



FAGNER GOES DA CONCEIÇÃO

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA POR DADOS DE SATÉLITES E
DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PARA O
ESTADO DE MINAS GERAIS**

LAVRAS - MG

2013

FAGNER GOES DA CONCEIÇÃO

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR
DADOS DE SATÉLITES E DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PARA
O ESTADO DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Dra. Elizabeth Ferreira

Coorientador

Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas

LAVRAS - MG

2012

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Conceição, Fagner Goes da.

Estimativa da evapotranspiração de referência por dados de satélites e de estações meteorológicas para o Estado de Minas Gerais / Fagner Goes da Conceição. – Lavras : UFLA, 2013.

61 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Elizabeth Ferreira.

Bibliografia.

1. Radiação solar incidente. 2. Makkink. 3. LSA-SAF DSSF. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 526.982

FAGNER GOES DA CONCEIÇÃO

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR
DADOS DE SATÉLITES E DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PARA
O ESTADO DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de novembro de 2012.

Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho UFLA

Dra. Margarete Marin L. Volpato EPAMIG

Dra. Gláucia Miranda Ramirez UFLA

Dra. Elizabeth Ferreira
Orientadora

LAVRAS - MG

2012

*Aos meus pais,
Maria de Lourdes e Francisco José
(in memoriam)*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEG) pela estrutura disponibilizada para realização do Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo CAG - APQ - 00285/11. Por meio desse projeto, pode-se obter suporte para aquisição dos dados e produtos LSA-SAF (*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities*).

Aos professores Dra. Elizabeth Ferreira e Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas pela orientação.

Aos professores Dr. Luiz Gonzaga Carvalho e Dra. Gláucia Miranda Ramirez pela dedicação e ensinamentos transmitidos durante esse período.

À Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato por se dispor a participar como membro na banca examinadora.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pela cessão do uso dos dados meteorológicos, por meio da permissão de acesso ao banco BDMEP.

RESUMO

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), no Estado de Minas Gerais, utilizando o método de Makkink, substituindo a variável radiação solar incidente (R_s) pelo produto LSA-SAF DSSF (*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities Down-welling Surface Short-wave Radiation Flux*). Os dados meteorológicos de superfície utilizados foram obtidos de 38 Estações Climatológicas Principais (ECPs), localizadas no Estado de Minas Gerais e entorno e da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) localizada no campus da Universidade Federal de Lavras. No que diz respeito aos dados orbitais, foram utilizados dados do produto LSA-SAF DSSF, obtido por meio de imagens do satélite Meteosat de Segunda Geração 2 (MSG-2), registradas a cada 15 minutos pelo sensor SEVIRI usando três canais, sendo os canais 1 e 2 correspondentes às bandas do visível (0,6 μm e 0,8 μm) e o canal 3 correspondente à banda do infravermelho próximo (1,6 μm). Esse produto possui uma resolução temporal de 30 minutos, ou seja, teoricamente são gerados 48 produtos por dia. Assim, neste trabalho, para o ano de 2010, foram analisados os dias 5, 16 e 27 para todos os meses do ano, à exceção do mês de dezembro, o qual teve as seguintes datas consideradas: 6, 17 e 28. Para testar a qualidade dos valores de R_s encontrados, foi efetuada uma comparação entre a R_s estimada pela ECP e pela PCD com o produto LSA-SAF DSSF, para o ano de 2010, no município de Lavras, Minas Gerais. Os resultados obtidos com o uso do produto LSA-SAF DSSF revelam boa concordância com a estimativa da R_s mediante dados de superfície. De modo que o produto LSA-SAF DSSF pode ser considerado como uma alternativa para substituição da R_s no processo de estimativa da ET_o quando esta utiliza a R_s, a exemplo do método de Makkink.

Palavras-Chave: Radiação solar incidente. Makkink. LSA-SAF DSSF.

ABSTRACT

This work was conducted with the objective of estimating reference evapotranspiration (ET_o), in the State of Minas Gerais, using the Makkink method, substituting the incident solar radiation (SR) variable for the product LSA-SAF DSSF (Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities Downwelling Surface Short-wave Radiation Flux). The surface meteorological data used were obtained from 38 Principal Climatological Stations (PCSs) located in the State of Minas Gerais and surroundings, and at the Data Collecting Platform (DCP) located in the campus of the Universidade Federal de Lavras. In regard to the orbital data, we used data from the product LSA-SAF DSSF, obtained by images from the second generation METEOSAT-2 (SGM-2) registered every 15 minutes by the SEVIRI sensor using three channels, with channels 1 and 2 corresponding to the visible bands (0.6 μm and 0.8 μm) and channel 3 corresponding to proximate infrared bands (1.6 μm). This product presents a temporal resolution of 30 min, that is, theoretically, 48 products are generated per day. Thus, in this work, for the year of 2010, days 5, 16 and 27 were analyzed for all months of the year with the exception of December, which had the following dates considered: 6, 17 and 28. In order to test the quality of the SR values found, a comparison between the SR estimated by the PCE and by the DCP with the product LSA-SAF DSSF was done, for the year of 2010, in the municipality of Lavras, Minas Gerais. The results obtained using the product LSA-SAF DSSF revealed a good accordance with the SR estimates under surface data, in a way that the product LAS-SAF DSSF may be considered an alternative for substituting SR in ET_o estimation process when the method uses SR, as is the case with the Makkink method.

Keywords: Incident solar radiation. Makkink. LSA-SAF DSSF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização geográfica	27
Figura 2	Fluxograma da metodologia adotada para estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o).....	30
Figura 3	Distribuição espacial das estações climatológicas do INMET.....	34
Figura 4	Comportamento médio da evapotranspiração de referência (ET _o) estimada com o uso do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a ET _o estimada com dados das Estações Climatológicas Principais (ECPs) para o Estado de Minas Gerais	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Principais características do sensor SEVIRI.....	24
Tabela 2	Caracterização das estações meteorológicas: nome, Unidade da Federação (UF), latitude, longitude e altitude.....	32
Tabela 3	Análise da normalidade para os dados de radiação solar incidente (Rs) segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov com nível de significância de 0,05.....	44
Tabela 4	Análise do teste t com significância de 0,05 para os dados de radiação solar incidente (Rs).....	45
Tabela 5	Coefficiente de determinação (r^2) e erro médio percentual (EMP) do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a Plataforma de Coleta de Dados (PCD).....	46
Tabela 6	Coefficiente de determinação (r^2) e erro médio percentual (EMP) do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a Estação Climatológica Principal (ECP).....	47
Tabela 7	Variação dos valores médios mensais de radiação solar incidente (Rs) para o ano de 2010 no município de Lavras, MG.....	49
Tabela 8	Análise do teste t com significância de 0,05 para os dados de evapotranspiração de referência (ETo).....	50
Tabela 9	Valores médios da evapotranspiração de referência (ETo) estimada com o uso do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a ETo estimada com dados das Estações Climatológicas Principais (ECPs) para o Estado de Minas Gerais	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Radiação solar	14
2.2	Evapotranspiração	16
2.2.1	Evapotranspiração potencial ou de referência	17
2.2.2	Evapotranspiração real e da cultura	18
2.3	Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência baseados na radiação solar	18
2.4	Uso do geoprocessamento na estimativa da evapotranspiração	21
2.5	O MSG/SEVIRI	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Caracterização geográfica e climática	27
3.2	Fluxograma	29
3.3	Dados de superfície utilizados	30
3.4	Dados orbitais utilizados	34
3.5	Comparação entre a radiação solar incidente e o produto LSA-SAF DSSF	37
3.5.1	Comparação entre a Rs medida na PCD e o produto LSA-SAF DSSF	37
3.5.2	Comparação entre a Rs estimada por dados das ECPs e o produto LSA-SAF DSSF	37
3.6	Estimativa da evapotranspiração de referência por dados de estações climatológicas	40
3.7	Estimativa da evapotranspiração de referência utilizando o produto LSA-SAF DSSF	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Comparação dos dados de radiação solar incidente obtida para o município de Lavras, Minas Gerais	44
4.2	Evapotranspiração de referência	50
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O estudo de elementos climáticos é de fundamental importância para diversos campos do conhecimento, pois estão intimamente relacionados aos inúmeros processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no planeta. A variável meteorológica radiação solar incidente à superfície terrestre (R_s), fator limitante para a manutenção das condições vitais na Terra, é tema central para pesquisas agrometeorológicas ou mesmo para elaboração de modelos hidrológicos e de dinâmica da vegetação, podendo ser considerada determinante para o gerenciamento dos recursos naturais.

Na superfície terrestre, os processos radiativos possibilitam a distribuição da umidade e da energia, atuando efetivamente no gerenciamento das trocas de calor no sistema solo-planta-atmosfera. Desse modo, é possível inferir que a ação da radiação solar está diretamente ligada à taxa de evapotranspiração, a qual expressa a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera em uma dada localidade, de acordo com a situação hídrica das culturas.

A evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser obtida diretamente, por meio de lisímetros ou via balanço hídrico direto de água no solo e estimada por modelos empíricos que utilizam dados meteorológicos. A escolha de um modelo empírico dá-se, principalmente, em função das condições climáticas, da praticidade e da precisão. Além disso, a aplicação de um determinado método pode ser inviabilizada para uma localidade porque os dados essenciais para a estimativa de ET_o podem ser insuficientes ou estarem indisponíveis.

Dentre esses modelos empíricos de estimativa de ET_o destaca-se o método de Makkink, que se baseia na equação de Penman e utiliza a R_s para a obtenção de valores de evapotranspiração.

Contudo, ainda que se tenham instrumentos nas estações meteorológicas que possibilitam a medição direta ou a estimativa de R_s , o uso desses dados é um tanto quanto restrito, pois além do número insuficiente de estações, essas têm melhor representatividade para áreas com pequenas extensões.

Ademais, frente à necessidade de estimativa e avaliação de dados climáticos em maiores escalas, o sensoriamento remoto é uma alternativa mais que viável, uma vez que apresenta grande cobertura espacial, além de oferecer informação com alto grau de confiabilidade e rapidez. Assim, nos últimos anos, o uso de imagens e produtos de satélite tem assumido papel de destaque para o monitoramento de fenômenos meteorológicos e ambientais.

A utilização de satélites meteorológicos geoestacionários para o acompanhamento desses fenômenos torna-se essencial, uma vez que esses possuem um tempo de revisita menor que outros tipos de plataformas orbitais, a exemplo dos satélites para recursos terrestres. É justamente essa alta resolução temporal que torna os satélites meteorológicos ideais para a estimativa de parâmetros como emissividade, albedo e temperatura de superfície, fluxos de radiação, evapotranspiração, dentre outros.

O Meteosat de Segunda Geração (MSG) leva a bordo o sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), que opera com 12 canais espectrais com resolução espacial de 1 ou 3 km e é capaz de gerar imagens a cada 15 minutos.

Com o intuito de facilitar o uso dos dados obtidos do MSG/SEVIRI, foi criado junto ao Instituto Meteorológico de Portugal o LSA-SAF (*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities*), responsável pela geração e disseminação de produtos operacionais. Estes produtos, disponíveis para a África, a Europa e América do Sul, incluem, entre outros, o fluxo de R_s , ou seja, a radiação de ondas curtas que atinge superfície terrestre ou LSA-SAF DSSF (*Down-welling Surface Short-wave Radiation Flux*).

Dado ao exposto, este trabalho foi conduzido com o objetivo de estimar a ETo no Estado de Minas Gerais, utilizando o método de Makkink, substituindo a variável Rs pelo produto LSA-SAF DSSF.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Radiação solar

A radiação solar consiste na fonte primária de energia regente de todos os processos atmosféricos atuantes no planeta, podendo ser considerada como a força motriz do ciclo hidrológico (TUBELIS; NASCIMENTO, 1992).

Ela é a energia responsável direta ou indiretamente pelo regimento de processos físicos, evaporação e aquecimento; químicos, reações gasosas na atmosfera e superfície terrestre e processos biológicos, como por exemplo, a fotossíntese. É uma variável meteorológica aplicada em diversos estudos para fins agrometeorológicos, climáticos, hidrológicos, entre outros, que impulsiona fenômenos inerentes ao sistema Terra-Atmosfera, além de ser determinante para o tempo e o clima (CHOU, 1992; BORGES et al., 2010).

Conforme observado em Lemos Filho et al. (2010), a radiação solar incidente à superfície terrestre (R_s) é o elemento climático que mais interage com a evapotranspiração, sendo um dado indispensável para modelos de estimativa de E_{To} , como por exemplo, Penman, Penman-Monteith-FAO, Makkink, Turc, Camargo, Priestley-Taylor, dentre outros (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

As trocas de energia que ocorrem na atmosfera são determinadas pela radiação emitida pelo Sol, ondas curtas e pela radiação emitida pela superfície terrestre, ondas longas. Assim, com o conhecimento da energia, presente em todos os comprimentos de ondas que atuam na superfície, é possível determinar a radiação líquida, também, denominada de saldo de radiação (R_n), ou seja, o balanço entre todos os fluxos radiativos (ondas curtas e longas) incidentes em uma dada superfície e emitidos pela mesma (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Apesar de ser medida diretamente em estações meteorológicas de superfícies por meio de radiômetros, o registro diário de R_s é muitas vezes limitado pela ausência de instrumentos adequados para a medição ou mesmo pela falta de manutenção dos mesmos. Assim, na inexistência de registros disponíveis de R_s para uma determinada área de interesse torna-se necessário o uso de métodos de estimativas (CHRYSOULAKIS; DIAMANDAKIS; PRASTACOS, 2004).

No processo de estimativa de radiação solar, é possível dividir os modelos em dois grupos: empíricos e físicos. Os modelos empíricos são baseados em variáveis meteorológicas como insolação e temperatura do ar, usualmente medidas nas condições atmosféricas locais; com isso a aplicação desses modelos é restrita às condições estudadas (GUL; MUNEER; KAMBEZIDIS, 1998).

Conforme Meza e Varas (2000), um dos modelos empíricos mais utilizados para a estimativa da radiação solar foi proposto originalmente por Angström (1924) e modificada por Prescott (1940). A equação de Angström-Prescott, baseia-se na relação entre a radiação solar incidente na superfície e a radiação solar incidente no topo da atmosfera.

Os modelos físicos estimam a R_s , por meio da interação desta com os componentes atmosféricos, baseando-se em dados de estações meteorológicas ou em dados de satélites, tendo validade para qualquer região do globo terrestre. Em contrapartida, pode haver dificuldade na aquisição de dados necessários para a parametrização desses modelos em decorrência das condições atmosféricas, como por exemplo, a quantidade e distribuição de nuvens (GUL; MUNEER; KAMBEZIDIS, 1998; MILLER et al., 2008).

Em áreas com topografia irregular, a determinação da R_s pode ficar comprometida até mesmo pelo sombreamento ocasionado pelo próprio relevo, em especial em médias ou elevadas latitudes, de modo que esse efeito torna-se

mais evidente nas estações de outono e inverno. Esse cenário resulta em diferenças no tempo e no espaço nos balanços energéticos, bem como na determinação de processos inerentes ao ciclo hidrológico a exemplo da evapotranspiração (LEFEVRE; WALD; DIABATE, 2007; AGUILAR; HERRERO; POLO, 2010).

2.2 Evapotranspiração

De acordo com Allen, Pereira e Raes (1998), evapotranspiração (ET) diz respeito ao processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por meio da evaporação da água do solo e da transpiração dos tecidos vegetais. Conforme apresentado por Carvalho et al. (2011), o termo “evapotranspiração” foi inserido na literatura por Thornthwaite e Wilm (1944), proporcionando um grande avanço para estudos relacionados à agricultura, hidrologia e climatologia.

A taxa de ET é normalmente expressa em milímetros (mm) por uma determinada unidade de tempo, por exemplo, hora, dia e mês e pode ser influenciada por elementos meteorológicos, fatores relacionados à cultura e pelo manejo e condições ambientais. Dentre os elementos meteorológicos destacam-se a R_s , a temperatura e umidade do ar e a velocidade do vento. Como fatores relacionados à superfície vegetada têm-se o tipo, a variedade e o estágio de desenvolvimento da cultura. Em se tratando do manejo e condições ambientais, é possível destacar a salinidade, a fertilidade e o tipo de horizontes do solo, o uso de insumos agrícolas, além do manejo de pragas e doenças (ALLEN et al., 1998).

Com o avanço dos estudos relacionados à ET e, por conseguinte, para melhor análise do processo evapotranspirativo foram surgindo outros conceitos na literatura: evapotranspiração potencial ou de referência, real e da cultura (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

2.2.1 Evapotranspiração potencial ou de referência

A evapotranspiração potencial (ETp) foi conceituada primeiramente por Thornthwaite e Wilm (1944) como sendo a máxima transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera com umidade no solo próxima ou na capacidade de campo, com solo densamente coberto com uma vegetação uniforme e em sua fase adulta com desenvolvimento ativo.

Anos mais tarde, Penman (1956) definiu a ETp como o processo de transferência de água para a atmosfera de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, rasteira, com altura uniforme, em pleno desenvolvimento e sem restrições hídricas.

O primeiro conceito para evapotranspiração de referência (ETo) foi proposto por Doorenbos e Pruitt (1977) como sendo a evapotranspiração de uma extensa cobertura de grama, verde, com crescimento ativo, altura uniforme de 8 a 15 cm e sem restrição de água no solo.

Em virtude da diversidade de espécies de gramíneas, ou mesmo outra vegetação, para se adotar como cultura de referência, Smith (1991) definiu a ETo como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência aerodinâmica da superfície de aproximadamente 70 s m^{-1} .

Para Allen et al. (1998), o conceito de ETo possibilita o estudo da demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de vegetação, estágio de desenvolvimento e práticas de manejo.

2.2.2 Evapotranspiração real e da cultura

Segundo Thornthwaite e Wilm (1944), a evapotranspiração real (ET_r) é o processo de transferência de água por evaporação e transpiração para atmosfera com fatores atmosféricos e umidade do solo em suas condições reais.

Camargo e Camargo (2000) afirmam que a ET_r corresponde à perda de água de uma superfície natural, independente das condições e do tipo de cultura e da umidade do solo.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera observada em uma cultura bem conduzida agronomicamente, ou seja, sem a presença de pragas e doenças e sob condições de solo próximo à capacidade de campo. Essa transferência é dependente das condições meteorológicas e do tipo de cultura, podendo ser compreendida como a evapotranspiração potencial que ocorre nos diferentes estádios fenológicos da mesma (DOORENBOS e PRUITT, 1977; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

2.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência baseados na radiação solar

A quantificação da evapotranspiração de referência (ET_o) é essencial para o manejo de áreas agrícolas e para o uso adequado da água em sistemas de irrigação. Diversos são os métodos empregados para a determinação da ET_o e os métodos de estimativa são largamente utilizados, pois são menos onerosos que os diretos. Entretanto, a escolha de um modelo depende de uma série de fatores como a disponibilidade de dados meteorológicos ou mesmo da escala de tempo requerida. Modelos mais complexos necessitam de muitas variáveis meteorológicas, diferente dos mais simples que podem chegar ao valor da ET_o

por meio de apenas um único elemento meteorológico (PERREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; ARAÚJO; CONCEIÇÃO; VENANCIO, 2012)

Dentre os vários métodos existentes para a obtenção da ETo, destaca-se o método combinado Penman-Monteith-FAO, parametrizado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) como modelo mais adequado para se estimar a ETo em escala diária. Esse modelo é eficiente em diversas condições climáticas e representa um aprimoramento do método de Penman (1948), o qual não considera a função de resistência à transferência de vapor de água. No entanto, ainda que seja padrão, o método Penman-Monteith-FAO pode ter sua aplicação limitada, uma vez que emprega muitas variáveis meteorológicas disponíveis apenas em algumas localidades, com isso a adoção de métodos alternativos torna-se necessária para a maioria das regiões (ALLEN et al., 1998; CAMARGO; CAMARGO, 2000; HENRIQUE; DANTAS, 2007).

O método de Makkink (1957) baseia-se nos trabalhos de Penman (1948) e utiliza dados de radiação solar e da temperatura do bulbo úmido, no entanto, na ausência deste dado, pode-se utilizar a temperatura média do ar para calcular seu fator de ponderação, superestimando a evapotranspiração. Esse método foi desenvolvido na Holanda, tendo coeficientes obtidos para a cidade de Wageningen, apresentando com isso melhores resultados para regiões de clima úmido. Ao encontro da metodologia proposta por Makkink, Turc (1961) desenvolveu um modelo para estimativa da ETo em regiões úmidas. Por outro lado, Jensen e Haise (1963) realizaram trabalhos semelhantes adotando como cenário de estudo campos irrigados em áreas áridas e semiáridas.

Bragança et al. (2010), ao analisarem diferentes métodos empíricos para determinação da ETo em períodos chuvosos para três localidades no Estado do Espírito Santo, observaram que os métodos de Turc e Makkink apresentaram respectivamente ótimo e bom desempenho para escala temporal diária. Já

Pereira et al. (2009), em estudos na região da serra da Mantiqueira, no Estado de Minas Gerais, observaram que o método Jensen-Haise apresentou melhor ajuste ao método padrão Penman-Monteith-FAO frente às demais metodologias adotadas.

No início da década de 70, Camargo (1971) propôs um método simplificado, baseado no método de Thornthwaite (1948), com eficácia semelhante, utilizando apenas dados de temperatura média do ar e de radiação solar incidente no topo na atmosfera. Back (2008), ao avaliar o uso de nove métodos de estimativa da ETo para o Município de Urussanga, em Santa Catarina, observou que o método de Camargo apresentou bom desempenho em escala mensal, quando comparado com o modelo Penman-Monteith-FAO.

O método de Priestley e Taylor (1972), baseado no balanço de energia, uma simplificação do método de Penman (1948), considera apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico. Esse coeficiente é denominado de parâmetro de Priestley-Taylor e incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração decorrente do termo aerodinâmico. Silva et al. (2011), avaliaram diferentes metodologias para estimativa de ETo para o Município de Uberlândia, Minas Gerais, concluindo que o método de Priestley-Taylor mostrou-se mais exato e confiável em relação aos demais métodos estudados.

Desenvolvido por Doorenbos e Pruitt (1984), o método da Radiação Solar, ou método FAO 24 da radiação, é uma adaptação dos trabalhos de Makkink (1957) com o incremento de um coeficiente angular da regressão dependente da umidade relativa do ar e da velocidade do vento. Segundo Tagliaferre et al. (2010), em estudos para obtenção da ETo por diferentes métodos no Município de Eunápolis, Bahia, o método da Radiação apresentou resultado satisfatório em todos os períodos analisados.

2.4 Uso do geoprocessamento na estimativa da evapotranspiração

Ainda que apresentem alto grau de confiabilidade, os métodos convencionais, para determinação da evapotranspiração (ET), normalmente, ocorrem em escalas pontuais e fornecem estimativas precisas apenas para áreas homogêneas, de modo que os resultados obtidos não se aplicam para áreas extensas e/ou diferentes coberturas (COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2005).

Segundo Giacomoni e Mendes (2008), quando se representa a ET espacialmente por algoritmos matemáticos são feitas interpolações ou mesmo extrapolações de dados pontuais oriundos de estações meteorológicas dispostas de maneira esparsa, gerando assim incerteza das informações obtidas. Visando minimizar essa incerteza, o uso do sensoriamento remoto, aliado a técnicas de geoprocessamento, desponta como ferramenta amplamente utilizada para obtenção de dados em grandes escalas no tempo e no espaço.

O uso de dados orbitais possibilita uma determinação final espacialmente distribuída da ET para uma área maior. Exemplo disso é observado em agrometeorologia, em que uma das principais aplicações de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é a de elaborar mapas a partir da interpolação de dados numéricos georreferenciados, com isso valores são estimados para todo e qualquer ponto da área representada (MEDINA et al., 1998; PELLEGRINO et al., 1998).

Ao longo dos anos, diferentes modelos foram desenvolvidos para a estimativa espacial da ET. Jacobs et al. (2002) realizaram estimativas de ET no Estado da Flórida, Estados Unidos, utilizando dados de radiação solar incidente (Rs) oriundos do satélite meteorológico GOES-8. A ET foi estimada pelos modelos de Penman-Monteith e Priestley-Taylor e apresentou alta correlação com a estimativa feita a partir de dados de superfície.

Jacobs et al. (2004) estimaram a ET diária no Estado da Flórida, Estados Unidos, pelos métodos de Penman-Monteith, Turc, Hargreaves e Makkink, utilizando dados obtidos pelo satélite GOES-8 e comparou com a ET estimada pelo método da correlação de turbilhões. Os resultados encontrados mostram as mais altas correlações para os modelos de Penman-Monteith e Makkink, respectivamente.

Schüttemeyer et al. (2007) utilizaram dados de R_s e temperatura do ar, obtidos por meio dos satélites Aqua e Meteosat de Primeira Geração, para determinar a ET, utilizando o método de Makkink em três localidades de Gana, na África Ocidental. Verificou-se que a ET estimada apresentou erro médio diário entre 5 e 35% e um erro sazonal menor que 5% quando comparada com a ET medida em superfície.

Sun et al. (2011) desenvolveram uma metodologia para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando a equação de Makkink, em tempo quase real para regiões de planalto no Leste Africano com o uso de dados dos satélites Terra e Meteosat de Segunda Geração (MSG). Os resultados encontrados mostraram alta correlação entre a ET_o estimada e a ET_o medida, ainda que tenha ocorrido em média subestimativa dos valores obtidos.

2.5 O MSG/SEVIRI

Os satélites geostacionários da série *Meteorological satellite* (Meteosat) tiveram sua jornada iniciada no final da década de 70 com o lançamento em órbita do Meteosat-1 em 1977, seguido de mais seis satélites da primeira geração da série lançados de 1981 a 1997. Todos os satélites dessa geração dispõem do sensor MVIRI (*Meteosat Visible and Infrared Imager*), instrumento com três canais que opera nas regiões do visível e infravermelho

termal capaz de realizar imageamento contínuo a cada 30 minutos, com resolução espacial de 2,5 ou 5 km no nadir (EUMETSAT, 2010).

A geração seguinte da série Meteosat, denominada Meteosat de Segunda Geração (MSG), teve início em 2002 com o lançamento do satélite MSG-1 e continuidade em 2005 e 2012 com o lançamento dos satélites MSG-2 e MSG-3, respectivamente. O último satélite da série, o MSG-4, tem lançamento previsto para o ano de 2015. Os satélites da segunda geração levam a bordo o sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), um poderoso instrumento capaz de gerar uma imagem a cada 15 minutos, operando em 12 bandas espectrais com resolução espacial de 1 ou 3 km no nadir; aliando assim alta cobertura territorial a alta resolução temporal e com isso oferecendo dados mais precisos para elaboração de modelos climatológicos (SCHMETZ et al., 2002; EUMETSAT, 2010).

As principais características do sensor SEVIRI podem ser observadas detalhadamente na Tabela 1.

Tabela 1 Principais características do sensor SEVIRI

Canal	Banda espectral	Resolução espectral	Resolução espacial
1	visível	0,56 – 0,71 μm	
2	visível	0,74 – 0,88 μm	
3	infravermelho próximo	1,50 – 1,78 μm	
4	infravermelho termal	3,48 – 4,36 μm	
5	vapor d'água	5,35 – 7,15 μm	
6	vapor d'água	6,85 – 7,85 μm	
7	infravermelho termal	8,30 – 9,10 μm	3 km
8	infravermelho termal	9,38 – 9,94 μm	
9	infravermelho termal	9,80 – 11,80 μm	
10	infravermelho termal	11,00 – 13,00 μm	
11	infravermelho termal	12,40 – 14,40 μm	
12	HRV	0,4 – 1,1 μm	1 km

Considerando esses 12 canais, com comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm , o SEVIRI fornece uma melhor cobertura meteorológica aumentando com isso a qualidade das previsões de tempo, realizando uma observação contínua da Terra em disco cheio.

Além de sua alta regularidade, outra vantagem do MSG/SEVIRI é que a EUMETSAT (*European Meteorological Satellite Organization*) e a ESA

(*European Space Agency*), organizações responsáveis pelo programa MSG, têm investido na divulgação, geração e no fornecimento de produtos operacionais, obtidos por meio de imagens do MSG. O Instituto de Meteorologia de Portugal ficou responsável por coordenar a LSA-SAF (*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities*), um projeto em operação desde 2005 que foi criado com o objetivo de descentralizar o processamento de produtos de satélites meteorológicos (TRIGO et al., 2011).

Os produtos LSA-SAF constituem informações essenciais para diversas áreas do conhecimento como agricultura, recursos hídricos, climatologia, dentre outras, e estão disponíveis para a África, a Europa e América do Sul. Como exemplo desses produtos, há parâmetros de vegetação e indicadores biofísicos, temperatura de superfície da terra, albedo de superfície e parâmetros de radiação, dentre os quais se encontra o fluxo de radiação de ondas curtas na superfície ou LSA-SAF DSSF, que representa a energia radiante no intervalo de comprimento de ondas de 0,3 a 4,0 μm , que atinge a superfície terrestre por unidade de área e tempo. Esse produto é dependente do ângulo zenital do Sol, da nebulosidade e em menor grau da absorção atmosférica e do albedo de superfície (CAMACHO et al., 2011).

Na última década, pesquisadores de todo o mundo vêm utilizando produtos derivados de imagens do MSG para o acompanhamento de diversos fenômenos atmosféricos. Por meio do MSG, De Bruin et al. (2010) utilizaram valores diários de R_s para determinar a ETo pelo método de Makkink e Penman-Monteith-FAO na Etiópia e no vale do rio Jordão, na Jordânia. Para os autores, os primeiros resultados do projeto são promissores de modo que possibilitará a disseminação de produtos ETo em tempo quase real.

Ghilain, Arboleda e Gellens-Meulenberghs (2011) desenvolveram um modelo operacional para determinação de ET em escala continental a partir de produtos LSA-SAF. O modelo denominado de MET (da fusão “MSG ET”) foi

validado para a Europa, apresentando, assim, bons resultados para regiões de clima temperado. Em comparação com observações de superfície, as ETs obtidas apresentaram correlação espacial entre 80 e 90% em horários próximos ao meio-dia.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização geográfica e climática

O estudo foi desenvolvido para o Estado de Minas Gerais, situado na região Sudeste do Brasil, entre as coordenadas geográficas de $14^{\circ}13'57''$ a $22^{\circ}55'22''$ de latitude Sul e $39^{\circ}51'23''$ a $51^{\circ}02'45''$ de longitude Oeste de Greenwich (Figura 1). A delimitação da área de estudo foi determinada pela construção de um retângulo envolvente cujas coordenadas compreendem em todo Estado de Minas Gerais.



Figura 1 Localização geográfica

Em virtude da sua localização geográfica, inteiramente contido na zona intertropical, topografia, vegetação e dinâmica atmosférica, o Estado apresenta clima diversificado com regime pluviométrico bastante heterogêneo e, por vezes, irregular.

Segundo Carvalho et al. (2008), levando-se em consideração a classificação climática com base no índice de umidade de Thornthwaite, o clima no Estado pode ser dividido da seguinte forma:

A, superúmido, predominante em regiões sob a influência de altitudes muito elevadas, a exemplo da região sul que é influenciada pela Serra da Mantiqueira, possui índices climáticos superiores a 100, com médias anuais inferiores a 14°C e precipitações médias acumuladas superiores a 1750 mm durante o ano.

B₁, úmido, apresenta índice de umidade variando entre 20 e 40, temperatura média anual que varia de 18 a 23°C e precipitação média acumulada em torno de 1500 mm ao ano.

B₂, úmido, apresenta índice de umidade compreendido entre 40 e 60, temperatura média anual que varia de 19 a 20°C e precipitação média anual acumulada com valores na ordem de 1500 a 1600 mm.

B₃, úmido, possui índices climáticos entre 60 e 80, com temperatura média anual podendo ser inferior a 18°C e precipitação média anual acumulada podendo ser superior a 1600 mm.

B₄, úmido, apresenta índices de umidade entre 80 e 100, com temperaturas médias anuais mais baixas em virtude da influência das regiões serranas e precipitação média acumulada em torno de 1700 mm ao ano.

C₁, subúmido seco, possui índices de umidade entre -33,3 e 0, com temperaturas médias anuais que pode variar de 21 a 25°C e precipitação média anual acumulada variando de 850 a 1100 mm durante o ano.

C₂, subúmido, possui índice de umidade que varia entre 0 e 20, com temperatura média anual próxima a 22°C e precipitação média anual acumulada variando de 1100 a 1400 mm.

D, semiárido, apresenta índice de umidade compreendido entre -66,7 e -33,3, com temperaturas médias anuais superiores a 25°C e precipitação média acumulada inferiores a 850 mm ao ano.

Assim, é possível encontrar desde regiões com clima semiárido, a exemplo do norte e nordeste, até regiões com clima semiúmido na maior parte do Estado, com verão quente e chuvoso e inverno frio e seco.

3.2 Fluxograma

Para uma compreensão sucinta das etapas descritas, a seguir é apresentado um fluxograma na Figura 2.

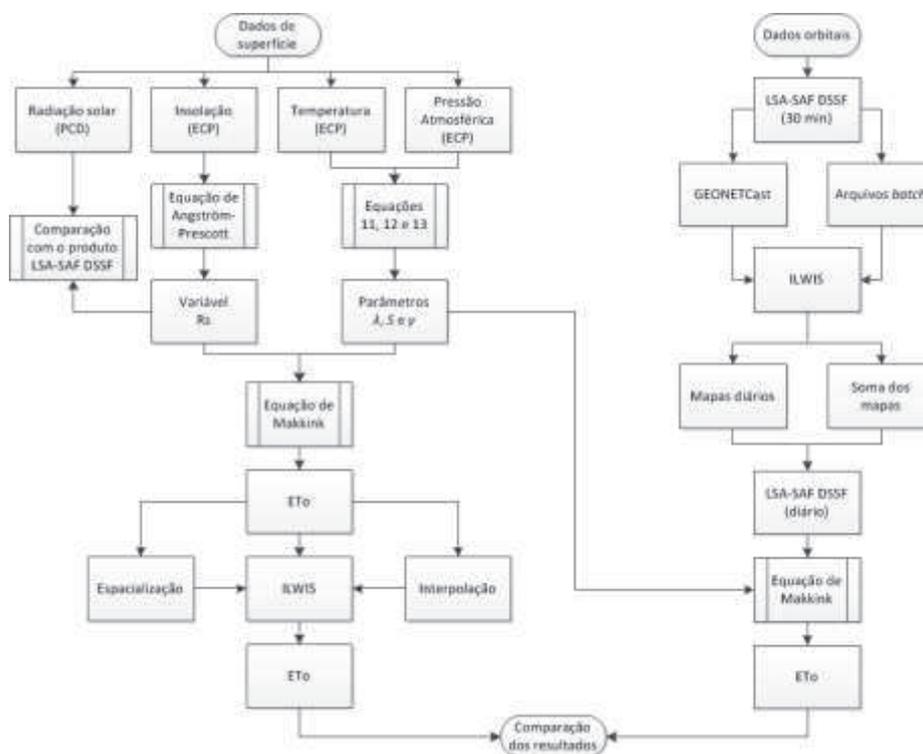


Figura 2 Fluxograma da metodologia adotada para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo)

Nota: PCD – Plataforma de Coleta de Dados; ECP – Estação Climatológica Principal; LSA-SAF DSSF – *Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities Downwelling Surface Short-wave Radiation Flux*; R_s – radiação solar incidente na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); λ – calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}); S – declividade da curva de pressão de saturação do vapor de água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ – coeficiente psicométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); ETo – evapotranspiração de referência (mm d^{-1}).

3.3 Dados de superfície utilizados

Os dados meteorológicos de superfície utilizados nas estimativas das evapotranspirações de referência (ETo) foram obtidos das estações meteorológicas convencionais, geralmente denominadas por Estações Climatológicas Principais (ECPs), pertencentes à rede nacional de postos de

observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os dados registrados por uma ECP da rede nacional do INMET são sistematicamente monitorados por observadores meteorológicos responsáveis pelo armazenamento dessa informação em bancos de dados disponibilizados via internet mediante a um simples cadastro.

Neste trabalho, foram utilizadas 38 estações meteorológicas escolhidas pela disponibilidade de dados, sendo 27 localizadas no Estado de Minas Gerais e as demais distribuídas no Distrito Federal e nos Estados de Goiás, São Paulo, do Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro e da Bahia.

A Tabela 1 apresenta os nomes, a localização e a caracterização geográfica (latitude, longitude e altitude) das estações meteorológicas do Estado de Minas Gerais e entorno utilizadas no trabalho. Na Figura 2, pode ser observada a distribuição espacial dessas estações.

Tabela 2 Caracterização das estações meteorológicas: nome, Unidade da Federação (UF), latitude, longitude e altitude

Estação meteorológica	UF	Latitude	Longitude	Altitude
Aimorés	MG	-19,49	-41,07	82,74
Araxá	MG	-19,60	-46,93	1023,61
BambuÍ	MG	-20,03	-46,00	661,27
Barbacena	MG	-21,25	-43,76	1126,00
Belo Horizonte	MG	-19,93	-43,93	915,00
Brasília	DF	-15,79	-47,92	1159,54
Caetité	BA	-14,06	-42,48	882,47
Caparaó	MG	-20,52	-41,90	843,18
Capinópolis	MG	-18,71	-49,55	620,60
Caratinga	MG	-19,80	-42,15	609,65
Conceição do Mato Dentro	MG	-19,01	-43,43	652,00
Diamantina	MG	-18,25	-43,60	1296,12
Divinópolis	MG	-20,17	-44,87	788,35
Formosa	GO	-15,53	-47,33	935,19
Itaperuna	RJ	-21,20	-41,90	123,59
Ituiutaba	MG	-18,95	-49,52	560,00
Januária	MG	-15,45	-44,36	473,71
Juiz de Fora	MG	-21,70	-43,35	939,96
Lavras	MG	-21,23	-45,00	918,84
Machado	MG	-21,75	-45,90	873,35
Mocambinho	MG	-15,08	-44,01	452,00

“Tabela 2, conclusão”

Estação meteorológica	UF	Latitude	Longitude	Altitude
Montes Claros	MG	-16,65	-43,83	646,29
Paracatu	MG	-17,13	-46,52	712,00
Paranaíba	MS	-19,75	-51,18	331,25
Patos de Minas	MG	-18,51	-46,43	940,28
Pedra Azul	MG	-16,00	-41,28	648,91
Pirapora	MG	-17,35	-44,91	505,24
Pirenópolis	GO	-15,85	-48,96	740,00
Posse	GO	-14,10	-46,37	825,64
Rio Verde	GO	-17,80	-50,91	774,62
Salinas	MG	-16,16	-42,30	471,32
São Carlos	SP	-22,01	-47,88	856,00
São Lourenço	MG	-22,10	-45,01	953,20
São Paulo Mirante	SP	-23,50	-46,62	792,06
São Simão	SP	-21,48	-47,55	617,39
Sete Lagoas	MG	-19,40	-44,25	732,00
Uberaba	MG	-19,73	-47,95	737,00
Viçosa	MG	-20,75	-42,85	689,73

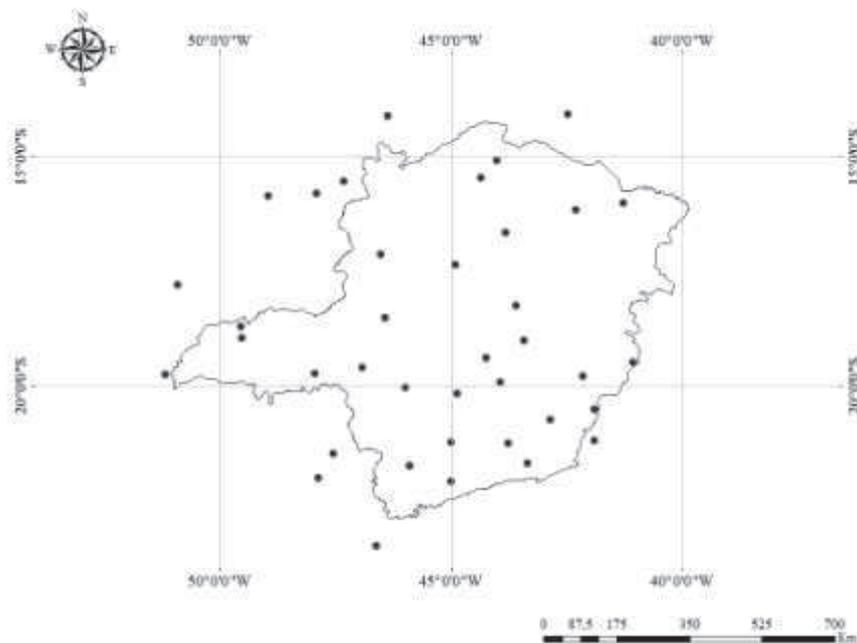


Figura 3 Distribuição espacial das estações climatológicas do INMET

Além dos dados das ECPs, foram utilizados dados da Plataforma de Coleta de Dados (PCD), da rede do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), localizada no campus da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, Minas Gerais.

3.4 Dados orbitais utilizados

Foram utilizados dados do produto LSA-SAF DSSF (*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities Down-welling Surface Short-wave Radiation Flux*), obtido por meio de imagens do satélite Meteosat de Segunda Geração 2 (MSG-2), para o ano de 2010, adquiridos via download diretamente

do portal <<http://www.landsaf.meteo.pt>>, os quais estão disponíveis para a Europa, a África e América do Sul em formato de arquivo do tipo HDF5 (*Hierarchical Data Format*).

O produto LSA-SAF DSSF é gerado a partir de imagens obtidas a cada 15 minutos pelo sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), usando três canais, sendo os canais 1 e 2 correspondentes às bandas do visível (0,6 μm e 0,8 μm) e o canal 3 correspondente à banda do infravermelho próximo (1,6 μm). Este produto possui uma resolução temporal de 30 minutos, ou seja, teoricamente são gerados 48 produtos por dia.

Assim, neste trabalho foram analisados os dias 5, 16 e 27 para todos os meses do ano de 2010, à exceção do mês de dezembro, o qual teve as seguintes datas consideradas: 6, 17 e 28. Essas datas foram escolhidas com base na avaliação visual, na qual foi evidenciada a menor incidência de nuvens.

Matematicamente, o fluxo de radiação de ondas curtas na superfície, na Equação 1 representada por F^\downarrow , é definida como a integral da irradiância espectral $E(\lambda)$ no seguinte intervalo de comprimento de onda: $\lambda_1 = 0,3 \mu\text{m}$ e $\lambda_2 = 4,0 \mu\text{m}$.

$$F^\downarrow = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Assim a irradiância espectral é a integral hemisférica angular da radiância espectral $L(\lambda, \theta, \phi)$, ponderada pelo cosseno do ângulo zenital conforme a Equação 2, contribuindo para a radiação solar direta, atenuada pela atmosfera, bem como para a radiação difusa.

$$E(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\lambda, \theta, \phi) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2)$$

Em outra notação, o produto LSA-SAF DSSF pode ser definido como

$$F^\downarrow = F_0 dr \cos \theta_s T \quad (3)$$

sendo,

F_0 – constante solar (com pequenas correções de acordo com o intervalo de comprimento de onda considerado);

θ_s – ângulo zenital (rad);

T – transmitância efetiva da atmosfera ou do sistema nuvem-atmosfera (%);

dr – distância relativa da Terra ao Sol em função do dia juliano J , conforme a Equação 4.

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (4)$$

A parametrização aplicada ao termo T , utilizado no algoritmo do produto LSA-SAF DSSF, varia em função das condições atmosféricas, ou seja, situações de céu claro ou nublado exigem diferentes parametrizações, visto que a radiação incidente que atinge a superfície diminui consideravelmente com céu encoberto. Com isso, é essencial a utilização de uma máscara de nuvens para a execução do algoritmo. Por meio dessa máscara, os pixels são selecionados e, quando afetado por nuvens, são excluídos.

Essa informação é fornecida por um software desenvolvido pelo NWC-SAF (*The Satellite Application Facility on support to Nowcasting*) que está integrado ao sistema operacional LSA-SAF.

3.5 Comparação entre a radiação solar incidente e o produto LSA-SAF DSSF

Para testar a qualidade dos valores de radiação solar incidente (R_s) encontrados, foi efetuada uma comparação entre o produto LSA-SAF DSSF com a R_s medida na PCD e a R_s estimada por dados da ECP, para o ano de 2010, no município de Lavras, Minas Gerais.

3.5.1 Comparação entre a R_s medida na PCD e o produto LSA-SAF DSSF

Os dados diários de radiação solar acumulada da PCD para o ano de 2010 foram obtidos do piranômetro LI200X e disponibilizados no ambiente virtual do CPTEC no seguinte endereço eletrônico: <<http://www.cptec.inpe.br>>.

O valor final de radiação foi obtido por meio da soma dos valores diários registrados às 12, 15, 18 e 21 h GMT, o que equivale respectivamente às 9, 12, 16 e 18 h no horário local.

3.5.2 Comparação entre a R_s estimada por dados das ECPs e o produto LSA-SAF DSSF

No processo de estimativa da R_s na superfície, utilizaram-se valores diários de insolação registrados pela estação climatológica, localizada no campus da Universidade Federal de Lavras, em convênio com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), posteriormente inseridos na equação de Angström-PreScott, representada na Equação 5.

$$R_s = \left(a + b \times \frac{n}{N} \right) \times R_a \quad (5)$$

sendo,

R_s – radiação solar incidente na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

a – coeficiente linear da equação;

b – coeficiente angular da equação;

n – insolação (h);

N – duração astronômica do dia (h);

R_a – radiação solar incidente no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Na Equação 5 N e R_a são obtidos pelas seguintes equações:

$$N = \frac{24 \omega_s}{\pi} \quad (6)$$

$$R_a = 37,586 \times dr [(\omega_s \times \sin \phi \times \sin \delta) + (\cos \phi \times \cos \delta \times \sin \omega_s)] \quad (7)$$

em que,

ϕ – latitude local (rad);

δ – declinação solar (rad);

ω_s – ângulo horário do nascer ou pôr do sol (rad), por sua vez obtido pela Equação 8:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \times \tan \delta) \quad (8) \text{ e,}$$

dr – distância relativa da Terra ao Sol, obtida conforme a Equação 4.

Uma vez obtida a R_s estimada por satélite e por estações climatológicas, verificou-se a normalidade dos dados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 0,05. De acordo com esse teste, para que a distribuição seja considerada normal os valores de máxima divergência das

séries não devem superar o valor crítico no nível de significância estabelecido, conforme descrito por Assis, Arruda e Pereira (1996).

Em seguida, os dados foram avaliados pelo teste t, com nível de significância de 0,05 e, depois comparados por meio do método de regressão linear simples e do índice estatístico do erro médio percentual (EMP), conforme adotado por Castro et al. (2010) e Gusmão et al. (2012), Equação 9.

$$EMP = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{x'_i - x_i}{x_i} \right|}{N} \times 100 \quad (9)$$

sendo,

x'_i – valor estimado pelo satélite;

x_i – valor medido e/ou estimado na superfície;

N – número de pares de dados.

3.6 Estimativa da evapotranspiração de referência por dados de estações climatológicas

Com base nos dados das ECPs foi possível obter a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando o método proposto por Makkink (1957), conforme Equação 10. A escolha do método de Makkink para a estimativa da ET_o é justificada pelo fato de que esse método utiliza apenas dados de temperatura, pressão atmosférica, radiação solar incidente e/ou insolação. Além da boa correlação existente entre esse método e o modelo Penman-Monteith-FAO conforme observado em Bragança et al. (2010).

$$ET_o = 0,61 \frac{R_s}{\lambda} \times \frac{S}{S+\gamma} - 0,12 \quad (10)$$

sendo,

ET_o – evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

R_s – radiação solar incidente na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), obtida conforme as Equações 5 a 8;

λ – calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}), para condições normais de temperatura e pressão $\lambda \cong 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$;

S – declividade da curva de pressão de saturação do vapor de água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ – coeficiente psicométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Os parâmetros λ , S e γ da Equação 10 são obtidos, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3})T \quad (11)$$

$$S = \frac{4098 \, es}{(T+237,2)^2} \quad (12)$$

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (13)$$

em que,

T – pressão atmosférica média diária (kPa);

es – pressão de saturação do vapor de água, Equação 14;

P – pressão atmosférica média diária (kPa).

Por fim, o parâmetro es da Equação 12 é obtido com base na equação seguinte:

$$es = 0,6108 \times 10^{\left(\frac{7,5 T}{237,3 + T}\right)} \quad (14)$$

Posteriormente, os valores de ETo foram espacializados no ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*) versão 3.72, *software* livre e de código aberto desenvolvido e distribuído gratuitamente pela 52° North no seguinte endereço eletrônico: <<http://www.52north.org>>. De modo que, por meio de operações com mapas, obteve-se um valor de ETo para cada dia analisado.

Em seguida, após testes preliminares, os dados foram interpolados por meio do método da krigagem ordinária, que define a correlação espacial entre as amostras com exatidão, além de apresentar um efeito de suavização e fornecer,

em média, estimativas não tendenciosas e com mínima variância, conforme observado em Sartori et al. (2010) e Vilanova, Simões e Trannin (2012).

Por meio desse interpolador, foram obtidos valores de ETo estimados pixel a pixel na resolução de 1 km² para toda a área estudada e não apenas para as coordenadas referentes às estações meteorológicas utilizadas.

3.7 Estimativa da evapotranspiração de referência utilizando o produto

LSA-SAF DSSF

Os produtos LSA-SAF DSSF foram adquiridos, via download, em formato HDF5, diretamente do portal LandSaf (<http://www.landsaf.meteo.pt>), sendo em seguida importados para o ILWIS.

Esse processo de importação foi realizado por meio da caixa de ferramentas GEONETCast e otimizado a partir de rotinas elaboradas com comandos de arquivos *batch* (.bat). O GEONETCast é um sistema global de distribuição de informação que tem por objetivo a disseminação de dados ambientais e produtos de satélites para usuários de todo o globo (MAATHIUS et al., 2011).

Uma vez importados para o ILWIS, foi criada uma sequência temporal dos 48 produtos diários de DSSF. Em seguida, os produtos foram somados obtendo-se um valor diário equivalente à radiação solar incidente (Rs) em W m⁻², posteriormente convertidos em MJ m⁻² d⁻¹ por meio da multiplicação pelo fator de correção 0,0018.

Até essa etapa, os mapas apresentavam a projeção original do produto (MSG) e com resolução espacial de 3 km para toda a América do Sul. Em seguida, os mapas foram reprojatados para a projeção Geográfica e datum WGS84. A fim de determinar com maior exatidão a posição geográfica das

estações climatológicas, foi feita uma reamostragem de pixels para resolução espacial de 1 km.

O método de interpolação utilizado no processo de reamostragem do pixel de 3 km para 1 km foi o vizinho mais próximo, pois, segundo Novo (2010), é um procedimento de fácil manipulação que não altera o valor radiométrico do pixel.

Para estimativa da ETo, utilizando-se o método de Makkink, foi aplicada a Equação 10, sendo a variável R_s substituída pelo produto LSA-SAF DSSF. Para aplicação da equação de Makkink, todas as variáveis da equação foram interpoladas e rasterizadas para pixels de 1 x 1 km.

Depois de estimada a ETo por dados de estações climatológicas e com o uso do produto LSA-SAF DSSF, foi realizado o teste t, com nível de significância de 0,05, para comparação dos resultados e, em seguida, calculado o erro médio percentual (EMP) conforme a Equação 9.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Comparação dos dados de radiação solar incidente obtida para o município de Lavras, Minas Gerais

Os valores de radiação solar incidente (Rs), obtidos para o município de Lavras ao longo do ano de 2010, foram analisados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 0,05, conforme observado na Tabela 3. No processo de análise foram utilizados dados do produto LSA-SAF DSSF, da Estação Climatológica Principal (ECP) e da Plataforma de Coleta de Dados (PCD).

Tabela 3 Análise da normalidade para os dados de radiação solar incidente (Rs) segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov com nível de significância de 0,05

	LSA-SAF DSSF	PCD	ECP
Média	19,19	16,81	18,65
Desvio padrão	6,01	5,24	5,30
Mínimo	2,40	2,70	6,00
Máximo	31,5	30,80	30,40
Kolmogorov-Smirnov Z	0,77	0,78	0,76
p-valor	0,59	0,58	0,62
p-valor corrigido	0,57	0,57	0,60

Verifica-se, na Tabela 3, que as variáveis analisadas possuem o p-valor do teste de Kolmogorov-Smirnov com a correção de Lilliefors (p-valor corrigido) maior que 0,05. Desse modo, segundo Assis, Arruda e Pereira (1996),

deve ser aceita a hipótese de normalidade das populações estudadas para o nível de significância em questão.

Confirmada a hipótese de que os dados de Rs têm distribuição normal, foi aplicado o teste t para comparação das médias dos valores obtidos cujos resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 Análise do teste t com significância de 0,05 para os dados de radiação solar incidente (Rs)

	LSA-SAF DSSF e PCD	LSA-SAF DSSF e ECP
t_{calc}	5,41	1,21
t_{tab}	1,96	1,96

Observa-se, na Tabela 4 que, para a análise do produto LSA-SAF DSSF com a PCD, o valor de t calculado (t_{calc}) é maior que o valor de t tabelado (t_{tab}) o que implica que há diferença significativa pela análise do teste t com nível de significância de 0,05. Ao contrário do que ocorre na análise do produto LSA-SAF DSSF com a ECP, em que t_{calc} é menor do que t_{tab} , não há assim diferença significativa pela análise do teste t com nível de significância de 0,05.

Esses resultados apontam para uma melhor correlação entre o produto LSA-SAF DSSF e a ECP, justificando, assim, o uso desta no processo de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Ademais, segundo Teramoto, Carvalho e Dantas (2009), a ECP apresenta instrumentos confiáveis em especial, em virtude do padrão de instalação desses estar de acordo com as normas da Organização Meteorológica Mundial (OMM), o que possibilita o aparecimento de erros em escala menor em comparação com a PCD.

Nas Tabelas 5 e 6, verificam-se os resultados dos coeficientes de determinação (r^2), obtidos pelo método de regressão linear simples, e do índice

estatístico do erro médio percentual (EMP) referente à comparação do produto LSA-SAF DSSF com a PCD.

Tabela 5 Coeficiente de determinação (r^2) e erro médio percentual (EMP) do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a Plataforma de Coleta de Dados (PCD)

	Equação da reta ($y = R_s\text{-PCD}$ e $x = \text{LSA-SAF DSSF}$)	r^2	EMP
Janeiro	$y = 0,7834x + 2,1777$	0,80	0,48
Fevereiro	$y = 0,8569x + 0,2228$	0,93	0,55
Março	$y = 0,8908x + 0,3521$	0,85	0,37
Abril	$y = 0,7399x + 2,6783$	0,76	0,43
Maiο	$y = 0,8151x + 1,6103$	0,96	0,30
Junho	$y = 0,8503x + 1,2208$	0,86	0,26
Julho	$y = 0,7206x + 3,3496$	0,71	0,17
Agosto	$y = 1,0664x - 2,9548$	0,71	0,43
Setembro	$y = 0,8983x - 1,0432$	0,71	0,62
Outubro	$y = 0,7759x + 0,0700$	0,67	1,01
Novembro	$y = 0,8466x - 0,5315$	0,95	0,76
Dezembro	$y = 0,7726x + 1,8639$	0,89	0,64

Tabela 6 Coeficiente de determinação (r^2) e erro médio percentual (EMP) do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a Estação Climatológica Principal (ECP)

	Equação da reta ($y = R_s$-ECP e $x = \text{LSA-SAF DSSF}$)	r^2	EMP
Janeiro	$y = 0,9687x - 1,0806$	0,82	0,29
Fevereiro	$y = 0,8641x + 2,6055$	0,94	0,08
Março	$y = 0,7812x + 3,7536$	0,87	0,11
Abril	$y = 0,8647x + 2,5589$	0,84	-0,04
Mai	$y = 0,7696x + 3,7946$	0,80	-0,13
Junho	$y = 0,7646x + 3,5677$	0,96	-0,08
Julho	$y = 0,7526x + 3,9255$	0,82	-0,12
Agosto	$y = 0,9880x - 0,1900$	0,79	0,08
Setembro	$y = 0,7974x + 2,9679$	0,94	0,21
Outubro	$y = 0,9066x + 0,1059$	0,78	0,35
Novembro	$y = 0,8479x + 2,7392$	0,94	0,05
Dezembro	$y = 0,8745x + 1,8219$	0,90	0,18

Ao comparar os resultados, por meio da análise conjunta das Tabelas 5 e 6, observa-se alto coeficiente de determinação (r^2) da R_s expressa pelo produto LSA-SAF DSSF tanto para com a R_s obtida pela PCD, quanto para a R_s estimada pela ECP.

Os maiores valores de r^2 foram obtidos para os meses de fevereiro com $r^2 = 0,94$ e $0,93$ e novembro com $r^2 = 0,94$ e $0,95$, respectivamente, para valores de R_s estimados pela ECP e obtidos pela PCD em comparação com o produto LSA-SAF DSSF. Em contrapartida, os menores valores de r^2 foram obtidos para os meses de agosto com $r^2 = 0,71$ e $0,79$ e outubro com $r^2 = 0,67$ e $0,78$, respectivamente, para valores de R_s obtidos pela PCD e estimados pela ECP em comparação com o produto LSA-SAF DSSF.

Também é possível constatar, diante dos coeficientes de determinação encontrados, uma maior concordância entre os valores de r^2 obtidos no processo de comparação entre o produto LSA-SAF DSSF e a ECP.

De maneira geral, em relação aos valores obtidos pelo índice estatístico EMP, é possível observar uma superestimativa dos valores de R_s referentes ao produto LSA-SAF DSSF em comparação com os valores de R_s estimados pela ECP para os meses de maior nebulosidade. Em contrapartida, observa-se uma subestimativa dos valores para os meses com menor nebulosidade.

Quanto à comparação com a R_s , obtida pela PCD, o produto LSA-SAF DSSF superestimou os valores de R_s para todos os meses do ano.

Os resultados supracitados corroboram com as afirmações de Perez, Seals e Zelenka, (1997), cujas estimativas de radiação solar, obtidas por meio de modelos numéricos combinados com dados de satélite, apresentam menores desvios dos valores observados em superfície.

Logo, o bom desempenho desse índice estatístico pode estar relacionado com a parametrização do algoritmo da máscara de nuvem utilizada e integrada ao sistema operacional LSA-SAF ou mesmo com a resposta espectral do canal visível do satélite Meteosat à interação com as nuvens indo ao encontro das afirmações de Schmetz et al. (2002).

Verifica-se, na Tabela 7, a variação dos valores médios mensais do produto LSA-SAF DSSF em comparação com os valores médios mensais de R_s estimados pela ECP e obtidos pela PCD.

Tabela 7 Variação dos valores médios mensais de radiação solar incidente (Rs) para o ano de 2010 no município de Lavras, MG

Mês	Variação de Rs ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)		
	LSA-SAF DSSF	ECP	PCD
Janeiro	13,7 - 31,5	12,8 - 29,9	11,9 - 28,4
Fevereiro	3,9 - 29,9	9,7 - 28,0	2,9 - 26,7
Março	4,8 - 26,7	9,6 - 24,7	4,8 - 30,2
Abril	7,3 - 22,4	8,6 - 22,7	6,7 - 19,9
Mai	6,3 - 19,3	8,5 - 19,3	6,6 - 17,6
Junho	2,4 - 16,8	6,0 - 17,0	2,7 - 26,3
Julho	8,4 - 18,7	9,4 - 18,9	8,3 - 17,5
Agosto	17,1 - 22,6	15,5 - 22,0	1,8 - 21,0
Setembro	4,7 - 25,4	8,9 - 23,5	3,4 - 30,8
Outubro	7,1 - 29,0	9,1 - 27,3	5,5 - 25,7
Novembro	6,5 - 31,1	10,2 - 28,7	3,6 - 27,1
Dezembro	11,8 - 30,9	12,3 - 30,4	9,2 - 27,4

Os valores máximos de Rs foram observados nos meses de janeiro e dezembro, sendo $31,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ o valor máximo de Rs obtido para o produto LSA-SAF DSSF em janeiro e $30,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ o valor máximo de Rs estimado pela ECP em dezembro. Em ambos os casos, os valores de radiação encontrados estão de acordo com o período de maior incidência de radiação solar no hemisfério sul, verão, que vai de dezembro a março. Já a PCD registrou valor máximo de Rs, $30,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, no mês de setembro.

Contudo, ainda que a radiação incidente seja fortemente influenciada pela nebulosidade, os valores de Rs obtidos para esses meses estão de acordo com os estudos de Teramoto e Escobedo (2012). Segundo estes, no verão os valores de radiação incidente são maiores em razão do declínio do Sol se aproximar da latitude local; ao contrário do que ocorre no inverno, em que os valores de radiação incidente são menores, pois é quando o Sol declina mais distante da latitude local.

4.2 Evapotranspiração de referência

A análise estatística realizada por meio de teste t com significância de 0,05 para os valores médios de evapotranspiração de referência (ET_o) obtidos está representada na Tabela 8.

Tabela 8 Análise do teste t com significância de 0,05 para os dados de evapotranspiração de referência (ET_o)

LSA-SAF DSSF e ECPs	
t_{calc}	0,70
t_{tab}	1,99

Verifica-se, na Tabela 8, que não há diferença significativa entre a ET_o estimada por dados do produto LSA-SAF DSSF e por dados ECPs para o teste t com nível de significância de 0,05, pois $t_{calc} < t_{tab}$.

A seguir, a média dos valores de ET_o obtidos para o Estado de Minas Gerais pelo método de Makkink para os dados das ECPs e para os dados do produto LSA-SAF DSSF, referente aos dias estudados ao longo do ano de 2010, estão representados graficamente na Figura 4 e na Tabela 9.

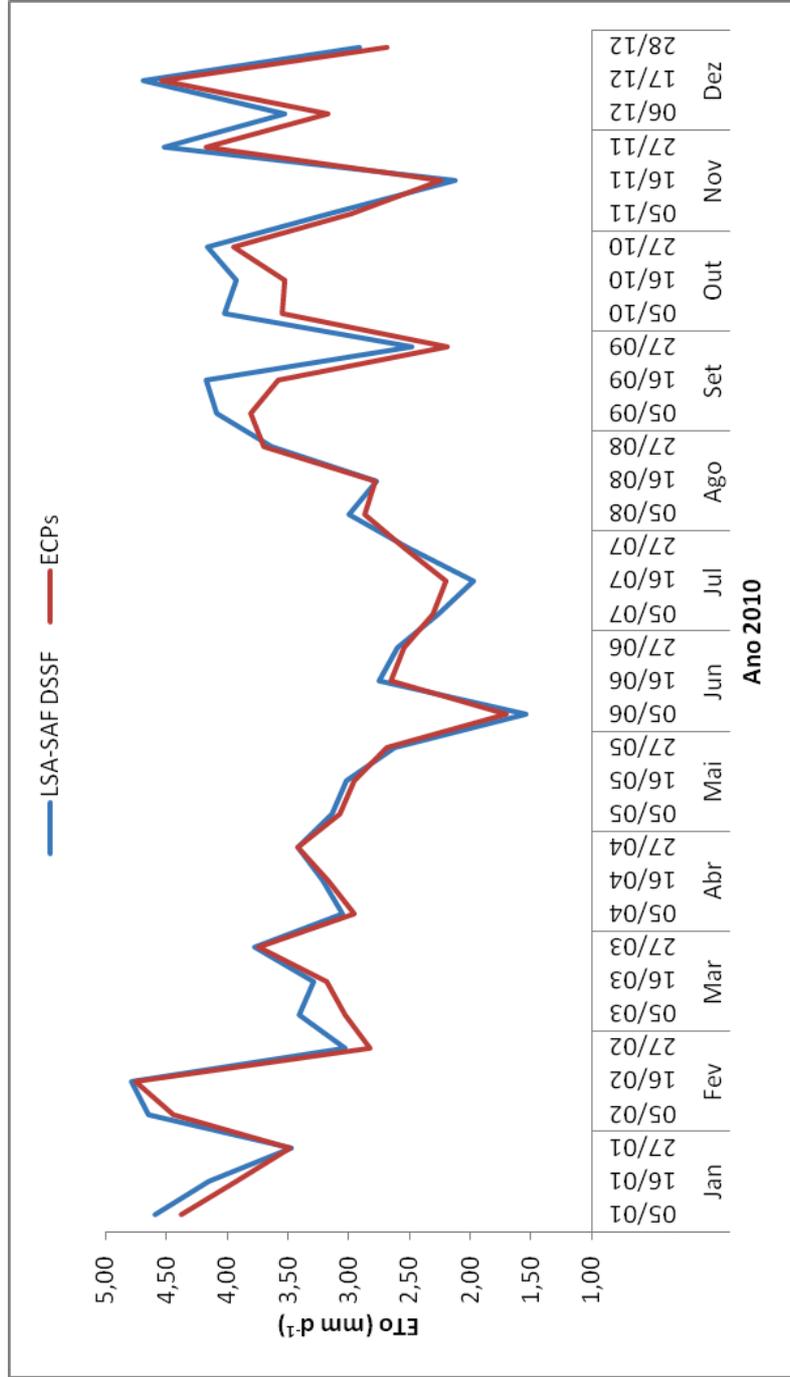


Figura 4 Comportamento médio da evapotranspiração de referência (ETo) estimada com o uso do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a ETo estimada com dados das Estações Climatológicas Principais (ECPs) para o Estado de Minas Gerais

Tabela 9 Valores médios da evapotranspiração de referência (ET_o) estimada com o uso do produto LSA-SAF DSSF em comparação com a ET_o estimada com dados das Estações Climatológicas Principais (ECPs) para o Estado de Minas Gerais

Mês	Data	ET _o		EMP
		LSA-SAF DSSF	ECP	
Janeiro	05/01	4,59	4,38	0,14
	16/01	4,15	3,93	0,16
	27/01	3,47	3,48	-0,01
Fevereiro	05/02	4,65	4,44	0,13
	16/02	4,79	4,75	0,02
	27/02	3,03	2,83	0,19
Março	05/03	3,41	3,03	0,35
	16/03	3,29	3,18	0,10
	27/03	3,77	3,74	0,02
Abril	05/04	3,05	2,95	0,09
	16/04	3,21	3,17	0,03
	27/04	3,42	3,42	0,00
Maio	05/05	3,14	3,07	0,07
	16/05	3,02	2,96	0,05
	27/05	2,62	2,69	-0,08
Junho	05/06	1,54	1,70	-0,26
	16/06	2,75	2,65	0,10
	27/06	2,60	2,55	0,04
Julho	05/07	2,27	2,31	-0,04
	16/07	1,97	2,20	-0,29
	27/07	2,51	2,54	-0,03
Agosto	05/08	3,00	2,87	0,12
	16/08	2,77	2,78	-0,02
	27/08	3,63	3,70	-0,05
Setembro	05/09	4,09	3,81	0,21
	16/09	4,17	3,58	0,46
	27/09	2,48	2,19	0,36

“Tabela 9, conclusão”

Mês	Data	ETo		EMP
		LSA-SAF DSSF	ECP	
Outubro	05/10	4,02	3,55	0,36
	16/10	3,92	3,53	0,30
	27/10	4,16	3,95	0,14
Novembro	05/11	3,16	2,98	0,17
	16/11	2,13	2,24	-0,15
	27/11	4,52	4,17	0,23
Dezembro	06/12	3,53	3,17	0,31
	17/12	4,69	4,54	0,09
	28/12	2,91	2,68	0,25

Por meio da análise da Figura 4 e da Tabela 9 é possível observar uma estimativa satisfatória da ETo com a adição do produto LSA-SAF DSSF em substituição ao Rs na equação de Makkink em comparação com a ETo estimada com dados das ECPs. Quando o produto LSA-SAF DSSF foi utilizado, observou-se uma tendência de superestimar os valores médios de ETo, concordando com Jensen, Burman e Allen (1990), ao concluírem que métodos baseados na temperatura do ar e na radiação tendem a superestimar a ETo em 15 a 25%, em climas úmidos e contrariando Sun et al. (2011), que obtiveram em média uma subestimativa dos valores de evapotranspiração.

Nos meses secos, período que vai de maio a agosto, a ETo estimada com o uso do produto LSA-SAF DSSF variou em média de 1,54 mm d⁻¹ a 3,63 mm d⁻¹, enquanto que a ETo estimada com dados das ECPs variou em média de 1,70 mm d⁻¹ a 3,70 mm d⁻¹.

Já nos meses caracterizados pelo período chuvoso, de setembro a abril, a ETo estimada com o uso do produto LSA-SAF DSSF variou em média de 2,13 mm d⁻¹ a 4,79 mm d⁻¹, enquanto que a ETo estimada com dados das ECPs variou em média de 2,19 mm d⁻¹ a 4,75 mm d⁻¹.

5 CONCLUSÕES

O uso do produto LSA-SAF DSSF, para o período analisado, apresentou resultados expressivos, além de boa concordância com a estimativa da radiação solar incidente (R_s) mediante dados de superfície.

O produto LSA-SAF DSSF pode ser considerado como uma alternativa para substituição da R_s no processo de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) quando esta utiliza a R_s , a exemplo do método de Makkink.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, C.; HERRERO, J.; POLO, M. J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v. 14, n. 12, p. 2479-2494, 2010.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 50, p. 121-126, 1924.
- ARAÚJO, W. F.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; VENANCIO, J. B. Evapotranspiração de referência diária em Boa Vista (RR) com base na temperatura do ar. **Irriga**, Botucatu, p. 155-169, 2012. Número Especial.
- ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Universitária, 1996. 161 p.
- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.
- BORGES, V. P. et al. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 961-969, 2010.
- BRAGANÇA, R. et al. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no Estado do Espírito Santo. **Idesia**, Arica, v. 28, n. 2, p. 21-29, 2010.
- CAMACHO, F. et al. **LSA-SAF Product User Manual: Down-welling Surface Shortwave Flux (DSSF)**, PUM-VEJA v2.6, 2011.

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

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CARVALHO, L. G. et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CARVALHO, L. G. et al. **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico. Lavras: UFLA, 2008. p. 89-102.

CASTRO, F. S. et al. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.

CHOU, M. D. A solar radiation model for use in climate studies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 49, p. 762-772, 1992.

CHRYSOULAKIS, N.; DIAMANDAKIS, M.; PRASTACOS, P. GIS Based estimation and mapping of local level daily irradiation on inclined surfaces. In: AGILE CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 7., 2004, Heraklion. **Proceedings...** Heraklion, 2004.

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

De BRUIN, H. A. R. et al. Reference crop evapotranspiration derived from geostationary satellite imagery: a case study for the Fogera flood plain, NW-Ethiopia and the Jordan Valley, Jordan. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, p. 2219-2228, 2010.

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

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1984. 178 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

EUMETSAT. **MSG Level 1.5 Image Data Format Description**. Darmstadt, Germany, 2010.

GHILAIN, N.; ARBOLEDA, A.; GELLENS-MEULENBERGHS, F. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 3, p. 771-786, 2011.

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

GUL, M. S.; MUNEEER, T.; KAMBEZIDIS, H. D. Models for obtaining solar radiation from other meteorological data. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 64, p. 99-108, 1998.

GUSMAO, A. C. V. L. et al. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1107-1114, 2012.

HENRIQUE, F. A. N.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 594-599, 2007.

JACOBS, J. M. et al. Solar radiation, longwave radiation and emergent wetland evapotranspiration estimates from satellite data in Florida, USA. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, n. 3, p. 461-476, 2004.

JACOBS, J. M. et al. GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 266, n. 1-2, p. 53-65, 2002.

JENSEN, M. E., HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 89, n. 4, p. 15-41, 1963.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332p

LEFEVRE, M.; WALD, L.; DIABATE, L. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 240-253. 2007.

LEMOS FILHO, L. C. A. et al. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010.

MAATHUIS, B. et al. GEONETCast Toolbox. Installation, configuration and user guide of the GEONETCast Toolbox plug-in for ILWIS 3.7, XML version 1.2. ITC. Enschede, The Netherlands, 2011. <http://52north.org/downloads/earth-observation/geonetcast/toolbox>.

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

MEDINA, J. L. et al. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on remote sensing and GIS. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 23, n. 4, p.427-432. 1998.

MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 100, p. 231-241, 2000.

MILLER, D. G. et al. Testing the spatial applicability of the Johnson-Woodward method for estimating solar radiation from sunshine duration data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 466-480, 2008.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: E. Blucher, 2010. 387 p.

PELLEGRINO, G. Q. et al. O uso de sistemas de informações geográficas no mapeamento de informações agrometeorológicas. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-CPAC, 1998.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. Netherlands. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 4, p. 9-29, 1956.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 193, n. 1, p. 120-146, 1948.

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

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

PEREIRA, D. R. et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 2488-2493, 2009.

PEREZ, R.; SEALS, R.; ZELENKA, A. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data. **Solar Energy**, v. 60, n. 2, p. 89-96, 1997.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transaction of the Royal Society Science Australian**, Adelaide, v. 64, p. 114-118, 1940.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

SARTORI, A. A. C. et al. Variabilidade temporal e mapeamento dos dados climáticos de Botucatu-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 2, p. 131-139, 2010.

SCHMETZ, J. et al. An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 977-992, 2002.

SCHÜTTEMEYER, D. et al. Satellite-based actual evapotranspiration over drying semiarid terrain in West Africa. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, p. 97-111, 2007.

SILVA, V. J. et al. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 95-101, 2011.

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

SUN, Z. et al. Mapping daily evapotranspiration and dryness index in the East African highlands using MODIS and SEVIRI data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 1, p. 163-170, 2011.

TAGLIAFERRE, C. et al. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TERAMOTO, E. T.; CARVALHO, L. G.; DANTAS, A. A. A. Comparação entre valores de temperatura média do ar de estação convencional com valores obtidos em estação automática e análise de equações para estimativas de médias da temperatura do ar em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 1798-1803, 2009.

TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 985-992, 2012.

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

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

TRIGO, I. F. et al. The Satellite Application Facility on Land Surface Analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 2725-2744, 2011.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1992. 374 p.

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

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Recife: M. A. Varejão-Silva, 2006. 449 p. Versão Digital

VILANOVA, M. R. N.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C. B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ETO) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 179-194, 2012.