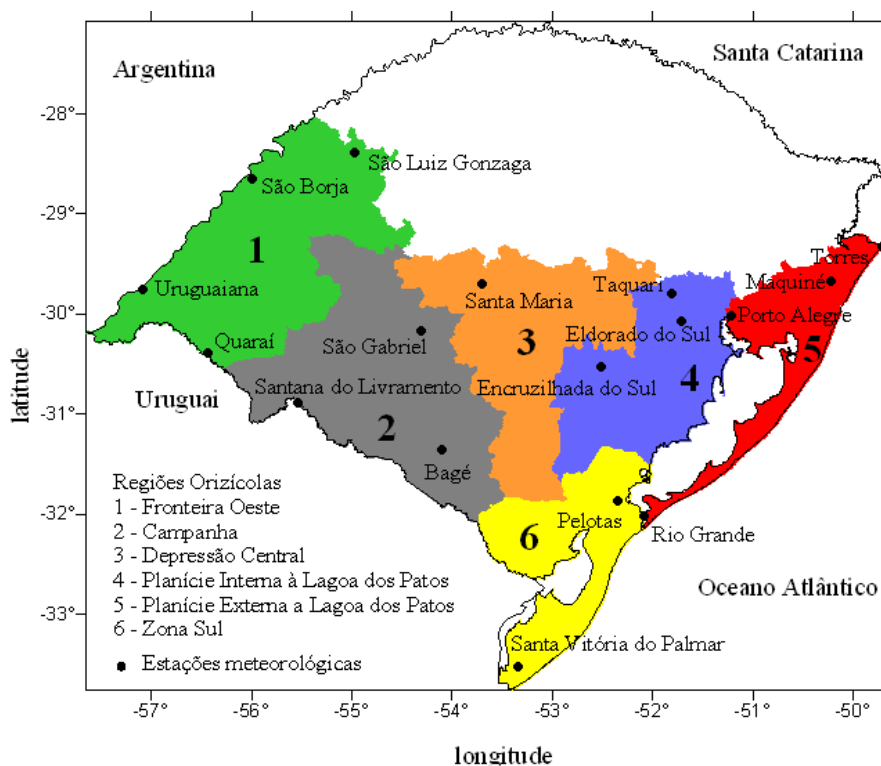


FIGURA 2. Mapa das regiões com cultura de arroz no Rio Grande do Sul.

Fonte: adaptado de KLERING (2012).

I.2.2 Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração (ET) é definida pela combinação de dois processos distintos: evaporação e transpiração. O processo de transpiração é definido como um fenômeno biofísico pelo qual a água que fez parte do metabolismo da planta é transferida para a atmosfera preferencialmente pelos estômatos (ALLEN et al., 1998). Durante o dia os estômatos permanecem abertos liberando vapor d'água para a atmosfera, exceto quando há ocorrência de estresse hídrico, que causa a não dissipação de energia aumentando o déficit de saturação.

O processo de evaporação é definido pela transferência d'água para a atmosfera sob a forma de vapor, a partir de superfícies com água livre, sendo influenciado pela energia externa, grau de saturação do ar circundante, velocidade do vento e disponibilidade de água. A mudança do estado físico da água líquida para gasosa necessita energia na forma de calor para que tal processo ocorra, que neste caso é o calor latente de evaporação λ , sendo obtido conforme CHOW; MAIDMENT; MAYS, (1988) através da equação abaixo:

$$\lambda = 2,501 - 0,00237 \times T \quad (1)$$

em que: T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); e λ o calor latente de evaporação MJ Kg^{-1} . Entre o intervalo de 10°C e 30°C de temperatura o calor latente de evaporação não sofre grande variação, podendo ser considerado constante em muitas aplicações, com valor igual a $2,45 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$ (PEREIRA; NOVA; SEDIYAMA, 1997). Além disso, a evaporação é um dos fatores importantes que determinam a efetividade da precipitação, especialmente em áreas áridas ou semi-áridas (DATTA, 1981).

A partir da fusão dos processos de transpiração e evaporação foram criados diversos termos a fim de caracterizar os diferentes tipos ETs, sendo os mais conhecidos: ET_0 (evapotranspiração de referência) é definida pelo processo em que a água é transferida para a atmosfera por uma superfície totalmente coberta com vegetação saudável com porte baixo e sem deficiência hídrica (ALLEN et al., 1998; PENMAN, 1948); ET_c (evapotranspiração da cultura) é definida pela quantidade de água que o cultivo necessita em qualquer fase de seu desenvolvimento e sem restrição hídrica (ALLEN et al., 1998); ET_r (evapotranspiração real) é definida pela perda de água da superfície para atmosfera para quaisquer cobertura vegetal e umidade do solo.

O processo de ET está ligado diretamente com o fluxo de calor latente (λET), que por sua vez, é um dos componentes chaves do balanço de energia na superfície. Portanto, a ET é governada pelas trocas de energia na superfície e limitada pela quantidade de energia disponível, sendo possível prevê-la através do princípio da conservação de energia (ALLEN et al., 1998). Desta forma, a energia que chega na superfície deve ser igual a energia perdida para um mesmo intervalo de tempo, podendo ser descrita como:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (2)$$

em que: R_n é o saldo de radiação; G é o fluxo de calor no solo; λET é o fluxo de calor latente; e H é o fluxo de calor sensível. O ciclo médio diurno das variáveis do balanço de energia é apresentado na Figura 3 para condições ideais de céu claro. Ambos os fluxos apresentam comportamento positivo durante o dia e negativo durante a noite, variando conforme a energia disponível que chega à superfície terrestre.

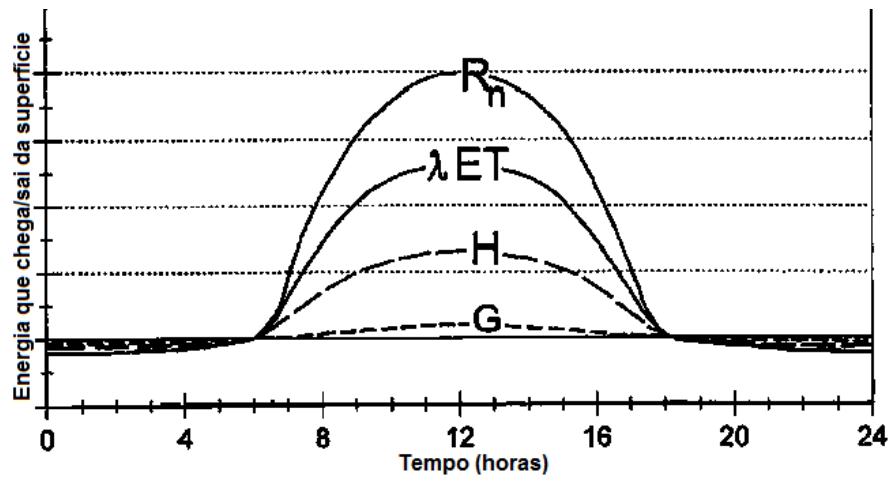


FIGURA 3. Variação diurna dos componentes do balanço para uma superfície bem irrigada transpirante com cobertura de céu limpo.

Fonte: adaptado de ALLEN et al., (1998).

I.2.3 Métodos para estimativa da Evapotranspiração

Atualmente existe uma grande variedade de métodos diretos e indiretos para a estimativa da ET. No entanto, a precisão e eficiência de cada método dependem da variação da cobertura vegetal, das condições climáticas e da localização espacial no globo. Através dessas variações, fez-se necessário a padronização de um método para a utilização da comunidade científica mundial, sendo escolhido o Penman-Monteith, por se tratar do método mais completo.

I.2.3.1 Método Penman-Monteith (PM)

Em 1948, Penman (PENMAN, 1948) combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície de água aberta a partir de registros climatológicos de radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento, denominado como método combinado. Este método foi desenvolvido por muitos pesquisadores e introduzido fatores de resistência superficial (ALLEN et al., 1998). A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é realizada através desta combinação,

sendo definida como a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com a altura entre 8 e 15 cm, com crescimento ativo e o solo completamente coberto sem déficit de água. A equação PM na sua forma original é descrita abaixo:

$$ET_{PM} = \left(\frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \right) \frac{1000}{\lambda \rho_w} \quad (3)$$

onde: ET_{PM} é a evapotranspiração (mm d^{-1}); Δ representa a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é o saldo de radiação diário (W m^{-2}); G é o fluxo de calor no solo (W m^{-2}); ρ_a é a densidade média do ar a pressão constante ($1,2 \text{ kg m}^{-3}$); c_p é o calor específico do ar a pressão constante ($1.013 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a descreve a pressão atual de vapor (kPa); γ é a constante Psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); r_s é a resistência superficial (s m^{-1}); r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}); λ calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}); ρ_w massa específica da água (kg m^{-3}).

A inclinação da curva de pressão de vapor é determinada através do gradiente de $\Delta = de_s/dT$, sendo obtida através da equação:

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{4.098 \cdot e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (5)$$

sendo: e_s a pressão de vapor de saturação (kPa); e T a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$).

A transferência de calor e de vapor d'água da superfície evaporante para o ar acima do dossel é definida como resistência aerodinâmica (r_a) (Figura 4), sendo determinada através da equação abaixo (ALLEN et al., 1998):

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{0m}} \right] \cdot \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{0h}} \right]}{k^2 \cdot u_z} \quad (5)$$

sendo: z_m altura da medida do vento (m); z_h altura da medida da umidade (m); d deslocamento do plano zero (m); z_{0m} comprimento de rugosidade da cultura para transporte de momento (m); z_{0h} comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível (m); k constante de Von Karman (0,41); u_z velocidade do vento na altura z (m.s⁻¹).

A resistência superficial (r_s) descreve o fluxo de vapor através da transpiração do cultivo e da superfície do solo evaporante (Figura 4) (ALLEN et al., 1998), sendo determinada através da equação abaixo:

$$r_s = \frac{r_l}{0,5 * IAF} \quad (6)$$

sendo: r_l é a resistência estomática da folha (s m⁻¹); IAF índice de área foliar (m² m⁻²). Maiores detalhes sobre as resistências aerodinâmica e superficial são descritas por ALLEN et al., (1998).

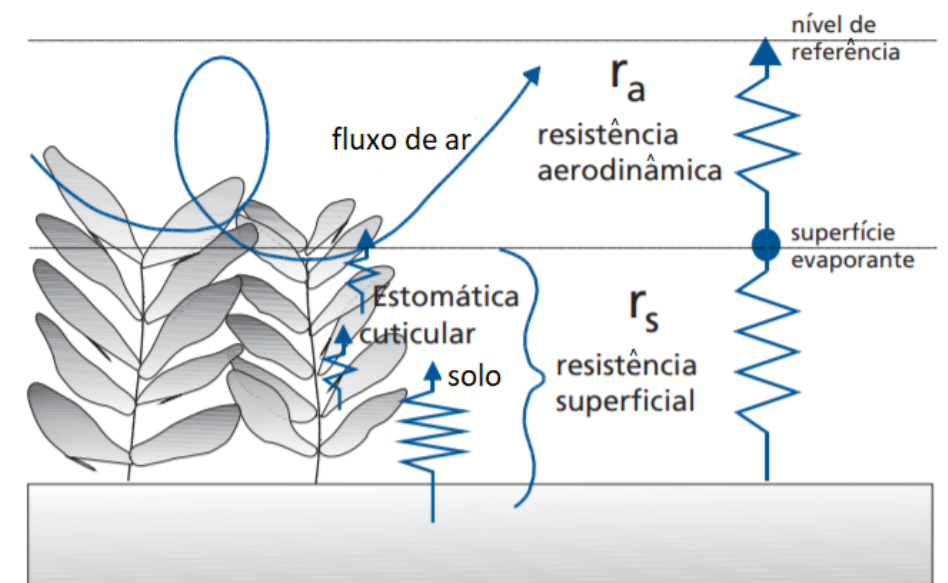


Figura 4. Representação simplificada da resistência superficial e da resistência aerodinâmica com o fluxo de vapor d'água.

Fonte: adaptado de ALLEN et al., (1998).

I.2.3.2 Método Priestley-Taylor (PT)

O Método PT é uma simplificação da equação Penman-Monteith (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972), levando em conta somente parâmetros meteorológicos como a temperatura do ar e saldo de radiação. No entanto, este método necessita de calibração no parâmetro ambiental α , que varia em função das variáveis ambientais (NICHOLS et al., 2004). A equação deste método para o cálculo do fluxo de calor latente segue abaixo:

$$\lambda ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (7)$$

onde: α é o parâmetro de Priestley-Taylor (unidimensional); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) obtido através da equação 5; γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a densidade de fluxo de radiação líquida na superfície da cultura (W m^{-2}); e G é o fluxo de calor no solo (W m^{-2}).

Após determinar λET , para encontrarmos os valores de ET é necessário utilizar a equação abaixo:

$$ET = 10^{-9} \left(\frac{\lambda ET}{\rho_a \lambda} \right) \quad (8)$$

onde: λET é em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, λ é o calor latente de vaporização ($2,45 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$) e ρ_a é a densidade do ar ($998,21 \text{ Kg m}^{-3}$) para temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. ET na equação (8) é obtida em mm d^{-1} .

I.2.3.3 Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos

O fluxo é definido como a transferência de uma quantidade por unidade de área pelo tempo, estando relacionado com massa, calor, mistura, momentum e fluxos poluentes (STULL, 1988). O método da covariância dos vórtices foi proposto por Swinbank em 1951,

onde podemos determinar os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e latente (λET) através das equações abaixo (ARYA; HOLTON, 2001):

$$H = \rho_a C_p \overline{\omega' T'} \quad (9)$$

$$\lambda ET = \rho_a \overline{\omega' q'} \quad (10)$$

em que: ρ_a densidade do ar; C_p é o calor específico do ar à pressão constante; ω' flutuações da velocidade vertical do vento; T' expressa o desvio em relação à média da temperatura do ar (K); q' é o desvio em relação à média da umidade específica do ar (kg kg^{-1}). Após obtido o λET , a equação 8 é utilizada para obtenção da ET diária sobre a superfície de interesse.

Embora não seja um método direto, a técnica de covariância dos vórtices turbulentos tem sido bastante utilizada para a estimativa da ETr , inclusive em áreas agrícolas (SINGER et al., 2010; SUYKER; VERMA, 2009). A aplicação deste método é bastante complexa, pois exige sensores com grande precisão e com resposta imediata. Sendo assim, capazes de detectar a passagem de vórtices com diferentes tamanhos.

I.2.4 Característica da Evapotranspiração sobre áreas agrícolas

O processo de ET está relacionado diretamente com as características fisiológicas das plantas, aspectos ambientais e práticas de cultivo. Determinar as taxas de ET para diferentes coberturas vegetais é um fator importante, visto que, cada vegetação apresenta diferença na quantidade de vapor d'água liberado para a atmosfera. A transpiração é responsável pela diferença nas taxas de ET de cada cultivo, através da perda de água da planta para a atmosfera (ALLEN et al., 1998) (Figura 5).

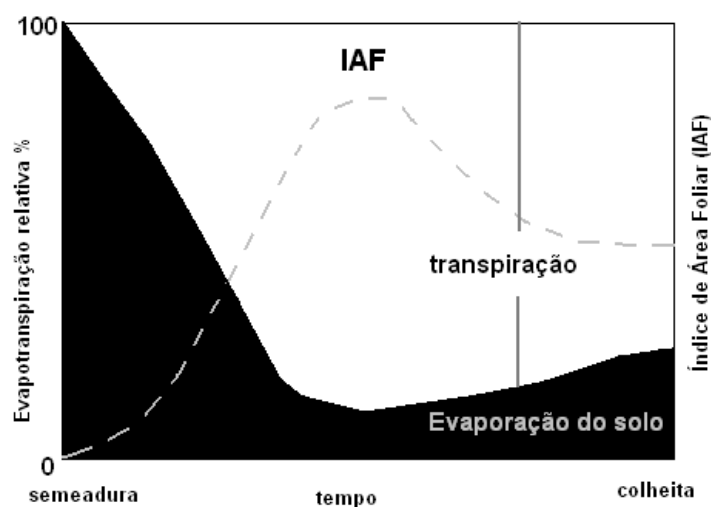


FIGURA 5. Relação entre evapotranspiração relativa com o desenvolvimento da planta.

Fonte: Adaptado de ALLEN et al., (1998).

Diversos trabalhos têm estudado as taxas de ET para culturas agrícolas. SEUNG-HWAN et al. (2013), descrevem o impacto das mudanças no clima em oito distritos com sistema de irrigação para a agricultura, mencionando a importância da ET no consumo de água. LI et al. (2009), usando dados de *Eddy Covariance* em áreas agrícolas irrigadas em Wuwai – China, encontraram valores de ET que variam entre 0,5 e 6 mm d⁻¹ para uma região de clima típico continental temperado, onde a média da precipitação anual é de 164 mm. ALBERTO et al. (2011), descreveram a ET sobre o arroz nas Filipinas, encontrando valor máximo de 7 e 6 mm d⁻¹ para o cultivo irrigado durante as estações seca e chuvosa, respectivamente. Ainda segundo os autores, os valores médios da ET variam entre 400 a 556 mm durante a fase de arroz. TIMM et al. (2014), encontraram valores de ET integrados para o período do cultivo de arroz irrigado igual a 562 mm de água durante o desenvolvimento da cultura. RIVAS; CARMONA (2013), estimaram a ET para uma área de cultivo de soja e pastagem na Região do Pampa Argentino, onde tem regime de precipitação e evapotranspiração médio anual igual a 950 e 1015 mm. Os autores estimaram o saldo de radiação através do modelo proposto por SEGUIN; ITIER (1983), utilizando imagens de satélite, onde encontraram valores de fluxo de calor latente menores para a pastagem (menor taxa de ET) em relação à soja (maior taxa de ET).

Atualmente apesar do avanço das técnicas de *Eddy Covariance*, a taxa de ET em áreas de arroz irrigado apresenta mundialmente um modesto número de estudos

(BALDOCCHI et al., 2016). Poucas pesquisas têm relatado a variação anual e interanual da ET sobre o arroz utilizando torres de fluxos, e a importância do consumo de energia para o seu desenvolvimento (ALBERTO et al., 2011; BALDOCCHI et al., 2016; HATALA et al., 2012; TIMM et al., 2014). Desta forma, ressalta-se a importância em avaliar e quantificar essas mudanças nas taxas de ET a pequeno e longo prazo, sendo um fator importante para monitorar possíveis alterações no microclima local, bem como o gerenciamento e uso inteligente da água e produção de grãos.

I.2.5 Dados de Sensoriamento Remoto: Sensor MODIS

O sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) é o principal instrumento dos satélites Terra e Aqua. O satélite Terra foi o primeiro do programa EOS (*Earth Observing System*), lançado em 18 de dezembro de 1999, levando a bordo o sensor MODIS e mais quatro instrumentos, disponibilizando dados a partir de 2000. Já o satélite Aqua foi lançado em 04 de maio de 2002, estando equipado com o sensor MODIS e mais cinco instrumentos, e disponibilizando dados a partir deste mesmo ano. A órbita de ambos os satélites é quase-polar com inclinação de 98°, e heliossíncrona com passagem pelo Equador às 10:30 h e 13:30 h, para o satélite Terra e Aqua, respectivamente (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007).

O MODIS foi projetado para fornecer uma série de observações globais nas regiões do visível (VIS) e do infravermelho (IV) do espectro eletromagnético. Possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais que variam no comprimento de onda de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007), conforme Tabela 1.

A partir desta grande quantidade de bandas foram desenvolvidos e disponibilizados gratuitamente diversos produtos comunidade científica. As imagens já são fornecidas com correções de efeitos atmosféricos e georreferenciadas. Os produtos estão distribuídos em diferentes classes, tais como: Atmosfera, Superfície, Criosfera e Oceano, abrangendo diversas áreas de estudo. O produto utilizado neste trabalho refere-se à superfície MOD16.

TABELA 1. Especificações do espectrorradiômetro do MODIS para as Bandas 1 a 36. Fonte: RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, (2007)

Uso Principal	Banda	Largura de Banda (nm)	Radiância espectral
Terra/Nuvens/ Aerossóis limite	1	620-670	21,8
	2	841-875	24,7
Terra/Nuvens/ Aerossóis Propriedades	3	459-479	35,3
	4	545-565	29,0
	5	1230-1250	5,4
	6	1628-1652	7,3
	7	2105-2155	1,0
Cor dos oceanos/ Fitoplâncton/ Biogeoquímica	8	405-420	44,9
	9	438-448	41,9
	10	483-493	32,1
	11	526-536	27,9
	12	546-556	21,0
	13	662-672	9,5
	14	673-683	8,7
	15	743-753	10,2
Vapor d'água atmosférico	16	862-877	6,2
	17	890-920	10,0
	18	931-941	3,6
Temperatura superfície/nuvens	19	915-965	15,0
	20	3660-3840	0,45 (300K)
	21	3929-3989	2,38 (335K)
	22	3929-3989	0,67 (300K)
Temperatura atmosférica	23	4020-4080	0,79 (300K)
	24	4433-4498	0,17 (250K)
Vapor d'água de nuvens Cirrus	25	4482-4549	0,59 (275K)
	26	1360-1390	6,00
Vapor d'água de nuvens Cirrus	27	6535-6895	1,16 (240K)
	28	7175-7475	2,18 (250K)
Propriedade de nuvens	29	8400-8700	9,58 (300K)
Ozônio	30	9580-9880	3,69 (250K)
Temperatura superfície/nuvens	31	10780-11280	9,55 (300K)
	32	11770-12270	8,94 (300K)
Altitude de topo de nuvens	33	13185-13485	4,52 (260K)
	34	13485-13785	3,76 (250K)
	35	13785-14085	3,11 (240K)
	36	14085-14385	2,08 (220K)

I.2.6. Técnicas de Sensoriamento Remoto no auxílio do estudo de áreas agrícolas

O monitoramento de áreas agrícolas vem utilizando cada vez mais técnicas de sensoriamento remoto para quantificar a área cultivada, produção agrícola, manejo de cultura, gerenciamento inteligente de recursos, efeitos causados no clima, entre outros. Atualmente existem diversos sensores remotos que auxiliam no estudo de atividades agrícolas, cada um com suas determinadas características explorando o comportamento espectral dos alvos (D'ARCO, 2007).

O monitoramento da área cultivada no Brasil começou a partir dos anos 70 com a utilização de dados do satélite Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*), devido à facilidade na obtenção do dado remoto e baixo custo a comunidade científica (MENGUE, 2013; WEBER et al., 2005). O lançamento dos satélites da série CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) auxiliou no desenvolvimento da pesquisa e grande avanço sobre os estudos das áreas agrícolas e também em florestas no Brasil (MENGUE, 2013).

O lançamento dos satélites Terra e Aqua durante o começo dos anos 2000, disponibilizou a comunidade científica imagens provenientes do sensor MODIS com moderada resolução espacial e alta resolução temporal em relação as series Landsat e CBERS. Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando dados de Índices de Vegetação (IVs) provenientes do MODIS para estudos agrícolas (ALLEN et al., 2011; D'ARCO, 2007; KLERING, 2012; RIZZI, 2005; SANTOS, 2009; SHIHUA et al., 2014; STULL, 1988, entre outros).

Alguns trabalhos foram desenvolvidos sobre cultivo de arroz irrigado do Rio Grande do Sul utilizando o sensor MODIS. D'ARCO (2007), realizou um estudo para mapear e estimar as áreas de arroz irrigado em escala municipal e estadual no Rio Grande do Sul utilizando dados de sensoriamento remoto. Os resultados mostraram que a classificação digital o CEI (*Crop Enhancement Index*) foi a que apresentou os melhores valores subestimando em 21,7% a área de arroz. O autor ainda comenta que devido à grande quantidade de pequenas lavouras de cultivo de arroz e com a resolução média das imagens MODIS, a estimativa das áreas cultivadas não foi precisa.

KLERING (2012), utilizou dados de sensoriamento remoto MODIS para mapeamento das áreas de cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul e monitorar o cultivo ao longo de 10 safras. Os resultados encontrados mostraram que a metodologia de classificação digital

supervisionada utilizada na pesquisa foi eficiente e pode ser usada no monitoramento das áreas cultivadas no Rio Grande do Sul.

O aprimoramento em quantificar as áreas de arroz irrigado vem sendo explorado cada vez mais sobre diversas partes do globo. Conforme TELUGUNTLA et al. (2015), os mapas precisos de arroz inundado são importantes insumos para melhores estimativas da evapotranspiração real no cenário agrícola. Ainda conforme os autores, as imagens do MODIS podem fornecer uma extensão robusta das áreas de arroz inundado sobre uma grande bacia hidrográfica em relação a uma análise plurianual.

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para o monitoramento da evapotranspiração em cultivos agrícolas. Conforme BIGGS et al. (2015), na escala de projetos de irrigação, mapas de ET podem ajudar no planejamento de irrigação e na avaliação da demanda d'água. O estudo da variabilidade da ET nestas áreas ajuda a entender como o sistema de produção de alimentos responde às mudanças climáticas globais. Conforme FISHER et al. (2017), as aplicações de ET têm avançado significativamente em uma ampla gama de campos nas últimas décadas; ainda assim, questões críticas de pesquisa e ciência baseadas na ET continuam em escalas locais a globais devido à deficiência nas capacidades observacionais. Ainda segundo os autores, nenhuma missão espacial existente ou planejada foi especificada para satisfazer plenamente os requisitos espaciais, temporais, espectrais e de precisão delineados para aplicações completas baseadas em ET (FISHER et al., 2017).

Apesar da deficiência de dados remotos específicos desenvolvidos para aplicações de ET, a integração efetiva do SIG (Sistema de Informação Geográfica) com técnicas de sensoriamento melhora a avaliação de desempenho e as capacidades de análise de diagnóstico em diversas áreas de aplicação de áreas agrícolas (THIRUVENGADACHARI; SAKTHIVADIVEL, 1997). Salienta-se dessa forma a importância do monitoramento das áreas agrícolas a cada safra voltados não somente para a produção da cultura, mas também para o acompanhamento fenológicos, bem como gerenciamento e uso inteligente da água.

I.3. MATERIAIS E MÉTODOS

I.3.1 Sítios experimentais de Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul-RS

A rede SULFLUX (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) consiste de um conjunto de torres micrometeorológicas, instrumentadas com sensores padrões, efetuando medidas a uma alta frequência amostral em importantes ecossistemas do Sul do Brasil. As observações, obtidas através das estações, fornecem dados de alta qualidade para inicializarem e validarem modelos numéricos, de clima e superfície para a região sul do país.

Atualmente a SULFLUX (www.ufsm.br/sulflux) possui dados de quatro torres micrometeorológicas instaladas sob diversas áreas do estado, e de outras duas localidades no qual foram monitoradas anteriormente (Figura 6). Neste trabalho, utilizaremos as torres micrometeorológicas instaladas em áreas de arroz irrigado por inundação nos municípios de Paraíso do Sul (PS) e Cachoeira do Sul (CS) (Figura 7). A área experimental de Paraíso do Sul tem aproximadamente 50 hectares (ha) destinados a orizicultura (29° 44' 39.6'' S; 53° 8' 59.8'' W, 108 m), com coleta de dados de fluxo durante o período de junho de 2003 até junho de 2004. O sítio experimental de Cachoeira do Sul (29° 44' 39.6'' S; 53° 8' 59.8'' W, 108 m) tem aproximadamente 1000 ha com cultivo de arroz irrigado, possuindo uma torre de fluxo desde outubro de 2010 até o presente, apresentando um diferencial, o sensor de metano (LI-7700, Li-Cor Inc. Lincoln, NE, USA), segundo equipamento a ser adquirido no Brasil. Ainda existem poucos estudos sendo realizados no mundo com este sensor, principalmente sobre cultivos de arroz irrigado.

Entre as safras os sítios experimentais permanecem sem qualquer tipo de cultura, restando apenas a palha seca do arroz e o crescimento de gramíneas silvestres, como por exemplo, *Heterenthera reniformis*, *Echinochloa crusgalli*, *Brachiaria plantaginea*, *Digitaria* sp., e *Luziola peruviana*.

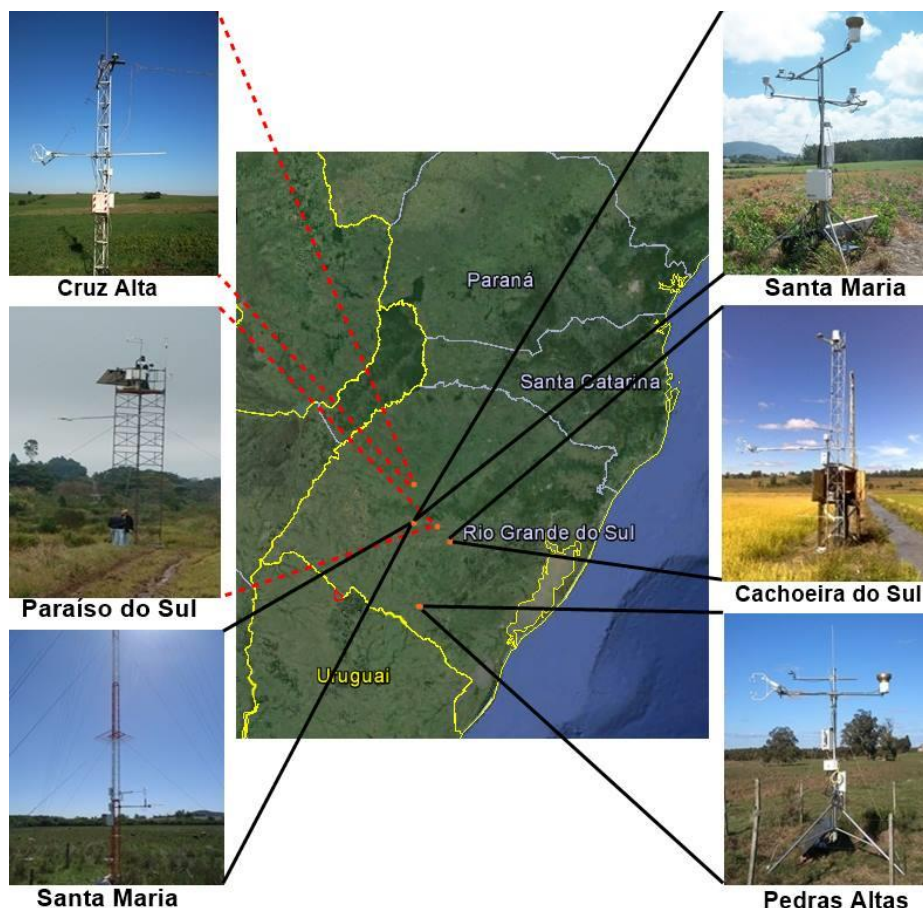


FIGURA 6: Localização dos sítios experimentais da Rede SULFLUX. Os locais com linha em vermelho as estações micrometeorológicas encontram-se desativadas.

O sítio experimental de PS possuía uma torre micrometeorológica medindo variáveis atmosféricas e fluxos superficiais. As variáveis de temperatura, velocidade do vento, umidade relativa foram medidas em alta frequência (16-Hz) para computar os fluxos verticais obtidos a partir da covariância dos vórtices turbulentos. A torre de PS estava equipada com os seguintes sensores: anemômetro sônico 3D (10 m, CSAT3; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah) para medir as componentes do vento, analisador de gás aberto (10 m, LI-7500; LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) medindo a concentração de H₂O. Para as variáveis de temperatura e umidade relativa (10 m, HMP45C-L; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), precipitação (10 m, TB4 Rain Gauge; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), saldo de radiação (8 m, NR LITE; Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands), radiação global (8 m; Kipp & Zonen- CM6B Pyranometer) e temperatura do solo (-0.02, 0.05, 0.10, 0.20 e 0.50 m; STP01 Hukseflux Thermal Sensors). Maiores detalhes estão descritos em Timm et al. (2014) e Acevedo et al. (2006, 2009).



(a)



(b)

FIGURA 7: Sítio experimental do Projeto SULFLUX. (a) Cultivo de arroz irrigado em Cachoeira do Sul; (b) Torres Micrometeorológicas.

O sítio experimental de CS está equipado com uma torre micrometeorológica, disponibilizando dados de fluxo em alta frequência. As componentes do vento, temperatura do ar e umidade relativa foram obtidas através do anemômetro sônico 3D (3m; CSAT3;

Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), a concentração de H₂O é determinada através de um analisador de gás aberto (3 m, LI-7500; LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) com medidas de alta frequência em 10 Hz. Os sensores de baixa frequência utilizados para determinar as variáveis ambientais foram: precipitação (6 m, Campbell Scientific - CSI Model TB4 Raingage), saldo de radiação (3,4 m; Kipp & Zonen NR LITE) e radiação global (6 m; Kipp & Zonen - CMB6).

I.3.2 Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet)

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) é o órgão responsável pela coleta e informações meteorológicas no Brasil, representando o país junto à Organização Meteorológica Mundial (OMM), disponibilizando dados à comunidade científica. O INMet tem como função o monitoramento, análise e previsão do tempo para todo o país, sendo fundamental no avanço de pesquisas relacionadas ao tempo e clima. Além disso, é o maior instituto com rede de monitoramento da América do Sul, possuindo uma grande quantidade de estações meteorológicas automáticas espalhadas por todo o território brasileiro, medindo as seguintes variáveis: temperatura do ar, umidade relativa, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras. Os dados coletados através dessas estações são disponibilizados de forma gratuita a sociedade quase que em tempo real, através da página <<http://www.inmet.gov.br>>.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados obtidas da estação meteorológica do INMet (OMM-86977) localizada em Santa Maria – RS (distante aproximadamente 60 km de PS e 83 km de CS, ambos em linha reta). Esses dados foram utilizados para preenchimento de falha nas variáveis ambientais faltantes na torre experimental de PS e CS. Para descrição da climatologia da região foram utilizados dados da normal climatológica do município de CS, pois não há registro para PS.

I.3.3 Produto MOD16: Produto Global de Evapotranspiração

Monitorar a taxa de Evapotranspiração em grandes áreas do globo é um fator limitante, visto a dificuldade na obtenção de dados. Diversas técnicas utilizando o uso de imagens remotas foram desenvolvidas, a fim de preencher este problema. O Produto MOD16 foi criado com o objetivo de monitorar a taxa de vapor d'água perdida pela superfície. Este produto foi desenvolvido por MU et al., (2007), adaptando o algoritmo de CLEUGH et al., (2007), desenvolvido e testado na Austrália para o globo, estando baseado no método Penman-Monteith eq. (1) onde são calculados a condutância do dossel e a ET, a partir da equação:

$$\lambda ET = \frac{sA + \rho_a C_p (e_{sat} - e) / r_a}{s + \gamma \left(1 + \left(\frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \quad (11)$$

onde λET é o fluxo de calor latente (W m^{-2}), λ é o calor latente de vaporização (J Kg^{-1}), $s = d(e_{sat})/dT$ inclinação da curva de pressão de vapor (Pa K^{-1}), e_{sat} é dado em (Pa), A é a partição da energia disponível entre o fluxo de calor sensível, latente e no solo para a superfície (W m^{-2}), ρ_a densidade do ar (Kg m^{-3}), C_p calor específico do ar a pressão constante ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), r_a resistência aerodinâmica (s m^{-1}).

A versão antiga do ET-MODIS (MU et al., 2007) levava em consideração somente a soma da Evaporação de solo úmido e a transpiração da vegetação para o período diurno. As melhorias no algoritmo de ET-MODIS resultaram na adição da fração da cobertura vegetal, condutância estomática, condutância aerodinâmica, como também, incluído o período diurno e noturno na estimativa da ET, além da estimativa do fluxo de calor no solo quando ocorre a partição da energia (MU; ZHAO; RUNNING, 2011; RUHOFF et al., 2013) (Figura 8).

Os dados de entrada para gerar o Produto MOD16 são baseados nos dados de sensoriamento remoto: MOD12Q1 (Land Cover classification/Land Cover Change), MOD15A2 (Leaf are Index, Fraction of Photosynthetically Active Radiation) e MCD43B2/B3 (Albedo), com resolução entre 500 a 1000 metros. Os dados meteorológicos de temperatura do ar (mínima, máxima e média), pressão de vapor e radiação global são utilizados do modelo *Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications from the Global Modelling and Assimilation Office* (MERRA GMAO) com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,6^\circ$ (MU; ZHAO;

RUNNING, 2013). O Produto final MOD16 disponibiliza dados de λET , ET Potencial e real para o intervalo de 8 dias, mensal e anual, com resolução espacial de 1 km, disponível em <http://ntsg.umd.edu/>.

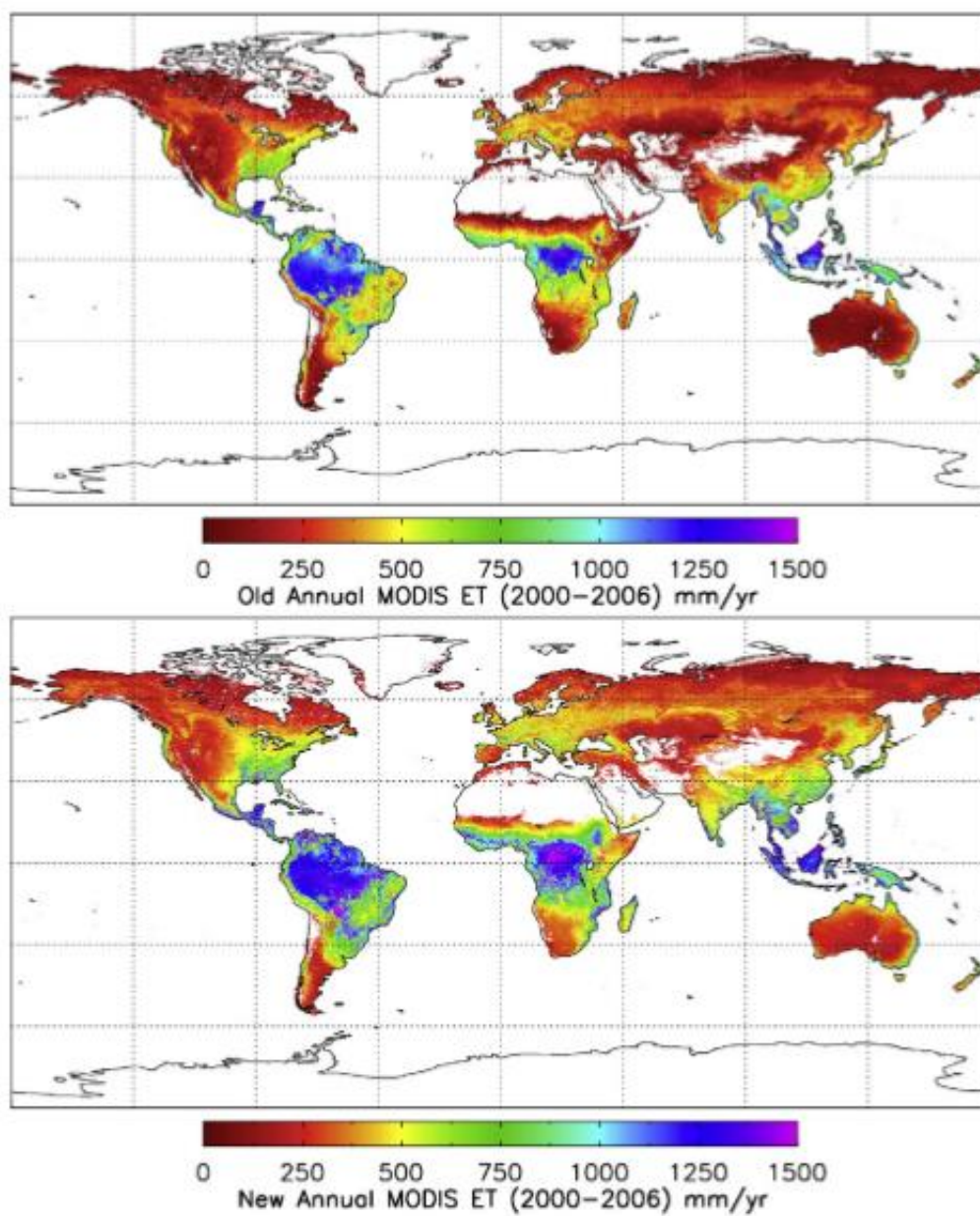


FIGURA 8: Dados do produto MOD16 de evapotranspiração global para o período de 2000 a 2006, primeira versão (acima) e melhorias do produto ET-MODIS (abaixo).

Fonte: MU; ZHAO; RUNNING, 2011.

I.3.4 Metodologia empregada

Este trabalho utilizou dados de fluxos coletados em dois sítios experimentais localizados em áreas de cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, que fazem parte da rede SULFLUX. Para ambos os sítios experimentais, os dados brutos são coletados por um Sistema *Eddy Covariance* e processados pelo software EddyPro (EddyPro®, V 5.1.1 – Li-Cor, Lincon, Nebraska, USA). Para o cálculo e correção dos fluxos de energia e massa foi utilizada uma configuração padrão do software: o cálculo das flutuações turbulentas em média móvel (MONCRIEFF et al., 2004), rotação dupla (WILCZAK; ONCLEY; STAGE, 2001), correção para os efeitos de densidade (WEBB; PEARMAN; LEUNING, 1980) e correção do ângulo de ataque para as componentes do vento (NAKAI et al., 2006). A correção de atenuações de fluxo devido à configuração instrumental (GASH; CULF, 1996). Testes de controle de qualidade dos fluxos (FOKEN et al., 2004), e correções de filtro passa alta e baixa seguiram a metodologia de MONCRIEFF et al., (2004) e MONCRIEFF et al., (1997), respectivamente. Este procedimento com os dados observados foi desenvolvido junto ao Laboratório de Micrometeorologia (LμMet) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Após o processamento de dados foi realizada a filtragem de λET e H a fim de eliminar possíveis valores espúrios. Para λET foram consideradas as medidas entre $-50 \text{ W m}^{-2} > \lambda ET > 650 \text{ W m}^{-2}$, enquanto que para H o intervalo foi de $-70 \text{ W m}^{-2} > H > 300 \text{ W m}^{-2}$. Durante o período noturno, ou seja, valores de radiação solar global ($R_g \leq 0$), foram desconsiderados valores de $\lambda ET > 100 \text{ W m}^{-2}$. Além disso, para os horários com ocorrência de precipitação foram excluídos os valores de λET e H . Estas filtrações nos dados e incluindo os dias de mal funcionamento dos equipamentos resultaram em grandes falhas nos fluxos.

As variáveis ambientais (temperatura do ar, radiação global e umidade relativa) quando apresentavam falhas de medidas, foram preenchidas primeiramente através de uma interpolação linear simples para intervalos menores que 3 horas. Falhas superiores a este intervalo, foi utilizado uma regressão linear simples entre os dados da torre de fluxo com a estação automática do INMet de Santa Maria, ajustando as medidas e preenchendo os horários faltantes (metodologia realizada para Cachoeira do Sul que apresentou falhas superiores a 3 horas).

O preenchimento final dos dados faltantes dos fluxos superficiais, foi realizado através do pacote *REddyProc* disponível para a versão do software RStudio, utilizando os seguintes

parâmetros: temperatura do ar, radiação global, umidade relativa, fluxo de calor sensível e latente. Este pacote foi desenvolvido através dos métodos propostos por REICHSTEIN et al., (2005).

Diversos trabalhos apontam que os fluxos de energia H somado ao λET é menor quando comparado a $(R_n - G)$, chegando a uma diferença em torno de 10 a 30%, necessitando ajuste nos valores de H e λET (ALBERTO et al., 2011; TWINE et al., 2000; WILSON, 2002). Desta forma, este trabalho realizou o fechamento do balanço de energia utilizando a técnica da razão de Bowen (FOKEN, 2008), definido como:

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET} \quad (12)$$

A energia residual disponível (RAE) foi distribuída entre H e λET através das equações:

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (13)$$

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (14)$$

em que: β a razão de Bowen, R_n o saldo de radiação ($W m^{-2}$), G o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$).

Após o ajuste nos fluxos superficiais foram realizadas análises nos dados observados a partir das Torres de Fluxos, visando validar o modelo PT (seção I.2.3.2) e MOD16 (seção I.3.3) para as áreas de arroz irrigado, extrapolando os resultados obtidos de maneira pontual nos sistemas de *Eddy Covariance*. O método PT utiliza informações *in situ* para a estimativa de ET, sendo testado e validado neste trabalho sobre as áreas de controle. Simplificações na equação de PT, quanto ao cálculo da energia disponível foram propostas. Além disso, foi determinado valores do parâmetro α para a estimativa da ET para o arroz.

O modelo MOD16 proveniente de técnicas remotas também foi analisado a fim de avaliar a acurácia e sensibilidade do algoritmo MOD16 para estimativa da ET em áreas de arroz irrigado por alagamento no Sul do Brasil. Duas formas de extrair as medidas ET MOD16 foram testadas: o pixel central e a área 3 x 3 km. Estes dois tipos de análise do dado remoto foram empregados devido a diversas metodologias utilizadas na literatura. Por fim, os

resultados obtidos nesta pesquisa vêm a auxiliar no monitoramento e gerenciamento de recursos hídricos, bem como monitorar o desenvolvimento da planta e previsão de rendimento de safra da cultura.

I.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ANA), A. N. DE Á. **LEVANTAMENTO DA AGRICULTURA IRRIGADA POR PIVÔS CENTRAIS NO BRASIL - 2014.**

ALBERTO, M. C. R. et al. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1417–1430, 2011.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.** Rome: 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>>.

ALLEN, R. G. et al. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395–406, 2007.

ALLEN, R. et al. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4011–4027, 2011.

ARASTEH, P. D.; TAJRISHY, M. Calibrating Priestley-Taylor Model to Estimate Open Water Evaporation under Regional Advection Using Volume Balance Method-Case Study: Chahnimeh Reservoir, Iran. **Journal of Applied Sciences**, v. 22, p. 4097–4104, 2008.

ARYA, S. P.; HOLTON, J. **Introduction to Micrometeorology.** 2nd. ed. San Diego – California: 2001.

BALDOCCHI, D. et al. The impact of expanding flooded land area on the annual evaporation of rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 223, p. 181–193, 2016.

BIGGS, T. et al. Remote Sensing of Evapotranspiration from Croplands. n. November, 2015.

CARRILLO-ROJAS, G. et al. Dynamic mapping of evapotranspiration using an energy balance-based model over an andean Páramo catchment of southern Ecuador. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, 2016.

CASTELLVI, F. et al. Comparison of methods for applying the Priestley-Taylor equation at a regional scale. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 9, p. 1609–1620, 2001.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology.** United States

of America: 1998.

CLEUGH, H. A. et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 3, p. 285–304, 2007.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira - Grãos Safra 2016/17. **Monitoramento agrícola- Safra 2017**, v. 4, n. 1, p. 1–98, 2017.

D'ARCO, E. Uso De Geotecnologias Para Estimativa Da Area Plantada De Arroz Irrigado No Estado Do Rio Grande Do Sul. p. 206, 2007.

DATTA, S. K. DE. **Principles and Practices of Rice Production**. Los Baños, Philippines: IRRI, 1981.

EMATER/RS. Área Técnica Arroz Irrigado. p. 1–2, 2017.

FANG, Y. et al. Monthly land cover-specific evapotranspiration models derived from global eddy flux measurements and remote sensing data. **Ecohydrology**, v. 9, n. 2, p. 248–266, 2016.

FISHER, J. B. et al. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resources Research**, p. 2618–2626, 2017.

FOKEN, T. et al. Post-field quality control, in Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurements, **Dordrecht: Kluwer Academic**, p. 81-108, 2004.

FOKEN, T. The energy balance closure problem: An overview. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1351–1367, 2008.

GASH, J. H. C.; CULF, A. D. Applying a linear detrend to Eddy Correlation data in real time. n. 1984, p. 301–306, 1996.

GAVIN, H.; AGNEW, C. A. Modelling actual, reference and equilibrium evaporation from a temperate wet grassland. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 2, p. 229–246, 2004.

HATALA, J. A. et al. Greenhouse gas (CO₂, CH₄, H₂O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento-San Joaquin Delta. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 150, p. 1–18, 2012.

HU, G.; JIA, L.; MENENTI, M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 510–526, 2015.

IBGE, I. B. DE G. E. E. Levantamento Sistemático Da Produção Agrícola. p. 115, 2017.

- IRGA, I. R. G. DE A. Evolução da Colheita - Safra 2016/17. p. 7–8, 2017.
- JANG, K. et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, n. 23, p. 12927–12940, 2013.
- KIM, H. W. et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 229–238, 2012.
- KLERING, E. V. Mapeamento da área cultivada e estimativa do rendimento de grãos de arroz irrigado a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais para o Rio Grande do Sul. **Porto Alegre: UFRGS, 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.**
- KUSTAS, W. P.; STANNARD, D. I.; ALLWINE, K. J. Variability in surface energy flux partitioning during Washita '92: Resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 171–193, 1996.
- LI, S. et al. Variability in energy partitioning and resistance parameters for a vineyard in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 6, p. 955–962, 2009.
- LIU, Y. A.; KAR, S. K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-a review. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 2821–2849, 2014.
- MENGUE, V. P. Avaliação da Dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento da soja e arroz irrigado no Rio Grande do Sul. p. 112, 2013.
- MONCRIEFF, J. B. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v. 188–189, p. 589–611, fev. 1997.
- MONCRIEFF, J. et al. Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. In: **Handbook of Micrometeorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 7–31, 2004.
- MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519–536, dez. 2007.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, 2011.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration

(ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Algorithm Theoretical Basis Document Collection 5. **NASA Headquarters**, p. 1–66, 2013.

NAKAI, T. et al. Correction of sonic anemometer angle of attack errors. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 136, n. 1–2, p. 19–30, 2006.

NICHOLS, J. et al. Comparison of evaporation estimation methods for a riparian area. **IIHR Technical Report**, v. 436, n. 436, 2004.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. A193, p. 120–146, 1948.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: 2002.

PILLAR et al. **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**, 2009.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.

RAMOELO, A. et al. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. **Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 7406–7423, 2014.

REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, 2005.

RIVAS, R. E.; CARMONA, F. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 55–57, p. 27–34, 2013.

RIZZI, R. Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: Estudo de Caso no Rio Grande do Sul. p. 216, 2005.

ROSEGRANT, M. W.; CAI, X. Global Water Demand and Supply Projections. **Water International**, v. 27, n. 2, p. 170–182, 2002.

RUDORFF, T. F. B.; SHIMABUKURO, E. Y.; CEBALLOS, C. J. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP: 2007.

RUHOFF, A. L. et al. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 703–725, 2012.

RUHOFF, A. L. et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1658–1676, 2013.

SANTOS, T. V. Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do jacuí por meio de imagens orbitais. p. 85, 2009.

SEGUIN, B.; ITIER, B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 371–383, 1983.

SEUNG-HWAN, Y. et al. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. **Agricultural Water Management**, v. 117, p. 43–54, 2013.

SHIHUA, L. et al. Monitoring paddy rice phenology using time series MODIS data over Jiangxi Province, China. v. 7, n. 6, p. 28–36, 2014.

SINGER, J. W. et al. Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 1, p. 157–163, 2010.

SOSBAI. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. **XX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**, p. 192, 2014.

SOSBAI, S. S.-B. DE A. I. A. IRRIGADO. Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. p. 161, 2007.

STULL, R. . **An introduction to Boundary Layer Meteorology**, 1998.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, p. 443–452, 2009.

TELUGUNTLA, P. et al. Mapping Flooded Rice Paddies Using Time Series of MODIS Imagery in the Krishna River Basin, India. **Remote Sensing**, v. 7, n. 7, p. 8858–8882, 2015.

THIRUVENGADACHARI, S.; SAKTHIVADIVEL, R. Satellite Remote Sensing for Assessment of Irrigation System Performance: A Case Study in India. Colombo, Sri Lanka: **International Irrigation Management Institute (IIMI)**, 1997.

TIMM, A. U. et al. Energy Partitioning and Evapotranspiration over a Rice Paddy in Southern Brazil. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 5, p. 1975–1988, 2014.

TWINE, T. E. et al. Correcting eddy covariance flux underestimates over grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 279–300, 2000.

VELPURI, N. M. et al. A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: Using point and gridded FLUXNET and water balance ET. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 35–49, 2013.

WALTER, L. C. et al. Mudanças climáticas e seus efeitos no rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 12, p. 915–924, 2014.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 447, p. 85–100, jan. 1980.

WEBER, E. et al. Comparação entre resultados de classificação de imagens Landsat e CBERS para estimativa de área cultivada com soja no planalto do Rio Grande do Sul. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil.**, p. 321–328, 2005.

WILCZAK, J. M.; ONCLEY, S. P.; STAGE, S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 99, n. 1, p. 127–150, 2001.

WILSON, K. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1–4, p. 223–243, 2002.

**CAPÍTULO II – RESULTADOS NA FORMA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS
SUBMETIDOS OU A SEREM SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO**

II. ARTIGO 1 – SIMPLIFICAÇÃO DA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
PARA O ARROZ IRRIGADO UTILIZANDO O MÉTODO PRIESTLEY-TAYLOR

II. ARTIGO 2 – WHAT DRIVES EVAPOTRANSPIRATION OVER IRRIGATED
CROPLAND? A COMPARISON BETWEEN FLUX TOWER MEASUREMENTS AND
MODIS REMOTE SENSING ESTIMATIONS

ARTIGO 1:

SIMPLIFICAÇÃO DA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O ARROZ IRRIGADO UTILIZANDO O MÉTODO PRIESTLEY-TAYLOR

Vanessa de Arruda Souza ⁽¹⁾, Debora Regina Roberti ^(2*), Jônatan Dupont Tatsch ⁽²⁾, Rita de Cássia Marques Alves ⁽¹⁾, Tamíres Zimmer ⁽²⁾, Virnei Silva Moreira ⁽³⁾

⁽¹⁾ Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

⁽²⁾ Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil.

⁽³⁾ Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Itaqui, RS, Brasil.

*Corresponding author: e-mail: debora@ufsm.br, Telephone number: +55 55 33012035; Fax number: +55 55 32208305

RESUMO

O arroz é um dos principais cereais produzidos no mundo, principalmente pelo sistema de irrigação por inundação. Determinar a evapotranspiração (ET) para as grandes áreas de arroz irrigado é um fator limitante, devido ao alto custo dos equipamentos e monitoramento *in situ*. O método Priestley-Taylor (PT) representa uma simplificação do método Penman-Monteith (PM), utilizando um menor número de variáveis ambientais, mas ainda sendo necessária a energia disponível no sistema e a calibração do parâmetro adimensional (α). Na literatura, diversos trabalhos apresentam diferentes valores de α , no entanto, nenhum obtido para a cultura de arroz irrigado no sul do Brasil. O objetivo deste trabalho é propor uma simplificação do método PT quanto ao cálculo da energia disponível e sugerir valores do parâmetro α para a estimativa da ET no arroz irrigado por inundação utilizando dois sítios experimentais no sul do Brasil. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais obtidos através da técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos. O valor de $\alpha = 1,18$ foi encontrado para o parâmetro de PT sobre a cultura de arroz inundado. Utilizando

simplificações na energia disponível o valor do parâmetro decaí. Por conseguinte, as simplificações sugeridas na formulação da energia disponível acarretaram em um pequeno aumento do erro médio quadrático para as estimativas de ET, embora com pouca diferença no acumulado por períodos ou anual da ET. Senso assim, as formulações simplificadas para a energia disponível propostas por este trabalho, servem como alternativa para a estimativa da ET em grandes plantações de arroz irrigado.

Palavras-chave: Arroz irrigado, Evapotranspiração, Priestley-Taylor, Covariância dos Vórtices Turbulentos.

1. INTRODUÇÃO

A Evapotranspiração (ET) é a componente chave do balanço hídrico, além de ser uma importante variável climatológica e ambiental. Determinar a ET sobre a cultura de agrícolas é um fator importante tanto para o desenvolvimento socio-econômico, ligada ao rendimento de safra agrícola, como para o clima regional, ligado às mudanças na temperatura e o conteúdo de água disponível para o desenvolvimento da planta (ALBERTO et al., 2011; ALLEN et al., 1998; KALMA; MCVICAR; MCCABE, 2008; MU; ZHAO; RUNNING, 2011; XU et al., 2017; ZHAO et al., 2013).

O Brasil é um importante produtor de arroz (*Oryza sativa*), sendo o estado do Rio Grande do Sul responsável por aproximadamente 2/3 do total produzido no país (CONAB, 2016). Enquanto na Ásia, principal produtor mundial, o cultivo ocorre duas vezes ao ano, no Brasil o cultivo ocorre apenas durante a estação primavera-verão, ficando o solo descoberto e com crescimento de vegetação espontânea no restante do tempo. Em geral, o cultivo de arroz se dá mundialmente pelo sistema irrigado por inundação, demandando um grande volume de água, afetando diretamente o balanço hídrico da região de cultivo. Estimativas do consumo de água por evapotranspiração nesse agroecossistema são fundamentais para a gestão de recursos hídricos (BOURAIMA; WEIHUA; CHAOFU, 2015; GUERRA et al., 1998).

O Método de Penman-Monteith (PM) (MONTEITH, 1965; PENMAN, 1948) é definido como padrão para estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o) segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) (ALLEN et al., 1998). No entanto, este método requer uma grande quantidade de variáveis meteorológicas e ambientais, tornando-se mais complexa sua utilização (PEREIRA; PRUITT, 2004). O Método

Priestley-Taylor (PT), por sua vez, representa uma simplificação do método PM, que utiliza apenas a temperatura do ar e a energia disponível no sistema (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972). Entretanto, a calibração do parâmetro adimensional (α), presente na equação PT, deve ser realizada de acordo com a cobertura da superfície. Na literatura, inúmeros trabalhos têm estimado valores para o parâmetro α sobre diferentes tipos de vegetação. PRIESTLEY; TAYLOR, 1972, propuseram para um valor de α igual a 1,26 para uma superfície saturada. Em regiões alagadas podemos destacar GAVIN; AGNEW, 2004, no qual encontraram valores de α entre 0,8 e 1,25 no sudeste da Inglaterra; ARASTEH; TAJRISHY, 2008, realizaram estudos sobre uma superfície coberta por água no sudeste do Irã, encontrando valores entre 1,20 a 2,47; KUSTAS; STANNARD; ALLWINE, 1996, determinaram valores de α entre 0,6 e 1,0 para pastagens e terras cultiváveis próximas a um rio; CASTELLVI et al., 2001, encontraram valores de α entre 1,2 e 1,9 para gramíneas de referência no nordeste da Espanha. CHO et al., 2013, demonstram que o α pode variar em função de variáveis ambientais.

O objetivo deste trabalho é propor simplificações no método PT, quanto ao cálculo da energia disponível, pois em um ecossistema não é usualmente medida pelas estações meteorológicas. Além disso, sugerir valores do parâmetro α para a estimativa da ET na equação de PT para o arroz irrigado por inundação. As simplificações e estimativas do parâmetro α são calibradas e validadas utilizando dados experimentais de ET obtidos através da técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos em dois sítios experimentais sobre arroz irrigado por inundação no sul do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de Estudo

As áreas de estudo estão localizadas em plantações de arroz irrigado por inundação no sul do Brasil. O sítio experimental de Paraíso do Sul (PS) (29°44' 39.6''S; 53°8'59.8''W, 108 m) tem aproximadamente 50 hectares (ha) com cultivo de arroz irrigado por inundação desde os anos 80 (Figura 1a). Em Cachoeira do Sul (CS) a área com cultivo de arroz irrigado por inundação é de aproximadamente 1000 ha (30°16' 37.59''S, 53° 8'52.25''W, 40,5 m) (Figura 1b). Os sítios experimentais são distantes aproximadamente 59 km em linha reta e em ambos o arroz é cultivado entre os meses de outubro a abril, sem rotação de cultura, ou seja, nos demais meses ocorre apenas crescimento espontâneo de gramíneas selvagens. O clima da região é classificado como subtropical úmido, Cfa, de acordo com a classificação climática de

Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), com constante influência dos fenômenos ENOS (El Niño-Oscilação Sul).

O período utilizado neste estudo para o sítio de PS foi de 21 julho de 2003 a 20 de julho de 2004, com arroz cultivado de 25 de novembro a 4 de abril, com o cultivar IRGA 417. Para CS, foi utilizado o período de 01 de agosto de 2012 a 31 de julho de 2013, sendo o arroz cultivado de 15 de outubro de 2012 a 17 de março de 2013, com o cultivar EPAGRI 118 comum. Em ambos sítios experimentais, 30 dias após a semeadura a lavoura de arroz foi inundada com aproximadamente 10 cm de lâmina d'água, permanecendo com esta lâmina até a colheita.

2.2 Medidas meteorológicas

No período do estudo, ambos os sítios experimentais estavam equipados com torres micrometeorológicas. Os fluxos verticais foram obtidos através da Técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos. PS possuía os seguintes equipamentos para a estimativa dos fluxos: anemômetro sônico 3D (10 m, CSAT3; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah) medindo as variáveis de temperatura, umidade relativa e as componentes do vento (u,v,w) e analisador de gás aberto (10 m, LI-7500; LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) medindo a concentração de H₂O. As seguintes variáveis ambientais foram medidas: temperatura e umidade relativa (10 m, HMP45C-L; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah); precipitação (10 m, TB4 Rain Gauge; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah); saldo de radiação (8 m, NR LITE; Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands); radiação global (8 m; Kipp & Zonen- CM6B Pyranometer) e temperatura do solo (-0.02, 0.05, 0.10, 0.20 e 0.50 m; STP01 Hukseflux Thermal Sensors). Uma descrição detalhada do sítio experimental e dos dados coletados pode ser encontrada em TIMM et al., 2014 e ACEVEDO et al., 2006, 2009.

Em CS a torre micrometeorológica possuía um anemômetro sônico 3D (3m; CSAT3; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah); um analisador de gás aberto (3 m, LI-7500; LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) para estimativa dos fluxos verticais, além de medidas das seguintes variáveis ambientais: precipitação (6 m, Campbell Scientific - CSI Model TB4 Rainage); saldo de radiação (3,4 m; Kipp & Zonen NR LITE) e radiação global (6 m; Kipp & Zonen - CMB6).

As variáveis meteorológicas obtidas da estação meteorológica do INMet (Instituto Nacional de Meteorologia – OMM-86977) localizada em Santa Maria – RS (distante aproximadamente 83 km de CS em linha reta), foram utilizadas para preenchimento de falha

nas variáveis ambientais faltantes da torre experimental de CS. Para descrição da climatologia da região foram utilizados dados climatológicos do INMet apenas do município de CS, pois não há registro para PS. No sítio experimental de PS não foi necessário realizar preenchimento de falhas com dados do INMet, pois as falhas foram inferiores a 3 horas, realizando apenas uma interpolação linear.

2.3 Processamento dos dados experimentais de ET

Para gerar os dados experimentais de evapotranspiração foi utilizado o fluxo de calor latente experimental, estimado através da técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos. Esta técnica é utilizada para estimar o fluxo de calor latente (LE) através da covariância entre medidas da velocidade vertical do vento e concentração de água na atmosfera. O software *EddyPro Advanced* (versão 5.1, LI-COR) foi utilizado para processar os dados de fluxo em médias de 30 minutos. Após o processamento de dados, foi realizada a filtragem de valores espúrios de LE, desconsiderando da análise valores $< -50 \text{ W m}^{-2}$ ou $> 650 \text{ W m}^{-2}$. Para valores de $R_g \leq 0$, ou seja, durante o período noturno, foram desconsiderados valores de $LE > 100 \text{ W m}^{-2}$. O fluxo de calor sensível (H) também foi filtrado para os intervalos de $-70 \text{ W m}^{-2} > H > 300 \text{ W m}^{-2}$. Além disso, foram excluídos os valores de H e LE para os horários com ocorrência de precipitação.

Para o sítio experimental de PS, a filtragem de dados, incluindo os dias de mal funcionamento dos equipamentos, resultou em uma falha de 30,1% nos dados de LE, enquanto que para CS as falhas foram de 25,5%. Os dados faltantes dos fluxos superficiais, bem como as variáveis meteorológicas que ainda possuíam falhas, foram preenchidos através do pacote *REddyProc* disponível para a versão do software RStudio, desenvolvido pelos métodos propostos por REICHSTEIN et al., 2005. Após este preenchimento, foi realizado o fechamento do balanço de energia, onde diversos trabalhos apontam que o H somado com LE é menor quando comparado à diferença entre R_n e fluxo de calor no solo (G), apresentando uma diferença que varia entre 10 a 30%, necessitando ajuste nos valores destes parâmetros (ALBERTO et al., 2011). Desta forma, o fechamento do balanço de energia foi forçado utilizando a técnica da razão de Bowen (FOKEN, 2008). Para o sítio de PS foram utilizadas todas as variáveis disponíveis, sendo elas: saldo de radiação (R_n), calor conduzido pelo solo (F_g) e armazenamento de calor no solo e lâmina d'água (ΔG). As variáveis F_g e ΔG representaram 1,15% e 0,74% de R_n neste sítio. O G para CS foi desconsiderado devido à falta de medidas *in situ*.

2.4 Método Priestley-Taylor (PT) para a Evapotranspiração

O Método PT é uma simplificação da equação de PM (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972), considerando somente parâmetros meteorológicos como a temperatura do ar e energia disponível no ecossistema. No entanto, este método necessita de calibração na constante de proporcionalidade, α , (parâmetro de Priestley-Taylor). O fluxo de calor latente, obtido pelo método PT é estimado por:

$$\lambda ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (X), \quad (1)$$

onde α é o parâmetro de Priestley-Taylor (adimensional), Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e X é a energia disponível no sistema (W m^{-2}). Na forma original do modelo PT, a energia disponível no sistema, X , é a diferença entre R_n (a densidade de fluxo de radiação líquida na superfície) e G (fluxo de calor no solo). O fluxo de calor no solo pode ser estimado através da soma entre fluxo de calor conduzido pelo solo (Fg) e o armazenamento de calor no solo e lâmina d'água (ΔG):

$$G = Fg + \Delta G. \quad (2)$$

Neste trabalho, ΔG foi estimado conforme descrito por TIMM et al., 2014, onde o armazenamento de calor na lâmina d'água foi calculado apenas para o período inundado.

A ET diária, obtida pelo método PT, foi calculada através da seguinte relação:

$$ET = 10^{-9} \left(\frac{\lambda ET}{\rho_a \lambda} \right) \quad (3)$$

onde: λET é o fluxo de calor latente em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, λ é o calor latente de evaporação ($2,45 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$) e ρ_a é a densidade do ar ($998,21 \text{ Kg m}^{-3}$) para temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

A ET experimental (ET_{exp}) foi estimada através da Eq. 3 utilizando o fluxo de calor latente experimental. A ET na Eq. 3 é obtida em mm d^{-1} .

2.5 Formulações para e energia disponível

Neste trabalho, simplificações no método PT foram realizadas de forma a descrever a energia disponível no sistema, X , da Eq. (1), conforme apresentados na Tabela 1. A formulação T1 foi realizado utilizando o máximo de variáveis disponíveis (saldo de radiação, fluxo de calor no solo e armazenamento de calor no solo e na lâmina d'água (quando o solo estava alagado)). As formulações T3, T4 e T5, são variações da T1 desconsiderando algum termo. A formulação T5, representa uma relação linear empírica entre o Saldo de Radiação (R_n) e a Radiação Solar Global (R_g) para o período das 8:00 às 17:00h (horário local), calibrada através do sítio experimental de PS e validada para CS.

Para cada formulação da energia disponível (Tabela 1) foi determinado o valor do parâmetro de Priestley-Taylor, α . Testes com variações centesimais no intervalo de 0,9 a 1,3 para o parâmetro α foram realizados. Este intervalo de variação de α representa a maioria dos resultados encontrados na literatura. O parâmetro α escolhido em cada teste foi aquele em que a comparação entre as médias diárias da ET experimental e simulada apresentaram o valor de PBIAS mais próximo de zero. Outros índices estatísticos como RMSE e R^2 também foram utilizados para análise.

Os valores de PBIAS foram determinados através da equação:

$$PBIAS = 100 \times \left(\frac{\sum(sim-obs)}{\sum obs} \right) \quad (4)$$

onde: *sim* representa os dados estimados de ET e *obs* representa os valores observados de ET pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições Ambientais

A temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), velocidade do vento (m s^{-1}) e o acumulado da precipitação (mm), para os sítios experimentais de Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul, são apresentados de forma mensal na Figura 2. O período de análise para PS foi de agosto 2003 a julho 2004, o mês de julho de 2003 foi desconsiderado da análise devido à pouca quantidade de medidas. Em CS a análise foi realizada de agosto de 2012 a julho de 2013.

Em PS a temperatura mínima no período de estudo foi de 0,2 °C no mês de julho, e máxima de 36,7 °C no mês de novembro (Figura 2a). No entanto, observamos que os maiores valores médios mensais da temperatura se encontram entre dezembro e fevereiro (estação de verão no hemisfério sul). A temperatura média mensal quando comparada a normal climatológica (NC), apresenta praticamente o mesmo comportamento, com variação máxima de ± 2 °C. Para o sítio de CS a Temperatura média mensal quando comparada a NC apresenta um comportamento bastante semelhante, a maior diferença entre elas foi de 3,4°C para o mês de agosto (Figura 3a). O menor valor de temperatura foi de -1,3°C em julho, enquanto o maior foi de 37,5°C em fevereiro. Conforme STEINMETZ; BRAGA, 2001, quedas na produtividade do arroz podem ser causadas pela ocorrência de baixas temperaturas e pouca disponibilidade de radiação solar durante os períodos críticos da planta. A temperatura do ar propícia para o desenvolvimento do arroz varia entre 20 e 35°C para o período de germinação, de 30 e 33°C para o período de floração e de 20 a 25°C para o período de maturação (YOSHIDA, 1981). Durante o período de desenvolvimento do arroz irrigado (novembro – março) verificou-se que a temperatura média mensal foi superior a 20°C em ambos locais, propiciando o bom desenvolvimento da cultura.

Os valores médios mensais da umidade relativa em PS foram em torno de 75%, seguindo o mesmo padrão dos dados da NC, com variação máxima de $\pm 6\%$ (Figura 2b). No sítio experimental de CS a UR apresentou picos entre agosto de 2012 até fevereiro de 2013 apresentando uma variação de $\pm 19\%$ em relação à NC, para os demais meses o comportamento foi bastante semelhante (Figura 3b).

A velocidade média do vento para PS apresentou valor de 2,4 m s⁻¹ (Figura 2c), enquanto que para CS foi de 2,2 m s⁻¹ (Figura 3c), aproximadamente. Os valores de velocidade do vento quando comparados a NC variaram em $\pm 1,6$ m s⁻¹ para PS, enquanto que em CS a amplitude de variação foi menor, próxima de 1 m s⁻¹.

Em PS o acumulando mensal de precipitação apresentou grande variação variando de 13 mm no mês de março a 284 mm no mês de outubro (Figura 2d), quando comparado os valores a NC verificamos uma superestima no período de setembro a dezembro, e subestima de janeiro a março e junho a julho. Durante o período de plantio ocorreu um grande volume de precipitação (novembro e dezembro), acarretando no atraso do plantio do arroz, que ocorreu em 25 de novembro de 2003. No período de máximo desenvolvimento da planta, verifica-se que a precipitação diminui (janeiro e fevereiro), mas com valores próximos a NC.

Para o sítio de CS, conforme a Figura 3d, o acumulado mensal de precipitação apresentou quatro meses com valores abaixo da NC (agosto, novembro, fevereiro e junho), enquanto que para dezembro e abril os volumes foram bem expressivos, acima de 250 mm mês⁻¹. Para os demais meses os volumes apresentados seguem um padrão próximo a NC.

3.2 Relações R_n X R_g

A formulação para a energia disponível, T5 (Tabela 1), utiliza uma relação linear entre R_n e R_g . Esta relação foi obtida através dos dados experimentais de PS e estão representados na (Figura 4). Foram encontrados os seguintes coeficientes lineares $a = 0,71$ e $b = -47$ com R^2 igual a 0,97.

3.3 Ajustes do parâmetro α – Paraíso do Sul

Os ajustes do parâmetro α para a estimativa da ET utilizando a Eq. 1 com as diferentes formulações para a energia disponível são apresentados na Tabela 1. Para estas estimativas foram utilizados dados de todo o período para Paraíso do Sul. Os valores de α sofrem alterações entre 1,17 e 1,22. A diferença percentual relativa entre os dados experimentais e simulados, PBIAS foram bem próximas para todas as formulações. Além disso, o R^2 e o RMSE apresentam valores próximos dos ideais para formulações com o máximo de variáveis para a energia disponível.

A diferença na soma anual da ET para todas as formulações foi próxima a 7 mm. A média diária da ET experimental no período anual foi de 2,9 mm d⁻¹. Logo, a diferença entre as somas anuais não foi significativa, correspondendo a aproximadamente três dias de dados para o período de um ano. A soma anual da ET_{exp} foi de 1067,7 mm. As formulações para os testes T1 e T2 foram as que mais se aproximaram do resultado observado, seguidas dos testes T4 e T5 com diferenças de 2,6 e 4,3 mm anual, respectivamente.

A dispersão entre a ET_{exp} e simulada por PT (ET_{PT}) utilizando diferentes formulações para a energia disponível (Tabela 1) é observada na Figura 5 (a-e). Para as formulações T1 e T2, a dispersão é menor, enquanto em T3, T4 e T5 a dispersão é maior. De modo geral, observa-se que a ET_{PT} subestima os dados experimentais para valores abaixo de 2 mm d⁻¹.

3.4 Validação do modelo proposto simplificado de PT utilizando o sítio de Cachoeira do Sul

Após serem realizados os ajustes nos parâmetros utilizando os dados de PS, foi feita a validação do modelo proposto por este trabalho, a partir do teste T5 no sítio experimental de CS. Para o cálculo foram utilizados os valores de “*a*” e “*b*” já apresentados anteriormente para a relação ($aR_g + b$), os dados de R_g foram obtidos experimentalmente em CS. Calculando a ET através do modelo simplificado T5 e comparando com a ET_{exp} a partir de um gráfico de dispersão (Figura 5f), observamos que para valores menores de 2 mm d^{-1} a ET_{PT-T5} subestima os dados experimentais. Além disso, grande parte dos pontos encontram-se entre as linhas 1:0,5 e 1:2. Comportamento muito semelhante foi observado para PS. Analisando os valores estatísticos verificamos baixo RMSE ($0,70 \text{ mm d}^{-1}$) e PBIAS (-2,1%), valores próximos aos encontrados para PS. Já a soma acumulada anual foi de $1106,8 \text{ mm}$ para ET_{exp} e $1083,1 \text{ mm}$ ET_{PT-T5} .

3.5 Análise das estimativas da ET

3.5.1 Médias diárias

O ciclo anual da ET média diária obtida experimentalmente e a calculada utilizando o método PT, com a formulação completa para a energia disponível (T1 na Tabela 1) e com parâmetro $\alpha=1,22$ para PS é apresentada na Figura 6a. Durante a fase de Pousio 1 (anterior à semeadura) e 2 (após a colheita) verificamos um comportamento bastante semelhante da ET_{PT-T1} com a ET_{exp} . Já para o período de desenvolvimento do arroz irrigado a ET_{exp} em comparação com a ET_{PT-T1} apresenta picos que não foram bem representados pelo modelo, porém não foram erros significativos.

A simplificação do modelo de PT através do teste T5 (Tabela 1) é apresentada na Figura (6b e c), para PS e CS, utilizando o parâmetro ajustado de $\alpha=1,18$. Em PS (Figura 6b), verificamos uma maior variação da ET_{PT-T5} em relação à ET_{PT-T1} , apresentando de modo geral, uma quantidade maior de valores próximos à zero. No entanto, quando comparada com a ET_{exp} , apresentam um comportamento semelhante, porém durante a fase de semeadura e início de desenvolvimento do cultivo, verificamos uma superestimava do dado modelado. Para CS (Figura 6b), verificamos que durante as fases de pousio 1 e cultivo do arroz irrigado a ET_{PT-T5} representa com bastante precisão a ET_{exp} , as maiores variações ocorrem durante o período do pousio 2. Estes resultados aproximam-se dos valores comumente encontrados para

áreas alagadas na literatura KUSTAS; STANNARD; ALLWINE, 1996; PEREIRA; GREEN; NOVA, 2007.

Durante a safra do arroz os máximos valores de ET ultrapassam 7 mm d^{-1} , tanto nos dados experimentais, quanto nos estimados por PT. No período de Pousio 1, a ET atinge valores de 6 mm d^{-1} nos dados experimentais e 5 mm d^{-1} estimados por PT. Na fase do Pousio 2 a ET diminui consideravelmente, ficando abaixo de 3 mm d^{-1} , isso ocorre devido a exposição do solo e predomínio do processo de evaporação. LI et al., 2009, usando dados de *Eddy Covariance* em áreas agrícolas irrigadas em Wuwai – China encontraram valores de ET que variam entre 0,5 e 6 mm d^{-1} para uma região de clima típico continental temperado. Para grande parte dos trópicos, a ET para a cultura do arroz em áreas irrigadas, varia entre 4 a 5 mm d^{-1} na estação chuvosa, e de 6 a 7 mm d^{-1} para a estação seca (DATTA, 1981; TABBAL et al., 2002). ALBERTO et al., 2011, descrevem a ET sobre o arroz nas Filipinas, encontrando valor máximo de 7 e 6 mm d^{-1} para o cultivo irrigado durante as estações seca e chuvosa, respectivamente. A ET em cultivo aeróbico apresenta valores menores quando comparado ao irrigado, com pico máximo próximos a 6 e 5 mm d^{-1} para o período seco e chuvoso (ALBERTO et al., 2011).

3.4.2 Evapotranspiração acumulada

Os acumulados diários das ETs experimentais e estimadas por PT para todas as formulações, durante os períodos pousio 1, arroz e pousio 2, é mostrado na Figura 7 para Paraíso do Sul e Cachoeira do Sul. Para PS, nota-se que durante o período inicial até início de setembro, a ET estimada utilizando as diferentes formulações seguem o mesmo padrão. Após este intervalo houve pequenas variações nas estimativas de ET, principalmente no período final do pousio 1, porém sem grande significância. No período do cultivo de arroz irrigado (Figura 7c) observa-se que todos os métodos seguem o mesmo padrão, mostrando uma boa acurácia na calibração do parâmetro α . Além disso, a soma total da ET durante a safra de arroz foi próxima a 600 mm em todas as formulações, inclusive com dados experimentais. Estes valores são maiores, porém próximos aos apresentados na literatura para o cultivo de arroz: SEUNG-HWAN et al., 2013, encontraram valores médios da ET da cultura (ETc) entre 441 e 493 mm para oito distritos agrícolas com sistema de irrigação e ALBERTO et al., 2011, encontraram valores da ET entre 400 a 556 mm para o cultivo de arroz irrigado.

O período que apresentou maior variação foi o Pousio 2 para PS (Figura 7e), principalmente após o mês de maio, estando ligado ao fato da queda da temperatura e

diminuição da radiação solar, devido à entrada do outono/inverno na região. Outro fator que deve ser levado em consideração é a palha (resíduos da cultura), que permanece sobre o solo durante os primeiros meses após a colheita, influenciando os fluxos superficiais que não se encontram presentes no método T5, estando ligado a subestimativa deste método em relação aos demais. Após a decomposição da palha seca, temos o crescimento ativo de gramíneas.

Para CS foi realizada somente a análise acumulada do teste T5 com a ET_{exp} , visto que este sítio não possui todas as variáveis disponíveis para os cálculos dos demais testes, e tendo como foco neste trabalho propor uma simplificação do método PT para o arroz irrigado. A soma acumulada da ET_{PT-T5} em CS durante os períodos de Pousio 1 e arroz (Figura 7 b, d, e) apresenta um comportamento muito semelhante com a ET_{exp} , ocorrendo o mesmo que para PS. Durante a fase de desenvolvimento do arroz irrigado a soma acumulada dos valores das ETs foram de 733,9 e 722,0 mm para ET_{exp} e ET_{PT-T5} , superiores aos encontrados para PS e na literatura listada anteriormente. Durante o Pousio 2 (Figura 7e) verificamos uma pequena variação nos valores acumulados entre as ETs, principalmente nos meses de março a abril e de junho a agosto, no entanto, sem grandes alterações.

4. CONCLUSÃO

O Método Priestley-Taylor mostrou-se muito eficiente para estimar a ET em grandes áreas de cultivo de arroz irrigado. No entanto, os valores propostos na literatura para o parâmetro ambiental (α) não se aplicam sobre a cultura, variando conforme as condições de cada local. Os testes realizados para a simplificação da equação por PT diminuíram a acurácia na precisão da estimativa de ET, porém, ainda assim, continuam sendo muito precisos os valores estimados, principalmente quando comparado aos resultados encontrado por TIMM et al., 2014, utilizando a equação Penman-Monteith sobre o mesmo sítio de PS.

A fim de simplificar ainda mais a equação de PT, devido à dificuldade para estimar o saldo de radiação, a utilização da radiação solar global ajustada a partir da regressão linear simples, proposta por este trabalho, mostrou-se eficaz substituindo o saldo de radiação no método, sendo calibrada para o sítio de PS e validada para CS. O erro gerado pela troca das variáveis foi pouco expressivo quando comparado aos dados experimentais.

As simplificações realizadas com o método PT indicam que grande parte da ET depende somente da radiação que chega à superfície e de uma boa calibração na variável α .

Sendo assim, este trabalho sugere que o valor de α seja igual a 1,22 para equação completa de PT, e de 1,18 quando utilizada a radiação solar global conforme proposto nesta pesquisa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa no Rio Grande do Sul (FAPERGS), Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (FAURGS), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, O. C. et al. Intermittency and the exchange of scalars in the nocturnal surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, n. 1, p. 41–55, 2006.

ACEVEDO, O. C. et al. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 1, p. 1–10, 2009.

ALBERTO, M. C. R. et al. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1417–1430, 2011.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: 1998.

ARASTEH, P. D.; TAJRISHY, M. Calibrating Priestley-Taylor Model to Estimate Open Water Evaporation under Regional Advection Using Volume Balance Method-Case Study: Chahnimeh Reservoir, Iran. **Journal of Applied Sciences**, v. 22, p. 4097–4104, 2008.

BOURAIMA, A. K.; WEIHUA, Z.; CHAOFU, W. Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 58–64, 2015.

CASTELLVI, F. et al. Comparison of methods for applying the Priestley-Taylor equation at a regional scale. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 9, p. 1609–1620, 2001.

CHO, J. et al. Difference in the Priestley-Taylor coefficients at two different heights of a tall micrometeorological tower. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 180, p. 97–101, 2013.

- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira - Grãos Safra 2015/16**, 2016.
- DATTA, S. K. DE. **Principles and Practices of Rice Production**. Los Baños, Philippines: IRRI, 1981.
- FOKEN, T. The energy balance closure problem: An overview. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1351–1367, 2008.
- GAVIN, H.; AGNEW, C. A. Modelling actual, reference and equilibrium evaporation from a temperate wet grassland. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 2, p. 229–246, 2004.
- GUERRA, L. C. et al. **Producing more rice with less water from irrigated systems**, 1998.
- KALMA, J. D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4–5, p. 421–469, 2008.
- KUSTAS, W. P.; STANNARD, D. I.; ALLWINE, K. J. Variability in surface energy flux partitioning during Washita '92: Resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 171–193, 1996.
- LI, S. et al. Variability in energy partitioning and resistance parameters for a vineyard in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 6, p. 955–962, 2009.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205–234, 1965.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, 2011.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, p. 259–263, 2007.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. A193, p. 120–146, 1948.
- PEREIRA, A. R.; GREEN, S. R.; NOVA, N. A. V. Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestley-Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees. **Agricultural Water Management**, v. 92, n. 1–2, p. 48–52, 2007.
- PEREIRA, A. R.; PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 66, n. 3, p. 251–257, 2004.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and

Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.

REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, 2005.

SEUNG-HWAN, Y. et al. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. **Agricultural Water Management**, v. 117, p. 43–54, 2013.

STEINMETZ, S.; BRAGA, H. J. Zoneamento de arroz irrigado por épocas de semeadura nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina Zoning of paddy rice by sowing dates in the states of Rio Grande do Sul and Santa Catarina , Brazil. p. 429–438, 2001.

TABBAL, D. F. et al. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. **Agricultural Water Management**, v. 56, n. 2, p. 93–112, 2002.

TIMM, A. U. et al. Energy Partitioning and Evapotranspiration over a Rice Paddy in Southern Brazil. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 5, p. 1975–1988, 2014.

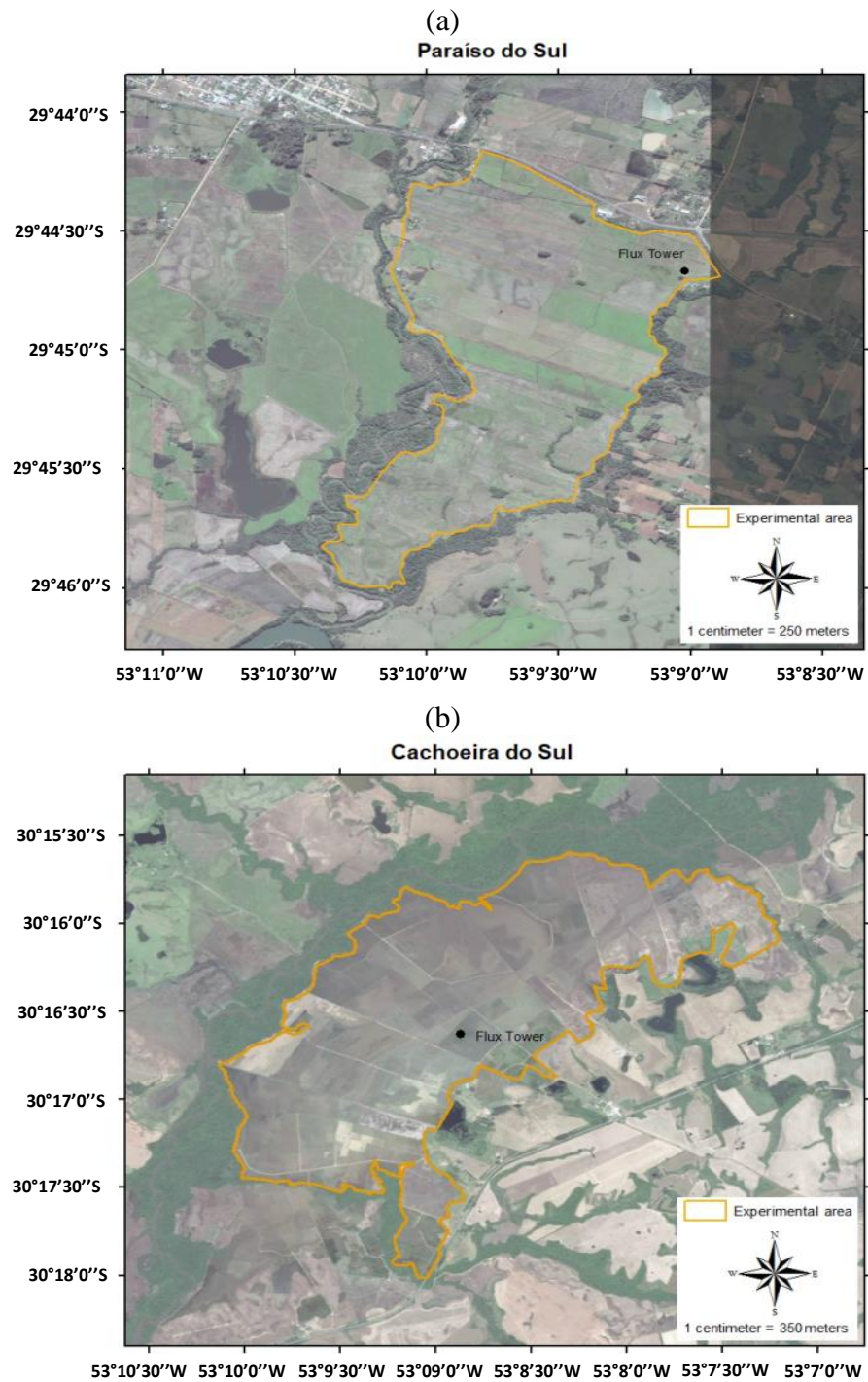
XU, J. et al. Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation by calibrating canopy resistance model parameters in the Penman-Monteith equation. **Agricultural Water Management**, v. 182, p. 55–66, 2017.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice croup science**. Los Banõs: ed. 1981.

ZHAO, N. et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain: Basal crop coefficients and soil evaporation component. **Agricultural Water Management**, v. 117, p. 93–105, 2013.

Figuras

Figura 1: Localização dos sítios experimentais com cultivo de arroz irrigado: (a) Paraíso do Sul (PS) e (b) Cachoeira do Sul (CS). A linha amarela refere-se aos limites das áreas experimentais com arroz irrigado.



0

Figura 2: Valores mensais das variáveis meteorológicas para o sítio de Paraíso do Sul. (a) Temperatura do ar; (b) Umidade Relativa; (c) Velocidade do vento; (d) Precipitação. Para as figuras (a-c) os pontos * representam os valores máximos; os pontos ▲ representam os valores mínimos; a linha tracejada em preto representa a média de cada variável meteorológica; a linha em cinza pontilhada representa os dados da normal climatológica. Na figura d as barras em preto representam a precipitação acumulada mensal e a linha em cinza pontilhada os dados da normal climatológica.

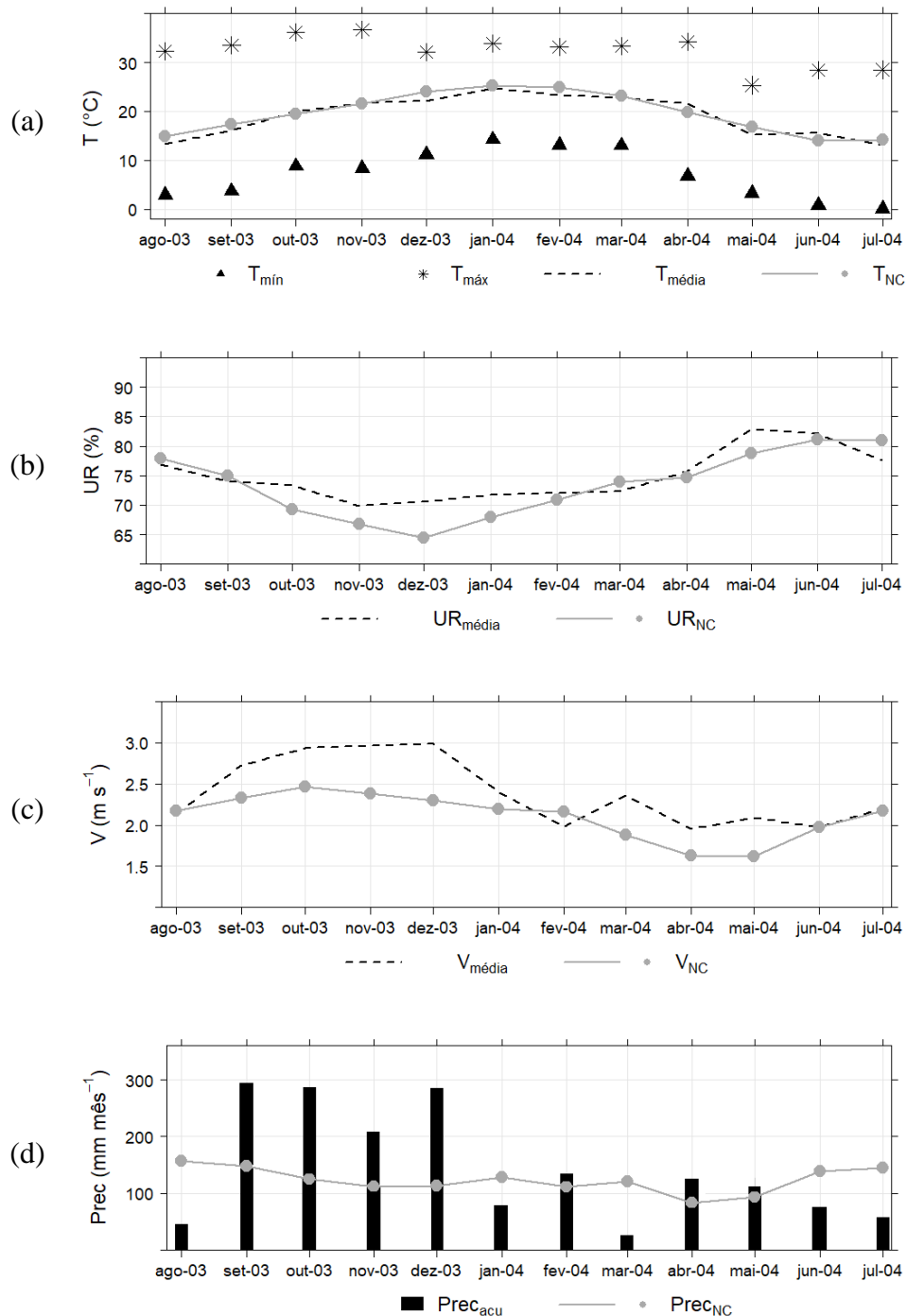


Figura 3: Valores mensais das variáveis meteorológicas para o sítio de Cachoeira do Sul. (a) Temperatura do ar; (b) Umidade Relativa; (c) Velocidade do vento; (d) Precipitação. Para as figuras (a-c) os pontos * representam os valores máximos; os pontos ▲ representam os valores mínimos; a linha tracejada em preto representa a média de cada variável meteorológica; a linha em cinza pontilhada representa os dados da normal climatológica. Na figura d as barras em preto representam a precipitação acumulada mensal e a linha em cinza pontilhada os dados da normal climatológica.

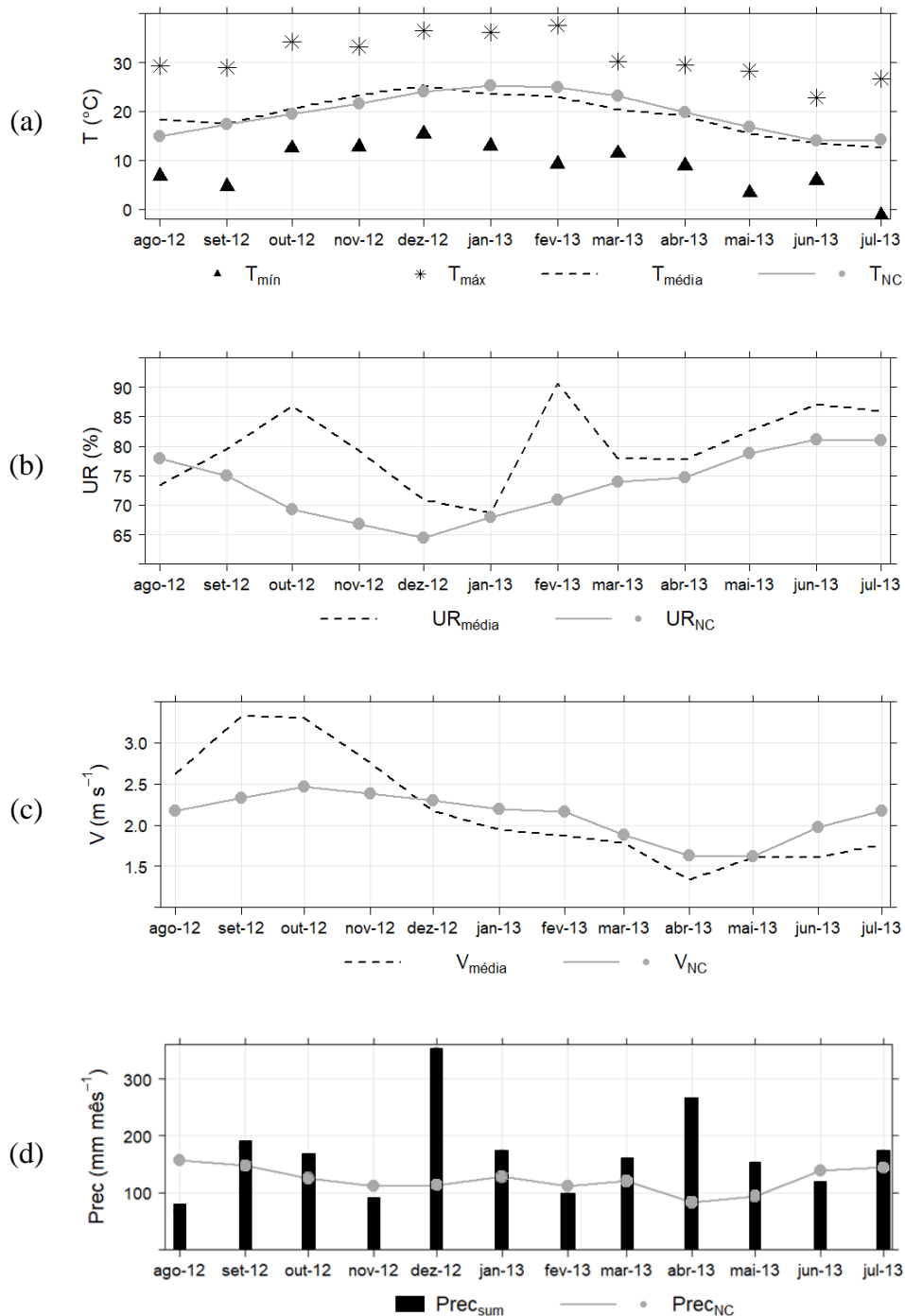


Figura 4: Dispersão entre o Saldo de Radiação (R_n) e a Radiação Solar Global (R_g) no intervalo das 8:00 às 17:00 h local para o período de 21 julho de 2003 a 20 de julho de 2004, em Paraíso do Sul.

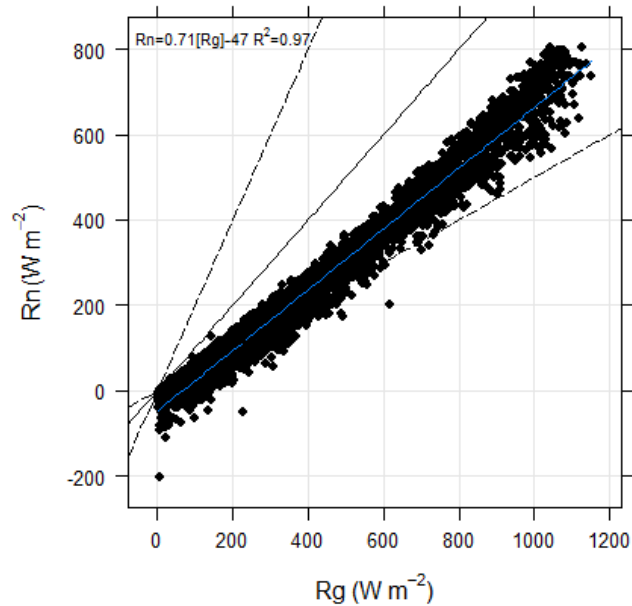
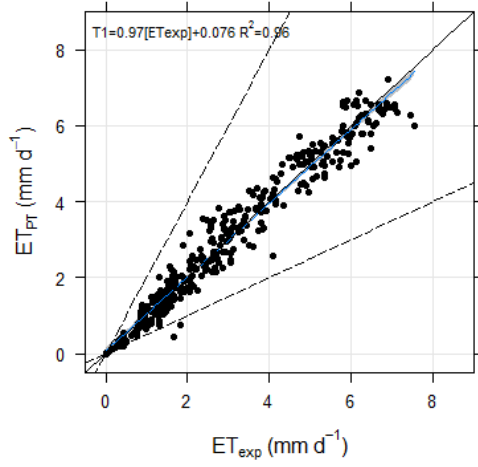
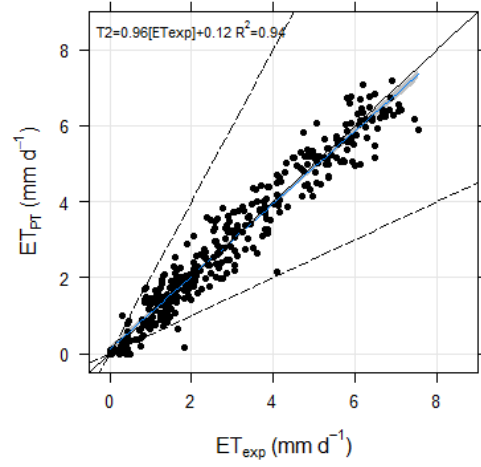


Figura 5: Dispersão entre a evapotranspiração experimental (ET_{exp}) e simulada a partir dos diferentes testes na equação de Priestley-Talyor (ET_{PT}). (a) Teste T1 para PS; (b) Teste T2 para PS; (c) Teste T3 para PS; (d) Teste T4 para PS; (e) Teste T5 para PS; (f) Teste T5 para CS. A linha azul contínua representa o ajuste linear dos dados. A linha preta sólida representa a linha 1:1 e as linhas pretas sólidas tracejadas referem-se às linhas 1:0.5 e 1:2.

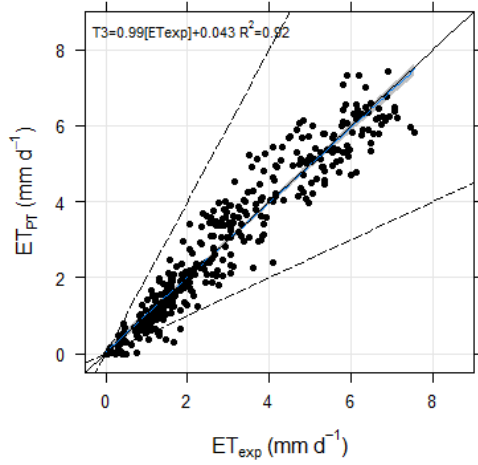
(a)



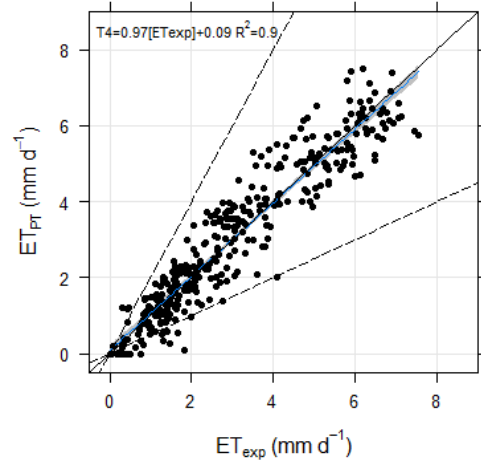
(b)



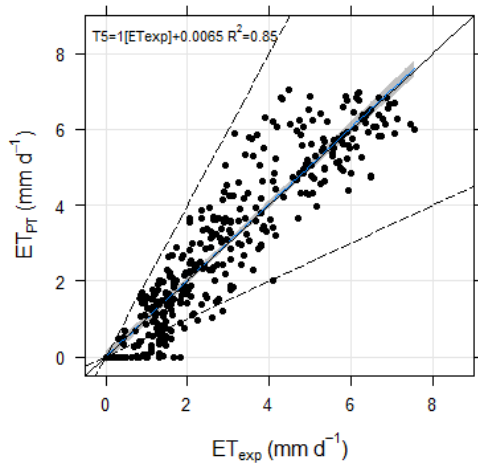
(c)



(d)



(e)



(f)

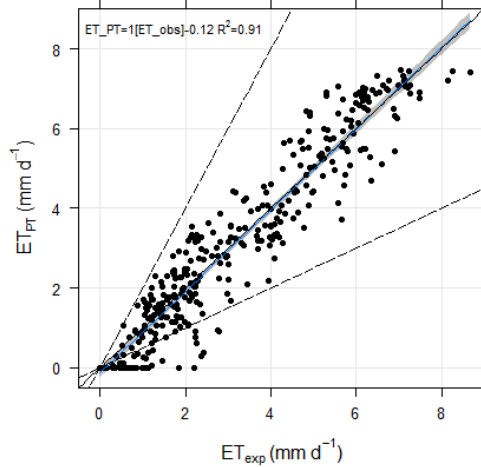


Figura 6: Ciclo anual da ET média diária experimental e estimada pelo método PT: (a) com a formulação completa para a energia disponível (T1 na Tabela 1) para Paraíso do Sul; (b) com a simplificação T5 para Paraíso do Sul e (c) Cachoeira do Sul.

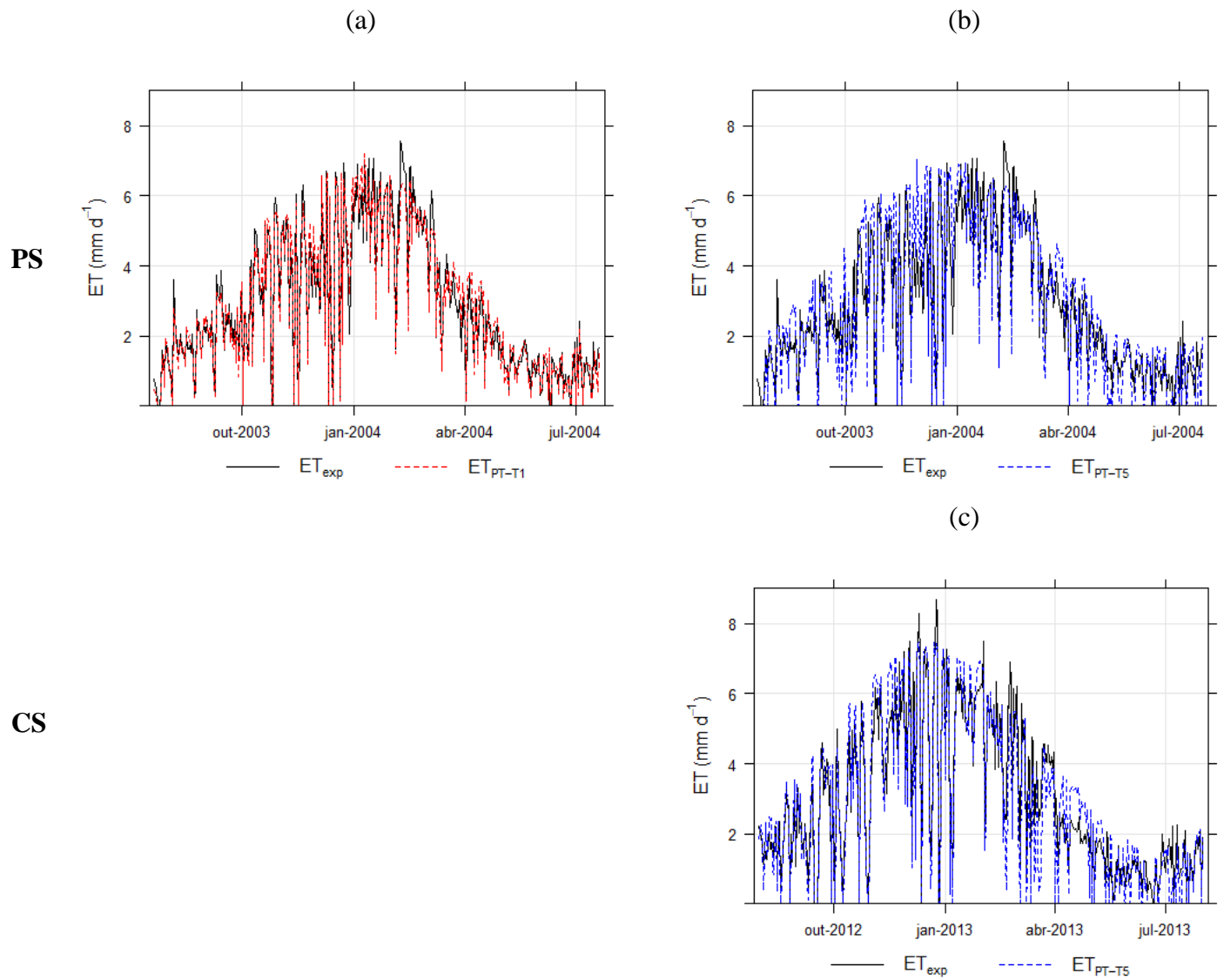


Figura 7: Acumulado diário da evapotranspiração experimental (ET_{exp}) e simulada (ET_{PT}) utilizando diferentes formulações para a energia disponível (Tabela 4) e diferentes. Coluna da esquerda PS e coluna da direita CS. Pousio 1 (a e b); (c e d) arroz irrigado e (e e f) Pousio 2.

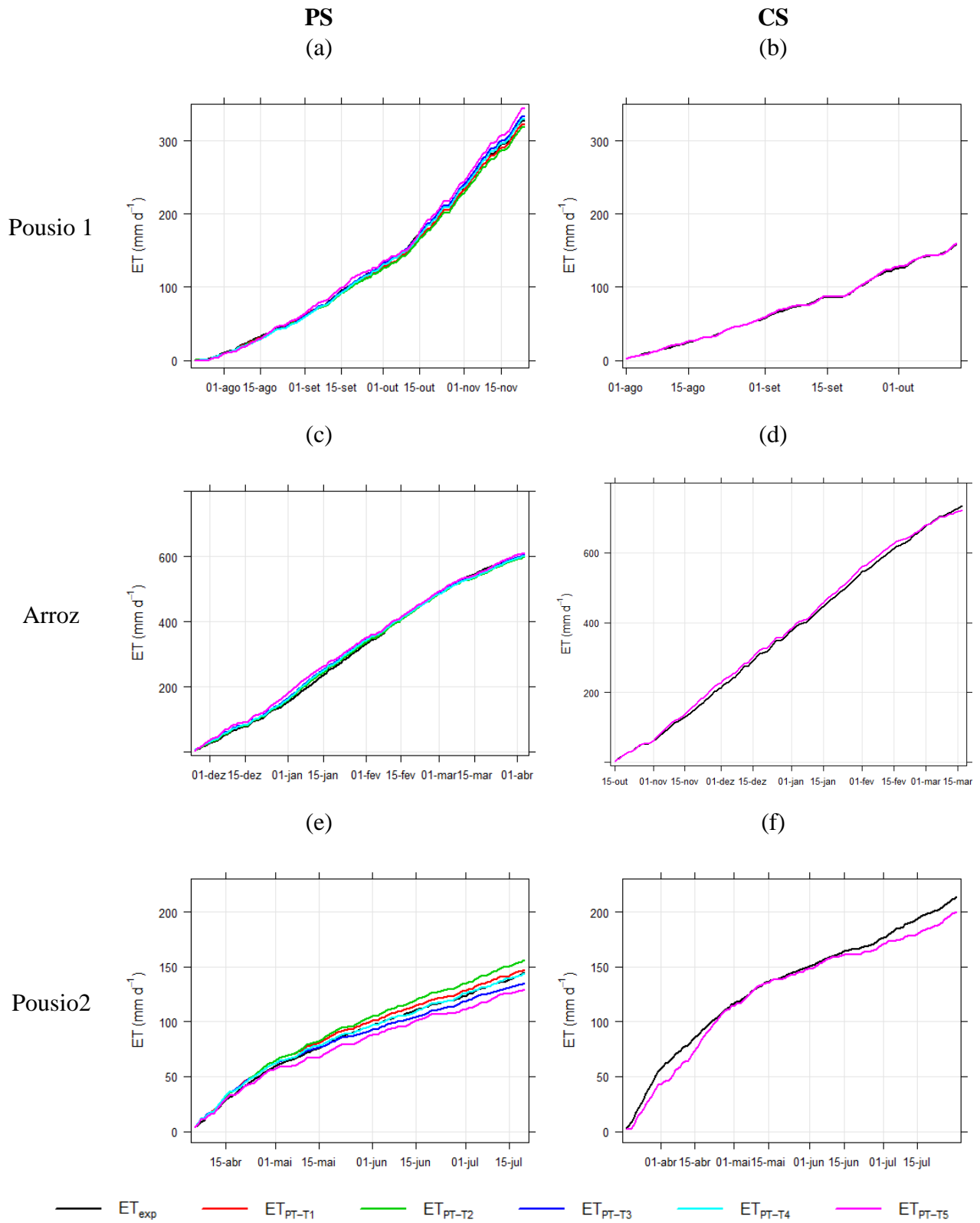


Tabela 1 – Simplificações para a formulação da energia disponível, X , na equação de Priestley-Taylor (Eq. 1), o Parâmetro α de Priestley-Taylor com resultados estatísticos (PBIAS, RMSE) e o acumulado anual do Evapotranspiração estimada, ET_{anual} em área de cultivo de arroz irrigado por inundação em PS. Resultados para o período 21 julho de 2003 a 20 de julho de 2004.

Paraíso do Sul						
Testes (ET_{PT})	X	α	PBIAS(%)	RMSE	R^2	ET_{anual} (mm)
T1	$(R_n - F_g - \Delta G)$	1,22	0,2	0,44	0,96	1070,3
T2	$(R_n - F_g)$	1,21	0,3	0,5	0,94	1070,3
T3	$(R_n - \Delta G)$	1,18	0,4	0,61	0,92	1071,5
T4	(R_n)	1,17	0,3	0,66	0,9	1070,9
T5	$(aR_g + b)^*$	1,18	-0,4	0,88	0,85	1063,4

*os valores dos coeficientes a e b são obtidos da relação linear entre R_n e R_g experimentais.

ARTIGO 2:

What drives evapotranspiration over irrigated cropland? A comparison between flux tower measurements and MODIS remote sensing estimations

Vanessa de Arruda Souza ¹, Débora Regina Roberti ^{2*}, Rita de Cassia Marques Alves ³, Tamires Zimmer ⁴, Marcelo Bortoluzzi Diaz ⁵, Anderson Luis Ruhoff ⁶, Luis Gustavo G. de Gonçalves ⁷, Oswaldo L. L. de Moraes ⁸

¹ Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil; v.arruda.s@gmail.com

² Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brazil; debora@ufsm.br

³ Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil; rita.cma@terra.com.br

⁴ Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brazil; tz.tamireszimmer@gmail.com

⁵ Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brazil; marbdiaz@gmail.com

⁶ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil; andersonruhoff@gmail.com

⁷ Centro de Previsão de Clima e Tempo, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, SP, Brazil; gustavo.degoncalves@gmail.com

⁸ Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brazil; osvaldo.moraes@gmail.com

* Correspondence: debora@ufsm.br, Tel.: +55 55 33012035

Academic Editor: name

Received: date; Accepted: date; Published: date

Abstract: Evapotranspiration (ET) is an important component of the hydrological cycle. Understanding the ET process has become of fundamental importance given the scenario of global change and increasing water use, especially in the industrial and agricultural sectors. Determining ET over large agricultural areas is a limiting factor, due to observational data availability. In this sense, remote sensing data has been used to estimate ET. In this study, we evaluated the MODIS land surface ET product (MOD16) over two rice paddy areas in Southern Brazil, using five years of measurements. Experimental ET was obtained using Eddy Covariance technique (EC). MOD16 ET estimations were evaluated for the central pixel (ET_{cp}) and for an area of 3×3 adjacent pixels ($ET_{3 \times 3}$) around the flux tower. Although EC measurements presented better net radiation (R_n) correlation, ET derived from MODIS showed higher correlation with against air temperature measurements. The MODIS derived ET underestimated the EC measurements, yielding RMSE between 11 and 19 mm 8-day⁻¹ and correlation coefficients between 0.43 and 0.82. The major errors and underestimations occurred during the rice growing season. In general, the product MOD16 ET presented low accuracy when compared against experimental measurements over rice paddy areas in the Southern Brazil, requiring model parameterization adjustments.

Keywords: Evapotranspiration, MOD16, rice paddy.

1. Introduction

Agriculture accounts for approximately 70% of the world water consumption [1]. Determining the evapotranspiration (ET) over large agricultural areas is a challenging task, due to the limited observational data availability in those areas. However, remote sensing techniques have been used to estimate ET over large areas with high accuracy. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) ET product (hereafter called MOD16 ET) has been developed to monitor the temporal and spatial variability of ET over global land surface areas. MOD16 ET was developed by Mu *et al.* [2] and combines MODIS 8-day and 16-day remote sensing data for surface representation and daily meteorological MERRA reanalysis data. Further improvements in MOD16 ET algorithm were made by Mu *et al.* [3], adding the stomatal conductance and aerodynamic variables, among others. Most of the experimental data used for the calibration and validation of this product was obtained from sites over North America (AmeriFlux and FluxNet) between 2000 and 2010.

Validation of MOD16 ET estimations are often performed using Eddy Covariance (EC) measurements [4]. Although the fetch of EC and remote data can be significantly different, some studies focus on validating MOD16 ET for an area of $3 \times 3 \text{ km}^2$ [2,3,5,6], whereas other validates using only the central pixel [7,8]. Recently, Tang *et al.* [6] compared the measurements of EC for an area of $3 \times 3 \text{ km}^2$ and central pixel around the flux tower, finding a better agreement between EC and MOD16 ET for the area average of $3 \times 3 \text{ km}^2$.

MOD16 ET estimations were validated in several land cover and climatological conditions around the world when compared to ET observations. Good correlations for MOD16 ET were found for grassland in the United Kingdom [9]; forests for arid and polar regions in Asia [10]; cropland and grassland in Europe [8]. Nevertheless, several authors have found low correlation of the MOD16 ET data on forests [6,8,11], woodland savannas [7,8], arid and semi-arid regions in the United States [12].

Only a small number of studies have been performed assessing the accuracy of MOD16 ET algorithm over agricultural areas. Tang *et al.* [6] carried out a study on maize, wheat and cotton, in an irrigated system and observed an underestimation of MOD16 ET for several crops. Hu *et al.* [8] verified the performance of the MOD16 ET product on wheat and barley croplands finding reasonable results for Europe. Kim *et al.* [10] validated the MOD16 ET over two rice paddy sites, however one study resulted in underestimation of ET whereas the other presented overestimated values.

Rice is one of the most important cereal crop in the world. Its production occurs generally in natural flooded regions due to its large water consumption demand [13–15]. Brazil is one of the top ten worldwide rice producers, with approximately 12.5 million tons per year and an average production of $5,424 \text{ kg ha}^{-1}$. The state of Rio Grande do Sul, located in Southern Brazil, was responsible for 70% of the total amount produced in the country in 2015. In this region, the rice paddy is cultivated once a year, during spring and summer seasons, leave the remaining soil in fallow for the rest of the year [16].

Vegetation indices derived from remote sensing, such as leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically radiation (f_{par}) are key input information for MOD16 ET estimations. Rice paddy areas present a special spectral behavior due to the interference of water in surface reflectance [17]. The main goal of this research is to evaluate the accuracy of the MOD16 8-day ET estimations using a five-year dataset of half-hourly ET derived from EC flux towers located in two rice paddy fields in Southern Brazil: one year dataset for Paraíso do Sul (PS) and four years dataset for Cachoeira do Sul (CS). MOD16 ET estimations were evaluated in two similar ways: firstly, ET observations were compared to a 1 km pixel, corresponding to the flux tower location (ET_{cp}) and secondly, ET observations were compared to an area-average of 3×3 pixels ($\text{ET}_{3 \times 3}$) centered around the flux tower. We also analyzed the correlation between MOD16 ET estimations and observed atmospheric variables (net radiation, global radiation and air temperature) to understand what controls the ET algorithm.

2. Materials and Methods

2.1. Site description

Atmospheric data collected from two rice paddy sites in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, was used in this work (Figure 1). The Paraíso do Sul (PS) experimental site ($29^{\circ}44'39.6''$ S; $53^{\circ}8'59.8''$ W; 108 m) is located in an area of approximately 50 hectares (ha) with the wind direction predominantly southeast, and Cachoeira do Sul (CS) ($30^{\circ}16'37.59''$ S; $53^{\circ}8'52.25''$ W; 40.5 m) in an area of approximately 1000 hectares (ha) with the wind direction predominantly east. In both sites, the rice paddy is cultivated over large lowland areas, with a flooding irrigation system. After the rice harvesting, the soil remains with spontaneous vegetation (fallow period), without crop rotation. The climate is classified as Cfa subtropical humid (according to Köppen climate classification [18]).

The period of analysis for the PS experimental site was from July 2003 to July 2004, with rice cultivated at the end of November 2003 and harvested at the beginning of April 2004. The measurements for the CS experimental site span from January 2011 to December 2014, with rice cultivated between October and November and harvested between March and April. In both experimental sites, 30 days after seeding, the rice crop was flooded with an approximately 0.07 m water layer, that was maintained until the harvesting. During the other periods, the areas were kept fallow and the soil continued near saturation throughout the time due to the high precipitation rates and high water table.

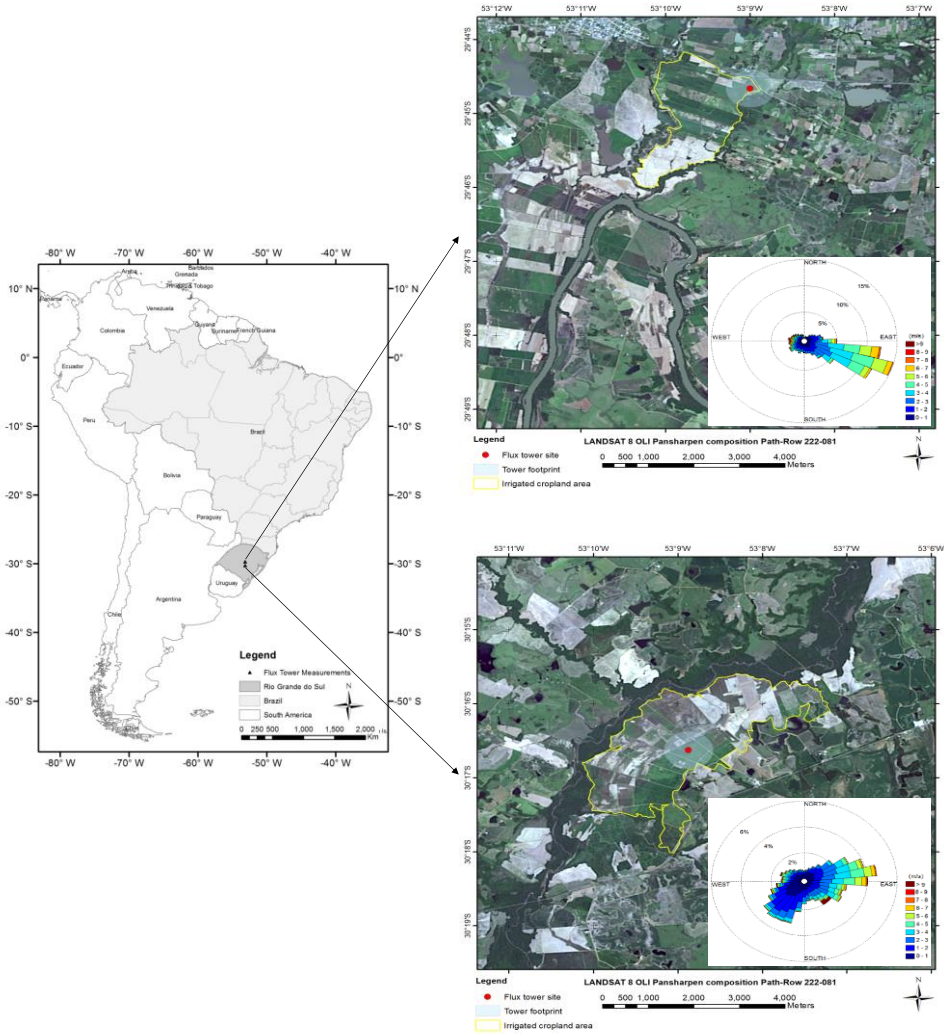


Figure 1. Rice Paddy sites location in South America with the windroses: (a) Paraíso do Sul (PS) and (b) Cachoeira do Sul (CS). The yellow line show the rice paddy limits.

2.2. Meteorological and flux measurements

During the period of study, the PS and CS experimental sites were equipped with a flux tower measuring atmospheric variables and surface fluxes. Air temperature, wind speed components and H₂O concentration were measured in high frequency to compute the vertical fluxes obtained by EC technique.

The PS flux tower was equipped with: 3D sonic anemometer (10 m, CSAT3; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah) to measure the wind components and open gas analyzer (10 m, LI-7500; LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) measuring the H₂O concentration measured in 16 Hz frequency; besides temperature and relative humidity variables (10 m, HMP45C-L; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), precipitation (10 m, TB4 Rain Gauge; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), radiation balance (8 m, NR LITE; Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands), global radiation (8 m; Kipp & Zonen-CM6B Pyranometer), soil temperature (-0.02 and -0.05 m; STP01 Hukseflux Thermal Sensors) and ground heat flux at 0.07 m (HFP01SC-L; Hukseflux Thermal Sensors, Delft, The Netherlands), measured in 1 min frequency. Further details are described in [16,19,20].

In the CS site, the following variables were measured: wind speed components and air temperature with 3D sonic anemometer (3 m; CSAT3; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), the H₂O concentration with an open gas analyzer (3 m, LI-7500; LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska), in high frequency (10 Hz), and also precipitation (6 m, Campbell Scientific - CSI Model TB4 Rain gauge), radiation balance (3.4 m; Kipp & Zonen NR LITE) and global radiation (6 m; Kipp & Zonen - CMB6), measured in 1 min frequency.

The gaps in the meteorological measurements (air temperature and global radiation) were filled using a simple linear regression scheme to CS, with data from a nearby meteorological station (OMM-86977) from the National Weather Service (INMET), located approximately 80 km from CS. In PS the gap was less than three hour and a linear interpolation was used.

2.3. ET experimental data processing

The experimental latent heat flux (*LE*), estimated through the EC technique, was used to compute the ET measurement. The EC technique estimates surface fluxes using the covariance between vertical wind speed measurements and water concentration in the atmosphere (or air temperature) to estimate the latent heat flux (or sensible heat flux, *H*). The EddyPro Advanced (5.1, LI-COR version) software was used to process the flux data employing the following configuration: Spikes in the time series were eliminated following [21]; block average method was used to calculate turbulent fluctuations and the double rotation method was used to nullify the average cross-stream and components of the wind velocity [22]; Spectral losses in the low frequency [23]; spectral losses in the high frequency range [24].

The footprint of EC was calculated by the software EddyPro using the methodology propose by Kljun *et al.* (2004). The fetch was greater than 200 m for CS and 470 m for PS in all directions. The location of flux tower was homogeneous for both site, however the footprint analyses was not necessary to filter any flux data.

The *LE* and *H* were filtered from spurious values [25], in which values of $-50 \text{ W m}^{-2} > LE > 650 \text{ W m}^{-2}$ and $-70 \text{ W m}^{-2} > H > 300 \text{ W m}^{-2}$ were removed from the analysis. During the night period, $LE > 100 \text{ W m}^{-2}$ was also removed. During precipitation periods, *LE* and *H* values were excluded. After the data filtering, including malfunctioning periods, the total gap was 30.1% and 29.15% for *LE* data for PS and CS, respectively. These percentage of gaps are similar of others works in rice paddy [16,26,27]. Gap filling for *H* and *LE* fluxes missing data was performed through the REddyProc package available to the RStudio software version, using the following entry data: *LE*, *H*, air temperature, global radiation. This package was developed using the proposed methods by Reichstein *et al.* [28].

Several studies show the imbalance between turbulent fluxes ($H + LE$) and available energy ($R_n - G$; R_n is the net radiation and G the soil heat flux). This difference varies between 10 and 30%. Many authors suggest the necessity of adjustment in the values of *H* and *LE* [14,29–31]. The energy balance

closure can be forced using the Bowen ratio technique, defined as $\beta = H/LE$ [32]. The residual available energy (RAE) is distributed between H and LE using the following equations:

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (1)$$

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2)$$

where R_n is the net radiation at the crop surface ($W m^{-2}$), G is the soil heat flux ($W m^{-2}$). For the PS site the soil heat flux, G , was estimated through the sum of ground heat flux (F_g) and heat storage in the soil and water layer (ΔG). In this work, ΔG was estimated according to [16], using:

$$\Delta G = \frac{c_s \Delta T_5 dz_s}{dt} + \frac{c_a \Delta T_2 dz_a}{dt} \quad (3)$$

where c_s is the volumetric heat capacity of soil ($3.03 MJ m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$) and c_a is the volumetric heat capacity of water ($4.186 MJ m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$), ΔT_5 and ΔT_2 are the soil temperature variation at depth 5 cm and 2 cm, respectively, dt is the time step; dz_s is the soil layer above the soil temperature sensor and dz_a is the water layer. The heat storage in the water layer was calculated only for the flooded period. The values of F_g and ΔG represent 1.15% and 0.74% of the total R_n , respectively, for the PS site. For the CS site, the F_g and ΔG variables was not available. However, we estimate G for CS, using the linear regression between G vs. R_n ($G = 0.22R_n - 19$) obtained with PS data

After correcting the LE values, daily ET was estimated using:

$$ET = 10^{-9} \left(\frac{LE}{\rho_a \lambda} \right) \quad (4)$$

where λ is latent heat for vaporization ($2.45 \times 10^6 J Kg^{-1}$) and ρ_a is the air density ($998.21 Kg m^{-3}$), both at the standard temperature ($20 \text{ } ^\circ C$), obtaining the final result in the millimeters per day.

2.4. MOD16 Data – Global Evapotranspiration Product

Several techniques using remote images have been developed to monitor ET rate over large areas. The MOD16 algorithm was created with the goal of monitoring the water vapor rate that is lost from the surface. This product was developed by Mu *et al.* [2], adapting the Cleugh *et al.* [33] algorithm tested in Australia, based in the Penman-Monteith method for the latent heat flux, LE , using the following equation (in units of $W m^{-2}$):

$$LE = \frac{sA + \rho C_p (e_{sat} - e) / r_a}{s + \gamma (1 + (r_s / r_a))} \quad (5)$$

where e is the actual water vapor pressure (Pa), e_{sat} is the saturated water vapor pressure (Pa), $s = d(e_{sat})/dT$ vapor pressure curve inclination ($Pa K^{-1}$), A is the energy available ($W m^{-2}$), ρ is the air density ($Kg m^{-3}$), C_p is the specific air heat in constant pressure ($J Kg K^{-1}$), r_a is the aerodynamic resistance ($s m^{-1}$), r_s is surface resistance ($s m^{-1}$), γ is the psychrometric constant ($Pa K^{-1}$). The evapotranspiration is calculated using the eq. (5) in eq. (4).

The first version of MOD16 ET [2] only considered the sum of evaporation from moist soil and transpiration from the vegetated areas during daytime. Improvements in MOD16 ET algorithm [3] resulted in the use of vegetation cover fraction to quantify the energy partition between soil and vegetation to compute soil and canopy evaporation and plant transpiration during daytime and nighttime.

MOD16 inputs are based on the following remote sensing data: MCD12Q1 (Land cover classification/Land Cover Change), MOD15A2 (LAI and fpar), MCD43B2/B3 (albedo), with resolution between 500 and 1000 meters. Meteorological inputs from Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications from the Global Modelling and Assimilation Office (MERRA GMAO) with spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.6^\circ$ [34] include air temperature (minimum, maximum and average), vapor pressure and shortwave incident radiation. The MOD16 final product provides 8-day, monthly and annual potential and actual LE and ET , with spatial resolution of 1 km. MOD16 ET estimations are freely available at <http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod16>, and was used in this work.

2.5. Statistical Analysis

MOD16 ET was centered in the same pixel where the flux tower is positioned and computed in two different forms: the central pixel, or $1 \times 1 \text{ km}^2$, (ET_{cp}) and the average over $3 \times 3 \text{ km}^2$ MODIS pixels ($ET_{3 \times 3}$). The daily ET measurements were accumulated in eight-day intervals corresponding to the MOD16 intervals. In order to evaluate the accuracy of the remote ET , we used:

$$r \text{ (correlation coefficient):} \quad r = \frac{\sum(EC_i - \overline{EC})(ET_{M_i} - \overline{ET_M})}{\sqrt{(\sum(EC_i - \overline{EC})^2)(\sum(ET_{M_i} - \overline{ET_M})^2)}} \quad (6)$$

$$\text{RMSE (root mean square error):} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum(EC - ET_M)^2}{N}} \quad (7)$$

$$\text{BIAS:} \quad BIAS = \frac{\sum(ET_M - EC)}{N} \quad (8)$$

$$\text{PBIAS (percent BIAS):} \quad PBIAS = \frac{BIAS}{\left(\frac{1}{N}\right)\sum EC} \times 100 \quad (9)$$

where EC is the ET measurement obtained by Eddy Covariance technique, ET_M is the MOD16 products and N is the sample number of samples.

3. Results

3.1. Comparison between 8-day MOD16 ET estimations and EC observations

The performance of MOD16 8-day ET products, at the central pixel (ET_{cp}) and at a $3 \times 3 \text{ km}^2$ ($ET_{3 \times 3}$) area were compared against EC estimated from two flux towers measurements over rice paddy areas in Southern Brazil (Table 1 and Figure 2). The period used for the analysis in the PS was from 2003 to 2004 whereas in the CS, the analyzes were performed from 2011 to 2014. The highest correlations (r), between the EC measurements and MOD16 ET estimations were found at the PS site, yielding r of 0.82 and 0.73 for ET_{cp} and $ET_{3 \times 3}$, respectively. At the CS site, the highest correlations and the lowest RMSE occurred during 2011 and 2012 ($r \sim 0.70$ for both years, with RMSE between 11.85 and 13.60 mm 8-day⁻¹). The lowest correlation and the highest RMSE occurred during the year 2013 for ET_{cp} and $ET_{3 \times 3}$.

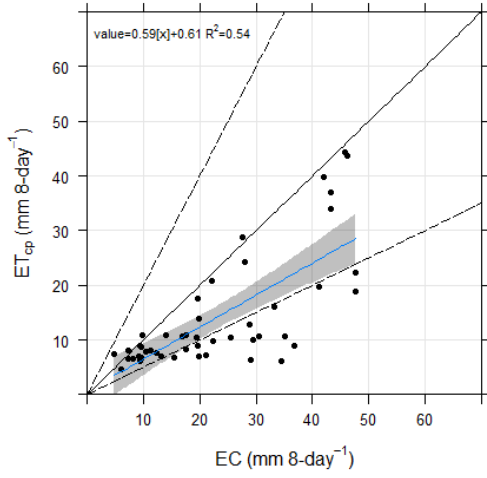
For all periods analyzed at PS and CS, BIAS and PBIAS showed negative values, resulting in overall underestimation of MOD16 ET for rice paddies. CS presented the lowest PBIAS and BIAS values that occurred during 2011 and also the highest values that were found during 2014 and 2012 for $ET_{3 \times 3}$ and ET_{cp} , respectively, as show on Table 1.

Table 1. Statistics comparing MOD16 ET (ET_{cp} and ET_{3x3}) with EC measurements in two rice paddy sites in Southern Brazil.

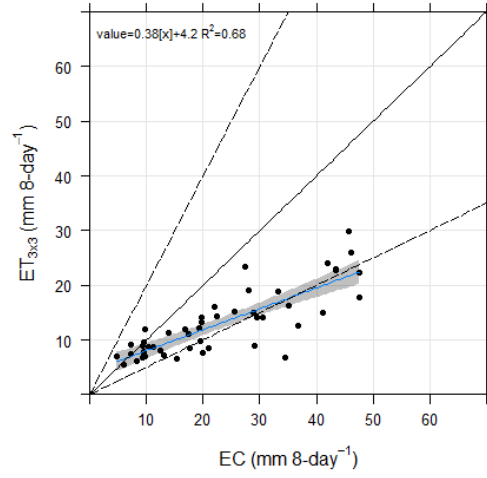
Site	Period	r		RMSE (mm 8-day ⁻¹)		PBIAS (%)		BIAS (mm 8-day ⁻¹)	
		3x3	cp	3x3	cp	3x3	cp	3x3	cp
PS	2003-2004	0.82	0.73	13.09	12.46	-43.3	-38.8	-9.80	-8.78
CS	2011-2014	0.59	0.56	14.85	15.62	-43.5	-33.9	-10.67	-8.30
CS	2011	0.70	0.72	11.85	12.70	-37.2	-21.0	-8.33	-4.71
CS	2012	0.70	0.69	13.60	13.44	-45.0	-43.0	-10.29	-9.83
CS	2013	0.45	0.43	17.02	18.90	-44.6	-34.6	-11.48	-8.91
CS	2014	0.55	0.50	16.35	16.64	-46.4	-36.1	-12.56	-9.78
PS	Fallow	0.67	0.42	8.39	9.74	-37.1	-44.2	-5.57	-6.64
PS	Rice	0.60	0.57	18.42	16.00	-47.7	-34.9	-16.85	-12.35
CS	Fallow	0.65	0.52	8.09	8.89	-39.1	-42.5	-6.19	-6.72
CS	Rice	0.06	0.09	21.24	22.12	-46.2	-28.5	-17.33	-10.67

The evaluation of MOD16 ET was also performed separately for the fallow period and rice growing season, as presented on Table 1. The highest r and the lowest RMSE occurred for ET_{3x3} during the fallow period at both sites. The lower PBIAS and BIAS were also found in this same period, with ET_{3x3} showing better results in comparison to ET_{cp} . During the PS rice growing season, the highest correlation occurred for ET_{3x3} whereas lower RMSE, PBIAS and BIAS were observed for the ET_{cp} . The CS rice growing season was also performed by grouping the information set from 2011 to 2014. Low correlation along with larger errors and expressive values of PBIAS and BIAS were found during this period. The difference in the underestimation of ET_{3x3} in relation to ET_{cp} were around 17% and 7 mm 8-day⁻¹ for PBIAS and BIAS, respectively.

Paráíso do Sul

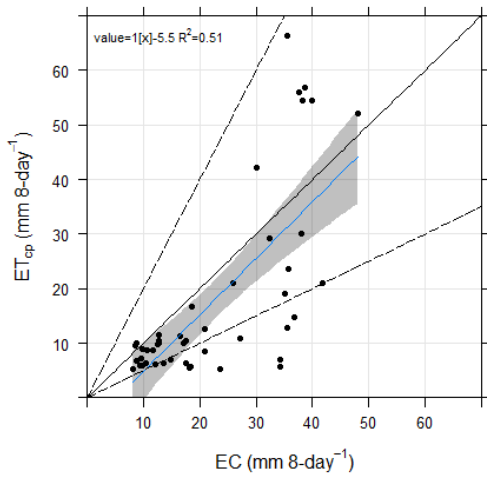


(a)

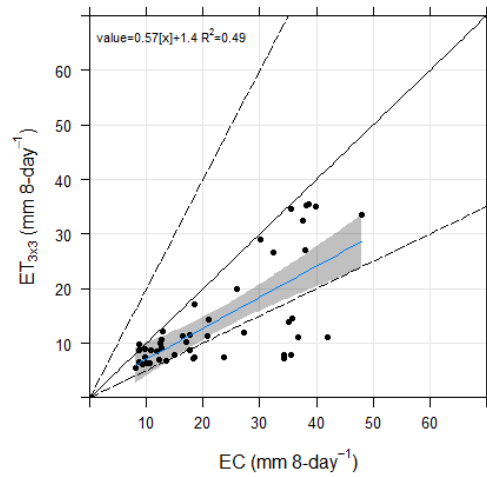


(b)

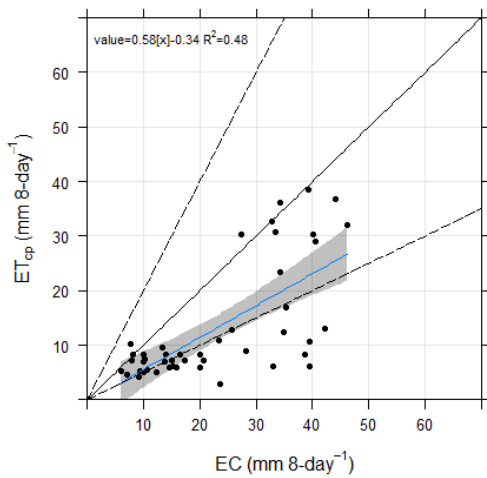
Cachoeira do Sul



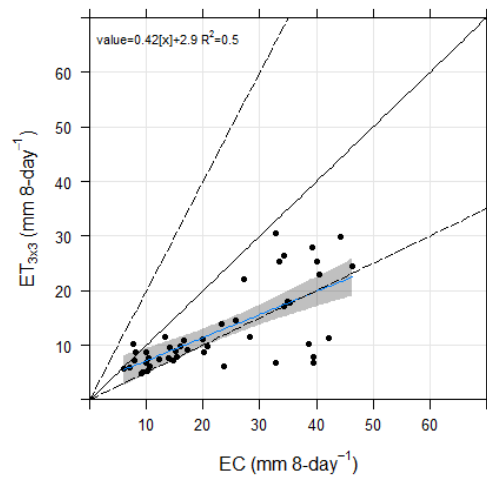
(c)



(d)



(e)



(f)

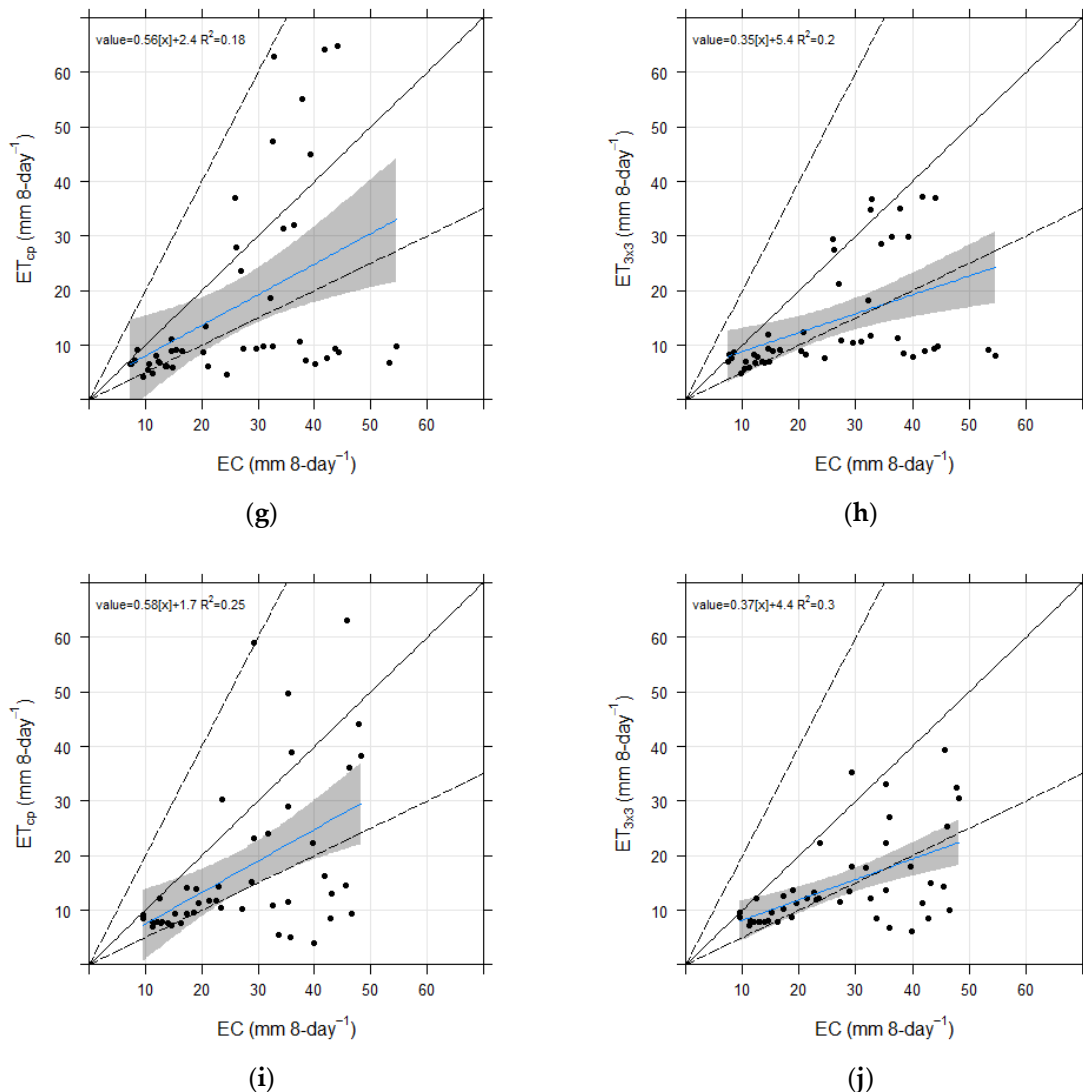


Figure 2. ET Scatterplots for MOD16 ET with EC measurements for different years. PS Site for years 2003-2004: (a) central pixel (ET_{cp}); (b) 3 x 3 pixel (ET_{3x3}). CS Site: (c) central pixel (ET_{cp}) year 2011; (d) 3 x 3 pixel (ET_{3x3}) year 2011; (e) central pixel (ET_{cp}) year 2012; (f) 3 x 3 pixel (ET_{3x3}) year 2012; (g) central pixel (ET_{cp}) year 2013; (h) 3 x 3 pixel (ET_{3x3}) year 2013; (i) central pixel (ET_{cp}) year 2014; (j) 3 x 3 pixel (ET_{3x3}) year 2014. Solid blue line represents the linear fit of the data and the hachured area represent 95% confidence intervals. The equation of the line and R² value is also shown. For reference, the 1:1 line is solid black line and the 1:0.5 and 1:2 lines are dashed.

3.2. Seasonality in ET estimations

The temporal variability of the atmospheric variables (air temperature, global radiation and net radiation), ET measurement and MOD16 ET products for PS and CS sites are presented in Figure 3. Through the years, the atmospheric variables present similar behavior (Figure 3b-d). PS site, EC is greater than ET_{3x3} and ET_{cp} during most of the period (Figure 3a). During the maximum plant development period (January-February), EC measurement reached maximum values of 48 mm 8-day⁻¹, while ET_{cp} and ET_{3x3} showed maximum values of 44.4 and 30 mm 8-day⁻¹, respectively. During the spring fallow (September to November) the greatest differences between EC and MOD16 ET, where values were above 10 mm 8-day⁻¹, were observed (EC > ET_{3x3} > ET_{cp}). Furthermore, during the winter

fallow months (May to August), MOD16 ET products showed similar behavior when compared to the EC measurements. In general, the seasonality of the ET measurements and MOD16 ET for PS are similar to CS (Figure 3a-c). However, as shown in Figure 3c, during the maximum plant development period, the ET_{cp} values were higher than the measurements taken in CS, reaching differences of up to $15 \text{ mm } 8\text{-day}^{-1}$. This behavior occurred during all growing season, except for 2012. Observing the atmospheric variables for January and February 2012 for CS (Figure 3d), we can see the lower values for net radiation and global radiation compared to the other years. It can be connected to the low values of MOD16 ET in this period, once these variables are input data into the ET model (eq. 5).

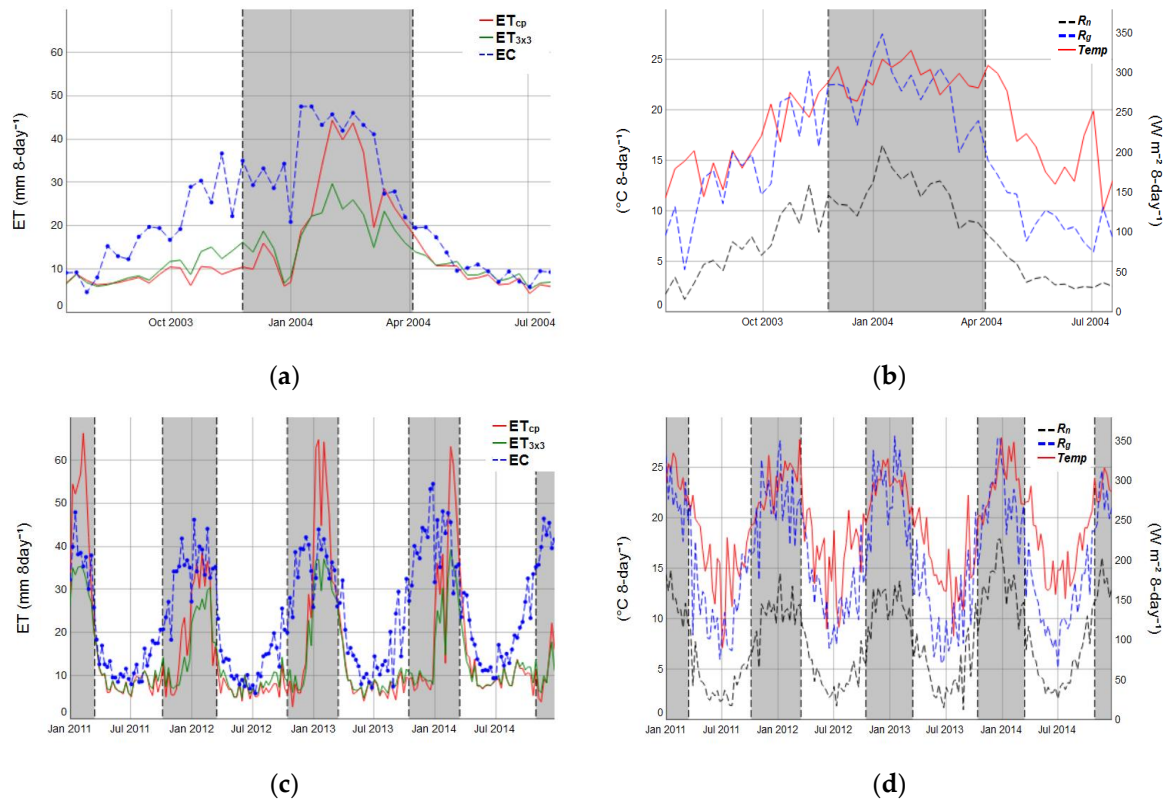


Figure 3. Temporal evolution of central pixel (ET_{cp}), 3×3 pixel ($ET_{3 \times 3}$) and 8 days cumulated experimental ET (EC) for: (a) PS and (c) CS. Temporal evolution of atmospheric variables: net radiation (R_n), global radiation (R_g) and air temperature ($Temp$) for: (b) PS and (d) CS. The hatched areas indicate the rice growing seasons.

EC and MOD16 ET integrated monthly were also evaluated as shown in Figure 4. In the PS (Figure 4a), higher correlation of $ET_{3 \times 3}$ and EC based on 8-day intervals were found, with R^2 equal to 0.87. When ET_{cp} and $ET_{3 \times 3}$ measurements were compared with respect to the 1:1 line we noticed, as well as in Figure 3a, an underestimation of the MOD16 ET data when compared to the ET measurements from the flux tower, except for the months of May, June and July, where the results were on the 1:1 line. The same behavior was found in CS (Figure 4b). The rice harvest occurs, in general, in April, and the crop residual is not removal from the soil surface. During the months May, June and July the straw layer is not easy degraded because the low air temperature. Therefore, in this period, the land cover is homogeneous over the rice field, leaving more accurate the remote measures of vegetation index. During the months of maximum crop development, ET_{cp} estimates were the closest to the observations. Throughout the analyzed period $ET_{3 \times 3}$ was lower than the observed values or by the central pixel, except for the months

of September and October as seen in Figure 4b. Additionally, during January the ET_{cp} values were close to the 1:1 line whereas during February it was mostly overestimated.

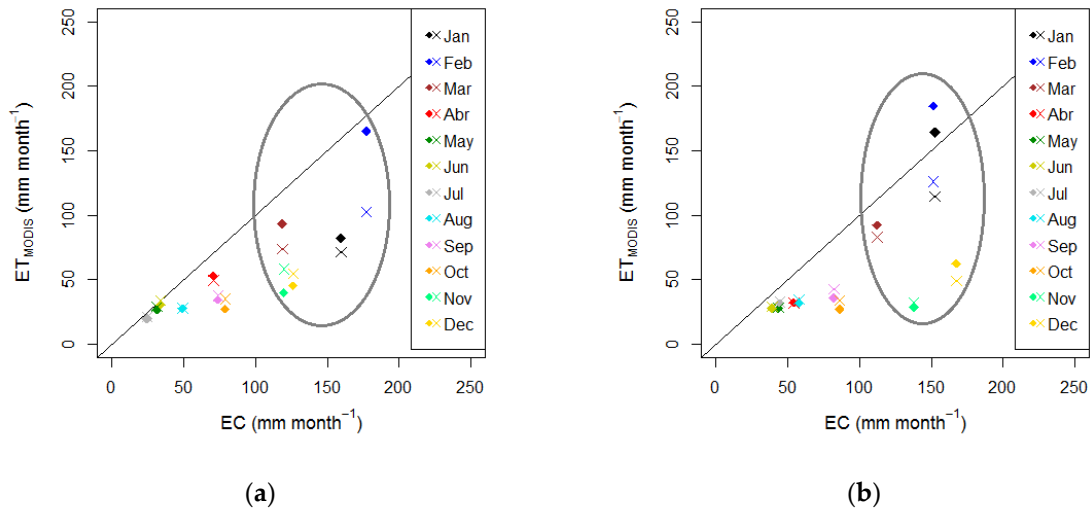


Figure 4. Monthly comparison of EC measurements and ET MOD16 (ET_{MODIS}), (×) for ET_{3x3} , (◆) for ET_{cp} . (a) PS and (b) CS rice paddy sites. The gray circle cover the rice growing season months.

The accumulated EC measurements and MOD16 ET products for the study areas are presented in Table 2. The climatological precipitation for both CS and PS regions is $1477 \text{ mm year}^{-1}$ nevertheless, during most of the period studied, precipitation was above the climatic average. The annual EC ET for PS was $1087.4 \text{ mm year}^{-1}$ and the four-year average in CS was $1128.8 \text{ mm year}^{-1}$, representing a difference of less than 4% when compared the two sites. Comparing the annual ET estimations with EC ET, we found differences that ranged from 21 to 57%. The smallest ET_{cp} underestimation in the CS occurred during 2011 ($216.8 \text{ mm year}^{-1}$) whereas the largest difference was observed for ET_{3x3} in CS during 2014 ($578.0 \text{ mm year}^{-1}$).

Table 2. Annual MOD16 ET, EC measurements for rice paddy sites in Southern Brazil.

Site	Year	ET_{3x3} (mm year^{-1})	ET_{cp} (mm year^{-1})	EC (mm year^{-1})
PS	2003-2004	616.8	665.9	1087.4
CS	2011	647.9	814.5	1031.3
CS	2012	578.1	599.4	1051.7
CS	2013	657.5	776.0	1185.8
CS	2014	668.3	796.3	1246.3

3.3. Key environmental controls on ET

We evaluated the cross-correlation coefficient (r) between ET and atmospheric variables: net radiation (R_n), global radiation (R_g) and air temperature ($Temp$) (Table 3). Vapor pressure deficit (VPD), wind speed (WS) and precipitation were excluded from the analyses because these variables presented r lower than 0.4 for different ET estimation methods. R_n presented a good correlation with respect to EC ET, for both sites. Furthermore, R_g and $Temp$ are also well correlated with EC. The same results were

found by Fang *et al.* [4] for different land cover types. MOD16 ET shows better correlation with *Temp*, followed by R_n and R_g for both sites. The correlation values were similar for both sites, showing no significant differences.

Table 3. Cross Correlation coefficients between the EC measurements, MOD16 ET products and atmospheric variables for two rice paddy sites in Southern Brazil.

	ET _{3x3}	ET _{cp}	EC	<i>Temp</i>	R_g	R_n
PARAÍSO DO SUL						
ET _{3x3}	1	0.93	0.82	0.76	0.66	0.73
ET _{cp}	0.93	1	0.73	0.63	0.54	0.61
EC	0.82	0.73	1	0.77	0.92	0.96
<i>Temp</i>	0.76	0.63	0.77	1	0.73	0.80
R_g	0.66	0.54	0.92	0.73	1	0.98
R_n	0.73	0.61	0.96	0.80	0.98	1
CACHOEIRA DO SUL						
ET _{3x3}	1	0.97	0.59	0.60	0.54	0.54
ET _{cp}	0.97	1	0.56	0.56	0.51	0.50
EC	0.59	0.56	1	0.83	0.91	0.96
<i>Temp</i>	0.60	0.56	0.83	1	0.79	0.84
R_g	0.54	0.51	0.91	0.79	1	0.95
R_n	0.54	0.50	0.96	0.84	0.95	1

4. Discussion

Evapotranspiration in irrigated crops is the largest consumer of available energy (R_n), consuming about 60 to 80% of the R_n during the growing season [35]. In rice paddy areas, irrigation occurs by flooding the area, and therefore, ET is expected to represent even larger portions of R_n . In this study, during the rice growing season, ET (or *LE*) represented 88% and 89% of the R_n in PS and CS, respectively. Rice fields in Southern Brazil are usually part of a larger area of lowlands within a river basin. In this system, the fallow period had great importance for the partition of the annual energy available. During the fallow periods ET represented 87% and 91% of the R_n for PS and CS, respectively. The validation of the MODIS ET estimations over the rice paddy sites studied here showed discrepancies with respect to the EC measurement data. Although MODIS ET presents similar seasonal behavior with respect to the ET measurement, the remote data underestimated the flux tower information. Kim *et al.* [10], validated these products on two rice paddy cropland sites, for the localized site in Korea and found that MOD16 overestimates the experimental values, whereas in a localized site in Japan the opposite occurs, with RMSE of 6.12 and 10.69 mm 8-day⁻¹, respectively. The RMSE of the data analyzed here are larger than those found in Kim *et al.* [10] for irrigated rice in Asia. Hu *et al.* [8] validated the MOD16 ET product over Europe using several flux towers, finding a mean RMSE value of 0.76 mm day⁻¹ (6.08 mm 8-day⁻¹) and BIAS ranging from -0.93 to 1.11 mm day⁻¹ with an average value of 2 mm 8-day⁻¹. For arid regions, Ramoelo *et al.* [7], validated MOD16 ET point data with in situ measurements in South Africa, where R² values ranged from 0.26 to 0.85 and RMSE less than 9 mm 8-day⁻¹. Velpuri *et al.* [12] validated the monthly data of the MOD16 product for the United States, finding R² values ranging from 0.16 to 0.6 and RMSE of 29.5 mm month⁻¹, representing an error of approximately 8 mm 8-day⁻¹.

The high availability of water in rice paddy regions increases the specific atmospheric humidity near the surface, causing low values of *VPD* [16] decreasing the water demand of the atmosphere. However, according to the results presented here (section 3.2), *VPD* and also precipitation do not present significant correlation with ET (experimental or MOD16 ET) when compared to the other environmental variables. R_n and R_g were highly correlated with experimental ET, while MOD16 ET present higher correlation with air temperature.

Discrepancies between MOD16 ET and EC can be related to various factors, including flux tower measurement error, flux tower footprint *vs.* MODIS pixel size, the land cover parameterization of the Penman-Monteith equation, as well as the limitations of the algorithm, most of which were identified by [2,3,10]. Particularly, the cause of underestimation observed in this study may be associated with the poor parameterization of the available energy in the eq. (5).

Power outages, occurrence of precipitation, noises in the sensor, among others, causes gap in data and may impair the quality of the experimental data. To obtain daily or seasonal integrations, gap filling of the data is necessary as many scientists suggest in the literature. Here, we used a well-known method to minimize these problems [28]. In addition, uncertainties regarding energy balance closure may influence surface measurements. We did not have measurements of ground heat flux (F_g) in CS site, then the soil heat flux (G) was estimated through a simple linear regression from the PS data with intention of minimize uncertainties. Despite G represents a small contribution to the energy balance, it can affect the distribution of the closure of energy balance, overestimating ET obtained by EC technique [29].

The MOD16 ET is estimated using the Penman-Monteith (PM) equation. Ramoelo *et al.* [7] and Kim *et al.* [10] did a consistent discussion about the problems involving the comparison between experimental and remote estimated ET. For the evaluation proposed here, we can point that remote sensing surface inputs (LAI, fpar and albedo) MOD16 algorithm and the water layer in the surface are the main problem. LAI has a spatial resolution of 1 km. Land cover classification at the PS site is represented by 4 types of classes (woodland savanna, grasslands, croplands, cropland/natural vegetation mosaic) and at the CS site land cover it is represented by 5 different classes (woodland savanna, savanna, grasslands, croplands, cropland/natural vegetation mosaic). There is no information about the irrigated cropland in these classifications. During the beginning of the crop growing season, the pixels may present mixtures of information with the total amount of liquid water in vegetation and soil background (Simms *et al.*, 2007), compromising the data quality of ET obtained remotely. The mixture in the classification of the surface cover may lead to inaccuracies in the fpar/LAI data values, used as input parameters in the MOD16 ET algorithm. This problem is also reported by Kim *et al.* [10], validating MOD16 product for different types of cover in Asia. Teluguntla *et al.* [17], reports that studies with rough spatial and temporal resolution for remote observations are an important source of error in the identification of irrigated rice crops. Even the study area in PS is smaller than in CS, PS presented better modeled values of MOD16 ET.

5. Conclusions

The accuracy of the product of MOD16 ET for Southern Brazil was evaluated using two flux towers located in rice paddy areas, using the EC technique. Two methods of comparison to obtain MOD16 ET estimations were evaluated: central pixel (ET_{cp}) and an area of 3×3 pixels ($ET_{3 \times 3}$). MOD16 algorithm underestimate ET when compared to EC measurements. It can be related to the heterogeneity of the land cover, directly affecting the vegetation indexes and other remote sensing estimations. The results presented RMSE ranging from 11.85 to 17.02 and 12.46 to 18.90 mm 8-day⁻¹ for $ET_{3 \times 3}$ and ET_{cp} , respectively, in the annual database. EC present highest correlation with R_n and R_g , while MOD16 ET presented better correlation with air temperature. The largest differences between the observed ET and MOD16 ET were found during the growing season, probably due to the water layer on the surface. In general, the largest underestimates were found at the 3×3 km² areas.

The rice paddy in Southern Brazil is cultivated in natural floodplains of rivers, generally no larger than a 1 km width. We suggest ET_{cp} better match the EC measurements. Improvements related to MOD16 ET algorithm and remote sensing inputs (LAI, albedo and land cover classification) must be taken into account, since the larger amplitudes of the ET are associated to the rice development phase. Finally, it is recommended an adjustment in the parameterization of MOD16 ET data over irrigated rice areas in Southern Brazil for improvement in ET estimates and water resources management in that region. More specifically, a thorough study that leads to an improvement in the parameterization of the

available energy in the Penman-Monteith equation is a key factor to bring MOD16 ET closer to the experimental ET over irrigated regions.

Acknowledgments: The authors acknowledge the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq - Brazil), the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES - Brazil), Foundation for Research of Rio Grande do Sul State (FAPERGS), Support Foundation of the Federal University of Rio Grande do Sul (FAURGS – Brazil), Financier of Studies and Projects (FINEP - Brazil) and NASA for the project “Integrating NASA Earth Sciences Research Results into Decision Support Systems for Agriculture and Water Management in South America” (Grant NNH08ZDA001N-DECISIONS) for their financial support.

Author Contributions: V.A.S. processed the remote sensing data, and wrote the manuscript. V.A.S, T.Z. and M.B.D collected, processed and analyzed the Eddy Covariance data. O.L.L.M. and D.R.R. conceived and designed the experiments. D.R.R. and R.C.M.A. supervised and advised all the research work that led to this paper. D.R.R., L.G.G.G. and A.R. reviewed the manuscript and conducted the English editing.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Rosegrant, M. W.; Cai, X. Global Water Demand and Supply Projections Part 2. Results and Prospects to 2025. *2002*, *27*, 170–182.
2. Mu, Q.; Heinsch, F. A.; Zhao, M.; Running, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* 2007, *111*, 519–536.
3. Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 2011, *115*, 1781–1800.
4. Fang, Y.; Sun, G.; Caldwell, P.; McNulty, S. G.; Noormets, A.; Domec, J.-C.; King, J.; Zhang, Z.; Zhang, X.; Lin, G.; Zhou, G.; Xiao, J.; Chen, J. Monthly land cover-specific evapotranspiration models derived from global eddy flux measurements and remote sensing data. *Ecohydrology* 2016, *9*, 248–266.
5. Ruhoff, A. L.; Paz, A. R.; Collischonn, W.; Aragao, L. E. O. C.; Rocha, H. R.; Malhi, Y. S. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. *Remote Sens.* 2012, *4*, 703–725.
6. Tang, R.; Shao, K.; Li, Z. L.; Wu, H.; Tang, B. H.; Zhou, G.; Zhang, L. Multiscale Validation of the 8-day MOD16 Evapotranspiration Product Using Flux Data Collected in China. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2015, *8*, 1478–1486.
7. Ramoelo, A.; Majozi, N.; Mathieu, R.; Jovanovic, N.; Nickless, A.; Dziki, S. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sens.* 2014, *6*, 7406–7423.
8. Hu, G.; Jia, L.; Menenti, M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sens. Environ.* 2015, *156*, 510–526.
9. Srivastava, P. K.; Han, D.; Islam, T.; Petropoulos, G. P.; Gupta, M.; Dai, Q. Seasonal evaluation of evapotranspiration fluxes from MODIS satellite and mesoscale model downscaled global reanalysis datasets. *Theor. Appl. Climatol.* 2016, *124*, 461–473.
10. Kim, H. W.; Hwang, K.; Mu, Q.; Lee, S. O.; Choi, M. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. *KSCE J. Civ. Eng.* 2012, *16*, 229–238.
11. Jang, K.; Kang, S.; Lim, Y.-J.; Jeong, S.; Kim, J.; Kimball, J. S.; Hong, S. Y. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013, *118*, 12,927–12,940.
12. Velpuri, N. M.; Senay, G. B.; Singh, R. K.; Bohms, S.; Verdin, J. P. A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: Using point and gridded FLUXNET and water balance ET. *Remote Sens. Environ.* 2013, *139*, 35–49.
13. Hatala, J. A.; Detto, M.; Sonnentag, O.; Deverel, S. J.; Verfaillie, J.; Baldocchi, D. D. Greenhouse gas (CO₂, CH₄, H₂O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento-San Joaquin Delta. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2012, *150*, 1–18.

14. Alberto, M. C. R.; Wassmann, R.; Hirano, T.; Miyata, A.; Hatano, R.; Kumar, A.; Padre, A.; Amante, M. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. *Agric. Water Manag.* 2011, 98, 1417–1430.
15. Tuong, T. P.; Bouman, B. A. M. Rice production in water-scarce environments. In *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*; CABI: Wallingford; pp. 53–67.
16. Timm, A. U.; Roberti, D. R.; Streck, N. A.; de Gonçalves, L. G. G.; Acevedo, O. C.; Moraes, O. L. L.; Moreira, V. S.; Degrazia, G. A.; Ferlan, M.; Toll, D. L. Energy partitioning and evapotranspiration over a rice paddy in Southern Brazil. *J. Hydrometeorol.* 2014, 15, 1975–1988.
17. Teluguntla, P.; Ryu, D.; George, B.; Walker, J.; Malano, H. Mapping Flooded Rice Paddies Using Time Series of MODIS Imagery in the Krishna River Basin, India. *Remote Sens.* 2015, 7, 8858–8882.
18. Peel, M. C.; Finlayson, B. L.; McMahon, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007, 11, 1633–1644.
19. Acevedo, O. C.; Moraes, O. L. L.; Degrazia, G. A.; Medeiros, L. E. Intermittency and the Exchange of Scalars in the Nocturnal Surface Layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 2006, 119, 41–55.
20. Acevedo, O. C.; Moraes, O. L. L.; Degrazia, G. A.; Fitzjarrald, D. R.; Manzi, A. O.; Campos, J. G. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? *Agric. For. Meteorol.* 2009, 149, 1–10.
21. Vickers, D.; Mahrt, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1997, 14, 512–526.
22. Wilczak, J. M.; Oncley, S. P.; Stage, S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorol.* 2001, 99, 127–150.
23. Moncrieff, J.; Clement, R.; Finnigan, J.; Meyers, T. Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. In *Handbook of Micrometeorology*; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht; pp. 7–31.
24. Moncrieff, J. B.; Massheder, J. M.; de Bruin, H.; Elbers, J.; Friborg, T.; Heusinkveld, B.; Kabat, P.; Scott, S.; Soegaard, H.; Verhoef, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *J. Hydrol.* 1997, 188–189, 589–611.
25. Foken, T.; Leuning, R.; Oncley, S. R.; Mauder, M.; Aubinet, M. Corrections and Data Quality Control. In *Eddy Covariance*; Springer Netherlands: Dordrecht, 2012; pp. 85–131.
26. Alberto, M. C. R.; Buresh, R. J.; Hirano, T.; Miyata, A.; Wassmann, R.; Quilty, J. R.; Correa, T. Q.; Sandro, J. Carbon uptake and water productivity for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. *F. Crop. Res.* 2013, 146, 51–65.
27. Alberto, M. C. R.; Quilty, J. R.; Buresh, R. J.; Wassmann, R.; Haidar, S.; Correa, T. Q.; Sandro, J. M. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. *Agric. Water Manag.* 2014, 136, 1–12.
28. Reichstein, M.; Falge, E.; Baldocchi, D.; Papale, D.; Aubinet, M.; Berbigier, P.; Bernhofer, C.; Buchmann, N.; Gilmanov, T.; Granier, A.; Grunwald, T.; Havrankova, K.; Ilvesniemi, H.; Janous, D.; Knohl, A.; Laurila, T.; Lohila, A.; Loustau, D.; Matteucci, G.; Meyers, T.; Miglietta, F.; Ourcival, J.-M.; Pumpanen, J.; Rambal, S.; Rotenberg, E.; Sanz, M.; Tenhunen, J.; Seufert, G.; Vaccari, F.; Vesala, T.; Yakir, D.; Valentini, R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Glob. Chang. Biol.* 2005, 11, 1424–1439.
29. Wilson, K. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.* 2002, 113, 223–243.
30. Twine, T. E.; Kustas, W. P.; Norman, J. M.; Cook, D. R.; Houser, P. R.; Meyers, T. P.; Prueger, J. H.; Wesley, M. L. Correcting eddy covariance flux underestimates over grassland. *Agric. For. Meteorol.* 2000, 103, 279–300.
31. Nagler, P.; Scott, R.; Westenberg, C.; Cleverly, J.; Glenn, E.; Huete, A. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sens. Environ.* 2005, 97, 337–351.
32. Foken, T. The energy balance closure problem: an overview. *Ecol. Appl.* 2008, 18, 1351–1367.
33. Cleugh, H. A.; Leuning, R.; Mu, Q.; Running, S. W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sens. Environ.* 2007, 106, 285–304.
34. Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S. W. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Algorithm Theoretical Basis Document Collection 5. NASA Hqrs. 2013, 1–66.

35. Suyker, A. E.; Verma, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agric. For. Meteorol.* 2009, 149, 443–452.



© 2017 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**CAPÍTULO III – RESULTADOS NA FORMA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS
PUBLICADOS EM PERÍODICOS INDEXADOS**

**III. ARTIGO 1 – VALIDAÇÃO DO PRODUTO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO MOD16
PARA UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO EM CACHOEIRA DO SUL – RS**

Artigo aceito e publicado na Revista *Ciência & Natura* - Edição Especial em 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X20230>

Validação do Produto de Evapotranspiração MOD16 para uma cultura de Arroz Irrigado em Cachoeira do Sul - RS

Validation the Product of Evapotranspiration (MOD16) for a Culture Rice Irrigated in Cachoeira do Sul – RS

Vanessa de Arruda Souza¹, Débora Regina Roberti², Rita de Cássia Marques Alves³, Marcelo Bortoluzzi Diaz⁴ e Jônatan Dupont Tatsch⁵

¹Mestre, Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – CEP SRM, Porto Alegre, Brasil

^{2,5}Doutor, Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil

³Doutor, Departamento de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – CEP SRM, Porto Alegre, Brasil

⁴Mestre, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

Resumo

O processo de Evapotranspiração (ET) é o segundo principal componente do ciclo hidrológico, estando ligado diretamente com a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera. Determinar a ET para grandes áreas de arroz irrigado é um fator limitante devido ao alto custo dos equipamentos e mão de obra especializada. A utilização de dados provenientes de sensores remotos vem servindo como técnica alternativa para o monitoramento da ET sobre extensas áreas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo validar os dados de ET (MOD16) para uma cultura de arroz irrigado em Cachoeira do Sul - Brasil. Os dados utilizados neste estudo compreendem o período de outubro de 2013 a setembro de 2014. A comparação entre a ET-MODIS do pixel central com a ET observada (estimada pela técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos) mostrou valores estatísticos de RSME = 15,87, PBIAS -29,2. Para os pixels com mesma cobertura vegetal também foram extraídos os valores médios de ET-MODIS e comparados com a torre de fluxo, apresentando RSME = 14,59, PBIAS = -40,3. A maior diferença entre os dados observados com o MOD16 ocorreu durante o cultivo de arroz que ocorre entre a primavera/verão, não acompanhando a variabilidade da ET.

Palavras-chave: Evapotranspiração, arroz irrigado, MOD16, Brasil, fluxo.

Abstract

The process of evapotranspiration (ET) is the second major component of the hydrological cycle, being connected directly with the amount of water vapor in the atmosphere. Determine the ET for large areas of irrigated rice is a limiting factor due to the high cost of equipment and skilled labor. Using data from remote sensors has been serving as an alternative technique for monitoring ET over large areas. The aim of this study is to evaluate the ET (MOD16) for a rice paddy in the Cachoeira do Sul - Brazil. The data used in this study cover the period from October 2013 to September 2014. The comparison between the ET-MODIS central pixel with the observed ET (estimated by technique Eddy Covariance) showed statistical values of RSME = 15.87, PBIAS - 29.2. For the same pixels with vegetation were also extracted from the average values of ET-MODIS flow and compared with the tower, showing RSME = 14.59, PBIAS = -40.3. The biggest difference between the observed data with the MOD16 occurred during the rice cultivation that takes place between the spring/summer, not following the variability of ET.

Keywords: Evapotranspiration, rice irrigated, MOD16, Brazil, flux.

1 Introdução

O Arroz (*Oryza sativa* L.) está entre os grãos mais produzidos no mundo, principalmente no continente asiático. O Brasil encontra-se entre os dez países com maior produção de Arroz, ocorrendo a semeadura do grão uma vez ao ano (durante as estações primavera/verão), diferentemente do que ocorre nos países asiáticos, com dois cultivos anuais. Em geral, o cultivo de arroz se dá pelo sistema de irrigação por inundação, demandando um grande volume de água, afetando diretamente o balanço hídrico da região do cultivo.

O Processo de Evapotranspiração (ET) está entre os principais componentes do ciclo hidrológico, representando a taxa evaporativa da superfície e a transpiração das plantas. Além disso, é uma importante variável climatológica e ambiental, apresentando complexidade na mensuração devido à grande variabilidade na escala de tempo e espaço, dependendo da cobertura vegetal, clima, topografia, propriedades do solo, entre outros fatores (Allen et al., 1998; Mu et al., 2007).

A ET está relacionada diretamente com a taxa de vapor d'água na atmosfera podendo alterar o regime de chuva na região, e também com o balanço de energia, ambos associados ao fluxo de calor latente (LE). Para a conversão da água líquida para o estado gasoso, o processo de ET consome grande quantidade de energia que chega a superfície. Em cultivos agrícolas sob a forma de sistema irrigado, a ET consome cerca de 60 a 80% do saldo de radiação na fase de crescimento vegetativo (Suyker & Verna, 2009).

A estimativa da ET pode ser dada através de métodos diretos, medidas realizadas através de equipamentos como o lisímetro, e por métodos indiretos calculada a partir de equações empírico-teóricas que utilizam variáveis meteorológicas. No entanto, esses métodos restringem-se a pequenas áreas de estudo, sendo limitados para grandes plantações de cultivos agrícolas.

Técnicas de sensoriamento remoto utilizando imagens espectrais vem sendo bastante utilizadas para determinar a ET em grandes áreas do globo, sendo as principais: SEBS (Surface Energy

Balance System), SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm over Land) e METRIC (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration).

Mu et al. (2007) desenvolveram o algoritmo global de ET do MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), chamado de produto MOD16, a fim de facilitar as observações da variabilidade temporal e espacial da Evapotranspiração. Entretanto, este produto foi validado a partir de 19 estações pertencentes ao American Flux, onde grande parte desses sítios experimentais localizam-se sobre a América do Norte. Ramoelo et al. (2014), utilizando duas estações micrometeorológicas sobre o sul da África do Sul, validou o produto MOD16, encontrando discrepância nas observações in situ com as estimadas a partir dos dados orbitais.

Dentro deste contexto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o produto global de ET MOD16, utilizando dados de Covariância dos Vórtices Turbulentos (*Eddy Covariance*) obtidos a partir de uma Torre de Fluxo localizada sobre uma extensa área de Arroz Irrigado no sul do Brasil. Os dados de fluxo de calor latente (LE) foram adquiridos a cada 30 minutos e convertidos a ET.

2 Materiais e Métodos

2.1 Sítio Experimental

As medidas foram coletadas em uma área de aproximadamente 1000 ha de Arroz Irrigado. O sítio experimental está localizado na cidade de Cachoeira do Sul (30°16'37.59"S, 53° 8'52.25"O, 40,5 m), no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1 e 2). O clima é do tipo subtropical úmido, bem como nas demais zonas de arroz irrigado do estado. Grande parte da água utilizada para irrigação da lavoura provém de rios presentes na região.

O período de estudo foi de 1 de outubro de 2013 a 30 de setembro de 2014, sendo o arroz semeado em 15 de novembro de 2013 e colhido no final do mês de março. Durante o período de pousio, a superfície permaneceu coberta pela palha seca do arroz e gramíneas silvestres, como por exemplo, *Heteranthera reniformis*, *Echinochloa*

crusgalli, *Brachiaria plantaginea*, *Digitaria sp.*, and *Luziola peruviana*.

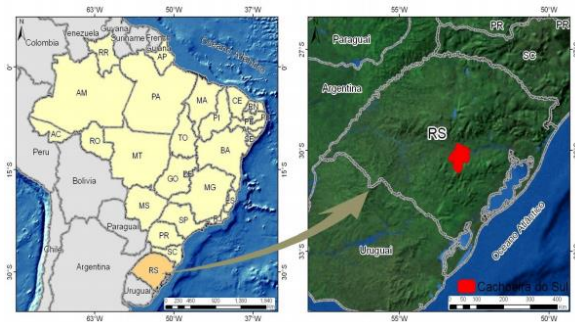


Figura 1: Localização do município de Cachoeira do Sul - RS.



Figura 2: Área experimental com cultivo de arroz irrigado em Cachoeira do Sul - RS.

2.2 Dados meteorológicos e de Covariância dos Vórtices Turbulentos

Os fluxos de calor sensível e calor latente foram estimados através da técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos, a partir de medidas de alta frequência (10 Hz) da temperatura, velocidade do vento e concentração de água, sendo que, os sensores utilizados nesta pesquisa foram o anemômetro sônico (CSAT3; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah) a 3 m de altura medindo u , v , w e temperatura virtual; analisador de gás infravermelho (LI-7500/LI-COR) a 3 m medindo concentrações de CO_2 e H_2O ; pirgeômetro e piranômetro (CGR3/ Kiip&Zonen) instalados a 5 m de altura medindo radiação de onda longa incidente, onda longa refletida, onda curta incidente e onda curta refletida; pluviômetro (TB4 Rain Gage/Hydrological Services Pty. Ltd.) instalado a 6 m medindo precipitação.

Dados das variáveis ambientais de temperatura, umidade relativa e radiação solar global foram utilizados da estação meteorológica do INMet (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada em Santa Maria - RS, a fim de complementar as possíveis falhas de coleta de

dados da Torre de Fluxo em Cachoeira do Sul - RS.

2.3 Processamento dos dados de Fluxo

Para processamento dos dados de fluxo foi utilizado o software *EddyPro Advanced* (versão 5.1, LI-COR). Após este processamento foi realizada uma filtragem no fluxo de calor latente a fim de descartar possíveis inconsistências nos dados, em que valores de $\text{LE} < -50$ ou $> 1000 \text{ W/m}^2$ foram desconsiderados da análise. Para o período noturno, ou seja, valores de $R_g \leq 0$, foi desconsiderado os valores de $-100 \text{ W/m}^2 < \text{LE} > 100 \text{ W/m}^2$. Além disso, foram excluídos dados de LE quando ocorreu a precipitação. Com todos esses procedimentos de filtragem realizados nos dados de LE, incluindo os dias de mal funcionamento da Torre de Fluxo (problemas de energia ou de manutenção dos sensores), resultou em 19,8% do total de dados filtrados. Esta lacuna de dados é relativamente baixa quando comparada a outros trabalhos como Timm et al. (2014) e Alberto et al. (2011).

Para preenchimento de todas as lacunas faltantes dos dados de fluxo experimentais, foram utilizadas as variáveis de temperatura, radiação solar global, déficit do vapor de pressão (VPD), umidade relativa, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente, como dados de entrada para o processamento e preenchimento final do LE a partir do pacote REddyProc disponível para o software R.

2.4 Produto Global de Evapotranspiração MOD16

O produtor MOD16, criado em 2006, possui dados de ET para toda superfície terrestre representando a transpiração das plantas e evaporação da superfície. Este produto disponibiliza dados de LE, ET potencial e real para o intervalo de 8 dias, mensal e anual, disponível em <http://ntsg.umd.edu/>.

O produto de ET é calculado a cada dia a partir de MOD12 (cobertura da superfície), MOD15 (Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida, Índice de Área Foliar) e dados meteorológicos do modelo GMAO (Global Modeling and Assimilation Office), com

resolução espacial igual a 1 km. O desenvolvimento do algoritmo de ET foi baseado na equação Penman-Monteith adaptada para uso com dados de sensoriamento remoto (Cleugh et al., 2006), maiores detalhes do algoritmo estão descritos em Mu et al. (2007; 2011).

2.5 Análise dos dados

Para comparação dos dados observados com os obtidos de forma remota, primeiramente foi realizada a média diária de LE medido pela Torre de Fluxo, e após calculada a evapotranspiração diária.

A soma dos 8 dias de ET observada foi realizada para avaliar a relação com os dados do produto MOD16. O coeficiente de determinação (R^2), erro médio quadrático (RMSE), o viés (BIAS) e PBIAS, foram determinados para apurar a acurácia das estimativas. Estas técnicas estatísticas foram também utilizadas por Ramoelo et al. (2014).

AS equações utilizadas para determinar o RMSE, BIAS e PBIAS são as seguintes:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (ET_{exp} - ET_m)^2}{N}} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum (ET_m - ET_{exp})}{N} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{Bias}{\left(\frac{1}{N}\right) \sum ET_{exp}} \times 100 \quad (3)$$

onde: ET_{exp} representa os dados observados da Torre de Fluxo, ET_m os dados do produto MOD16 e N é o número de medidas. Quanto mais próximo de zero os valores de RMSE e BIAS, maior a acurácia dos dados modelados com os observados.

3 Resultados e Discussão

3.1 Análise para todo o período

As medidas de ET experimental (ET_{exp}) e precipitação foram somadas pelo número de dias que representa cada imagem MODIS. A variabilidade da precipitação juntamente com as

medidas de ET é observada na Figura 3. Notamos que o maior pico de precipitação ocorre na segunda quinzena de novembro, onde há uma queda na ET_{exp} ligada também, ao período de plantio do cultivo. Durante a segunda quinzena de dezembro até a metade de janeiro verificamos os maiores picos de ET_{exp} , com máximo próximo a 54 mm/8-dia, devido a fase de desenvolvimento do arroz irrigado e a maior incidência de radiação solar na superfície. Entretanto, observamos uma inconsistência entre as medidas de ET_m com os dados observados para este período.

Analisando o comportamento do pixel central (ET_{pc}) com a média dos pixels contendo a mesma cobertura vegetal da área (ET_{media}), verificamos que ET_{pc} apresenta os maiores valores durante os meses de janeiro e fevereiro, chegando a aproximadamente 63 mm/8-dia, diferentemente do que ocorre com as medidas in situ. Cabe salientar que durante os máximos de ET_m ocorre frequente taxa precipitação, mesmo que em pequenos volumes. Somente a partir do mês de abril que ambas medidas de ET_{exp} e MODIS apresentam um comportamento semelhante.

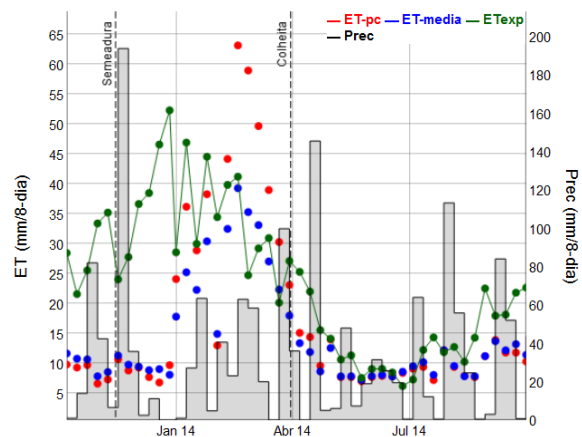


Figura 3: Comparação da Evapotranspiração observada, MOD16 e da Precipitação somadas a cada 8 dias em Cachoeira do Sul - RS.

A estatística para todo o período é apresentada na Tabela 1. Verificamos que a ET_{media} apresentou maior R^2 e menor RMSE quando comparada a ET_{pc} . No entanto, o menor viés da evapotranspiração em relação aos dados observados foi encontrado em ET_{pc} , com

uma diferença de aproximadamente 10% em relação a ET-media.

Tabela 1: Comparação dos dados observados de ET observada com o produto MOD16.

	R ²	RMSE (mm/ 8 dias)	BIAS (mm/ 8 dias)	PBIAS (%)
ET-pc	0,18	15,87	-6,95	-29,2
ET-media	0,22	14,59	-9,58	-40,3

O gráfico de dispersão contendo as medidas estimadas a partir do sensor MODIS com os dados de ET_{exp} estão representados pela figura 4. Observamos que para valores inferiores a 20 mm/8-dia a ET-pc e ET-media são representativas quando comparadas a ET_{exp}. Entretanto, para valores superiores a 20 mm/8-dia, notamos inconsistência entre as medidas.

Ramoelo et al. (2014), avaliou os dados de ET do produto MOD16 para a Savana Africana utilizando dados para o período de dez anos, onde encontraram melhores valores de R² e menores RMSE, quando comparado aos dados apresentados neste trabalho. No entanto, é importante salientar, que aqui estamos tratando de uma área agrícola (arroz) que é alagada. Embora os pixels estando na área do cultivo, este não se dá de forma homogênea no terreno, tendo diferenças no plantio e colheita que podem chegar a quase 1 mês.

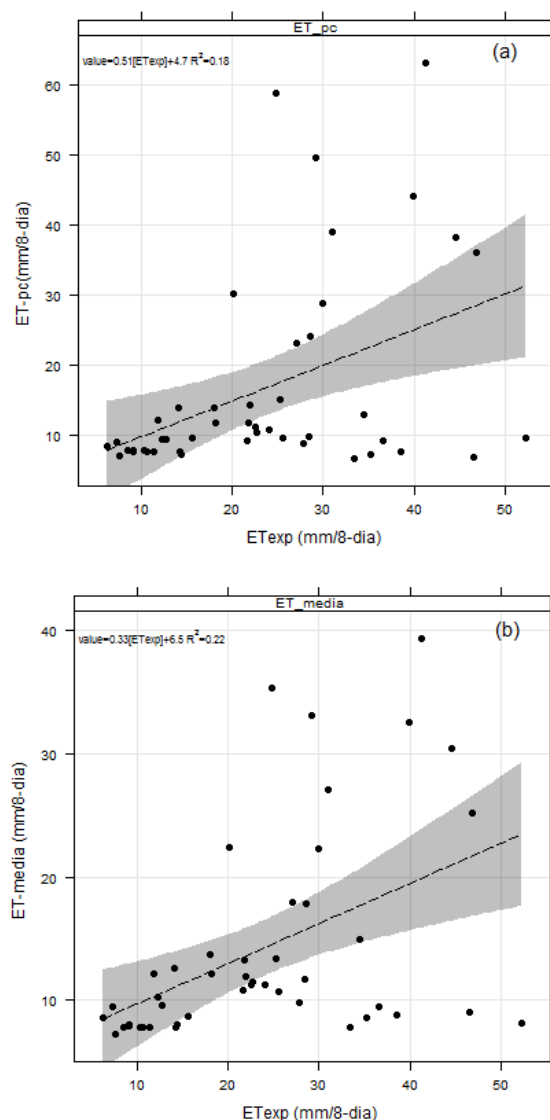


Figura 4: Gráfico de dispersão entre a ET experimental e modelada a partir do produto MOD16. Período de 01 de outubro de 2013 a 30 de setembro de 2014.

3.2 Análise para os diferentes períodos

A fim de quantificar o erro durante o período de Pousio e Arroz, foram separados os dados representativos para cada intervalo, totalizando 28 medidas para o período de pousio e 18 para o período do Arroz. A Tabela 2 demonstra os valores encontrados para cada período, onde podemos observar que em ambos os períodos o coeficiente de determinação foi inferior a 0,15. O menor RMSE ocorreu durante a fase de pousio para a ET-media, entretanto, os maiores valores de PBIAS restringem-se a este intervalo. A medida que apresentou o maior viés foi a ET-

media durante a fase do Arroz chegando a uma diferença de -7,06 quando comparado ao menor viés.

Tabela 2: Comparação dos dados observados de ET observada com o produto MOD16 para o período de Pousio e Arroz.

	R ²	RMSE (mm/ 8 dias)	BIAS (mm/ 8 dias)	PBIAS (%)
<u>POUSIO</u>				
ET-pc	0,05	10,42	-7,06	-42,1
ET-media	0,15	10,0	-6,84	-40,8
<u>ARROZ</u>				
ET-pc	0,01	21,8	-6,77	-19,5
ET-media	0,01	19,71	-13,83	-39,9

4 Conclusões

O presente estudo avaliou a qualidade do Produto Global de ET MOD16 sobre uma extensa área de arroz irrigado no sul do Brasil, onde verificamos baixa acurácia nos dados observados com os modelados a partir do sensor MODIS. Para a análise anual, notamos que a ET-MODIS subestima os valores observados durante grande parte do período, exceto para os meses de fevereiro e março. Vários fatores podem ter influenciado na inconsistência dos dados observados e modelados, sendo eles: parametrização do modelo utilizado pelo MOD16, diferença na área de cobertura entre Torre de Fluxo e o pixel, bem como problemas no fechamento do balanço de energia dos dados observados. Por fim, recomenda-se uma calibração do Produto Global de ET MOD16 para o sul do Brasil.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa no Rio Grande do Sul (FAPERS), Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (FAURGS), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro.

Referências

- Alberto, Ma. C. R., Wassmann, R., Hirano, T., Miyata, A., Hatano, R., Kumar, A., Padre, A., Amante, M. (2011). Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flood and aerobic rice fields in the Philippines. *Agricultural Water Management*, 98, 1417-1430.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Itália.
- Cleugh, H. A., Leuning, R., Mu, Q., Running, S. W. (2006) Regional Evaporation Estimates from Flux Tower and MODIS Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 106, 285-304.
- Mu, Q., Heinsh, F. A., Zhao, M., Running, S. W. (2007) Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing Environment*, 111, 519-53.
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1781-1800.
- Ramoelo, A., Majazi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A., Dziki, S. (2014). Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6, 7406-7423.
- Suyker, A. E.; Verma, S.B. (2009). Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agricultural Forest Meteorology*, 149, 443-452.
- Timm, A. U., Roberti, D. R., Streck, N. A., Gonçalves, L. G. G., Acevedo, O. C., Moraes, O. L. L., Moreira, V. S., Degrazia, G. A., Ferlan, M., Toll, D. L. (2014). Energy partitioning and evapotranspiration over a rice paddy in southern Brazil. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 1975-1988.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande avanço de áreas agrícolas de forma irrigada tem afetado diretamente o balanço hídrico, principalmente em regiões de planície onde há o cultivo de arroz irrigado. Logo para referenciar os trabalhos realizados neste doutoramento sugiro:

- Souza (2017) validou e simplificou o Método Priestley-Taylor (PT) sobre áreas de arroz irrigado por inundação no Sul do Brasil, bem como determinou o valor de 1,22 para parâmetro α utilizando a equação completa de PT, e de 1,18 para a equação simplificada proposta pelo autor, demonstrando bastante acurácia em relação aos dados experimentais.
- Souza (2017) validou o Produto MOD16 de Evapotranspiração sobre cultivos de arroz irrigado no sul do Brasil, para áreas de 3 x 3 km e pixel central em relação aos dados *Eddy Covariance*, verificando maior acurácia com o pixel central. Entretanto, de modo geral, há inconsistência nos dados remotos de ET em relação as medidas *in situ*, recomendando uma calibração na parametrização do Produto MOD16.