**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Modelagem espacial da evapotranspiração utilizando Modelo de
Duas Fontes em ambiente SIG para florestas e cana-de-açúcar**

Raoni Wainer Duarte Bosquilia

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Raoni Wainer Duarte Bosquilia
Engenheiro Agrônomo

**Modelagem espacial da evapotranspiração utilizando Modelo de Duas
Fontes em ambiente SIG para florestas e cana-de-açúcar**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Bosquilia, Raoni Wainer Duarte

Modelagem espacial da evapotranspiração utilizando Modelo de Duas Fontes em ambiente SIG para florestas e cana-de-açúcar / Raoni Wainer Duarte Bosquilia. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016. 172 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Evapotranspiração 2. Sensoriamento remoto 3. Landsat 8 I. Título

CDD 526.0285
B744m

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

Dedico esse trabalho à minha esposa Samira, aos meus pais Sebastião e Liane, meu irmão Renan e em memória de minha avó Loiva que, com certeza, esteve olhando por mim em todos os momentos da realização desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela incondicional força e ajuda, tanto nos momentos fáceis como nos mais difíceis.

À minha esposa Samira, por todo o carinho, compreensão, amor e companheirismo em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais, Sebastião e Liane, ao meu irmão Renan e à toda minha família pelo apoio e amor que sempre me transmitiram.

Aos meus avós Jacyra e Décio, a minha avó Loiva (sempre na memória) e a minha tia e madrinha Cleusa, que sempre me mostrou, com seu trabalho e dedicação aos alunos, que estudar e ensinar é (sempre) o melhor caminho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e à Universidade de São Paulo pelas ótimas condições de estudo oferecidas e pela oportunidade de aprender cada dia mais, tanto na Graduação quanto na Pós-Graduação.

Ao Instituto Water for Food da Universidade de Nebraska - Lincoln por ter me recebido sempre com boas-vindas e por ter me aberto as portas para que eu realizasse parte desse sonho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Nascimento Duarte pela amizade, confiança, orientação, apoio, compreensão e por todo conhecimento compartilhado.

Ao professor e amigo Christopher M. U. Neale que me recebeu com muita satisfação para o período sanduíche realizado na Universidade de Nebraska - Lincoln, e que compartilhou comigo todo seu conhecimento e sua orientação para a realização desse trabalho, além de todo apoio e ajuda para minha estadia.

Ao professor Silvio Frosini de Barros Ferraz, que auxiliou na execução do presente trabalho desde o primeiro dia do projeto, transmitindo seu conhecimento e auxiliando em todos os momentos necessários.

Ao colega de Doutorado Burdette Barker, pela ajuda com o modelo utilizado no trabalho durante o período sanduíche na Universidade de Nebraska - Lincoln, e pelos vários momentos empenhados em me auxiliar com o projeto.

Aos professores Peterson Ricardo Fiorio, Paulo Cesar Sentelhas, Kelly Tonello e a todos os professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP pela amizade e, que de alguma forma, fizeram parte desse trabalho.

Ao Eng. Dr. Gré de Araujo Lobo por toda ajuda com os dados obtidos do DAEE e por permitir esse elo de ligação entre pesquisa e extensão.

Aos amigos e colegas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Dois Vizinhos, especialmente às professoras coordenadoras Maria Madalena Santos da Silva e Veridiana Padoin Weber, por me permitirem, entre viagens e momentos de aula, encerrar esse ciclo e sempre terem me apoiado na realização desse sonho.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação da ESALQ/USP, pelas conversas, conselhos e auxílios em todas as etapas desse trabalho.

Ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, por autorizar o uso do programa ESRI/ArcGIS 10.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio na concessão da bolsa de estudos.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo fornecimento de dados meteorológicos utilizados no presente estudo.

Por fim, agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, fizeram parte da realização desse sonho.

“Educai as crianças,
para que não seja
necessário punir os
adultos”

Pitágoras

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO GERAL	15
Referências	19
2 AJUSTE E VALIDAÇÃO DO MODELO DE DUAS FONTES NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8	23
Resumo.....	23
Abstract	23
2.1 Introdução	24
2.2 Material e métodos	25
2.2.1 Fluxograma das etapas de trabalho	25
2.2.2 Localização da área de estudo.....	26
2.2.3 Clima	28
2.2.4 Bacias hidrográficas	28
2.2.5 Mapeamento das bacias hidrográficas e dos cursos d'água.....	30
2.2.6 Dados pluviométricos, fluviométricos e meteorológicos	34
2.2.7 Imagens de satélite de precipitação global TRMM/NASA	36
2.2.8 Imagem do satélite Landsat 8	38
2.2.9 Uso e ocupação do solo	39
2.2.10 Estimativa da evapotranspiração (ET) por imagem de satélite	40
2.2.10.1 Balanço de energia na superfície	41
2.2.10.2 Modelo de Duas Fontes (TSM – Two Source Model).....	42
2.2.10.3 Correção atmosférica das imagens Landsat 8	46
2.2.10.4 Dados meteorológicos da região de estudo	50
2.2.10.5 Interface SETMI	51
2.2.10.6 Ajuste dos resultados estimados.....	52
2.2.11 Comparação dos resultados.....	53
2.3 Resultados e discussão.....	53
2.4 Conclusão	76
Referências	77

3 AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PARA CANA-DE-AÇÚCAR, FLORESTA PLANTADA E MATA NATIVA UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8 EM DIFERENTES ASPECTOS ESPAÇO-TEMPORAIS.....	83
Resumo	83
Abstract.....	83
3.1 Introdução.....	84
3.2 Material e métodos	85
3.2.1 Fluxograma das etapas de trabalho.....	85
3.2.2 Localização da área de estudo	86
3.2.3 Clima.....	88
3.2.4 Imagem do satélite Landsat 8.....	88
3.2.5 Estimativa da evapotranspiração (ET) por imagem de satélite	89
3.2.5.1 Balanço de energia na superfície.....	90
3.2.5.2 Modelo de Duas Fontes (TSM – Two Source Model)	91
3.2.5.3 Correção atmosférica das imagens Landsat 8.....	95
3.2.5.4 Dados meteorológicos da região de estudo.....	99
3.2.5.5 Interface SETMI	100
3.2.5.6 Ajuste dos resultados estimados	100
3.2.6 Escala espacial dos fenômenos atmosféricos	102
3.2.7 Modelo digital de terreno (MDT)	102
3.2.7.1 Altitude	104
3.2.7.2 Declividade	106
3.2.7.3 Faces de exposição do terreno.....	107
3.2.8 Mapa pedológico.....	109
3.2.9 Mapa de fitofisionomias (biomas)	110
3.2.10 Uso e ocupação do solo	112
3.2.11 Coberturas vegetais.....	116
3.2.11.1 Cana-de-açúcar	117
3.2.11.2 Floresta plantada	118
3.2.11.3 Mata nativa	118
3.2.12 Comparação dos resultados	118
3.3 Resultados e discussão	120
3.4 Conclusão.....	161
Referências.....	162
ANEXOS.....	169

RESUMO

Modelagem espacial da evapotranspiração utilizando Modelo de Duas Fontes em ambiente SIG para florestas e cana-de-açúcar

O presente trabalho avaliou diferentes parâmetros espaciais e temporais da evapotranspiração real (ET_r) para três coberturas vegetais diferentes (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa) utilizando o Modelo de Duas Fontes (TSM) em ambiente SIG. Para a utilização do referido modelo, foi realizada uma adaptação do TSM aos padrões brasileiros e uma validação da estimativa de ET_r com dados de balanços de chuva-vazão obtidos à campo em três bacias representativas na região de Corumbataí/SP, para dois anos hidrológicos completos. Desenvolveu-se também uma nova metodologia de integralização dos dados de ET_r horários em mensais e anuais. Posteriormente, obteve-se a ET_r para dois anos de estudo para áreas com cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa. Avaliou-se como a evapotranspiração variou temporalmente e espacialmente, com a utilização dos parâmetros: altitude, declividade, faces de exposição do terreno, tipos de solo e biomas. Temporalmente, analisando os resultados mensais, sazonais e anuais, a cana-de-açúcar consumiu menos água do que a floresta plantada e a mata nativa. Para a altitude, concluiu-se que, quanto maior a altitude, maior a ET_r anual. Quanto à declividade do terreno, concluiu-se que, quanto maior a declividade, maior foi a ET_r anual. Quanto às faces de exposição do terreno, a face plana foi a que apresentou menor ET_r. Para a mata nativa, as faces não apresentaram diferença; já para a floresta plantada, as faces norte e oeste consumiram mais água, enquanto para a cana-de-açúcar os maiores valores de ET_r ocorreram na face oeste. Para os solos, as três coberturas vegetais apresentaram maior ET_r em solos diferentes; porém o Neossolo Litólico apresentou altos consumos de água comumente entre todas as coberturas. Por fim, para a cultura da cana-de-açúcar, não foram obtidas diferenças significativas na estimativa de ET real anual quando plantada em áreas de Cerrado ou Mata Atlântica. Já para floresta plantada e mata nativa, houve variações significativas no consumo de água dessas coberturas, em áreas com esses biomas.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Sensoriamento remoto; Landsat 8

ABSTRACT

Spatial modeling of evapotranspiration using Two Source Model on GIS for forests and sugarcane

This study evaluated different spatial and temporal parameters of actual evapotranspiration (ET_r) for three different vegetation cover (sugarcane, planted forest and native forest) using the Two Source Model (TSM) in a GIS environment. For the use of this model, was made an adaptation of TSM to Brazilian standards patterns and was made a validation of the estimated ET_r with a rain-flow balance data obtained on the field in three representative watersheds in the region of Corumbataí/SP, Brazil, for two full years hydrological. It was developed a new methodology to convert hourly ET_r to monthly and annually data. Later, was obtained the ET_r for two years of study to areas with sugarcane, planted and natural forests and was evaluated how this evapotranspiration behaved temporally and spatially, using the parameters: altitude, slope, exposure faces of the terrain, soil types and biomes. Temporally, analyzing the monthly, seasonal and annual results, the sugarcane consumed less water than the planted and natural forests. For altitude, it was found that the higher the altitude, the greater the annual ET_r. For the slope aspect, it was concluded that the higher the slope, the greater the annual ET_r. As for the land exposure faces, the flat face showed the lowest ET_r. For the native forest, the faces showed no difference. For the planted forest, north and west sides consumed more water, while for sugarcane higher ET_r values were on the west face. For soils, the three vegetation covers showed higher ET_r in different soils, but the Neossolo Litólico showed high water consumption common for all. Finally, for the sugarcane, were not obtained significant differences for the annual actual ET when planted in areas of Cerrado and Atlantic Forest. As for planted and natural forests, there were significant variations in water consumption by these covers on the area of the studied biomes.

Keywords: Evapotranspiration; Remote sensing; Landsat 8

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é o bem mais importante para a vida na Terra, de forma que a preocupação com os recursos hídricos vem aumentando cada vez mais na sociedade. Está-se tomando consciência de que todos os recursos de água passíveis de serem aproveitados não estavam dispensando a devida importância: pensava-se apenas no lucro e desprezava-se todo o cuidado com esse bem maior. Segundo Goubesville (2008), a demanda hídrica já excede o suprimento em muitas partes do mundo e, com o crescimento populacional, aliado aos efeitos das mudanças climáticas, uma maior escassez de água pode acontecer.

Sabe-se que o Setor Agrícola é o maior consumidor de água, alcançando cerca de 69% de toda a água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos (MOREIRA et al., 2010). Diante disso, o uso racional da água na Agricultura e o desenvolvimento de novas tecnologias para o planejamento e otimização dos recursos devem ser considerados uma meta prioritária, tanto nos órgãos públicos como no meio acadêmico.

A preocupação com o aproveitamento racional das fontes de recursos hídricos tem se materializado por meio de ações governamentais voltadas para este setor, mais especificamente no âmbito das bacias hidrográficas, com a adoção dos planos diretores.

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), a disponibilidade hídrica pode ser quantificada pelo balanço hídrico climatológico, no qual fica evidenciada a flutuação temporal de períodos com excedente e deficiência de água, permitindo, dessa forma, o planejamento e a otimização dos recursos, de acordo com os usos do solo, que podem ser culturas, como por exemplo, a cana-de-açúcar, ou até florestas plantadas.

Para quantificar esse balanço hídrico em bacias hidrográficas, é necessário ter conhecimento em detalhes dos componentes do ciclo hidrológico e, principalmente, da evapotranspiração. Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997) definem a evapotranspiração como um elemento climático fundamental, composto de dois processos: a evaporação da água na superfície do solo e a transpiração da vegetação. A evapotranspiração é fortemente influenciada pelo tipo de vegetação, pelo manejo agrícola, pela gestão ambiental e, principalmente, por parâmetros

climáticos (ALLEN et al., 1998), incluindo radiação solar, vento, temperatura e umidade relativa do ar.

A estimativa da evaporação e da transpiração é de grande importância para atividades como os projetos de irrigação, o gerenciamento de reservatórios e o planejamento de uso e a outorga de recursos hídricos.

A evapotranspiração é a transferência de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade para a atmosfera, e é uma das principais variáveis utilizadas no manejo da água em sistemas agrícolas; portanto, é de extrema importância que os valores estimados correspondam à realidade, visto que estes interferem diretamente nas decisões a serem tomadas a respeito do manejo da água de irrigação.

Muitos trabalhos vêm sendo realizados utilizando variados métodos de estimativa da evapotranspiração (ET). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda o uso do método de estimativa de ET por meio da equação de Penman-Monteith. Esse modelo prediz com eficácia a ETo em diversas condições de umidade atmosférica, necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos que nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões.

Para Moreira et al. (2010), os modelos clássicos de medição da ET fornecem informações pontuais, utilizando o balanço hídrico no solo por exemplo, podendo não condizer com o resultado a ser apresentado pela análise da cultura espacialmente. Adicionalmente, esses métodos clássicos de estimativa da ET costumam ser caros e difíceis de ser trabalhados com instrumentos em campo (NEVES; VERSIANI; RODRIGUES, 2007).

Com isso, utilizando-se do grande avanço das tecnologias de Sensoriamento Remoto e de novas opções de imagens de satélite, estão sendo desenvolvidas técnicas de estimativa do balanço de energia na superfície do solo, do fluxo de energia e da evapotranspiração por intermédio dessas imagens, obtendo-se informações em caráter regional e não mais pontual, tornando-se ferramentas de grande utilidade para o manejo racional da água e do aumento de produtividade das culturas (SILVA; LOPES; AZEVEDO, 2005; SILVA; BEZERRA, 2006).

Nesse contexto, Bezerra (2013) afirma que a necessidade de modelagens em ambiente SIG aumenta com as mudanças climáticas e com o crescimento

populacional. A determinação da evapotranspiração real (ET_r), por sensoriamento remoto, dispensa a necessidade de dados hidrológicos difíceis de serem obtidos, e ainda pode ser aplicada a diferentes ecossistemas. Acrescenta-se, também, a possibilidade do manejo de grandes áreas, destacando-se como uma boa alternativa para a obtenção da ET_r em micro e macro escalas, revelando variações dentro de uma área de superfície heterogênea (BASTIAANSSEN, 2000; TEIXEIRA et al., 2009a, 2009b; MEDINA et al., 1998).

Deste modo, algumas alternativas para os métodos clássicos de estimativa vêm se tornando cada mais utilizados, como é o caso do modelo de uma fonte chamado SEBAL; porém, outros modelos mais elaborados, precisos e completos vêm sendo apresentados na literatura, como, por exemplo, o Modelo de Duas Fontes (TSM).

Bastiaanssen (1995, 1998) propôs um modelo semi-empírico denominado “*Surface Energy Balance Algorithm for Land*” (SEBAL), que necessita de um número reduzido de dados de superfície. Esse algoritmo faz uso apenas das radiâncias espectrais registradas em sensores de satélites e de um conjunto mínimo de dados meteorológicos que incluem a velocidade do vento e a temperatura do ar, para calcular o balanço de energia na superfície da Terra. Assim, é possível se obter a estimativa da evapotranspiração nas escalas horária e diária (COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2003), sendo, por esse motivo, considerado um modelo de uma fonte. Esse modelo vem sendo amplamente utilizado e estudado por vários tipos de análises de evapotranspiração em bacias, conforme trabalhos realizados por Bezerra, Silva e Ferreira (2008), Silva e Bezerra (2006), Hernandez et al. (2011), Moreira et al. (2010), Bezerra (2013), Ferreira e Meirelles (2011), Menezes et al. (2009) e Leivas et al. (2011).

Porém, Norman, Kustas e Humes (1995) desenvolveram e Li et al. (2005) apresentaram um Modelo híbrido de Duas Fontes (TSM – Two Source Model), previamente revisado e melhorado por Kustas e Norman (1999, 2000). Nesse modelo, diferentemente do SEBAL, o calor sensível (H) utilizado no balanço de energia é obtido separadamente para cada tipo de uso do solo (solo exposto, floresta plantada ou culturas, por exemplo), tornando a estimativa de ET mais acurada, já que é obtido o balanço de energia de cada superfície homogênea separadamente.

A partir disso, Colaizzi et al. (2012) realizaram um estudo aperfeiçoando e validando o modelo TSM, comparando amostras de ET real obtidas a campo com as estimativas realizadas pelas imagens de satélite. Adicionalmente, outros trabalhos vêm sendo realizados utilizando o TSM, como o estabelecimento de padrões de ET para áreas não irrigadas (GELI; NEALE, 2009), a quantificação da água no solo por meio da ET estimada por imagem de satélite (NEALE et al., 2012), assim como outras validações, testes e melhorias no modelo (ZHUANG; BU, 2015; SONG et al., 2016).

Timmermans et al. (2007), em variados cenários e culturas, concluíram que o TSM apresentou resultados mais reais e específicos para cada cultura e solo exposto do que o SEBAL, já que o TSM faz essa análise separadamente. Assim, o TSM vem sendo mais indicado para estudos com o uso e ocupação do solo previamente determinados em áreas conhecidas, como em bacias hidrográficas, por exemplo.

Nesse contexto, vários trabalhos vêm se desenvolvendo em função de realizar um melhor balanço de energia na superfície, utilizando imagens de satélite; porém, nenhum foi realizado para avaliar variáveis físicas, espaciais e temporais para as culturas de cana-de-açúcar e de floresta plantada e para mata nativa.

Menezes et al. (2009) realizaram um estudo avaliando a evapotranspiração regional em Minas Gerais utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso, encontrando diferenças de ET instantânea entre as diferentes formações estudadas; porém, não houve nenhuma cultura no estudo, até porque, segundo os autores, as fórmulas empregadas no modelo utilizado foram criadas com base em padrões e condições norte-americanas e europeias.

Deste modo, verificou-se a necessidade de se ajustar o TSM, também desenvolvido para os padrões norte-americanos e europeus, para as condições brasileiras. Procurou-se, também, avaliar outras fontes de dados orbitais, como os dados de precipitação global da NASA (providos pelo sensor presente no satélite da missão Tropical Rainfall Measurement Mission – TRMM), a fim de se obter uma metodologia de obtenção de dados de evapotranspiração espacializados e reais, tanto em escala diária, como mensal e anual. Objetivou-se, assim, poder aplicar os resultados a todas as culturas e florestas que se fizerem necessárias.

Objetivo Geral

O presente trabalho teve por objetivo principal verificar, validar e propor uma nova metodologia de se calcular o balanço hídrico, por meio de estudos do processo chuva-vazão, em três bacias hidrográficas monitoradas. Visou-se obter a evapotranspiração (ET) por intermédio de um modelo de estimativa da ET espacializada por imagem de satélite - Modelo de Duas Fontes (TSM – Two Source Model) – utilizando o software SETMI, desenvolvido nos EUA, para os padrões hidrológicos brasileiros.

Posteriormente, aplicou-se o modelo validado e ajustado para avaliar parâmetros espacializados (aspectos do relevo, tipos de solo e biomas) e temporais, na estimativa da ET real de três coberturas vegetais (floresta plantada, mata nativa e cana-de-açúcar). Utilizou-se dados de ET obtidos por meio da aplicação do método proposto nas imagens do satélite Landsat 8, para, assim, verificar como eles influenciam na ET estimada para cada cobertura vegetal e como se comporta a necessidade hídrica espacialmente em cada uma delas.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 15 p.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 237 p. Thesis (Ph.D. in Eco-Hydrology, Soil Physics and Groundwater Management) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.

_____. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, p. 87–100, 2000.

BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212/213, p. 198-212, 1998.

BEZERRA, J.M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. 2013. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <www.pgea.ufrpe.br/downloads/dissertacoes/JoelBezerra.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2013.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

COLAIZZI, P.D.; KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C.; AGAM, N.; TOLK, J.A.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A.; GOWDA, P.H.; O'SHAUGHNESSY, S.A. Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. **Advances in Water Resources**, Oxford, v. 50, p. 134-151, 2012.

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use mesoscale atmospheric models. In: ICID - WORKSHOP ON REMOTE SENSING OF ET FOR LARGE REGIONS, 2003, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: ICID, 2003. p. 1-17.

FERREIRA, A.S.; MEIRELLES, M.S.P. Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na Mesorregião do Sul Goiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5576-5583.

GELI, H.M.E.; NEALE, C.M.U. Estimation of spatial evapotranspiration over non-irrigated agricultural areas using a Two-Source energy balance model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 5., 2009, Salt Lake City. **Proceedings...** Salt Lake City: ICID, 2009. p.49-64.

GOUBESVILLE, P. Challenges for integrated water resources management. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 33, p. 284-289, 2008.

HERNANDEZ, F.B.T.; NEALE, C.M.U.; TAGHVAEIAN, S.; TEIXEIRA, A.H. de C. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5209-5216.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 94, p. 13-29, 1999.

_____. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surface. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 847-854, 2000.

LEIVAS, J.F.; ANDRADE, R.G.; NOGUEIRA, S.F.; BOLFE, E.L. Estimativa da evapotranspiração em áreas com diferentes características ambientais utilizando o algoritmo SEBAL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SIGERA, 2011. p. 1-5.

LI, F.; KUSTAS, W.P.; PRUEGER, J.H.; NEALE, C.M.U.; JACKSON, T.J. Utility of remote sensing based two-source energy balance model under low and high vegetation cover conditions. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 6, n. 6, p. 878–891, 2005.

MEDINA, J.L.; CAMACHO, E.; RECA, J.; LÓPEZ, R.; ROLDÁN, J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on remote sensing and GIS. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 23, n. 4, p. 427-432, 1998.

MENEZES, S.J.M.C.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V.P.; GLERIANI, J.M.; ANDRADE, R.G. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 6, p. 491-503, 2009.

MOREIRA, L.C.J.; DURAND, B.J.; TEIXEIRA, A.S.; ANDRADE, E.M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1148-1159, 2010.

NEALE, C.M.U.; GELI, H.M.E.; KUSTAS, W.P.; ALFIERI, J.G.; GOWDA, P.H.; EVETT, S.R.; PRUEGER, J.H.; HIPPS, L.E.; DULANEY, W.P.; CHAVEZ, J.L.; FRENCH, A.N.; HOWELL, T.A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, Oxford, v. 50, p. 152-161, 2012.

NEVES, B.V.B.; VERSIANI, B.R.; RODRIGUES, P.C.H. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 87-102, 2007.

NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; HUMES, K.S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 77, p. 263–293, 1995.

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.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

SILVA, B.B. da; BEZERRA, M.V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

SILVA, B.B. da; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SONG, L.; KUSTAS, W.P.; LIU, S.; COLAIZZI, P.D.; NIETO, H.; XU, Z.; MA, Y.; LI, M.; XU, T.; AGAM, N.; TOLK, J.A.; EVETT, S.R. Applications of a thermal-based two-source energy balance model using Priestley-Taylor approach for surface temperature partitioning under adjective conditions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, 2016. In press.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M-UD-D; BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part A: calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 149, p. 462-476, 2009a.

_____. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: application to the large scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v.149, p.477-490, 2009b.

TIMMERMANS, W.; KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C.; FRENCH, A.N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 108, p. 369-384, 2007.

ZHUANG, Q.; WU, B. Estimating evapotranspiration from an Improved two-source energy balance model using ASTER satellite imagery. **Water**, Basel, v. 7, n. 12, p. 6673-6688, 2015.

2 AJUSTE E VALIDAÇÃO DO MODELO DE DUAS FONTES NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8

Resumo

Sabe-se que o Setor Agrícola é o maior consumidor de toda a água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos; porém, normalmente, usa-se a água sem saber a real necessidade hídrica de uma determinada cultura. Para quantificar o balanço hídrico em bacias hidrográficas, é necessário ter-se conhecimento, em detalhes, dos componentes do ciclo hidrológico e, principalmente, da evapotranspiração (ET). Muitos trabalhos vêm sendo realizados utilizando o modelo de uma fonte SEBAL para a estimativa da ET real (ET_r) por imagens de satélite; porém, outros modelos mais elaborados e completos vêm sendo apresentados na literatura. Assim, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma validação da estimativa de ET_r com dados de chuva-vazão obtidos à campo em três bacias representativas da região de Corumbataí/SP, para dois anos hidrológicos completos. Desenvolveu-se também uma nova metodologia de integralização dos dados de ET_r horários em mensais e anuais. Foram obtidos os valores de precipitação e de vazão no exutório de cada bacia, além de valores de precipitação de imagens TRMM/NASA para que a ET fosse calculada por meio do balanço hídrico de dois anos hidrológicos. Posteriormente, os dados de ET mensais e anuais obtidos por meio da aplicação do TSM ajustado nas imagens do Landsat 8 foram comparados com os resultados do balanço hídrico. Assim, concluiu-se que tal ajuste apresentou dados de ET mensal e anual estatisticamente correlacionados e semelhantes aos obtidos por intermédio de um balanço hídrico anual simplificado. Esse resultado foi obtido tanto utilizando valores de precipitação obtidos diretamente nas bacias hidrográficas quanto com valores de precipitação estimados por imagem de satélite. Assim, a nova metodologia pode ser utilizada para estimar dados espacializados de ET mensal e anual a partir de imagens Landsat 8.

Palavras-chave: Imagem de satélite; TRMM; Geotecnologias

Abstract

It is known that the agricultural sector is the largest consumer of all the water derived from rivers, lakes and underground aquifers; however, usually, the water is used without knowing the actual water requirement of a particular culture. To quantify the water balance in watersheds, it is necessary to know, in detail, the components of the hydrological cycle and, especially, evapotranspiration (ET). Many studies have been performed using the model of a One Source Model – SEBAL – for estimating actual ET (ET_r) from satellite images; however, other more elaborated and complete models have been presented. Thus, this study aimed to perform a validation of ET_r estimation with rain-flow data from the field in three representative watersheds in the region of Corumbataí/SP, Brazil, for two full hydrological years, developing a new methodology to convert ET_r hourly data to monthly and annual data. The amounts of precipitation and flow in outfall of each basin were obtained, as also precipitation values from TRMM / NASA images, thus were calculated ET through the water balance of hydrological two years. Later, monthly and yearly ET data from applying the TSM in the Landsat 8 images were compared with the results of the water

balance. Thus, it was concluded that the adjustment presented to monthly and yearly ET data was statistically correlated and similar to those obtained through a simplified annual water balance, using both precipitation values obtained directly from river basins and with estimated rainfall amounts from satellite image. So, we concluded that it can be used as a new methodology to estimate specialized data for monthly and yearly ET from Landsat 8 images.

Keywords: Satellite images; TRMM; Geotechnologies

2.1 Introdução

A água é o bem mais importante para a vida na Terra e, devido a isso, a preocupação com os recursos hídricos vem aumentando cada vez mais na sociedade.

Sabe-se que o Setor Agrícola é o maior consumidor de água, alcançando cerca de 69% de toda a água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos (MOREIRA et al., 2010). Diante disso, o uso racional da água na Agricultura e o desenvolvimento de novas tecnologias para o planejamento e otimização dos recursos hídricos em bacias hidrográficas devem ser considerados metas prioritárias, tanto nos órgãos públicos quanto no meio acadêmico.

Para isso, é necessário ter conhecimento em detalhes dos componentes do ciclo hidrológico e, principalmente, da evapotranspiração. Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997) definem a evapotranspiração como um elemento climático fundamental, composto de dois processos: a evaporação da água na superfície do solo e a transpiração da vegetação. A evapotranspiração é fortemente influenciada pelo tipo de vegetação, pelo manejo agrícola, pela gestão ambiental e, principalmente, por parâmetros climáticos (ALLEN et al., 1989), incluindo radiação solar, vento, temperatura e umidade relativa do ar.

Para se estimar a evapotranspiração, Moreira et al. (2010) comentam que os métodos tradicionais representam análises pontuais utilizando o balanço hídrico no solo, por exemplo, podendo não condizer com o resultado a ser apresentado pela análise da cultura espacialmente. Desta forma, outros métodos vêm sendo desenvolvidos, principalmente em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) utilizando-se de imagens de satélite, visando, assim, obter dados espacializados e reais do instante da obtenção da cena.

Deste modo, algumas alternativas para os métodos clássicos de estimativa vêm se tornando cada vez mais utilizados, como é o caso do modelo de uma fonte

(SEBAL); porém, outros modelos mais elaborados, precisos e completos vêm sendo apresentados na literatura, como, por exemplo, o Modelo de Duas Fontes (TSM).

Timmermans et al. (2007), em variados cenários e culturas, utilizaram o TSM e concluíram que tal modelo apresentou resultados mais reais e específicos para cada cultura e para o solo exposto do que o modelo de uma fonte, já que o TSM faz essa análise separadamente. Assim, o TSM seria mais indicado para estudos com o uso e ocupação do solo previamente determinados em áreas conhecidas, como em bacias hidrográficas, por exemplo.

Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo propor uma nova metodologia para a estimativa de evapotranspiração, combinando dados de origem orbital com dados de superfície, utilizando o TSM. Pretendeu-se avaliar e validar a estimativa da ET mensal e anual utilizando o TSM em três bacias hidrográficas no Estado de São Paulo, Brasil, com padrões fisiográficos brasileiros e com dados de chuva e vazão monitoradas.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Fluxograma das etapas de trabalho

A metodologia aplicada está representada no fluxograma das etapas de trabalho presente na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma geral do trabalho

Conforme fluxograma apresentado na Figura 1, no presente trabalho pretendeu-se avaliar a eficácia de se estimar a evapotranspiração pelo TSM, utilizando imagens de satélite para bacias hidrográficas.

2.2.2 Localização da área de estudo

A região de estudo escolhida para o presente trabalho é compreendida pela cena do satélite Landsat 8 com Órbita/Path 220 e Ponto/Row 75, entre as latitudes $20^{\circ}43'55,2''\text{S}$ e $22^{\circ}36'28,8''\text{S}$ e longitudes $46^{\circ}37'48,0''\text{W}$ e $48^{\circ}50'16,8''\text{W}$ (Figura 2). Esta cena compreende o nordeste do Estado de São Paulo.

Figura 2 – Cena Landsat 8 com Órbita/Path 220 e Ponto/Row 75 escolhida para o presente trabalho

Inclusas nessa cena, foram escolhidas três bacias hidrográficas monitoradas (Figura 3), onde existem estações pluviométricas e de medição de vazão no ponto

de seção de controle (exutório) de cada bacia. Todas essas bacias se localizam na região de Corumbataí/SP.

Figura 3 – Localização das bacias hidrográficas no Estado de São Paulo

2.2.3 Clima

O clima da região é o Cwa segundo Köppen, definido como mesotérmico subtropical, com inverno seco e verão chuvoso, temperaturas do mês mais quente superior a 22°C e do mês mais frio não excedente a 18°C, como também observado por Oliveira (2012). As chuvas concentram-se nos meses de outubro a março, apresentando uma precipitação média anual de 1.390mm (TROPPMAIR; MACHADO, 1974), sendo o período seco de abril a setembro. Na Figura 4, estão representadas as precipitações médias mensais de longo período, obtidas entre os anos de 1917 e 2015.

Figura 4 - Precipitação média mensal entre os anos de 1917 e 2015

Fonte: INMET

2.2.4 Bacias hidrográficas

Como se observa na Figura 3, optou-se por três bacias próximas e com uma grande amplitude entre as áreas de drenagem, para que fosse possível realizar uma comparação e verificação do método em diferentes cenários.

Foram selecionadas duas bacias menores (Bacias Analândia e Jacutinga) que se localizam inclusas em uma bacia maior (Bacia Corumbataí), para que, assim, fossem utilizados os mesmos dados meteorológicos de superfície e de satélite.

Os dados de cada bacia se encontram na Tabela 1, com as áreas de drenagem (AD) em km² e as coordenadas das seções de controle das bacias em metros (coordenadas UTM zona 23 Sul – Datum SIRGAS2000).

Tabela 1 – Dados das bacias hidrográficas estudadas

Bacias Hidrográficas	Coordenada UTM exutório (m)	Área de drenagem (km ²)
Bacia Corumbataí	7.520.147,80 N 232.126,48 E	476,09
Bacia Analândia	7.550.397,87 N 224.694,49 E	55,99
Bacia Jacutinga	7.525.533,58 N 232,090,55 E	28,92

As referidas bacias foram geradas a partir das coordenadas geográficas dos pontos de localização das seções de controle obtidas junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Para a delimitação dessas bacias, utilizou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) com 30 metros de resolução espacial, obtido a partir do sensor orbital ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Com esse modelo, gerou-se, automaticamente, em ambiente SIG, os divisores das bacias e as redes hidrográficas apresentadas na Figura 2. A metodologia utilizada para a geração dos cursos d'água e divisores de água (limites das bacias) aparece detalhada no item 2.2.5 deste presente trabalho.

A partir da rede de telemetria instalada e mantida pelo DAEE, foram obtidos dados de vazão média mensal dos anos de 2013, 2014 e 2015, das três bacias a serem estudadas.

Foram utilizados dados de dois anos hidrológicos (de abril de 2013 até março de 2014 e de abril de 2014 até março de 2015) para cada bacia, ou seja, duas sequências de dados de um período contínuo de doze meses, durante o qual ocorre um ciclo anual climático completo e que foi escolhido por permitir uma comparação mais significativa dos dados meteorológicos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DNAEE, 1976). Custódio e Llamas (1976) também mostraram que um balanço hídrico anual a partir da análise da ET real pode auxiliar na análise de deficiências hídricas das culturas.

Com os dados coletados, foram realizados os cálculos do balanço hídrico anual para as três bacias avaliadas, conforme a fórmula simplificada do balanço hídrico, onde é desprezado o valor da variação de armazenamento da água na bacia (Equação 1).

$$ET = P - Q \quad (1)$$

Em que ET é a evapotranspiração calculada, P é a precipitação e Q é a vazão integrada no tempo da seção de controle da bacia.

Desse modo, foi estimada a ET pela diferença entre a precipitação e a vazão, conforme Equação 1. Assim, os valores mensais de ET foram integralizados para as duas séries anuais, obtidos pela diferença do balanço hídrico (Eq. 1) e pela estimativa por satélite. Dessa maneira avaliou-se a eficácia do Modelo de Duas Fontes (TSM) em estimar a evapotranspiração pela imagem do satélite Landsat 8, em três bacias hidrográficas com áreas de drenagem distintas.

2.2.5 Mapeamento das bacias hidrográficas e dos cursos d'água

No presente trabalho, utilizou-se o Modelo Automático de Determinação de Bacias e Drenagens existente no programa ArcGIS 10 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2010), por meio da ferramenta *Spatial Analyst Tools/Hydrology* para geração dos cursos d'água e das bacias hidrográficas a serem estudadas.

Nesta metodologia, apresentada por Bosquilia (2014), utilizou-se um MDT proveniente de sensor orbital (ASTER-GDEM), com 30 metros de resolução espacial.

A metodologia utilizada para a obtenção da rede de drenagem e das bacias hidrográficas a partir de um MDT é esquematizada na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia utilizada para a geração automática da rede de drenagem e das bacias hidrográficas utilizadas

Quando um MDT é gerado, alguns *pixels* podem apresentar um valor muito diferente dos seus vizinhos, causado pela alta declividade local. Para se corrigir essa possível imperfeição do método de interpolação, utilizou-se a ferramenta *Fill* (preenchimento de depressões). Assim, essas depressões foram preenchidas pela média das cotas dos *pixels* vizinhos, gerando um MDT mais consistente.

Assim, o MDT escolhido no presente estudo foi aplicado à ferramenta *Fill* para posterior utilização na ferramenta *Flow direction*.

2.2.5.1 Direção de fluxo (Flow direction)

A direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica (RENNÓ et al., 2008). A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir (ALVES SOBRINHO et al., 2010).

Em um MDT, o escoamento superficial está relacionado com o valor da cota de cada *pixel*. Assim, o algoritmo pode representar as direções do fluxo da água sobre o terreno.

A determinação da rede de drenagem no modelo hidrológico é realizada a partir da definição da direção do fluxo em cada célula, assumindo-se que o escoamento da água segue da célula considerada para suas células vizinhas (PAZ; COLLISCHONN; TUCCI, 2005).

Seguindo as direções de fluxo, obtém-se a quantidade de células à montante que drenam para cada uma das células à jusante. No algoritmo utilizado no programa ArcGIS 10 (ESRI, 2010), as direções de fluxo são representadas na forma de uma grade regular, cujo valor de cada célula corresponde a uma das 8 direções possíveis. A obtenção da direção do fluxo em cada *pixel* pode ser realizada por procedimentos automatizados, os quais atribuem o sentido do escoamento de um *pixel* para um de seus oito vizinhos, com base na diferença de cota ponderada pela distância entre eles. Como resultado, a cada *pixel* é atribuído um número indicativo de uma das oito direções de fluxo possíveis. Seguindo as direções do fluxo, obtém-se a quantidade de células à montante que drenam para cada uma das células à jusante, determinando o fluxo acumulado de drenagem (Figura 6).

Figura 6 - Direção de fluxo utilizada pelo programa ArcGIS 10: (a) Direções possíveis de um *pixel*; (b) Cota de cada *pixel*, em metros; (c) Direção do escoamento para a célula com menor cota

Fonte: Adaptado de Turcote et al. (2001), apresentado por Bosquilia (2014)

Assim, as direções de fluxo foram calculadas para cada uma das três bacias hidrográficas utilizando o MDT ASTER selecionado para o presente trabalho, e, a partir desses mapas foi possível obter-se o fluxo acumulado.

2.2.5.2 Fluxo acumulado (Flow accumulation)

O fluxo acumulado é o parâmetro que determina por onde o fluxo direcionado se acumulará, permitindo a locação da rede de drenagem e a delimitação automática da bacia hidrográfica. Esse processo compara cada *pixel* com seus oito vizinhos e determina, por meio da direção de fluxo, quantas células drenam para a célula à jusante, acumulando os dados para cada *pixel* do *raster*, e determinando por onde haverá um maior acúmulo de água, até o exutório da bacia. Geralmente, o

exutório de uma bacia hidrográfica é a sua foz, mas também pode ser uma barragem, uma estação de coleta de dados hidrológicos ou qualquer ponto de interesse a ser estudado (TUCCI, 1997).

Para Valeriano (2008), o fluxo acumulado, também conhecido como área de contribuição, apresenta obtenção complexa, seja de forma manual ou computacional, uma vez que reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante), a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo).

Alves Sobrinho et al. (2010 adaptado de TURCOTE et al., 2001) apresentaram um exemplo de determinação do fluxo acumulado (Figura 7), onde é possível observar a formação dos caminhos preferenciais de fluxo da água que originam a rede hidrográfica.

Figura 7 - Exemplo de determinação do fluxo acumulado, apresentado por Alves Sobrinho et al. (2010 adaptado de TURCOTE et al., 2001)

Utilizando o método apresentado, calculou-se o Fluxo Acumulado (*Flow Accumulation*) para todas as bacias, pela função *Flow Accumulation*, no programa ArcGIS 10 (ESRI, 2010). A partir disso, pode-se delimitar as drenagens pela utilização da ferramenta Con (*Conditional*).

2.2.5.3 Delimitação das drenagens pela ferramenta Con (*Conditional*)

A ferramenta Con utiliza o mapa resultante do fluxo acumulado e transforma todo *pixel* que apresentar seu valor acumulado, maior que o determinado pelo usuário, para o valor 1 do novo mapa. Todos os *pixels* que tiverem um valor menor que o determinado pelo usuário são automaticamente transformados para o valor 0, sendo dessa forma considerados como o fundo preto do mapa final.

No presente estudo, para cada bacia, os valores limites utilizados na ferramenta Con foram determinados utilizando-se da rede de drenagem existente nas cartas topográficas do IGC 1:10.000 como base para testes de valores. Esses valores foram testados um por um, até os mapas gerados automaticamente apresentarem suas nascentes próximas às das cartas. Na inexistência de cartas para uma determinada área, a rede hidrográfica gerada por intermédio de imagens de satélite e fotografias aéreas serviriam de base para tal (BOSQUILIA, 2014).

Com isso, após todos os mapas com as redes de drenagem terem sido gerados com os valores testados, extraíram-se as informações obtidas em formato raster para arquivos vetoriais pela ferramenta *Stream to Feature*.

2.2.5.4 Delimitação das áreas de drenagem de cada bacia hidrográfica

Posteriormente à realização dos passos anteriores, as bacias hidrográficas foram geradas utilizando-se da ferramenta *Watershed*, na qual são inseridos os mapas resultantes da direção de fluxo e os pontos de saída (exutório) de cada bacia delimitada (Figura 3).

2.2.6 Dados pluviométricos, fluviométricos e meteorológicos

Para o presente trabalho, foram obtidos dados de chuva (mm.mês^{-1}) e vazão média mensal ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) a partir de medições realizadas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE).

Para a padronização dos dados, a fim de uma posterior aplicação na avaliação do balanço hídrico anual, foi determinado que todos os dados deveriam estar na mesma unidade (mm.mês^{-1}), para depois serem integralizados para mm.ano^{-1} .

Os dados de precipitação foram obtidos de estações meteorológicas com pluviômetros automáticos existentes em pontos próximos da saída de vazão (exutório) das bacias estudadas, já apresentados em mm.mês^{-1} .

Os dados de vazão foram obtidos de seções de controle de vazão no exutório de cada uma das três bacias do presente estudo, na unidade $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Para se realizar a transformação para mm.mês^{-1} , foram multiplicados o número de segundos contabilizados em cada mês, obtendo-se o resultado em $\text{m}^3.\text{mês}^{-1}$. Posteriormente,

realizou-se a divisão do resultado pela área de cada bacia, em m^2 , o que forneceu $m.mês^{-1}$. Finalizando o cálculo, multiplicou-se o resultado anterior por 1000 para ser obtido o valor em $mm.mês^{-1}$.

Dessa forma, foram organizados todos os dados de precipitação e vazão mensal (para o período de abril de 2013 até março de 2015 – dois anos hidrológicos) (Tabela 2) para serem aplicados à Equação 1, obtendo-se, assim, a estimativa de evapotranspiração mensal (ET balanço) pela diferença entre a precipitação e a vazão em cada bacia.

Tabela 2 – Dados de vazão e precipitação padronizados obtidos a partir de medições realizadas pelo DAEE para as três bacias hidrográficas

Meses	Dados DAEE ($mm.mês^{-1}$)					
	Bacia Analândia		Bacia Corumbataí		Bacia Jacutinga	
	Precipitação	Vazão	Precipitação	Vazão	Precipitação	Vazão
abr/13	83,70	55,47	83,70	38,55	160,50	60,11
mai/13	136,00	50,13	136,00	36,10	155,00	30,71
jun/13	67,40	48,98	67,40	29,94	60,00	25,48
jul/13	46,40	44,29	46,40	22,98	35,00	21,48
ago/13	12,00	38,53	12,00	15,29	0,00	6,34
set/13	52,90	36,89	52,90	15,40	76,00	4,94
out/13	233,70	50,57	233,70	25,68	140,00	43,20
nov/13	235,20	51,91	235,20	34,54	280,00	69,33
dez/13	136,60	43,90	136,60	30,15	152,00	49,69
jan/14	57,00	36,19	57,00	22,32	120,00	9,82
fev/14	100,20	31,69	100,20	14,22	155,00	12,98
mar/14	188,10	39,88	188,10	30,41	280,00	35,09
Total 13/14	1349,20	528,42	1349,20	315,56	1613,50	369,17
abr/14	61,40	33,91	61,40	15,54	75,00	4,93
mai/14	50,10	33,34	50,10	13,01	67,00	3,37
jun/14	1,30	29,50	1,30	10,38	10,00	6,94
jul/14	43,10	30,51	43,10	11,00	5,00	5,58
ago/14	1,30	27,79	1,30	9,40	0,00	3,60
set/14	91,40	30,52	91,40	16,40	127,00	14,10
out/14	9,70	26,04	9,70	8,81	17,00	14,57
nov/14	174,90	28,13	174,90	16,30	190,00	12,47
dez/14	241,90	30,14	241,90	31,78	217,50	13,81
jan/15	158,90	31,08	158,90	21,62	54,00	4,09
fev/15	387,40	35,81	387,40	63,19	311,00	26,84
mar/15	220,40	46,56	220,40	57,79	290,00	77,76
Total 14/15	1441,8	383,325	1441,8	275,215	1363,5	188,056

2.2.7 Imagens de satélite de precipitação global TRMM/NASA

Alternativamente à precipitação obtida nas estações meteorológicas localizadas nas bacias estudadas, optou-se, também, por testar novas fontes de informação e tecnologia, já que nem sempre é possível contar com uma estação meteorológica no local a ser estudado. Assim, optou-se por usar dados de precipitação obtidos a partir de dados orbitais fornecidos pelo sensor presente no satélite da missão Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM), que é uma ação conjunta entre a NASA (National Aeronautics and Space Administration), dos Estados Unidos, e a JAXA (Japan Aerospace and Exploration Agency), do Japão. Tal missão é a primeira com o objetivo específico de monitorar a precipitação na área tropical do globo (KUMMEROW et al., 1998), cobrindo toda a faixa de latitude entre 50° Norte e 50° Sul (Figura 8).

Figura 8 – Imagem TRMM 3B43 do mês de janeiro de 2015

Os principais sensores a bordo do satélite TRMM relacionados com a estimativa da precipitação são: TRMM Microwave Imager (TMI), Precipitation Radar (PR) e Visible and Infrared Radiometer System (VIRS). A integração destes sensores por meio de diferentes algoritmos permite a obtenção dos mais variados produtos (Tabela 3).

Tabela 3 - Relação dos produtos de satélite da missão TRMM

Sensor	Nível de Processamento	Produto
PR	1B21	Calibrated Received Power
	1C21	Radar Reflectivity
	2A21	Normalized Radar Surface Cross Section
	2A23	PR Qualitative
	2A25	Rain Profile
	3A25	Monthly Statistics of Rain Parameter
	3A26	Monthly Rain Rate using a Statistical Mtd
TMI	1B11	Brightness Temperature
	2A12	Rain Profile
	3A11	Monthly Oceanic Rainfall
VIRS	1B01	Radiance
COMB	2B31	Rain Profile
	3B31	Monthly Rainfall
	3B42	TRMM & IR Daily Rainfall
	3B43	TRMM & Other Sources Monthly Rainfall

Para o presente estudo, o produto mais interessante encontrado foi o 3B43, que provém de uma combinação entre os sensores presentes no satélite, e se apresenta em imagens digitais com resolução temporal de 1 mês e resolução espacial de 0,25°, tanto em latitude como em longitude. Em coordenadas projetadas, a resolução espacial de tal produto é de cerca de 25 km.

O número digital (estimativa de precipitação) presente em cada pixel se apresenta como a média da precipitação mensal, porém em mm.h^{-1} . Com isso, extraiu-se a média dos valores dos pixels existentes nas bacias e multiplicou-se esse valor pelo número de horas de cada mês, obtendo-se, assim, os resultados mensais de precipitação para cada bacia, em mm.mês^{-1} .

Dessa forma, obtiveram-se os valores de precipitação mensal por intermédio dos dados do satélite da missão TRMM para os dois anos hidrológicos consecutivos em estudo (de abril de 2013 até março de 2014; e de abril de 2014 a março de 2015) (Tabela 4), ou seja, o mesmo período durante o qual já se havia obtido os dados de vazão nas bacias estudadas. Com isso, aplicou-se esses dados à Equação 1, resultando na estimativa de ET pelo balanço hídrico, utilizando a precipitação obtida com um sensor orbital.

Tabela 4 – Dados de precipitação obtidos por intermédio da padronização dos dados do produto 3B43 do satélite TRMM/NASA

Meses	Precipitação TRMM/NASA (mm.mês ⁻¹)		
	Bacia Analândia	Bacia Corumbataí	Bacia Jacutinga
abr/13	101,97	95,65	84,41
mai/13	121,48	118,29	112,02
jun/13	58,95	63,03	69,81
jul/13	54,04	52,98	51,57
ago/13	13,42	13,77	14,48
set/13	37,57	37,08	36,02
out/13	122,11	120,65	117,03
nov/13	154,35	155,44	157,32
dez/13	129,73	121,66	107,23
jan/14	105,37	98,84	87,23
fev/14	102,74	104,63	107,58
mar/14	111,63	114,62	119,63
Total 13/14	1113,34	1096,65	1064,32
abr/14	96,93	97,67	99,08
mai/14	28,67	31,22	35,74
jun/14	2,61	2,58	2,53
jul/14	36,69	35,90	34,62
ago/14	8,24	9,95	12,97
set/14	78,90	79,14	79,31
out/14	22,29	20,99	18,64
nov/14	207,57	204,59	199,45
dez/14	212,20	217,94	228,09
jan/15	141,95	140,56	137,37
fev/15	258,01	255,32	249,83
mar/15	209,39	210,87	213,68
Total 14/15	1303,45	1306,73	1311,29

2.2.8 Imagem do satélite Landsat 8

Com o lançamento do Landsat 8, no dia 11 de fevereiro de 2013, surgiu uma nova e gratuita opção para obtenção de imagens de satélite disponíveis para todo o planeta, com período de revisita de 16 dias (resolução temporal). Tendo em vista esse fato, obteve-se uma imagem do Landsat 8 para cada mês dos dois anos hidrológicos do presente estudo (24 imagens), compreendendo a região das bacias hidrográficas do presente trabalho, com Órbita/Path 220 e Ponto/Row 75, entre as latitudes 20°43'55,2"S e 22°36'28,8"S e longitudes 46°37'48,0"W e 48°50'16,8"W.

Dessa forma, as imagens obtidas do satélite Landsat 8 foram utilizadas, tanto para estimativa da ET, utilizando as bandas necessárias para o modelo a ser estudado (Bandas 2, 3, 4, 5, 10 e 11) (Tabela 5), quanto para a determinação das áreas de uso e ocupação do solo.

Tabela 5 - Características do satélite Landsat 8

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)
Banda 1 – Coastal aerosol	0,43 – 0,45	30
Banda 2 – Blue	0,45 – 0,51	30
Banda 3 – Green	0,53 – 0,59	30
Banda 4 – Red	0,64 – 0,67	30
Banda 5 – Near Infrared (NIR)	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Panchromatic	0,50 – 0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100
Banda 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100

2.2.9 Uso e ocupação do solo

Uma vez importada a imagem ao SIG ArcGIS 10 (ESRI, 2010), utilizaram-se as bandas 2, 3 e 4 na geração de uma composição colorida cor natural, com 30 metros de resolução espacial. Posteriormente, realizou-se um fusionamento da banda 8 (Pancromática) com a composição colorida obtida anteriormente, resultando em uma imagem fusionada em coloração natural, com 15 metros de resolução espacial, com a finalidade de obtenção do uso e ocupação do solo. Tal imagem foi utilizada, posteriormente, como dado de entrada para o modelo de estimativa de evapotranspiração por imagem de satélite utilizado.

Para tanto, extraiu-se dessa imagem fusionada uma área suficiente para enquadrar as três bacias em estudo, e exportou-se a mesma ao programa Spring para ser realizada uma segmentação, que consiste em gerar polígonos que representem áreas de mesmos usos na imagem para posterior classificação.

Esse arquivo vetorial segmentado foi reimportado ao ArcGIS 10, onde foi realizada uma interpretação da imagem digital em tela (FLORENZANO, 2011) e classificação dos polígonos conforme as classes de uso e ocupação do solo,

previamente determinadas pelo conhecimento in loco da região de estudo e pelo interesse no produto final (solo exposto, cana-de-açúcar, pastagem, área construída, mata nativa, floresta plantada, água e outros usos) (Figura 9).

Figura 9 – Uso e ocupação do solo da região de estudo

2.2.10 Estimativa da evapotranspiração (ET) por imagem de satélite

No presente trabalho, propôs-se uma nova metodologia e resolveu-se trabalhar com o Modelo de Duas Fontes (Two Source Model – TSM) na estimativa da ET utilizando dados de sensores orbitais. Esse método, diferentemente do mais utilizado (SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land) (BASTIAANSSEN et al., 1998) que faz uso apenas da radiância medida na cena do satélite, utiliza duas fontes de entrada de dados (características da vegetação e do solo, além da imagem de satélite), relacionando a ET estimada ao uso relacionado àquele pixel na imagem final.

Segundo trabalho realizado por Timmermans et al. (2007), em variados cenários e culturas, concluiu-se que, por ser um modelo bem mais completo e que faz uso de uma maior quantidade de dados de entrada, o TSM apresentou resultados mais reais e específicos para cada cultura e solo exposto, já que tal modelo faz essa análise separadamente, diferentemente do SEBAL; esse último modelo só analisa a reflectância obtida pela imagem, sem nenhuma correlação com o alvo e com o uso e ocupação da cena estudada.

Deste modo, apresenta-se, na Figura 10, o fluxograma com as etapas do processamento desses dados até à obtenção dos mapas espacializados de ET.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia utilizada na estimativa de ET proposta no presente trabalho

2.2.10.1 Balanço de energia na superfície

Segundo Geli (2012), os componentes (fluxos) do balanço de energia da superfície terrestre são: a rede de fluxo radiativo ou saldo de radiação (R_n), o solo (G), o calor sensível (H) e o calor latente (LE), que normalmente são considerados na forma simplificada da equação do balanço de energia em um curto período de tempo. Existem outros fluxos no balanço de energia da superfície que, normalmente, por seu valor diminuto, não são considerados no balanço, tal como a energia usada para a fotossíntese ou o armazenamento de energia pela vegetação. R_n é dividido

em fluxos de energia após a equação do balanço de energia: $R_n = G + H + LE$. R_n é resultado do balanço de ondas curtas e de ondas longas de radiação de entrada e de saída para a superfície. G representa o fluxo de calor para dentro ou para fora do meio do solo devido às diferenças de temperatura entre a superfície do solo e do sub-solo. H é o fluxo de turbulência para a superfície ou a partir dessa, devido à diferença de temperaturas entre a superfície e o ar. LE é o fluxo de calor latente na superfície devido à evaporação de água, e representa uma medida da ET.

2.2.10.2 Modelo de Duas Fontes (TSM – Two Source Model)

O TSM estima os componentes do balanço de energia do solo e da cobertura vegetal separadamente, diferentemente do SEBAL (BEZERRA; SILVA; FERREIRA, 2008; SILVA; BEZERRA, 2006; HERNANDEZ et al., 2011; MOREIRA et al., 2010; BEZERRA, 2013; FERREIRA; MEIRELLES, 2011; MENEZES et al., 2009; LEIVAS et al., 2011). Utiliza bandas de ondas curtas de alta resolução espacial para obter a fração de cobertura do dossel que ajudam a decompor os pixels grosseiros (de baixa resolução espacial) das bandas termais, também utilizadas no processo de obtenção da ET por imagem de satélite.

Na modelagem, a formulação de resistência em série de Norman, Kustas e Humes (1995) com modificações por Campbell e Norman (1998), Kustas e Norman (2000) e Li et al. (2005), é usada, sendo a radiação líquida do dossel e do solo estimada, utilizando as Equações 2 e 3, quais sejam:

$$Rn_c = Ln_c + (1 - \tau_s)(1 - \alpha_c)S \quad (2)$$

$$Rn_s = Ln_s + \tau_s(1 - \alpha_s)S \quad (3)$$

Em que: Ln_c e Ln_s são as radiações de onda longa dos componentes do dossel e do solo, respectivamente, estimadas utilizando as Equações 4 e 5; α_s o albedo do solo; α_c o albedo do dossel; τ_s a transmissão solar no dossel, e S a radiação solar.

$$Ln_c = [1 - \exp(-k_L \Omega LAI)] [L_{sky} + L_c + L_s] \quad (4)$$

$$Ln_s = \exp(-k_L \Omega LAI) L_{sky} + [1 - \exp(-k_L \Omega LAI)] L_c + L_s \quad (5)$$

Sendo: k_L um coeficiente de extinção; L_{sky} , L_c , e L_s as radiações de onda longa do céu, dossel, e do solo, calculado com base no ar, dossel, e as temperaturas do solo,

respectivamente; LAI o índice de área foliar estimado, segundo Anderson et al. (2004); e Ω o fator de aglutinação, estimado usando a Equação 6, como função do ângulo zenital solar (θ).

$$\Omega(\theta) = \frac{\Omega(0)\Omega(90)}{\Omega(0) + [\Omega(90) - \Omega(0)]\exp(k\theta^p)} \quad (6)$$

Sendo: k um coeficiente empírico igual a -2,2; p um coeficiente empírico igual a 3,8-0,46D, em que D representa a relação entre a altura e a largura da vegetação aglomerada, $\Omega(90) \approx 1,0$, e $\Omega(0)$ o fator de aglutinação de quando dossel é visto em nadir. O $\Omega(0)$ é calculado a partir dos conhecimentos gerais e da definição da fração de cobertura vegetal (f_{veg}) e da cobertura do solo (f_{gap}). A fração de cobertura do dossel (como, por exemplo, solo nu visto no nadir) é igual a $\exp(-0,5 \Omega(0) LAI / \cos(0))$.

A fração total de solo nu visto no nadir é igual a $1-f_{veg}$ mais a fração de solo nu visto através da vegetação, que equivale $f_{veg}f_{gap}$ (KUSTAS; NORMAN, 2000; LI et al., 2005). Portanto:

$$(1 - f_{veg}) + f_{veg} f_{gap} = \exp\left(\frac{-0.5\Omega(0)LAI}{\cos(0)}\right) \quad (7)$$

$$f_{gap} = \exp\left(\frac{-0.5LAI_L}{\cos(0)}\right) \quad (8)$$

$$f_{veg} = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \quad (9)$$

Sendo: $NDVI_{min}$ e $NDVI_{max}$ o índice de vegetação normalizado (NDVI) para o solo descoberto e para cobertura vegetal total, respectivamente.

O fator de aglutinação, como uma função do ângulo de visão zenital (ϕ), é utilizado na decomposição da temperatura radiométrica da superfície (T_R), em temperatura do solo e da cobertura vegetal T_s e T_c , respectivamente, como descrito na Equação 10.

$$T_R(\phi) \approx [f_c(\phi)T_c^4 + (1 - f_c(\phi))T_s^4]^{1/4} \quad (10)$$

Sendo: $f_c(\phi)$ a fração de cobertura vegetal em função do ângulo zenital ϕ , estimada usando a Equação 11.

$$f_c(\phi) = 1 - \exp\left(\frac{-0.5\Omega LAI}{\cos(\phi)}\right) \quad (11)$$

Ademais, o efeito da aglutinação da vegetação aparece no cálculo da velocidade do vento, ao estimar a resistência do solo (R_s) e da cobertura vegetal (R_x), especificamente na estimativa dos coeficientes de extinção a_s e a_x , respectivamente. Esses coeficientes podem ser estimados utilizando a Equação 12 (KUSTAS; NORMAN, 2000).

$$a_s = 0.28(\Omega(\phi)LAI)^{2/3} h_c^{1/3} w_c^{-1/3} \quad (12a)$$

$$a_x = 0.28(\Omega(\phi)LAI_L)^{2/3} h_c^{1/3} w_c^{-1/3} \quad (12b)$$

Sendo: h_c a altura do dossel estimado segundo Anderson et al. (2004); w_c a largura média das folhas da copa; e LAI_L o índice de área foliar local equivale a LAI/f_{veg} .

O fluxo de calor sensível (H) é estimado como $H = H_c + H_s$, em que H_c e H_s são os componentes do calor sensível do dossel e do solo, respectivamente, estimado pelas Equações de 13 a 16:

$$H = \rho C_p \frac{T_{ac} - T_a}{R_a} \quad (13)$$

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_{ac}}{R_x} \quad (14)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{R_s} \quad (15)$$

Sendo: R_a a resistência aerodinâmica para a transferência de calor, estimada usando a Equação 15; ρ a densidade do ar ($1,24 \text{ kg.m}^{-3}$); C_p o calor específico do ar ($1005,00 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); e T_{ac} a temperatura da interface ar-dossel.

$$R_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z_u - d_o}{z_{om}}\right) - \psi_M \right] \left[\ln\left(\frac{z_t - d_o}{z_{om}}\right) - \psi_H \right]}{k^2 u} \quad (16)$$

Sendo: z_u e z_t as alturas de medição da velocidade do vento e da temperatura do ar, respectivamente; d_o a altura do deslocamento estimado como uma fração da altura do dossel (h_c), sendo $d_o = (2/3) h_c$; z_{om} o comprimento de rugosidade para o impulso (*momentum*) obtido, como uma fração de h_c , sendo $z_{om} = (1/8) h_c$ (GARRAT; HICKS, 1973); ψ_H e ψ_M são fatores de correção para a estabilidade do calor atmosférico e transferência de impulso (*momentum*), respectivamente (BRUTSAERT, 1982); R_x é a resistência total na camada limite da cobertura da cobertura vegetal estimada, utilizando a formulação descrita por Norman, Kustas e Humes (1995); e R_s é a resistência ao fluxo de calor na camada limite, imediatamente acima da superfície do solo, estimada por meio da Equação 17 (NORMAN; KUSTAS; HUMES, 1995).

$$R_s = \frac{1}{a + bu_s} \quad (17)$$

Sendo: a e b constantes iguais a 0,004 e 0,012, respectivamente; e u_s a velocidade do vento à altura acima da superfície do solo, onde o efeito da rugosidade da superfície do solo é mínima, estimada utilizando a formulação descrita por Norman, Kustas e Humes (1995).

Uma das recentes modificações na Equação 17 inclui a atualização de R_s por meio do conhecimento de T_s e T_c , em que $a = 0,004$ foi substituído por $c (T_s - T_c)^{(1/3)}$, sendo $c = 0,0025$ (LI et al., 2005; KUSTAS; NORMAN, 1999, 2000).

O fluxo de calor latente (LE) é estimado como $LE = LE_c + LE_s$, em que LE_c e LE_s são os componentes do calor latente do dossel e do solo, respectivamente. O modelo começou com uma estimativa inicial do LE_c , seguindo a formulação Priestly-Taylor, apresentada por Norman, Kustas e Humes (1995) como $LE_c = \alpha_{PT} f_G [\Delta / (\Delta + \gamma)] Rn_c$, em que α_{PT} é a constante de Priestly-Taylor ($\alpha_{PT} = 1,26$), f_G a fração de Índice de Área Foliar (IAF) que se apresenta verde ($f_G = 1$), Δ a inclinação da pressão do vapor de saturação em função da curva de temperatura, e γ a constante psicrométrica.

Para condições de vegetação estressada, o processo normalmente resulta, para a constante de Priestly-Taylor (PT) = 1,26, em uma solução não-física ($LE_s < 0$, ou seja, condensação na superfície do solo durante condições convectivas diurnas),

fazendo com que, então, a PT seja reduzida até que uma solução física seja obtida (KUSTAS et al., 2004).

O fluxo de calor do solo (G) é calculado como $G = C_g R_n$, em que $C_g = 0,35$, tal como sugerido por Li et al. (2005), usando a formulação descrita por Kustas, Zhan e Schmugge (1998).

Com isso, o fluxo de calor latente instantâneo, estimado no momento em que o satélite capta a cena, é extrapolado e convertido para mapas com valores de ET diário, em mm.dia^{-1} , utilizando a ET de referência introduzida ao modelo como parte do cálculo.

Dentro do próprio modelo, existem algumas fórmulas relacionando o IAF e outras características de cada alvo, já que o modelo diferencia-se dos modelos de uma fonte, como o SEBAL, ou seja, além de realizar o cálculo pela reflectância das imagens de satélite, o TSM utiliza, juntamente com esses dados, os dados alvos existentes no mapa de uso e ocupação do solo.

No presente trabalho, utilizou-se, como modelo de estimativa de evapotranspiração em ambiente SIG, o TSM (NORMAN; KUSTAS; HUMES, 1995; LI et al., 2005) programado no software SETMI (Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface), descrito por Geli e Neale (2012) e desenvolvido em conjunto por pesquisadores da Utah State University e University of Nebraska – Lincoln, ambas nos Estados Unidos, como uma extensão para o SIG ArcGIS 10 (ESRI, 2010).

2.2.10.3 Correção atmosférica das imagens Landsat 8

Para a correção atmosférica das bandas necessárias para a utilização no TSM, utilizaram-se dois métodos diferentes.

Primeiramente, foram obtidas todas as 24 imagens do satélite Landsat 8 (cada uma representando um mês dos dois anos hidrológicos estudados) e foram separadas as bandas que necessitariam de correção atmosférica (Bandas 3, 4, 5 e 10) (Tabela 5).

Para as bandas 3, 4 e 5, utilizou-se a plataforma on-line do Centro de Ciência e Arquitetura de Processamento (Center Science Processing Architecture – ESPA) do Departamento Americano de Pesquisas Geológicas, subdepartamento de Observação e Ciência dos Recursos da Terra (United States Geological Survey – USGS, Earth Resources Observation and Science - EROS) (USGS, 2016) para a

obtenção dessas bandas transformadas de Número Digital (ND, que são valores atribuídos a cada pixel da imagem, conforme a energia eletromagnética refletida por um alvo) para valores de reflectância na superfície, para cada pixel das bandas.

Para Soares et al. (2015), as diferentes escalas de ND impossibilitam a comparação entre bandas, a realização de cálculos e a utilização de dados obtidos nessas imagens, fazendo com que se necessite de uma conversão desses números para parâmetros físicos, tais como radiância e reflectância.

Na referida plataforma, são informadas as cenas (datas) necessárias para realização dos processos que o serviço oferece. Para o presente estudo, foram solicitadas as bandas 3, 4 e 5 do sensor OLI do satélite Landsat 8, para as 24 datas previamente selecionadas, corrigidas atmosféricamente e transformadas em reflectância na superfície. Adicionalmente, essas bandas foram reprojetadas para o DATUM SIRGAS2000, projeção UTM 23K Sul.

Com isso, foram realizadas composições coloridas com as bandas 3, 4 e 5 já transformadas em reflectância e, posteriormente, cada imagem composta passou por um processo de transformação dos valores finais de inteiros para decimais, para assim poderem ser utilizadas no modelo proposto.

Adicionalmente, essas imagens compostas foram utilizadas no processo de correção atmosférica da banda relativa ao Infravermelho Termal, passando pelos cálculos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Fração de Cobertura e Emissividade, conforme apresentado na Figura 10.

Já para a correção atmosférica da banda 10 (Infravermelho Termal – Sensor TIRS do Landsat 8), utilizou-se outro procedimento e outros cálculos, uma vez que a plataforma ESPA não realiza o procedimento para a referida banda.

Assim, foram obtidas todas as 24 bandas originais em Números Digitais (ND) diretamente na plataforma *Earth Explorer* da NASA. Utilizando a Equação 18, apresentada por USGS (2015), os ND na banda 10 foram transformados em radiância no topo da atmosfera.

$$L_{\lambda} = ML * Q_{cal} + AL \quad (18)$$

Em que:

$L\lambda$ é a radiância espectral no topo da atmosfera ($W\ m^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$); ML é o fator de redimensionamento multiplicativo de cada banda específica contida nos metadados da cena ($RADIANCE_MULT_BAND_x$, onde x é o número da banda); AL é o fator de redimensionamento aditivo de cada banda específica contida nos metadados da cena ($RADIANCE_ADD_BAND_x$, onde x é o número da banda); e $Qcal$ é o número digital (ND) de cada pixel da imagem.

Com a banda 10 transformada em radiância no topo da atmosfera, utilizou-se a plataforma on-line disponibilizada pela NASA, elaborada e apresentada por Brunsell e Gillies (2002) e por Barsi, Barker e Schott (2003) e validada por Barsi et al. (2005), chamada de Atmospheric Correction Parameter Calculator, para se obter os parâmetros necessários para a correção atmosférica da referida banda, quais sejam: transmissão atmosférica, radiância ascendente e radiância descendente.

Esses parâmetros são calculados pela plataforma, utilizando dados atmosféricos obtidos e armazenados pela NASA, a partir de dados de entrada informados pelo usuário, como data da imagem, horário de passagem do satélite, latitude e longitude, banda e satélite a ser utilizado, além de condições de altitude, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ponto de estudo.

Assim, obtiveram-se os parâmetros para as 24 bandas termais separadas para o presente estudo, os quais foram aplicados à Equação 19, seguindo os passos propostos por Brunsell e Gillies (2002), Barsi, Barker e Schott (2003) e Barsi et al. (2005) para o início do processo de correção atmosférica e transformação das informações na banda termal para temperatura na superfície, em graus Celsius.

$$L_{sens} = \tau [\varepsilon L_{SurfBB} + (1 - \varepsilon) L_d] + L_u \quad (19)$$

Em que:

L_{sens} é a radiância medida pelo sensor; τ é a transmissão atmosférica do solo até o sensor; ε é a emissividade da superfície; L_{SurfBB} é a radiância emitida por um corpo preto na temperatura da superfície no momento; L_d é a radiância descendente emitida pela atmosfera e refletida pela superfície até o sensor; L_u é a radiância ascendente emitida pela atmosfera até o sensor. As radiâncias são expressas em $W\ m^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$, sendo que τ e ε não possuem unidade.

Assumindo que a superfície, no presente trabalho, é ocupada, majoritariamente, por solo e vegetação, a emissividade pode ser calculada conforme Brunsell e Gillies (2002) propuseram na Equação 20.

$$E = f_c \varepsilon_{veg} + (1 - f_c) \varepsilon_{solo} \quad (20)$$

Em que:

F_c é a fração de cobertura da vegetação (0~1); ε_{veg} e ε_{solo} são a emissividade da vegetação e do solo, respectivamente.

Brunsell e Gillies (2002) usaram valores entre 0,955 e 0,98 para ε_{veg} e ε_{solo} , respectivamente, para a banda 4 do sensor AVHRR. Para o presente estudo, resolveu-se utilizar 0,90 e 0,98, respectivamente, depois de alguns testes.

Segundo Brunsell e Gillies (2002), f_c é calculado conforme a Equação 21.

$$f_c = (NDVI_{star})^2 \quad (21)$$

Em que:

$NDVI_{star}$ é uma Diferença Normalizada de Índice de Vegetação, dimensionada como apresentado na Equação 22.

$$NDVI_{star} = \frac{(NDVI - NDVI_{zero})}{(NDVI_{max} - NDVI_{zero})} \quad (22)$$

Sendo:

$NDVI_{zero}$ é o NDVI correspondente ao solo exposto e $NDVI_{max}$ é o NDVI correspondente à vegetação completa.

No presente trabalho, utilizaram-se os valores propostos por Geli (2012), que foram 0,10 para $NDVI_{zero}$ e 0,925 para $NDVI_{max}$, faltando apenas calcular o NDVI (Equação 23).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (23)$$

Sendo:

NIR e RED são as bandas do Infravermelho Próximo (banda 5) e do Vermelho (banda 4) do satélite Landsat 8, respectivamente, em reflectância e corrigidas atmosféricamente.

Uma vez calculado o L_{surfBB} , a temperatura na superfície (T_s), em graus Kelvin, pode ser calculada usando a Equação de Plank, ou, no caso da utilização do satélite Landsat, uma versão específica da equação de Plank (Equação 24).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{surfBB}} + 1\right)} \quad (24)$$

Em que:

K_1 e K_2 são coeficientes específicos para as bandas de Infravermelho Termal para cada sensor Landsat, que foram obtidas nos metadados de cada cena Landsat 8 utilizada no estudo.

Assim, foram obtidas as imagens com a temperatura instantânea da superfície, em graus Kelvin, para o dia e o horário de cada passagem do satélite. Dessa forma, pode-se obter, por um cálculo simples de alteração de unidades em ambiente SIG, todas as imagens de temperatura da superfície em graus Celsius, as quais são utilizadas no modelo de estimativa de evapotranspiração como um dos dados de entrada necessários para tal.

2.2.10.4 Dados meteorológicos da região de estudo

Como parte dos dados de entrada para o software SETMI, utilizado no presente trabalho, os dados meteorológicos utilizados na região de estudo foram obtidos juntamente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo provenientes de uma estação automática localizada na cidade de Piracicaba – SP (Estação A726), com altitude de 573 metros, latitude 22° 42' Sul e longitude 47° 37' Oeste, distando, aproximadamente, 33, 38 e 63 km do exutório das três bacias propostas no estudo.

Os dados obtidos do INMET são horários; porém, foram realizadas interpolações para se obter os dados necessários nas horas e minutos exatos de cada passagem do satélite, para cada data utilizada no estudo.

Dessa forma, obtiveram-se os valores interpolados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (m.s^{-1}), umidade relativa (%), radiação solar (W.m^{-2}) e pressão atmosférica (kPa) da região de estudo, para serem introduzidos ao modelo.

2.2.10.5 Interface SETMI

O Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI) é uma interface de modelagem desenvolvida por Geli e Neale (2012) que é executada dentro do ambiente ArgGIS 10 (ESRI, 2010). O SETMI é programado em VisualBasic.NET® e pode ser executado no modo de depuração no ambiente de programação Microsoft Visual Studio® ou compilada dentro do ArcGIS. O SETMI inclui vários modelos de evapotranspiração baseados em Sensoriamento Remoto. O mais interessante é a interface por meio da qual o modelo híbrido de estimativa de ET de Neale et al. (2012) é executado. O modelo híbrido é um híbrido do Modelo de Duas Fontes (TSM) de Norman, Kustas e Humes (1995) e um modelo de balanço hídrico que utiliza coeficientes de cultura à base de reflectância (K_{cbrf}). A porção K_{cbrf} do modelo permite uma interpolação e/ou extrapolação temporal de um balanço hídrico espacial, entre ou além das datas de imagem de entrada. A inclusão do modelo TSM permite uma capacidade de auto ajuste para o modelo, além de fornecer uma estimativa espacial de ET no momento da obtenção da imagem, que é independente do equilíbrio da água.

Desta forma, conforme apresentado no fluxograma de trabalho (Figura 10), o programa SETMI exige, como dados de entrada para o cálculo da estimativa da ET para cada data, o uso e ocupação do solo da região de estudo com alguns dados de cada cobertura analisada (ANEXO A), a composição das bandas 3, 4 e 5 do Landsat 8 (em reflectância e corrigida atmosféricamente), a imagem de temperatura da superfície, em graus Celsius, obtida a partir da banda 10 do sensor TIRS do satélite Landsat 8 e os dados meteorológicos da região de estudo, previamente interpolados para o momento (hora e minuto) de passagem do satélite (ANEXO B).

Assim, foram obtidos os dados brutos da estimativa de ET pelo programa SETMI para as 24 datas do presente estudo. Essas imagens representam uma área que contempla as três bacias propostas.

2.2.10.6 Ajuste dos resultados estimados

No presente estudo, optou-se por desenvolver e propor uma metodologia que permitisse extrapolar a estimativa da ET, que foi calculada por uma única imagem em uma data específica, para representar um mês inteiro, já que o dia de passagem do satélite pode não representar o que ocorreu no ambiente na maior parte do mês.

Assim, optou-se por estimar a Evapotranspiração de Referência (ET_o) para o dia de passagem do satélite, utilizando os dados da região fornecidos pelo INMET. Para tal, foi utilizado o programa RefET (Reference Evapotranspiration Calculator), criado e apresentado em sua última versão por Allen (2008). Essa versão contém uma programação automatizada para o método de Penman-Monteith (PM), descrito por Monteith (1965) e adaptado por Allen et al. (1989), para a estimativa de ET de referência na escala diária; esse método é, atualmente, o padrão para a FAO (ALLEN et al., 1994).

A partir da estimativa de ET_o diária para o dia de passagem do satélite, obtida pelo método de Penman-Monteith, multiplicou-se o valor pela média dos K_{cs} (coeficientes de cultura) existentes na área de estudo (o qual foi igual a 0,783) para que a ET_o fosse transformada em ET da cultura, considerada como ET real no dia de passagem do satélite.

Na sequência, multiplicaram-se esses valores diários pela quantidade de dias em cada mês para se obter uma estimativa dos valores mensais de ET real pelo método Penman-Monteith (PM). Essa multiplicação dos valores estimados diários de ET pela quantidade de dias de cada mês também foi realizada para a estimativa de ET pela imagem de satélite. Assim, obtiveram-se as estimativas de ET mensal para ambos os métodos.

Para a ET estimada pela imagem de satélite, foi preciso calcular, em ambiente SIG, a estimativa de ET para cada uso do solo para que, multiplicada pela área ocupada por cada uso, fosse possível obter-se o valor espacializado da ET diária e mensal.

A partir disso, dividiram-se os valores mensais de ET (PM) pelos valores mensais de ET (TSM), obtendo-se um coeficiente médio para todos os meses do estudo, representativo da relação entre os dois métodos de estimativa de ET (estimativa clássica por Penman-Monteith, e nova pelo Modelo de Duas Fontes).

Esse coeficiente foi utilizado para ajustar todos os valores mensais de ET provenientes do Modelo de Duas Fontes para que esse, agora corrigido e extrapolado de um único dia de um determinado mês, fosse adequado para a estimativa mensal do referido mês. Essa estimativa foi utilizada para ser comparada ao balanço hídrico das três bacias monitoradas na região do presente estudo.

2.2.11 Comparação dos resultados

Para o presente estudo, optou-se por fazer uma comparação simples entre os valores brutos dos resultados da estimativa da evapotranspiração anual por intermédio de imagens do satélite Landsat 8, com a estimativa de ET pelo balanço hídrico anual simplificado, calculado pela diferença entre o que precipitou em cada uma das bacias e o que foi escoado via vazão no exutório dessas bacias.

Adicionalmente, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento, com a utilização de linhas de tendência, para serem comparados os resultados da ET estimada pelo TSM com a ET estimada pelo balanço hídrico simples, utilizando tanto a precipitação medida em solo quanto a precipitação estimada pela imagem do satélite TRMM.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é um índice adimensional com valores situados entre -1,0 e 1,0, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados.

2.3 Resultados e discussão

Com todo o processo realizado no presente trabalho, obteve-se, primeiramente, os mapas espacializados de evapotranspiração real ajustada, obtida pelo Modelo de Duas Fontes (TSM), utilizando imagens do satélite Landsat 8, para os 24 meses estudados.

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se exemplos das bacias já extraídas dos mapas de ET, ajustados para os meses de julho de 2013 e janeiro de 2015, respectivamente.

Já na Tabela 6 e na Figura 13 apresentam-se todos os resultados de ET real mensal obtidos por intermédio do TSM, ajustados pela metodologia proposta no presente trabalho.

Figura 11 – Mapas ajustados de ET real obtida por intermédio do Modelo de Duas Fontes do mês de julho de 2013 para as três bacias estudadas: a) Bacia Analândia; b) Bacia Jacutinga; c) Bacia Corumbataí

Figura 12 – Mapas ajustados de ET real obtida por intermédio do Modelo de Duas Fontes do mês de janeiro de 2015 para as três bacias estudadas: a) Bacia Analândia; b) Bacia Jacutinga; c) Bacia Corumbataí

Tabela 6 – Valores de ET real mensal obtidos por intermédio do Modelo de Duas Fontes (TSM) ajustados pela metodologia proposta no presente trabalho

Meses	ET real mensal TSM ajustada (mm.mês ⁻¹)		
	Bacia Analândia	Bacia Corumbataí	Bacia Jacutinga
abr/13	87,866	84,664	85,784
mai/13	60,094	58,154	57,810
jun/13	58,921	57,528	59,616
jul/13	64,686	65,826	66,935
ago/13	64,204	67,172	68,227
set/13	85,840	92,002	95,043
out/13	105,744	112,640	107,369
nov/13	108,554	114,363	115,000
dez/13	113,824	116,536	119,168
jan/14	121,404	124,873	125,317
fev/14	122,026	128,345	142,466
mar/14	118,594	114,437	114,282
Total 13/14	1.111,758	1.136,538	1.157,018
abr/14	110,658	106,706	103,738
mai/14	78,561	75,113	68,678
jun/14	108,140	104,957	108,884
jul/14	59,733	59,761	56,690
ago/14	78,714	75,273	70,500
set/14	61,098	61,155	57,940
out/14	76,193	77,299	76,601
nov/14	83,382	86,011	89,840
dez/14	134,836	136,497	139,848
jan/15	111,559	105,360	103,232
fev/15	103,585	99,711	98,406
mar/15	101,562	104,289	114,277
Total 14/15	1.108,019	1.092,132	1.088,635

Figura 13 – Valores de ET real mensal obtidos por intermédio do Modelo de Duas Fontes, ajustados pela metodologia proposta no presente trabalho

Pela análise da Figura 13 e da Tabela 6, é possível observar que a variação mensal de ET real ajustada estimada pelo TSM segue o padrão de chuvas da região (Figura 4), que apresenta duas estações definidas: um período seco de abril a setembro, com menos de 20% da precipitação anual e um período chuvoso de outubro a março, com mais de 80% da precipitação anual, como observado por Valente (2001).

Posteriormente à obtenção dos valores de ET mensal estimados pelo modelo TSM ajustado, calculou-se a ET pelo balanço hídrico mensal (Equação 1) utilizando a vazão obtida nos pontos de saída de cada bacia e as precipitações, avaliadas por medições nas estações meteorológicas automáticas locadas nos pontos de saída das bacias e pelas imagens mensais de estimativa de precipitação do satélite TRMM/NASA.

Os dados mensais de ET obtidos pelo balanço hídrico foram comparados aos dados estimados pelo modelo TSM e estão apresentados nas Figuras de 14 a 17 para a bacia Analândia, nas Figuras de 18 a 21 para a bacia Corumbataí e nas Figuras de 22 a 25 para a bacia Jacutinga.

Figura 14 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Analândia)

Figura 15 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Analândia)

Figura 16 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Analândia)

Figura 17 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Analândia)

Figura 18 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Corumbataí)

Figura 19 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Corumbataí)

Figura 20 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Corumbataí)

Figura 21 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Corumbataí)

Figura 22 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Jacutinga)

Figura 23 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Jacutinga)

Figura 24 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Jacutinga)

Figura 25 – Estimativa de ET mensal pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico, utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Jacutinga)

Pela observação das Figuras de 14 a 25, pode-se verificar que a estimativa de ET mensal não apresenta uma inter-relação constante entre as diferentes metodologias de estimativa. Pelas análises, pode-se observar que a estimativa mensal pelo modelo TSM utilizando as imagens do Landsat 8 manteve, durante os meses ao longo dos dois anos, uma variação menor entre os meses, quando

comparada à estimativa de ET pelo balanço hídrico (tanto utilizando a precipitação obtida com a estação meteorológica quanto com os dados de satélite (TRMM/NASA). O balanço hídrico forneceu meses com ET alta e outros meses com ET negativa (a vazão nesses meses foi maior que a precipitação). Isso pode ser explicado pela dificuldade de obtenção de dados de vazão e de precipitação exatos em bacias; é difícil se realizar uma estimativa de ET mensal próxima da real pelo balanço hídrico simplificado, já que o tempo de concentração de uma grande bacia pode ser de mais de um mês, além de que medidas a campo podem estar mais sujeitas a interferências e erros.

Outro fator que deve também ser considerado no balanço hídrico mensal é o fato de que o período de um mês é muito pequeno para que todo o ciclo de Evapotranspiração-Precipitação-Escoamento se complete, podendo parte da água infiltrar no solo e demorar mais tempo para sair da bacia ao atingir o lençol freático. Desta forma, recomenda-se, ao se propor um balanço hídrico simplificado, realizar o cálculo completo em um ano hidrológico, eliminando, assim, o problema com a variação do armazenamento subsuperficial e subterrâneo.

Por outro lado, observa-se que, para a estimativa de ET mensal, o modelo TSM ajustado pela metodologia apresentada no presente trabalho se mostrou bem semelhante ao que ocorre com a ET estimada pelos métodos tradicionais, como Penman-Monteith, e apresenta uma relação com o padrão de chuvas da região, como foi observado na Figura 13.

Assim, optou-se por aplicar os resultados mensais ao coeficiente de correlação de Pearson para avaliar o grau de correlação linear entre as variáveis estudadas, conforme é apresentado nas Figuras de 26 a 29 para a bacia Analândia, de 30 a 33 para a bacia Corumbataí e de 34 a 37 para a bacia Jacutinga.

Figura 26 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Analândia)

Figura 27 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Analândia)

Figura 28 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Analândia)

Figura 29 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Analândia)

Figura 30 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Corumbataí)

Figura 31 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Corumbataí)

Figura 32 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Corumbataí)

Figura 33 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Corumbataí)

Figura 34 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Jacutinga)

Figura 35 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Jacutinga)

Figura 36 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014 (Bacia Jacutinga)

Figura 37 – Gráfico de dispersão dos valores de ET mensal determinados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015 (Bacia Jacutinga)

Pela análise das Figuras de 26 a 37, é possível observar que o menor coeficiente de correlação de Pearson entre as duas variáveis estudadas foi de 0,47244 para a ET estimada pelo Modelo de Duas Fontes e a ET estimada pelo

balanço hídrico com os dados do DAEE (estação meteorológica automática) na bacia Analândia, para o ano hidrológico 2014/2015 (Figura 29)

Já o maior coeficiente (0,70661) ocorreu para a mesma bacia Analândia, porém associando dados do TSM com os do balanço utilizando a precipitação do satélite TRMM/NASA para o ano hidrológico de 2013/2014 (Figura 26).

Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010) explicam que, como valores extremos (0 ou 1) dificilmente são encontrados na prática, é importante discutir como os pesquisadores podem interpretar a magnitude dos coeficientes. Dancey e Reidy (2006) apresentaram uma classificação com valores: de $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); de $r = 0,40$ até $0,6$ (moderado); de $r = 0,70$ até 1 (forte). Já para Cohen (1988), valores entre $0,10$ e $0,29$ podem ser considerados pequenos; escores entre $0,30$ e $0,49$ podem ser considerados como médios; e valores entre $0,50$ e 1 podem ser interpretados como grandes.

Assim, independente do autor ou da metodologia a seguir, é certo que, quanto mais perto de 1 (independente do sinal), maior é o grau de dependência estatística entre as variáveis. No outro oposto, quanto mais próximo de zero, menor é a dependência expressa por essa relação (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2010).

Desse modo, observou-se que todas as correlações analisadas se apresentaram entre moderada e alta. Assim, mesmo considerando o fato da estimativa mensal de ET ter apresentado uma variação alta nos valores brutos de ET, quando vistas mês a mês, os métodos avaliados mostraram semelhanças estatísticas e correlações de no mínimo moderadas entre eles, podendo, desta forma, ser utilizada a metodologia proposta no presente trabalho para se estimar a ET por intermédio de imagens de satélite ajustadas mensalmente.

Posteriormente à avaliação mensal do método, partiu-se para integralizar os valores mensais em anuais, obtendo-se, assim, os valores anuais de ET estimados: (i) pelo Modelo de Duas Fontes ajustado, (ii) pelo balanço hídrico simplificado utilizando as imagens orbitais da missão TRMM para a estimativa dos dados de chuva e, (iii) pelo balanço simplificado, porém utilizando dados de precipitação medidos diretamente nas bacias.

Assim, apresentam-se nas Tabelas de 7 a 10 os resultados da estimativa de ET anual, utilizando o balanço com cada uma das duas diferentes opções de precipitação, versus a ET estimada pelo Modelo de Duas Fontes.

Tabela 7 – Estimativa anual de ET pelo balanço hídrico utilizando precipitação TRMM e pelo Modelo de Duas Fontes (TSM), para o ano hidrológico 2013/2014

Bacias Hidrográficas	ET Balanço (mm.ano ⁻¹)	ET TSM (mm.ano ⁻¹)	Diferença (mm.ano ⁻¹)	Variação (%)
Analândia	584,92	1111,76	526,83	47,39%
Corumbataí	781,09	1136,54	355,45	31,27%
Jacutinga	695,15	1157,02	461,86	39,92%
r (Pearson)	0,605			

Tabela 8 – Estimativa anual de ET pelo balanço hídrico utilizando precipitação TRMM e pelo Modelo de Duas Fontes (TSM), para o ano hidrológico 2014/2015

Bacias Hidrográficas	ET Balanço (mm.ano ⁻¹)	ET TSM (mm.ano ⁻¹)	Diferença (mm.ano ⁻¹)	Variação (%)
Analândia	920,12	1108,02	187,90	16,96%
Corumbataí	1031,51	1092,13	60,62	5,55%
Jacutinga	1123,24	1088,63	34,60	-3,18%
r (Pearson)	-0,956			

Tabela 9 – Estimativa anual de ET pelo balanço hídrico utilizando precipitação DAEE e pelo Modelo de Duas Fontes (TSM), para o ano hidrológico 2013/2014

Bacias Hidrográficas	ET Balanço (mm.ano ⁻¹)	ET TSM (mm.ano ⁻¹)	Diferença (mm.ano ⁻¹)	Variação (%)
Analândia	820,78	1111,76	290,98	26,17%
Corumbataí	1033,64	1136,54	102,89	9,05%
Jacutinga	1244,33	1157,02	87,32	-7,55%
r (Pearson)	0,999			

Tabela 10 – Estimativa anual de ET pelo balanço hídrico utilizando precipitação DAEE e pelo Modelo de Duas Fontes (TSM), para o ano hidrológico 2014/2015

Bacias Hidrográficas	ET Balanço (mm.ano ⁻¹)	ET TSM (mm.ano ⁻¹)	Diferença (mm.ano ⁻¹)	Variação (%)
Analândia	1058,48	1108,02	49,54	4,47%
Corumbataí	1166,59	1092,13	74,45	-6,82%
Jacutinga	1175,44	1088,63	86,81	-7,97%
r (Pearson)	-0,995			

Adicionalmente, decidiu-se submeter os resultados anuais ao coeficiente de correlação de Pearson, com a utilização de linhas de tendência, para avaliar o grau de correlação linear entre as variáveis estudadas, conforme Figuras de 38 a 41.

Figura 38 – Gráfico de dispersão dos valores de ET anual estimados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2013/2014, nas três bacias estudadas

Figura 39 – Gráfico de dispersão dos valores de ET anual estimados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação TRMM, para o ano hidrológico de 2014/2015, nas três bacias estudadas

Figura 40 – Gráfico de dispersão dos valores de ET anual estimados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2013/2014, nas três bacias estudadas

Figura 41 – Gráfico de dispersão dos valores de ET anual estimados pelo Modelo de Duas Fontes (TSM) e pelo balanço hídrico utilizando dados de precipitação DAEE, para o ano hidrológico de 2014/2015, nas três bacias estudadas

Desse modo, analisando-se os resultados apresentados nas Tabelas de 7 a 10 e nas Figuras de 38 a 41, pode-se observar que, com exceção do ano hidrológico 2013/2014 e os dados de precipitação TRMM (Tabela 7 e Figura 38), os coeficientes de correlação de Pearson ficaram acima de 0,95, mostrando uma correlação muito alta entre as variáveis. Os valores brutos de ET anual apresentados, principalmente nas bacias Corumbataí e Jacutinga, mostraram-se com diferença abaixo dos 10%, sendo considerados ótimos, tendo em vista a dificuldade de obtenção de dados de vazão e precipitação em campo. Esse valor também pode ser considerado aceitável, já que parte da água das bacias acaba ficando armazenada ou drena para outro meio que não seja o curso d'água principal, por onde foi calculado o volume de escoamento anual.

Para o ano de 2013/2014, o sensor TRMM apresentou uma estimativa de precipitação sensivelmente menor do que a que se obteve pelos dados do DAEE diretamente das bacias. Já para o ano de 2014/2015, os dados do TRMM se equivaleram aos coletados nas bacias. Uma explicação para esse fato pode ser que, nesses anos, ocorreu uma interferência grande causada por uma seca histórica na região, podendo ter afetado a estimativa realizada pelo satélite, já que esse referido produto possui resolução espacial de, aproximadamente, 25 km, ou

seja, cada valor de precipitação do satélite representa uma área de 25 km², podendo não ser tão preciso em épocas de chuvas esparsas e irregulares.

Também, observando-se as Tabelas de 7 a 10, percebe-se que a bacia Analândia (diferentemente das outras duas) apresenta as maiores variações, em porcentagem dos valores de ET obtidos pelos diferentes métodos. Isso pode ser explicado pelo relevo mais acidentado e pela altitude maior da região de Analândia-SP. Esse fato pode ter sido ocasionado pelas diferenças maiores de precipitação em certas partes da bacia, que as vezes podem não ter sido contabilizadas, tanto na imagem TRMM (pelo fato do satélite possuir uma resolução espacial muito alta, faltando sensibilidade para distinguir tal área), quanto na precipitação medida no exutório da bacia, que pode não contabilizar a chuva à montante na bacia hidrográfica.

Mesmo que alguns valores possam ter refletido diferenças entre os métodos, acredita-se que o modelo ajustado apresentado pelo presente trabalho possa ser utilizado como uma nova metodologia para estimar a evapotranspiração real no instante de passagem do satélite, assim como os valores de ET real mensal e anual.

Portanto, existe a potencialidade dessa metodologia gerar imagens espacializadas de ET real que possam apresentar-se diferenciadas para cada tipo de cobertura vegetal existente nessas imagens.

2.4 Conclusão

A partir das análises realizadas com a metodologia proposta, de ajuste da estimativa de evapotranspiração (ET) pelo Modelo de Duas Fontes, para as três bacias hidrográficas com padrões fisiográficos brasileiros, foi possível concluir que tal ajuste permitiu obter-se valores de ET anual estatisticamente correlacionados e, assim, semelhantes aos obtidos por intermédio de balanço hídrico anual simplificado, tanto utilizando valores de precipitação medidos diretamente nas bacias hidrográficas quanto utilizando valores de precipitação estimados por imagem de satélite.

Deste modo, conclui-se que o ajuste proposto ao modelo foi validado, e tem potencialidade para ser utilizado, posteriormente, na obtenção de dados de

evapotranspiração mensal e anual espacializados para grandes áreas, e diferenciados para cada tipo de uso e ocupação do solo.

Referências

ALLEN, R.G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator, version 3.1. Kimberly: University of Idaho Research and Extension Center, 2008. 61 p.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 35-91, 1994.

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B.; AYRES, F.M. Delimitação automática de Bacias Hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 46-57, 2010.

ANDERSON, M.C.; NEALE, C.M.U.; LI, F.; NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; JAYANTHI, H.; CHAVEZ, J. Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, p. 447-464, 2004.

BARSI, J.A.; BARKER, J.L.; SCHOTT, J.R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 16., 2003, Toulouse. **Proceedings...** Disponível em: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi_IGARSS03.PDF>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BARSI, J.A.; SCHOTT, J.R.; PALLUCONI, F.D.; HOOK, S.J. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. **Proc. of SPIE**, Bellingham, v.5882, p. 1-7, 2005. Disponível em: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi_AtmCorr_SPIE05.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2016.

BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212/213, p. 198-212, 1998.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BEZERRA, J.M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. 2013. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <www.pgea.ufrpe.br/downloads/dissertacoes/JoelBezerra.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BOSQUILIA, R.W.D. **Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de drenagens e nascentes**. 2014. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-04022014-094241/>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BRUNSELL, N.A.; GILLIES, R.R. Incorporating surface emissivity into a thermal atmospheric correction. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 68, n. 12, p. 1263-1269, 2002.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications**. Houten: Springer, 1982. 299 p.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998. 286 p.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum, 1988. 590 p.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrología subterránea**. Barcelona: Ed. Omega, 1976. 1157 p.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Glossário de termos hidrológicos**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 1976. 291 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS professional GIS for the desktop**, version 10. Redlands, 2010.

FERREIRA, A.S.; MEIRELLES, M.S.P. Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na Mesorregião do Sul Goiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5576-5583.

FIGUEIREDO FILHO, D.B.; SILVA JÚNIOR, J.A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson. **Revista Política Hoje**, Recife, v. 18, p. 115-146, 2009.

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

GARRATT, J.R.; HICKS, B.B. Momentum, heat and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Reading, v. 99, p. 680–687, 1973.

GELI, H.M.E. **Modeling spatial surface energy fluxes of agricultural and riparian vegetation using remote sensing**. 2012. 182 p. Thesis (Ph.D. in Civil and Environmental Engineering) – Utah State University, Logan, 2012. Disponível em: <<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2158&context=etd>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

GELI, H.M.E.; NEALE, C.M.U. Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI). **IAHS Proceedings and Reports**, Wallingford, v. 352, p. 171-174, 2012.

HERNANDEZ, F.B.T.; NEALE, C.M.U.; TAGHVAEIAN, S.; TEIXEIRA, A.H. de C. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5209-5216.

KUMMEROW, C.D.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 15, p. 809-817, 1998.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 94, p. 13–29, 1999.

_____. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surface. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 847–854, 2000.

KUSTAS, W.P.; ZHAN, X.; SCHMUGGE, T.J. Combining optical and microwave remote sensing for mapping energy fluxes in a semiarid watershed. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.64, p.116–131, 1998.

KUSTAS, W.P.; LI, F.; JACKSON, T.J.; PRUEGER, J.H.; MACPHERSON, J.L.; WOLDE, M. Effects of remote sensing pixel resolution on modelled energy flux variability of croplands in Iowa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, p. 535–547, 2004.

LEIVAS, J.F.; ANDRADE, R.G.; NOGUEIRA, S.F.; BOLFE, E.L. Estimativa da evapotranspiração em áreas com diferentes características ambientais utilizando o algoritmo SEBAL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SIGERA, 2011. p. 1-5.

LI, F.; KUSTAS, W.P.; PRUEGER, J.H.; NEALE, C.M.U.; JACKSON, T.J. Utility of remote sensing based two-source energy balance model under low and high vegetation cover conditions. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 6, n. 6, p. 878–891, 2005.

MENEZES, S.J.M.C.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V.P.; GLERIANI, J.M.; ANDRADE, R.G. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 6, p. 491-503, 2009.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 6., 1964, Swansea. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.

MOREIRA, L.C.J.; DURAND, B.J.; TEIXEIRA, A.S.; ANDRADE, E.M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1148-1159, 2010.

NEALE, C.M.U.; GELI, H.M.E.; KUSTAS, W.P.; ALFIERI, J.G.; GOWDA, P.H.; EVETT, S.R.; PRUEGER, J.H.; HIPPS, L.E.; DULANEY, W.P.; CHAVEZ, J.L.; FRENCH, A.N.; HOWELL, T.A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, Oxford, v. 50, p. 152-161, 2012.

NORMAN, J.M.; KUSTAS W.P.; HUMES, K.S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 77, p. 263–293, 1995.

OLIVEIRA, J.S. **Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solo em ambiente SIG**. 2012. 103 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-31052012-075705>. Acesso em: 23 mar. 2016.

PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** Disponível em: http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz_et_al_SBRH_2005c.pdf. Acesso em: 23 mar. 2016.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. Hand, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

SILVA, B.B. da; BEZERRA, M.V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

SOARES, F.S.; ALMEIDA, R.K.; RUBIM, I.B.; BARROS, R.S.; CRUZ, C.B.M.; MELLO, G.V.; BAPTISTA NETO, J.A. Análise comparativa da correção atmosférica de imagem do Landsat 8: o uso do 6S e do ATCOR2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 1821-1828.

TIMMERMANS, W.; KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C.; FRENCH, A.N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 108, p. 369-384, 2007.

TROPPEMAIR, H.; MACHADO, M.L.A. **Variação da estrutura da mata galeria na bacia do Rio Corumbataí (SP) em relação à água do solo, do tipo de margem e do traçado do rio.** São Paulo: USP, Instituto de Geografia, 1974. 22 p. (Série Biogeografia, 8).

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH; Editora da UFRGS, 1997. 943 p.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.P.; ROUSSEAU, A.N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J.P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 240, n. 3, p. 225-242, 2001.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8 (L8) data users handbook: version 1.0.** 2015. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

_____. **User guide: earth resources observation and science (eros) center science processing architecture (ESPA) on demand interface;** version 3.1. 2016. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/espa_odi_userguide.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2016.

VALENTE, R.O.A. **Análise da estrutura da paisagem na bacia do Rio Corumbataí, SP.** 2001. 162 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-16042004-145533/>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

VALERIANO, M.M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 72-104.

3 AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PARA CANA-DE-AÇÚCAR, FLORESTA PLANTADA E MATA NATIVA UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8 EM DIFERENTES ASPECTOS ESPAÇO-TEMPORAIS

Resumo

O conhecimento da evapotranspiração real (ET_r) de culturas e florestas em geral é importante em todas as etapas do manejo produtivo dessas coberturas vegetais. Muitos trabalhos vêm se desenvolvendo com a finalidade de se obter esses valores, tanto pontuais quanto espacializados. Deste modo, o presente trabalho teve por objetivo utilizar o Modelo de Duas Fontes (TSM), ajustado para integralizar os dados de ET_r horários em mensais e anuais, na obtenção da ET_r durante dois anos de estudo, para áreas com cana-de-açúcar, florestas plantadas e mata nativa; avaliou-se como essa evapotranspiração se comporta temporalmente e como é influenciada pelos parâmetros altitude, declividade, faces de exposição do terreno, tipos de solo e biomas. Temporalmente, analisando os resultados mensais, sazonais e anuais, a cana-de-açúcar consumiu menos água do que a floresta plantada e a mata nativa. Para a altitude, concluiu-se que, quanto maior a altitude, maior a ET_r anual. Quanto à declividade do terreno, concluiu-se que, quanto maior a declividade, maior foi a ET_r anual. Quanto às faces de exposição do terreno, a face plana foi a que apresentou menor ET_r. Para a mata nativa, as faces não apresentaram diferença; já para a floresta plantada, as faces norte e oeste consumiram mais água, enquanto que para a cana-de-açúcar os maiores valores de ET_r foram obtidos na face oeste. Para os solos, as três coberturas vegetais apresentaram maior ET_r em solos diferentes; porém, o Neossolo Litólico apresentou maior consumo de água quando comparado com os outros. Por fim, para a cultura da cana-de-açúcar, não foram obtidas diferenças significativas na estimativa de ET real anual quando plantadas em áreas de Cerrado ou Mata Atlântica. Já para floresta plantada e mata nativa, houve variações significativas no consumo de água por esses tipos de cobertura.

Palavras-chave: ET_r; Relevo; Solos; Biomas

Abstract

The knowledge of actual evapotranspiration (ET_r) of a general culture and forests is very important at all stages of the production management of these vegetal covers. Many studies have been developed in order to obtain such value both punctual as spatialized. Thus, this study aimed to use the Two Source Model (TSM), adjusted to convert hourly ET_r to monthly and annually data, in obtaining ET_r for two years to areas with sugarcane, planted and native forests and evaluate how this evapotranspiration behaves temporally and spatially for some parameters, as altitude, slope, exposure faces of the terrain, soil types and biomes. Temporally, analyzing the monthly, seasonal and annual results, the sugarcane consumed less water than the planted and natural forests. For altitude, it was found that the higher the altitude, the greater the annual ET_r. For the slope aspect, it was concluded that

the higher the slope, the greater the annual ETr. As for the land exposure faces, the flat face showed the lowest ETr. For the native forest, the faces showed no difference. For the planted forest, north and west sides consumed more water, while for sugarcane higher ETr values were on the west face. For soils, the three vegetation covers showed higher ETr in different soils, but the Neossolo Litólico showed high water consumption common for all. Finally, for the sugarcane, were not obtained significant differences for the annual actual ET when planted in areas of Cerrado and Atlantic Forest. As for planted and natural forests, there were significant variations in water consumption by these plants.

Keywords: ETr; Terrain; Soils; Biomes

3.1 Introdução

A evapotranspiração é a perda de água de uma superfície coberta com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade da atmosfera, e se constitui em uma das principais variáveis utilizadas no manejo da água em sistemas agrícolas.

O conhecimento da evapotranspiração real (ETr) das culturas e da vegetação em geral é de grande importância em atividades ligadas à gestão de bacias hidrográficas, em modelagens meteorológica e hidrológica e, sobretudo, no manejo hídrico da agricultura irrigada (BEZERRA; SILVA; FERREIRA, 2008).

Muitos trabalhos vêm sendo realizados utilizando variados métodos de estimativa da evapotranspiração, atualmente. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda o uso do método de estimativa de ET por meio da equação de Penman-Monteith. Este modelo prediz com eficácia a ETo em diversas condições de umidade atmosférica, necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos, que nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões.

Para Moreira et al. (2010), os modelos clássicos de medição da evapotranspiração (ET) fornecem informações pontuais, utilizando o balanço hídrico no solo; assim, podem não condizer com o resultado a ser apresentado pela análise da cultura, espacialmente. Adicionalmente, esses métodos clássicos de estimativa da ET costumam ser caros e difíceis de serem trabalhados com instrumentos em campo (NEVES; VERSIANI; RODRIGUES, 2007).

Com isso, utilizando-se do grande avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e de novas opções de imagens de satélite, estão sendo desenvolvidas técnicas de estimativa do balanço de energia na superfície do solo, do fluxo de

energia e da evapotranspiração por intermédio dessas imagens, obtendo-se informações em caráter regional, e não mais pontual. Essas técnicas se constituem em ferramentas de grande utilidade para o manejo racional da água e do aumento de produtividade das culturas (SILVA; LOPES; AZEVEDO, 2005; SILVA; BEZERRA, 2006).

Porém, quando se trabalha com a evapotranspiração regionalizada e espacializada, alguns fatores devem ser levados em consideração, pois podem alterar a estimativa de ET em determinados tipos de cobertura vegetal; alguns desses valores são: a vegetação, o relevo, o bioma, o tipo de solo, entre outros.

Assim sendo, o objetivo do presente trabalho foi o de aplicar o modelo de estimativa de evapotranspiração por imagem de satélite (Modelo de Duas Fontes) ajustado para valores de ET real mensal, a fim de avaliar o efeito de alguns parâmetros temporais e espaciais para a cultura da cana-de-açúcar e para florestas plantadas, além dos remanescentes florestais de mata nativa.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Fluxograma das etapas de trabalho

A metodologia aplicada está representada no fluxograma das etapas de trabalho presente na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma geral do trabalho realizado

Conforme o fluxograma apresentado na Figura 1, no presente trabalho pretendeu-se avaliar a ET real ajustada mensal, frente a variados parâmetros espaciais e temporais, para as culturas mais importantes da região de estudo (cana-de-açúcar e floresta plantada), além dos remanescentes florestais dos biomas presentes na área.

3.2.2 Localização da área de estudo

A região de estudo escolhida para o presente trabalho é compreendida pela cena do satélite Landsat 8 com Órbita/Path 220 e Ponto/Row 75, entre as latitudes $20^{\circ}43'55,2''S$ e $22^{\circ}36'28,8''S$ e longitudes $46^{\circ}37'48,0''W$ e $48^{\circ}50'16,8''W$ (Figura 2). Esta cena compreende o nordeste do Estado de São Paulo.

Figura 2 – Cena Landsat 8 com Órbita/Path 220 e Ponto/Row 75 escolhida para o presente trabalho

Inclusa na cena apresentada na Figura 2, escolheu-se uma quadricula (Figura 3), de área igual a 2.231,926 quilômetros quadrados, a qual contempla as bacias

hidrográficas estudadas no Capítulo 1, e uma grande variedade espacial dos fatores a serem estudados, incluindo diferentes classes de declividade, diferentes fitofisionomias vegetais e variados tipos de solo.

Figura 3 – Localização da área de estudo escolhida para o presente trabalho no Estado de São Paulo

Como se observa na Figura 3, a área de estudo contempla 12 municípios, quais sejam: Santa Gertrudes, São Pedro, Charqueada, Ipeúna, Rio Claro, Itirapina, Corumbataí, Brotas, Analândia, São Carlos, Pirassununga e Descalvado.

3.2.3 Clima

O clima da região é o Cwa segundo Köppen, definido como mesotérmico subtropical, com inverno seco e verão chuvoso, temperaturas do mês mais quente superior a 22°C e do mês mais frio não excedente a 18°C, como também observado por Oliveira (2012). As chuvas concentram-se nos meses de outubro a março, apresentando uma precipitação média anual de 1.390mm (TROPPMAIR; MACHADO, 1974), sendo o período seco de abril a setembro. Na Figura 4, estão representadas as precipitações médias mensais de longo período, obtidas entre os anos de 1917 e 2015.

Figura 4 - Precipitação média mensal entre os anos de 1917 e 2015

Fonte: INMET

3.2.4 Imagem do satélite Landsat 8

Com o lançamento do Landsat 8, no dia 11 de fevereiro de 2013, surgiu uma nova e gratuita opção para obtenção de imagens de satélite disponíveis para todo o planeta, com período de revisita de 16 dias (resolução temporal). Tendo em vista

esse fato, obteve-se uma imagem do Landsat 8 para cada mês dos dois anos do presente estudo (24 imagens), compreendendo a região selecionada para o presente trabalho, com Órbita/Path 220 e Ponto/Row 75, entre as latitudes 20°43'55,2"S e 22°36'28,8"S e longitudes 46°37'48,0"W e 48°50'16,8"W.

Dessa forma, as imagens obtidas do satélite Landsat 8 foram utilizadas tanto para estimativa da ET, utilizando as bandas necessárias para o modelo a ser estudado (Bandas 2, 3, 4, 5, 10 e 11) (Tabela 1), quanto para a determinação das áreas de uso e ocupação do solo.

Tabela 1 - Características do satélite Landsat 8

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)
Banda 1 – Coastal aerosol	0,43 – 0,45	30
Banda 2 – Blue	0,45 – 0,51	30
Banda 3 – Green	0,53 – 0,59	30
Banda 4 – Red	0,64 – 0,67	30
Banda 5 – Near Infrared (NIR)	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Panchromatic	0,50 – 0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100
Banda 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100

3.2.5 Estimativa da evapotranspiração (ET) por imagem de satélite

No presente trabalho, propôs-se uma nova metodologia, fazendo-se uso do Modelo de Duas Fontes (Two Source Model – TSM) na estimativa da ET utilizando dados de sensores orbitais. Esse método, diferentemente do mais utilizado (SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land) (BASTIAANSEN et al., 1998) que faz uso apenas da radiância medida na cena do satélite, utiliza duas fontes de entrada de dados (características da vegetação e do solo, além da imagem de satélite), relacionando a ET estimada ao uso correspondente àquele pixel na imagem final.

Segundo o trabalho realizado por Timmermans et al. (2007), em variados cenários e culturas, concluiu-se que, por ser um modelo bem mais completo e que faz uso de uma maior quantidade de dados de entrada, o TSM apresentou

resultados mais reais e específicos para cada cultura e solo exposto, já que tal modelo faz essa análise separadamente, diferentemente do SEBAL; esse último modelo só analisa a reflectância obtida pela imagem, sem nenhuma correlação com o alvo e com o uso e ocupação da cena estudada.

Deste modo, apresenta-se, na Figura 5, o fluxograma com as etapas do processamento desses dados, até à obtenção dos mapas espacializados de ET.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia utilizada na estimativa de ET, proposta no presente trabalho

3.2.5.1 Balanço de energia na superfície

Segundo Geli (2012), os componentes (fluxos) do balanço de energia da superfície terrestre são: a rede de fluxo radiativo ou saldo de radiação (R_n), o solo (G), o calor sensível (H) e o calor latente (LE), que normalmente são considerados na forma simplificada da equação do balanço de energia em um curto período de tempo. Existem outros fluxos no balanço de energia da superfície que, normalmente, por seu valor diminuto, não são considerados no balanço, tal como a energia usada para a fotossíntese ou o armazenamento de energia pela vegetação. R_n é dividido em fluxos de energia por meio da equação do balanço de energia: $R_n = G + H + LE$. R_n é resultado do balanço de ondas curtas e de ondas longas de radiação de entrada e de saída para a superfície. G representa o fluxo de calor para dentro ou

para fora do meio do solo devido às diferenças de temperatura entre a superfície do solo e do sub-solo. H é o fluxo de turbulência para a superfície ou a partir dessa, devido à diferença de temperaturas entre a superfície e o ar. LE é o fluxo de calor latente na superfície devido à evaporação de água, e representa uma medida da ET.

3.2.5.2 Modelo de Duas Fontes (TSM – Two Source Model)

O TSM estima os componentes do balanço de energia do solo e da cobertura vegetal separadamente, diferentemente do SEBAL (BEZERRA; SILVA; FERREIRA, 2008; SILVA; BEZERRA, 2006; HERNANDEZ et al., 2011; MOREIRA et al., 2010; BEZERRA, 2013; FERREIRA; MEIRELLES, 2011; MENEZES et al., 2009; LEIVAS et al., 2011). Utiliza bandas de ondas curtas de alta resolução espacial para obter a fração de cobertura do dossel que ajudam a decompor os pixels grosseiros (de baixa resolução espacial) das bandas termais, também utilizadas no processo de obtenção da ET por imagem de satélite.

Na modelagem, a formulação de resistência em série de Norman, Kustas e Humes (1995) com modificações por Campbell e Norman (1998), Kustas e Norman (2000) e Li et al. (2005), é usada, sendo a radiação líquida do dossel e do solo estimada, utilizando as Equações 1 e 2, quais sejam:

$$Rn_c = Ln_c + (1 - \tau_s)(1 - \alpha_c)S \quad (1)$$

$$Rn_s = Ln_s + \tau_s(1 - \alpha_s)S \quad (2)$$

Em que: Ln_c e Ln_s são as radiações de onda longa dos componentes do dossel e do solo, respectivamente, estimadas utilizando as Equações 3 e 4; α_s o albedo do solo; α_c o albedo do dossel; τ_s a transmissão solar no dossel, e S a radiação solar.

$$Ln_c = [1 - \exp(-k_L \Omega LAI)] [L_{sky} + L_c + L_s] \quad (3)$$

$$Ln_s = \exp(-k_L \Omega LAI) L_{sky} + [1 - \exp(-k_L \Omega LAI)] L_c + L_s \quad (4)$$

Sendo: k_L um coeficiente de extinção; L_{sky} , L_c , e L_s as radiações de onda longa do céu, dossel, e do solo, calculado com base no ar, dossel, e as temperaturas do solo, respectivamente; LAI o índice de área foliar estimado, segundo Anderson et al. (2004); e Ω o fator de aglutinação, estimado usando a Equação 5, como função do ângulo zenital solar (θ).

$$\Omega(\theta) = \frac{\Omega(0)\Omega(90)}{\Omega(0) + [\Omega(90) - \Omega(0)]\exp(k\theta^p)} \quad (5)$$

Sendo: k um coeficiente empírico igual a -2,2; p um coeficiente empírico igual a 3,8-0,46D, em que D representa a relação entre a altura e a largura da vegetação aglomerada, $\Omega(90) \approx 1,0$, e $\Omega(0)$ o fator de aglutinação de quando dossel é visto em nadir. O $\Omega(0)$ é calculado a partir dos conhecimentos gerais e da definição da fração de cobertura vegetal (f_{veg}) e da cobertura do solo (f_{gap}). A fração de cobertura do dossel (como, por exemplo, solo nu visto no nadir) é igual a $\exp(-0,5 \Omega(0) LAI/\cos(0))$.

A fração total de solo nu visto no nadir é igual a $1-f_{veg}$ mais a fração de solo nu visto através da vegetação, que equivale $f_{veg}f_{gap}$ (KUSTAS; NORMAN, 2000; LI et al., 2005). Portanto:

$$(1 - f_{veg}) + f_{veg}f_{gap} = \exp\left(\frac{-0.5\Omega(0)LAI}{\cos(0)}\right) \quad (6)$$

$$f_{gap} = \exp\left(\frac{-0.5LAI_L}{\cos(0)}\right) \quad (7)$$

$$f_{veg} = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \quad (8)$$

Sendo: $NDVI_{min}$ e $NDVI_{max}$ o índice de vegetação normalizado (NDVI) para o solo descoberto e para cobertura vegetal total, respectivamente.

O fator de aglutinação, como uma função do ângulo de visão zenital (ϕ), é utilizado na decomposição da temperatura radiométrica da superfície (T_R), em temperatura do solo e da cobertura vegetal T_s e T_c , respectivamente, como descrito na Equação 9.

$$T_R(\phi) \approx [f_c(\phi)T_c^4 + (1 - f_c(\phi))T_s^4]^{1/4} \quad (9)$$

Sendo: $f_c(\phi)$ a fração de cobertura vegetal em função do ângulo zenital ϕ , estimada usando a Equação 10.

$$f_c(\phi) = 1 - \exp\left(\frac{-0.5\Omega LAI}{\cos(\phi)}\right) \quad (10)$$

Ademais, o efeito da aglutinação da vegetação aparece no cálculo da velocidade do vento, ao estimar a resistência do solo (R_s) e da cobertura vegetal (R_x), especificamente na estimativa dos coeficientes de extinção a_s e a_x , respectivamente. Esses coeficientes podem ser estimados utilizando a Equação 11 (KUSTAS; NORMAN, 2000).

$$a_s = 0.28(\Omega(\phi)LAI)^{2/3} h_c^{1/3} w_c^{-1/3} \quad (11a)$$

$$a_x = 0.28(\Omega(\phi)LAI_L)^{2/3} h_c^{1/3} w_c^{-1/3} \quad (11b)$$

Sendo: h_c a altura do dossel estimado segundo Anderson et al. (2004); w_c a largura média das folhas da copa; e LAI_L o índice de área foliar local equivale a LAI/f_{veg} .

O fluxo de calor sensível (H) é estimado como $H = H_c + H_s$, em que H_c e H_s são os componentes do calor sensível do dossel e do solo, respectivamente, estimado pelas Equações de 12 a 15:

$$H = \rho C_p \frac{T_{ac} - T_a}{R_a} \quad (12)$$

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_{ac}}{R_x} \quad (13)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{R_s} \quad (14)$$

Em que: R_a é a resistência aerodinâmica para a transferência de calor, estimada usando a Equação 14; ρ é a densidade do ar ($1,24 \text{ kg.m}^{-3}$); C_p é o calor específico do ar ($1005,00 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); e T_{ac} é a temperatura da interface ar-dossel.

$$R_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z_u - d_o}{z_{om}}\right) - \psi_M \right] \left[\ln\left(\frac{z_t - d_o}{z_{om}}\right) - \psi_H \right]}{k^2 u} \quad (15)$$

Sendo: z_u e z_t as alturas de medição da velocidade do vento e da temperatura do ar, respectivamente; d_o a altura do deslocamento estimado como uma fração da altura do dossel (h_c), sendo $d_o = (2/3) h_c$; z_{om} o comprimento de rugosidade para o impulso (*momentum*) obtido, como uma fração de h_c , sendo $z_{om} = (1/8) h_c$ (GARRAT; HICKS, 1973); ψ_H e ψ_M são fatores de correção para a estabilidade do calor atmosférico e

transferência de impulso (*momentum*), respectivamente (BRUTSAERT, 1982); R_x é a resistência total na camada limite da cobertura da cobertura vegetal estimada, utilizando a formulação descrita por Norman, Kustas e Humes (1995); e R_s é a resistência ao fluxo de calor na camada limite, imediatamente acima da superfície do solo, estimada por meio da Equação 16 (NORMAN; KUSTAS; HUMES, 1995).

$$R_s = \frac{1}{a + bu_s} \quad (16)$$

Sendo: a e b constantes iguais a 0,004 e 0,012, respectivamente; e u_s a velocidade do vento à altura acima da superfície do solo, onde o efeito da rugosidade da superfície do solo é mínima, estimada utilizando a formulação descrita por Norman, Kustas e Humes (1995).

Uma das recentes modificações na Equação 16 inclui a atualização de R_s por meio do conhecimento de T_s e T_c , em que $a = 0,004$ foi substituído por $c (T_s - T_c)^{(1/3)}$, sendo $c = 0,0025$ (LI et al., 2005; KUSTAS; NORMAN, 1999, 2000).

O fluxo de calor latente (LE) é estimado como $LE = LE_c + LE_s$, em que LE_c e LE_s são os componentes do calor latente do dossel e do solo, respectivamente. O modelo teve origem com uma estimativa inicial do LE_c , seguindo a formulação Priestly-Taylor, apresentada por Norman, Kustas e Humes (1995) como $LE_c = \alpha_{PT} f_G [\Delta / (\Delta + \gamma)] Rn_c$, em que α_{PT} é a constante de Priestly-Taylor ($\alpha_{PT} = 1,26$), f_G a fração de Índice de Área Foliar (IAF) que se apresenta verde ($f_G = 1$), Δ a inclinação da pressão do vapor de saturação em função da curva de temperatura, e γ a constante psicrométrica.

Para condições de vegetação estressada, o processo normalmente resulta, para a constante de Priestly-Taylor (PT) = 1,26, em uma solução não-física ($LE_s < 0$, ou seja, condensação na superfície do solo durante condições convectivas diurnas), fazendo com que, então, a PT seja reduzida até que uma solução física seja obtida (KUSTAS et al., 2004).

O fluxo de calor do solo (G) é calculado como $G = C_g Rn$, em que $C_g = 0,35$, tal como sugerido por Li et al. (2005), usando a formulação descrita por Kustas, Zhan e Schmugge (1998).

Com isso, o fluxo de calor latente instantâneo, estimado no momento em que o satélite capta a cena, é extrapolado e convertido para mapas com valores de ET diário, em mm.dia^{-1} , utilizando a ET de referência introduzida ao modelo como parte do cálculo.

Dentro do próprio modelo, existem algumas fórmulas relacionando o IAF e outras características de cada alvo, já que o modelo diferencia-se dos modelos de uma fonte, como o SEBAL, ou seja, além de realizar o cálculo pela reflectância das imagens de satélite, o TSM utiliza, juntamente com esses dados, os dados alvos existentes no mapa de uso e ocupação do solo.

No presente trabalho, utilizou-se, como modelo de estimativa de evapotranspiração em ambiente SIG, o TSM (NORMAN; KUSTAS; HUMES, 1995; LI et al., 2005) programado no software SETMI (Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface), descrito por Geli e Neale (2012) e desenvolvido em conjunto por pesquisadores da Utah State University e University of Nebraska – Lincoln, ambas nos Estados Unidos, como uma extensão para o SIG ArcGIS 10 (ESRI, 2010).

3.2.5.3 Correção atmosférica das imagens Landsat 8

Para a correção atmosférica das bandas necessárias para a utilização no TSM, utilizaram-se dois métodos diferentes.

Primeiramente, foram obtidas todas as 24 imagens do satélite Landsat 8 (cada uma representando um mês dos dois anos hidrológicos estudados) e foram separadas as bandas que necessitariam de correção atmosférica (Bandas 3, 4, 5 e 10) (Tabela 1).

Para as bandas 3, 4 e 5, utilizou-se a plataforma on-line do Centro de Ciência e Arquitetura de Processamento (Center Science Processing Architecture – ESPA) do Departamento Americano de Pesquisas Geológicas, subdepartamento de Observação e Ciência dos Recursos da Terra (United States Geological Survey – USGS, Earth Resources Observation and Science - EROS) (USGS, 2016) para a obtenção dessas bandas transformadas de Número Digital (ND, que são valores atribuídos a cada pixel da imagem, conforme a energia eletromagnética refletida por um alvo) para valores de reflectância na superfície, para cada pixel das bandas.

Para Soares et al. (2015), as diferentes escalas de ND impossibilitam a comparação entre bandas, a realização de cálculos e a utilização de dados obtidos

nessas imagens, fazendo com que se necessite de uma conversão desses números para parâmetros físicos, tais como radiância e reflectância.

Na referida plataforma, são informadas as cenas (datas) necessárias para realização dos processos que o serviço oferece. Para o presente estudo, foram solicitadas as bandas 3, 4 e 5 do sensor OLI do satélite Landsat 8, para as 24 datas previamente selecionadas, corrigidas atmosféricamente e transformadas em reflectância na superfície. Adicionalmente, essas bandas foram reprojctadas para o DATUM SIRGAS2000, projeção UTM 23K Sul.

Com isso, foram realizadas composições coloridas com as bandas 3, 4 e 5 já transformadas em reflectância e, posteriormente, cada imagem composta passou por um processo de transformação dos valores finais de íntegros para decimais, para assim poderem ser utilizadas no modelo proposto.

Adicionalmente, essas imagens compostas foram utilizadas no processo de correção atmosférica da banda relativa ao Infravermelho Termal, passando pelos cálculos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Fração de Cobertura e Emissividade, conforme apresentado na Figura 5.

Já para a correção atmosférica da banda 10 (Infravermelho Termal – Sensor TIRS do Landsat 8), utilizou-se outro procedimento e outros cálculos, uma vez que a plataforma ESPA não realiza o procedimento para a referida banda.

Assim, foram obtidas todas as 24 bandas originais em Números Digitais (ND) diretamente na plataforma *Earth Explorer* da NASA. Utilizando a Equação 17, apresentada por USGS (2015), os ND na banda 10 foram transformados em radiância no topo da atmosfera.

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (17)$$

Em que:

$L\lambda$ é a radiância espectral no topo da atmosfera ($W\ m^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$); ML é o fator de redimensionamento multiplicativo de cada banda específica contida nos metadados da cena (RADIANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda); AL é o fator de redimensionamento aditivo de cada banda específica contida nos metadados da cena (RADIANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda); e Q_{cal} é o número digital (ND) de cada pixel da imagem.

Com a banda 10 transformada em radiância no topo da atmosfera, utilizou-se a plataforma on-line disponibilizada pela NASA, elaborada e apresentada por Brunsell e Gillies (2002) e por Barsi, Barker e Schott (2003) e validada por Barsi et al. (2005), chamada de Atmospheric Correction Parameter Calculator, para se obter os parâmetros necessários para a correção atmosférica da referida banda, quais sejam: transmissão atmosférica, radiância ascendente e radiância descendente.

Esses parâmetros são calculados pela plataforma, utilizando dados atmosféricos obtidos e armazenados pela NASA, a partir de dados de entrada informados pelo usuário, como data da imagem, horário de passagem do satélite, latitude e longitude, banda e satélite a ser utilizado, além de condições de altitude, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ponto de estudo.

Assim, obtiveram-se os parâmetros para as 24 bandas termais separadas para o presente estudo, os quais foram aplicados à Equação 18, seguindo os passos propostos por Brunsell e Gillies (2002), Barsi, Barker e Schott (2003) e Barsi et al. (2005) para o início do processo de correção atmosférica e transformação das informações na banda termal para temperatura na superfície, em graus Celsius.

$$L_{sens} = \tau [\varepsilon L_{SurfBB} + (1 - \varepsilon) L_d] + L_u \quad (18)$$

Em que:

L_{sens} é a radiância medida pelo sensor; τ é a transmissão atmosférica do solo até o sensor; ε é a emissividade da superfície; L_{SurfBB} é a radiância emitida por um corpo preto na temperatura da superfície no momento; L_d é a radiância descendente emitida pela atmosfera e refletida pela superfície até o sensor; L_u é a radiância ascendente emitida pela atmosfera até o sensor. As radiâncias são expressas em $W m^{-2} Sr^{-1} \mu m^{-1}$, sendo que τ e ε não possuem unidade.

Assumindo que a superfície, no presente trabalho, é ocupada, majoritariamente, por solo e vegetação, a emissividade pode ser calculada conforme Brunsell e Gillies (2002) propuseram na Equação 19.

$$E = f_c \varepsilon_{veg} + (1 - f_c) \varepsilon_{solo} \quad (19)$$

Em que:

F_c é a fração de cobertura da vegetação (0~1); ϵ_{veg} e ϵ_{solo} são a emissividade da vegetação e do solo, respectivamente.

Brunsell e Gillies (2002) usaram valores entre 0,955 e 0,98 para ϵ_{veg} e ϵ_{solo} , respectivamente, para a banda 4 do sensor AVHRR. Para o presente estudo, resolveu-se utilizar 0,90 e 0,98, respectivamente, depois de alguns testes.

Seguindo Brunsell e Gillies (2002), f_c é calculado conforme a Equação 20.

$$f_c = (NDVI_{star})^2 \quad (20)$$

Em que:

$NDVI_{star}$ é uma Diferença Normalizada de Índice de Vegetação, dimensionada como apresentado na Equação 21.

$$NDVI_{star} = \frac{(NDVI - NDVI_{zero})}{(NDVI_{max} - NDVI_{zero})} \quad (21)$$

Sendo:

$NDVI_{zero}$ o NDVI correspondente ao solo exposto e $NDVI_{max}$ o NDVI correspondente à vegetação completa.

No presente trabalho, utilizaram-se os valores propostos por Geli (2012), que foram 0,10 para $NDVI_{zero}$ e 0,925 para $NDVI_{max}$, faltando apenas calcular o NDVI (Equação 22).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (22)$$

Sendo:

NIR e RED as bandas do Infravermelho Próximo (banda 5) e do Vermelho (banda 4) do satélite Landsat 8, respectivamente, em reflectância e corrigidas atmosféricamente.

Uma vez calculado o L_{surfBB} , a temperatura na superfície (T_s), em graus Kelvin, pode ser calculada usando a Equação de Plank, ou, no caso da utilização do satélite Landsat, uma versão específica da equação de Plank (Equação 23).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{surfBB}} + 1\right)} \quad (23)$$

Em que:

K_1 e K_2 são coeficientes específicos para as bandas de Infravermelho Termal para cada sensor Landsat, que foram obtidas nos metadados de cada cena Landsat 8 utilizada no estudo.

Assim, foram obtidas as imagens com a temperatura instantânea da superfície, em graus Kelvin, para o dia e o horário de cada passagem do satélite. Dessa forma, pode-se obter, por um cálculo simples de alteração de unidades em ambiente SIG, todas as imagens de temperatura da superfície em graus Celsius, as quais são utilizadas no modelo de estimativa de evapotranspiração como um dos dados de entrada necessários para tal.

3.2.5.4 Dados meteorológicos da região de estudo

Como parte dos dados de entrada para o software SETMI, utilizado no presente trabalho, os dados meteorológicos utilizados na região de estudo foram obtidos juntamente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo provenientes de uma estação automática localizada na cidade de Piracicaba – SP (Estação A726), com altitude de 573 metros, latitude 22° 42' Sul e longitude 47° 37' Oeste, distando, aproximadamente, 33, 38 e 63 km do exutório das três bacias propostas no estudo.

Os dados obtidos do INMET são horários; porém, foram realizadas interpolações para se obter os dados necessários nas horas e minutos exatos de cada passagem do satélite, para cada data utilizada no estudo.

Dessa forma, obtiveram-se os valores interpolados de temperatura do ar (°C), velocidade do vento ($m.s^{-1}$), umidade relativa (%), radiação solar ($W.m^{-2}$) e pressão atmosférica (kPa) da região de estudo, para serem introduzidos ao modelo.

3.2.5.5 Interface SETMI

O Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI) é uma interface de modelagem desenvolvida por Geli e Neale (2012) que é executada dentro do ambiente ArgGIS 10 (ESRI, 2010). O SETMI é programado em VisualBasic.NET® e pode ser executado no modo de depuração no ambiente de programação Microsoft Visual Studio® ou compilada dentro do ArcGIS. O SETMI inclui vários modelos de evapotranspiração baseados em Sensoriamento Remoto. O mais interessante é a interface por meio da qual o modelo híbrido de estimativa de ET de Neale et al. (2012) é executado. O modelo híbrido é um híbrido do Modelo de Duas Fontes (TSM) de Norman, Kustas e Humes (1995) e um modelo de balanço hídrico que utiliza coeficientes de cultura à base de reflectância (K_{cbrf}). A porção K_{cbrf} do modelo permite uma interpolação e/ou extrapolação temporal de um balanço hídrico espacial, entre ou além das datas de imagem de entrada. A inclusão do modelo TSM permite uma capacidade de auto ajuste para o modelo, além de fornecer uma estimativa espacial de ET no momento da obtenção da imagem, que é independente do equilíbrio da água.

Desta forma, conforme apresentado no fluxograma de trabalho (Figura 10), o programa SETMI exige, como dados de entrada para o cálculo da estimativa da ET para cada data, o uso e ocupação do solo da região de estudo com alguns dados de cada cobertura analisada (ANEXO A), a composição das bandas 3, 4 e 5 do Landsat 8 (em reflectância e corrigida atmosféricamente), a imagem de temperatura da superfície, em graus Celsius, obtida a partir da banda 10 do sensor TIRS do satélite Landsat 8 e os dados meteorológicos da região de estudo, previamente interpolados para o momento (hora e minuto) de passagem do satélite (ANEXO B).

Assim, foram obtidos os dados brutos da estimativa de ET pelo programa SETMI para as 24 datas do presente estudo.

3.2.5.6 Ajuste dos resultados estimados

No presente estudo, optou-se por desenvolver e propor uma metodologia que permitisse extrapolar a estimativa da ET, que foi calculada por uma única imagem em uma data específica, para representar um mês inteiro, já que o dia de passagem do satélite pode não representar o que ocorreu no ambiente na maior parte do mês.

Assim, optou-se por estimar a Evapotranspiração de Referência (ET_o) para o dia de passagem do satélite, utilizando os dados da região fornecidos pelo INMET. Para tal, foi utilizado o programa RefET (Reference Evapotranspiration Calculator), criado e apresentado em sua última versão por Allen (2008). Essa versão contém uma programação automatizada para o método de Penman-Monteith (PM), descrito por Monteith (1965) e adaptado por Allen et al. (1989), para a estimativa de ET de referência na escala diária; esse método é, atualmente, o padrão para a FAO (ALLEN et al., 1994).

A partir da estimativa de ET_o diária para o dia de passagem do satélite, obtida pelo método de Penman-Monteith, multiplicou-se o valor pela média dos K_{cs} (coeficientes de cultura) existentes na área de estudo (o qual foi igual a 0,783) para que a ET_o fosse transformada em ET da cultura, considerada como ET real no dia de passagem do satélite.

Na sequência, multiplicaram-se esses valores diários pela quantidade de dias em cada mês para se obter uma estimativa dos valores mensais de ET real pelo método Penman-Monteith (PM). Essa multiplicação dos valores estimados diários de ET pela quantidade de dias de cada mês também foi realizada para a estimativa de ET pela imagem de satélite. Assim, obtiveram-se as estimativas de ET mensal para ambos os métodos.

Para a ET estimada pela imagem de satélite, foi preciso calcular, em ambiente SIG, a estimativa de ET para cada uso do solo para que, multiplicada pela área ocupada por cada uso, fosse possível obter-se o valor espacializado da ET diária e mensal.

A partir disso, dividiram-se os valores mensais de ET (PM) pelos valores mensais de ET (TSM), obtendo-se um coeficiente médio para todos os meses do estudo, representativo da relação entre os dois métodos de estimativa de ET (estimativa clássica por Penman-Monteith, e nova pelo Modelo de Duas Fontes).

Esse coeficiente foi utilizado para ajustar todos os valores mensais de ET provenientes do Modelo de Duas Fontes para que esse, agora corrigido e extrapolado de um único dia de um determinado mês, fosse adequado para a estimativa mensal do referido mês. Essa estimativa foi utilizada para ser cruzada com os mapas contendo os parâmetros de relevo, fitofisionomias e tipos de solo para cada uso de solo estudado, a fim de se detectar possíveis efeitos.

3.2.6 Escala espacial dos fenômenos atmosféricos

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), os fenômenos atmosféricos ocorrem de forma continuada, havendo influência das escalas espaciais, uma sobre outra. Desta forma, pode-se separá-las em três grandes categorias: *macro*, *meso*, e *micro*-escala, que são importantes para a previsão do tempo e para o manejo agrícola.

No presente trabalho, optou-se por utilizar a meso-escala, a qual se refere aos fenômenos em escala local, em que a topografia condiciona o clima pelas condições do relevo local. A face de exposição do terreno (N, S, E ou W), a configuração (vale, espigão, meia encosta) e o grau de inclinação do terreno afetam o clima local (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

A configuração e a exposição do terreno podem modificar bastante o clima regional, sendo de grande importância na agricultura, devendo ser levado em consideração no planejamento agrícola. Assim, a meso-escala deve ser considerada no planejamento de implantação e manejo de um cultivo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

3.2.7 Modelo digital de terreno (MDT)

Para o presente estudo, optou-se por obter um MDT proveniente da missão orbital SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) em sua banda X, a qual foi gerada por um radar de abertura sintética no ano de 2000, por meio de uma parceria entre a NASA, a Agência Espacial Alemã (DLR) e a Agência Espacial Italiana. Dois sistemas de radar interferométricos foram acoplados a aeronave Endeavor, com o objetivo de gerar um modelo global de elevação do terreno de alta resolução espacial. O sistema americano (NASA) operou na banda C e derivou as imagens SRTM, de 90 m de resolução; já o sistema ítalo-germânico trabalhou na banda X, resultando nos modelos SRTM de 30 metros de resolução.

Assim, o MDT obtido foi reprojetoado para o DATUM SIRGAS 2000, UTM 23k Sul e teve extraída apenas a área de estudo, como se observa na Figura 6.

Figura 6 – Modelo Digital de Terreno SRTM-X, com 30 metros de resolução espacial, extraído para a região de estudo

Adicionalmente, aplicou-se a ferramenta *hillshade* do programa ArcGIS 10 (ESRI, 2010), que é uma representação de uma iluminação hipotética de uma superfície de elevação, e que visa melhor demonstrar como o relevo se apresenta na região (Figura 7).

Figura 7 – Representação do terreno da região de estudo

Como se observa nas Figuras 6 e 7, a região de estudo apresenta variações de altitude e formato no terreno, corroborando com a ideia do presente trabalho de se avaliar as diferenças físicas do terreno na estimativa de ET espacializada.

Deste modo, a partir do MDT selecionado, optou-se por obter três parâmetros espacializados (altitude, declividade e faces de exposição do terreno) para serem realizadas as análises de ET real mensal, segundo as coberturas vegetais escolhidas para o presente trabalho.

3.2.7.1 Altitude

Utilizando o MDT SRTM-X, gerou-se um mapa de altitude em relação ao nível do mar, em metros, da área de estudo, dividindo-se os valores em 6 classes de altitude determinadas pelo conhecimento do relevo da região, sendo essas classes:

menor que 600 metros, de 600 a 700 metros, de 700 a 800 metros, de 800 a 900 metros, de 900 a 1000 metros e maior que 1000 metros.

Deste modo, obteve-se o mapa das classes de altitude, classificado conforme descrito, e apresentado na Figura 8. Adicionalmente, apresenta-se, na Tabela 2, as áreas ocupadas por cada classe de altitude.

Tabela 2 – Quantificação da área ocupada por cada classe de altitude na área de estudo

Classe de altitude	Área (km ²)
Menor que 600m	237,191
600 - 700m	689,396
700 - 800m	707,838
800 - 900m	390,440
900 - 1000m	181,308
Maior que 1000m	25,754
Total	2231,926

Figura 8 – Mapa das classes de altitude da área de estudo

A partir do mapa de classes de altitude proposto, foram cruzados os valores de ET real ajustada mensal para cada um dos 24 meses, considerando também o cruzamento de mapas das coberturas vegetais propostas no presente estudo (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa), a fim de se obter a ET real mensal para cada tipo de vegetação, em cada classe de altitude.

3.2.7.2 Declividade

Utilizando o MDT SRTM-X, gerou-se um mapa de declividade, em graus, da área de estudo, dividindo-se os valores em 5 classes de declividade determinadas pelo conhecimento do relevo da região, sendo essas classes: 0-3%, 3-6%, 6-12%, 12-18% e maior que 18%. Tais classes também foram empregadas por Pereira (2000) e Mello, Bueno e Pereira (2006), apenas com algumas subdivisões a mais na classe mais alta. No caso atual, optou-se por manter a classe abrangendo todos os pixels com declividade maior que 18% porque, acima disso, não é considerado mais possível utilizar colhedoras de cana-de-açúcar.

Deste modo, obteve o mapa de declividade, classificado conforme descrito, e apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Mapa das classes de declividade da área de estudo

A partir do mapa de classes de declividade proposto, foram cruzados os valores de ET real ajustada mensal para cada um dos 24 meses, considerando também o cruzamento de mapas das coberturas vegetais propostas no presente estudo (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa), a fim de se obter a ET real mensal para cada tipo de vegetação, em cada classe de declividade.

3.2.7.3 Faces de exposição do terreno

Utilizando-se, também, a banda X do MDT SRTM, obteve-se um mapa de faces de exposição do terreno à radiação solar, já que essa é a principal fonte de energia para a vegetação. Esse mapa foi gerado no programa ArcGIS 10 (ESRI, 2010) utilizando a ferramenta *aspect*, obtendo como resultado o mapa em azimutes. Posteriormente, o mapa foi reclassificado para apenas 5 classes (plano, norte, sul, leste e oeste), sendo os ângulos representados por cada classe: Norte, de 315° a 45°; Leste, de 45° a 135°; Sul, de 135° a 225°; e Oeste, de 225° a 315°.

Dessa forma, o mapa reclassificado aparece representado na Figura 10.

Figura 10 – Mapa com as faces de exposição do terreno na área de estudo

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), nas regiões S e SE do Brasil, os terrenos com face voltada para o Norte são mais ensolarados, mais secos e mais quentes. Os de face voltada para o Sul são menos ensolarados, mais úmidos e mais frios, estando ainda sob o efeito dos ventos SE, predominantes na circulação geral da atmosfera. No inverno, terrenos à meia encosta ou convexos permitem boa drenagem do ar frio, ao passo que terrenos côncavos acumulam o ar frio, agravando os efeitos de geada em noites de intenso resfriamento.

Desse modo, a partir do mapa das faces de exposição do terreno proposto, foram cruzados os valores de ET real ajustada mensal para cada um dos 24 meses, considerando também o cruzamento de mapas das coberturas vegetais propostas no presente estudo (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa), a fim de se obter a ET real mensal de cada tipo de vegetação, em cada face de exposição do terreno.

3.2.8 Mapa pedológico

Para o presente estudo, realizou-se também o cruzamento das informações obtidas da estimativa de ET real ajustada com os tipos de solo existentes sobre cada cobertura vegetal estudada, a fim de se avaliar a relação entre a ET e o solo, considerando também cada um dos usos avaliados.

Assim, utilizou-se o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000, elaborado por Oliveira et al. (1999), como base para o mapeamento de solos na área de estudo.

O referido mapa foi importado ao programa ArcGIS 10 (ESRI, 2010), georreferenciado, reprojetoado para SIRGAS 2000 UTM 22k Sul, e serviu como base para a vetorização de cada classe de uso da área estudada.

Posteriormente, esse arquivo vetorial foi transformado para *raster*, a fim de ser utilizado na álgebra de mapas e tabulação cruzada com os mapas de usos e de ET.

O mapa pedológico da região de estudo, com as respectivas áreas representadas por cada classe de solo, é apresentado na Figura 11. Também, apresenta-se, na Tabela 3, as áreas abrangidas por cada tipo de solo na região de estudo.

Tabela 3 – Quantificação da área ocupada por cada tipo de solo na área de estudo

Classe de solo	Sigla	Área (km ²)
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	580,464
Latossolo Vermelho	LV	158,312
Neossolo Quartzarênico	RQ	408,766
Organossolo Háplico	OY	29,274
Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA	732,560
Gleissolo Háplico	GX	15,516
Neossolo Litólico	RL	307,033
Total		2231,926

Figura 11 – Mapa pedológico da região de estudo com áreas representadas por cada classe de solo

3.2.9 Mapa de fitofisionomias (biomas)

Com a finalidade de se obter a ET real ajustada das coberturas vegetais em cada bioma da área estudada, e de se analisar e verificar como e quanto a fitosionomia de uma região afeta a ET real espacializada da cana-de-açúcar, da mata nativa e das florestas plantadas, utilizou-se um mapa dos biomas brasileiros existentes na região do presente trabalho.

Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2004), bioma é um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, o que resulta em uma diversidade biológica própria.

Dessa forma, obteve-se um mapa do Ministério do Meio Ambiente (MMA) em parceria com o IBGE, contendo os seis biomas continentais brasileiros (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa), em uma escala 1:5.000.000.

Desse mapa, extraiu-se, apenas, a região de estudo, que apresentou dois desses biomas (Cerrado e Mata Atlântica), conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Mapa dos biomas existentes na área de estudo

Segundo Klink e Machado (2005), o Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, sendo superado em área apenas pela Amazônia. Ocupa cerca de 24% do território nacional, e é reconhecido como a savana mais rica do mundo (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2013); é considerado a última fronteira agrícola do planeta (BORLAUG, 2002). O termo Cerrado é normalmente utilizado para designar o conjunto de ecossistemas (savanas, matas, campos e matas de galeria) que ocorrem no Brasil Central, entre as regiões Centro-Oeste e Sudeste do país (EITEN, 1977; RIBEIRO; SANO; SILVA, 1981).

Os remanescentes de Cerrado que existem nos dias de hoje desenvolveram-se sobre solos muito antigos, intemperizados, ácidos, depauperados de nutrientes, e que possuem concentrações elevadas de alumínio. Para torná-los produtivos para

fins agrícolas, aplicam-se fertilizantes e calcário a esses solos (KLINK; MACHADO, 2005).

Já o bioma Mata Atlântica e seus ecossistemas associados envolvem uma área de 1,1 milhão de km² (13% do território brasileiro). Contudo, em virtude de séculos de ocupação, a área florestal da Mata Atlântica foi reduzida drasticamente e encontra-se altamente fragmentada. Não obstante, a Mata Atlântica ainda abriga parcela significativa de diversidade biológica do Brasil. Esse bioma é composto por diversas formações florestais, como floresta ombrófila (densa, mista e aberta), mata estacional semidecidual e estacional decidual, manguezais, restingas e campos de altitude associados, além de brejos interioranos no Nordeste (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2013).

3.2.10 Uso e ocupação do solo

Para a realização do mapa de uso e ocupação do solo, procedeu-se à importação das imagens Landsat 8 ao SIG ArcGIS 10 (ESRI, 2010), utilizando-se as bandas 2, 3 e 4 na geração de uma composição colorida cor natural, com 30 metros de resolução espacial. Posteriormente, realizou-se um fusão da banda 8 (Pancromática) com a composição colorida obtida anteriormente, resultando em uma imagem fusionada em coloração natural, com 15 metros de resolução espacial, com a finalidade de obtenção do uso e ocupação do solo; tal imagem foi utilizada, posteriormente, como dado de entrada para o modelo de estimativa de evapotranspiração por imagem do satélite utilizado.

Para tanto, extraiu-se da imagem fusionada a área selecionada para elaboração do presente estudo e exportou-se a mesma para o programa Spring, para ser realizada uma segmentação.

Esse arquivo vetorial segmentado foi reimportado ao ArcGIS 10, onde foi realizada uma interpretação da imagem digital em tela (FLORENZANO, 2011) e classificação dos polígonos conforme as classes de uso e ocupação do solo. As classes foram previamente determinadas pelo conhecimento prévio da região de estudo e pelo interesse no produto final (solo exposto, cana-de-açúcar, pastagem, área construída, mata nativa, floresta plantada, superfície de água e outros usos) (Figura 13). Além da classificação, realizou-se também a quantificação de cada uso na área (Tabela 4).

Tabela 4 – Quantificação do uso e ocupação do solo na região de estudo

Uso e ocupação do solo	Área	
	km ²	%
Água	6,549	0,29
Cana-de-açúcar	385,360	17,27
Área construída	97,331	4,36
Floresta Plantada	220,465	9,88
Mata Nativa	536,611	24,04
Outros usos	186,340	8,35
Pastagem	490,885	21,99
Solo Exposto	308,385	13,82
Total	2231,926	100,00

Figura 13 – Uso e ocupação do solo da região de estudo

Como, no presente trabalho, tinha-se como objetivo o estudo dos efeitos dos usos aplicados sobre os parâmetros espacializados e temporais, optou-se por realizar uma validação da classificação em tela aplicando o índice de concordância Kappa, e utilizando uma matriz de erros para se comparar o resultado do mapa de

uso e ocupação do solo, gerado com as cenas fusionadas do Landsat 8 (15 metros de resolução espacial) e com imagens do programa Google Earth Pro® (1 metro de resolução espacial). Estas últimas foram consideradas como verdade terrestre para o presente trabalho; na imagem de alta resolução apresentada pelo programa Google Earth Pro® é mais fácil se distinguir um alvo na imagem.

Assim, utilizou-se a ferramenta *Generate Random Points* da extensão Hawth'sTools do ArcGIS 10 (ESRI, 2010) para gerar 200 pontos aleatórios em toda área de estudo, ficando um ponto para cada 11,15963 km² de área.

Posteriormente, obteve-se a classe de uso e ocupação do solo correspondente a cada um dos pontos aleatórios e comparou-se, ponto a ponto (Figura 14), com o uso do solo (alvo) visto nas imagens do programa Google Earth Pro®. Avaliou-se, assim, o erro da classificação visual realizada na imagem Landsat 8 utilizada no estudo.

Figura 14 – Pontos aleatórios gerados e utilizados na comparação entre as imagens: (a) Landsat 8; (b) Google Earth Pro®

Com os 200 pontos conferidos com a verdade terrestre proposta no presente trabalho (Google Earth Pro®), realizou-se uma comparação entre a classificação temática e a verdade terrestre, organizando-se os dados em uma matriz de confusão, para, a partir disso, ser calculado o Índice Kappa, que é baseado no número de respostas concordantes, e a Acurácia Global (*Overall Accuracy*) das correlações.

Conforme observado por Tangerino e Lourenço (2013), o Índice Kappa é o indicativo mais recomendado para esse tipo de comparação, já que, segundo Rosenfield e Fitzpatrick-Lins (1986), este utiliza todas as células da matriz, e não somente os elementos diagonais, garantindo, assim, uma maior acurácia em relação aos outros métodos.

Assim, o Índice Kappa e a acurácia global foram calculados aplicando-se os dados à Equação 24 e à Equação 25, respectivamente.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (24)$$

$$Acurácia_{Global} = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} \quad (25)$$

Em que:

K é o valor Kappa; k é o número de linhas; $\sum_{i=1}^k x_{ii}$ é a soma dos elementos da matriz de confusão em sua diagonal principal; x_{i+} é a soma total das observações das linhas; x_{+i} é a soma total de observações das colunas e N é o número total de observações.

Desta forma, a qualidade do mapa de uso e ocupação do solo foi determinada pelo valor obtido para o Índice Kappa, utilizando-se da classificação estabelecida por Landis e Koch (1977) (Tabela 5).

Tabela 5 – Qualidade de classificação de acordo com o Índice Kappa

Índice Kappa	Qualidade
0,00	Péssima
0,01 a 0,20	Ruim
0,21 a 0,40	Razoável
0,41 a 0,60	Boa
0,61 a 0,80	Muito Boa
0,81 a 1,00	Excelente

3.2.11 Coberturas vegetais

A partir do mapa de uso e ocupação do solo gerado, separou-se, dos outros tipos de uso, apenas as coberturas vegetais com que se pretendeu avaliar no presente trabalho, como se apresenta na Figura 15.

Figura 15 – Coberturas vegetais selecionadas para o presente trabalho

Dessa forma, obtiveram-se as coberturas vegetais que tiveram suas ET reais avaliadas, ou seja, cruzando-se os dados temporais com os dados físicos do ambiente.

3.2.11.1 Cana-de-açúcar

Como uma das coberturas avaliadas, a cana-de-açúcar é uma cultura que possui produtividade diretamente ligada à disponibilidade de água; essa disponibilidade foi avaliada por Martins e Olivette (2015), para a região estudada, que obtiveram valores de 1200 a 1300 milímetros anuais para a cultura atingir seu potencial máximo.

Ainda segundo Martins e Olivette (2015), a cana-de-açúcar pode ser plantada em épocas diferentes na região do presente estudo. A referida cultura pode ser plantada tanto no sistema de ano-e-meio (cana de 18 meses) quanto no sistema de ano (cana de 12 meses). No primeiro sistema, o plantio é realizado entre os meses de janeiro e março; nos primeiros três meses, a planta inicia seu desenvolvimento e, com a chegada da seca e do inverno, o crescimento passa a ser muito lento durante os meses de abril a agosto; volta a vegetar nos sete meses seguintes, de setembro a abril, para, então, amadurecer nos demais meses, até completar de 16 a 18 meses. Já no segundo sistema, o plantio é realizado de outubro a novembro e o ciclo anual da cultura se estende até o mesmo período do próximo ano.

Como, no presente estudo, a locação das áreas de cana-de-açúcar se deu por intermédio das imagens Landsat 8 fusionadas com a banda pancromática, não foram separadas as áreas com os usos de cana-de-açúcar em diferentes épocas de plantio, ou seja, englobaram-se todas as áreas plantadas com a cultura na região do estudo.

Assim, como foram obtidas as informações de ET real ajustada para 24 meses consecutivos, esse efeito não foi considerado no atual estudo. Na verdade, na soma anual, a ET tende a anular essas variações causadas pelas diferentes épocas de plantio; além disso, a intenção das presentes análises foi a de avaliar a ET real para grandes áreas representativas de cada cobertura, e não se deter a níveis de detalhe mais específicos.

3.2.11.2 Floresta plantada

Igualmente à cana-de-açúcar, as áreas de floresta plantada foram determinadas pelas imagens do satélite Landsat 8, não sendo possível se distinguir qual espécie plantada.

Como pode ser observado na Figura 15, as áreas de floresta plantada são áreas maiores, normalmente em hortos florestais e florestas comerciais.

Duas grandes áreas observadas no estudo (Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade, também conhecida como Horto Florestal de Rio Claro, e Estação Experimental de Itirapina), a primeira com 22,22 km² e a segunda com 31,96 km², formam grandes florestas plantadas consolidadas, com a maior parte de suas árvores sendo constituída por eucalipto e pinus (*Eucalyptus sp* e *Pinus sp*).

Desta forma, como não foi realizada a separação das duas espécies, preferiu-se trabalhar com o termo floresta plantada, já que o objetivo do presente trabalho foi o de se poder comparar a evapotranspiração real, em diferentes aspectos físicos e temporais, de três grupos de cobertura vegetal, sem detalhar espécies e cultivares. Visou-se também obter uma boa representatividade de cada cobertura vegetal em grandes áreas, visto que essas comparações de todos os parâmetros e variáveis propostas já contemplariam os objetivos do trabalho.

3.2.11.3 Mata nativa

Também, quanto à mata nativa, obteve-se todos os remanescentes florestais e matas ciliares existentes na área de estudo por intermédio das imagens Landsat 8, sendo que esse uso foi o que apresentou a maior área coberta dentre todos os usos.

Como observado na Figura 12, a área do presente estudo apresenta duas fitofisionomias (Cerrado e Mata Atlântica), entendendo-se que esses biomas possam ser representados pelas áreas de mata nativa selecionadas.

3.2.12 Comparação dos resultados

No presente trabalho, optou-se por avaliar a estimativa da evapotranspiração real com ajuste mensal para cada parâmetro estudado, separado pelos três tipos de cobertura vegetal (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa).

Assim, primeiramente, avaliou-se o quão diferente é a ET real para os usos propostos quanto às variações temporais, como a anual e a mensal, e período chuvoso e seco da região.

Posteriormente, decidiu-se aplicar as informações obtidas do cruzamento das ET reais ajustadas mensais com os mapas de classe de declividade, faces de exposição do terreno, tipos de solo e fitofisionomias vegetais (biomas), para cada tipo de cobertura vegetal estudada, obtendo-se resultados para cada um dos fatores estudados.

Desta forma, a comparação e a análise dos resultados se deu por meio de comparação dos valores mensais e anuais absolutos de evapotranspiração real para cada cultura e parâmetro (temporal ou físico), além de análises utilizando a média, o desvio-padrão e o coeficiente de correlação de Pearson (r) para os dados mensais de ETr para as coberturas vegetais estudadas, com o objetivo de responder as seguintes perguntas:

- Se as coberturas vegetais estudadas apresentam diferentes taxas de ETr durante os meses do ano;
- Se existe diferença entre as ETr anuais e sazonais das culturas da cana-de-açúcar, da floresta plantada e da mata nativa;
- Se a diferença de altitude influencia na ETr das coberturas vegetais estudadas;
- Se a ETr é alterada quando as coberturas vegetais estudadas estão locadas em regiões com maior ou menor declividade;
- Se a face de exposição do terreno influencia na ETr da vegetação;
- Se o tipo de solo onde as culturas foram implantadas influencia na ETr; e
- Se o ambiente (bioma) onde as coberturas vegetais estudadas estão localizadas acarreta efeitos na ETr de tais culturas.

3.3 Resultados e discussão

Na avaliação do uso e ocupação do solo realizado a partir das imagens Landsat 8 fusionadas com a banda pancromática, utilizou-se o Índice Kappa e a Acurácia Global, calculados a partir da Matriz de Confusão, apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz de confusão e resultado do Índice Kappa para a classificação do uso e ocupação do solo

Classe de uso	SE	CA	P	AC	MN	OU	FP	A	Total
Solo Exposto (SE)	95,83	11,43	2,38	0,00	1,92	0,00	7,69	0,00	15,50
Cana-de-açúcar (CA)	0,00	82,86	9,52	0,00	9,62	0,00	0,00	0,00	19,00
Pastagem (P)	4,17	0,00	64,29	25,00	1,92	0,00	0,00	100,00	16,00
Área Construída (AC)	0,00	0,00	2,38	75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50
Mata Nativa (MN)	0,00	0,00	11,90	0,00	76,92	8,33	11,54	0,00	24,50
Outros Usos (OU)	0,00	5,71	7,14	0,00	1,92	91,67	0,00	0,00	8,50
Floresta Plantada (FP)	0,00	0,00	2,38	0,00	7,69	0,00	80,77	0,00	13,00
Água (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Acurácia Global (<i>Overall Accuracy</i>) = 78,50%									
Índice Kappa = 0,74017									

Pela análise da Tabela 6, observa-se que o acerto global dos usos do solo foi de 78,50%, além do Índice Kappa ter sido de 0,74, que, pela classificação proposta por Landis e Koch (1977) e apresentada na Tabela 5, valida o uso e ocupação do solo realizado pelas imagens do Landsat 8 e classifica-o como de qualidade muito boa.

A magnitude do acerto pode ser explicada pelo fato de que, quando o programa gera os 200 pontos, ele pode localizar alguns pontos bem perto de mudanças de uso (como foi o caso de vários pontos), fazendo com que a diferença de resolução espacial entre os dois produtos utilizados (15 metros para a imagem Landsat 8 fusionada e 1 metro para a imagem do Google Earth Pro®) cause uma certa diferença nas divisas de usos.

Além desse fato, por se tratar de uma grande área recoberta (2231,926 km²), a probabilidade de acontecerem alguns enganos de classificação aumentam, ainda mais pela região de estudo do presente trabalho, que se apresenta como uma área repleta de pequenos tipos de outros usos.

Também, pela análise da Tabela 6, alguns usos como solo exposto e cana-de-açúcar foram confundidos, já que, dependendo da época, a cana-de-açúcar pode estar sendo colhida e na outra imagem já se apresentar como solo exposto.

Além disso, em certos pontos, a pastagem foi bastante confundida com área construída, já que na imagem com 15 metros de resolução espacial existe uma maior dificuldade de se delimitar, exatamente, quando uma área de pastagem ou área gramada tem alguma construção ou não.

De qualquer modo, o uso e ocupação do solo se mostrou válido para ser utilizado na comparação da ET real especializada com os variados parâmetros, como proposto no presente trabalho.

Com a validação da classificação do uso e ocupação do solo realizada, resolveu-se avaliar, primeiramente, as coberturas vegetais temporalmente, utilizando-se dos resultados obtidos por intermédio das 24 imagens mensais utilizadas nessa pesquisa.

Assim, utilizou-se desses valores de ET real com ajuste mensal, para serem cruzados com as coberturas vegetais propostas.

Obtiveram-se os resultados da ET espacializada para cada uso temporalmente, em dados mensais, anuais e sazonais (estações secas, de abril a setembro, e chuvosas, de outubro a março), como se observa nas Tabelas de 7 a 10 e nas Figuras de 16 a 18.

Tabela 7 – Evapotranspiração real com ajuste mensal para as três coberturas vegetais estudadas

Mês	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)		
	Cana-de-açúcar	Mata Nativa	Floresta Plantada
abr/13	81,9	90,7	93,7
mai/13	60,7	68,8	70,7
jun/13	60,0	63,1	63,6
jul/13	65,1	71,3	72,1
ago/13	63,3	78,9	81,0
set/13	86,5	103,1	109,3
out/13	94,2	122,5	127,0
nov/13	97,4	129,0	132,3
dez/13	107,2	133,5	133,6
jan/14	112,2	133,4	134,4
fev/14	129,7	143,4	147,1
mar/14	107,7	123,0	124,3
abr/14	100,9	120,0	126,0
mai/14	82,2	79,1	78,5
jun/14	102,2	105,5	102,1
jul/14	63,7	69,6	75,8
ago/14	72,0	90,1	100,4
set/14	56,0	70,9	76,2
out/14	66,3	90,2	95,1
nov/14	74,6	101,0	105,9
dez/14	125,6	145,9	145,2
jan/15	103,3	112,8	119,6
fev/15	95,7	111,4	113,2
mar/15	100,8	109,2	109,6
Média	87,9	102,8	105,7
Desvio-Padrão	21,6	25,4	25,2

Tabela 8 – Matriz de correlação da ET real com ajuste mensal entre as coberturas vegetais

	Coeficiente de Correlação de Pearson (r)		
	Cana-de-açúcar	Mata Nativa	Floresta Plantada
Cana-de-açúcar	1	0,941	0,915
Mata Nativa	0,941	1	0,993
Floresta Plantada	0,915	0,993	1

Figura 16 – Evapotranspiração real com ajuste mensal para as três coberturas vegetais estudadas

Tabela 9 – Evapotranspiração real com ajuste anual para as três coberturas vegetais estudadas

Ano	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)		
	Cana-de-açúcar	Mata Nativa	Floresta Plantada
2013/14	1066,0	1260,7	1289,1
2014/15	1043,4	1205,9	1247,5
Média	1054,7	1233,3	1268,3

Figura 17 – Evapotranspiração real com ajuste anual para as três coberturas vegetais estudadas

Tabela 10 – Evapotranspiração real com ajuste por período seco e chuvoso para as três coberturas vegetais estudadas

Período		ET real ajustada		
		Cana-de-açúcar	Mata Nativa	Floresta Plantada
Seco 2013	Média (mm.mês ⁻¹)	69,6	79,3	81,7
	Total (mm)	417,5	475,9	490,3
Chuvoso 2013/14	Média (mm.mês ⁻¹)	108,1	130,8	133,1
	Total (mm)	648,5	784,8	798,8
Seco 2014	Média (mm.mês ⁻¹)	79,5	89,2	93,2
	Total (mm)	477,0	535,2	559,0
Chuvoso 2014/15	Média (mm.mês ⁻¹)	94,4	111,8	114,8
	Total (mm)	566,3	670,6	688,5

Figura 18 – Evapotranspiração real com ajuste por período seco e chuvoso para as três coberturas vegetais estudadas

Pela análise dos dados mensais apresentados na Figuras 16 e na Tabela 7, observa-se que os usos de floresta plantada e mata nativa propiciaram resultados de ET mensal muito próximos em quase todos os meses dos dois anos estudados; porém, a cana-de-açúcar, em quase a totalidade dos meses, apresentou resultado de ET abaixo das duas outras coberturas (com exceção dos meses de maio e junho de 2014, no qual os três usos aparecem bem próximos uns dos outros). Esses resultados corroboram com o resultado da matriz de correlação dos dados mensais entre as coberturas (Tabela 8), que apresentou um coeficiente de correlação de Pearson de 0,914 entre a cana-de-açúcar e a floresta plantada, diferentemente da

correlação entre a ET real mensal da floresta plantada e da mata nativa, que foi de 0,992. A cultura da cana-de-açúcar apresentou ET real média de 87,890 mm.mês⁻¹ para os dois anos estudados, diferentemente da mata nativa e da floresta plantada, que apresentaram, respectivamente, 102,772 e 105,691 mm.mês⁻¹; a cana-de-açúcar exigiu, em média, 15,67% a menos de água que os outros dois usos.

Adicionalmente, observou-se que a cultura da cana-de-açúcar obteve um desvio-padrão mensal (para os dois anos estudados) de 21,6 mm, sendo esse resultado menor que os apresentados pela mata nativa e pela floresta plantada (25,4 e 25,2, respectivamente). Conclui-se que a ET real da cana-de-açúcar se mostrou menos influenciada pela alteração do clima durante o ano quando comparada às outras duas coberturas, com valores mensais máximos e mínimos mais próximos das médias nos dois anos de estudo.

Percebeu-se, também, que nos meses de outubro a dezembro de 2013, a diferença entre a cana-de-açúcar e as outras coberturas vegetais se pronunciou, diferentemente de maio e junho de 2014, quando a ET foi praticamente igual para os três usos.

Esse comportamento pode ser explicado pelo ambiente encontrado nos referidos meses, como também pelo estágio vegetativo no qual as coberturas se encontravam, além do fato da cana-de-açúcar possuir uma menor área foliar quando comparada às florestas e matas nativas (XAVIER; VETTORAZZI; MACHADO, 2004).

Para a análise anual (Figura 17 e Tabela 8), os usos seguiram a tendência mensal: a cana-de-açúcar apresentou uma evapotranspiração real de 1066,001 e 1043,356 mm em cada um dos dois anos de estudo; a floresta plantada 1289,052 e 1247,532 mm anuais para a ET real; e a mata nativa 1260,665 e 1205,855 mm anuais.

Dessa forma, observou-se que, para os dois anos de estudo, a cana-de-açúcar apresentou uma tendência de menor exigência por água que a mata nativa e a floresta plantada, já que tanto na análise mensal como na anual, verificou-se a mesma tendência.

Além disso, analisou-se a ET real estimada para os três usos em períodos secos e úmidos dos dois anos estudados. Na Tabela 9, observa-se que no período chuvoso de 2013/14 houve uma maior ET para todos os usos, em relação ao mesmo período chuvoso de 2014/15. Isso pode ser explicado pelo fato de que nos anos de

2014 e 2015 houve uma das maiores estiagens de toda a série histórica na região, fazendo com que o menor volume de chuva nesse ano tenha prejudicado o consumo de água das culturas, visto que os períodos secos dos dois anos permaneceram mais semelhantes entre si.

Assim, analisando-se a Figura 18, observa-se que no período chuvoso, a ET variou mais entre a cana-de-açúcar e os outros usos do que no período seco, momento em que as coberturas vegetais apresentaram uma evapotranspiração menor.

Com isso, conclui-se que, as florestas plantadas e as matas nativas consumiram mais água no período mais quente do ano e que o volume evapotranspirado por essas duas coberturas superou o da cana-de-açúcar em todos os aspectos temporais analisados, como também observou Ruhoff (2011).

Já quanto às análises físicas da região, os estudos iniciaram-se pela análise do modelo digital de terreno selecionado (Banda X do MDT SRTM), do qual se obtiveram as classes de altitude e de declividade da região.

De acordo com Castro e Lopes (2001), também citado por Tonello et al. (2006), a altitude influencia a quantidade de radiação que uma cobertura vegetal recebe e, conseqüentemente, influencia a evapotranspiração, a temperatura e a precipitação.

Dessa forma, primeiramente, as classes de altitude foram cruzadas com as três coberturas vegetais estudadas (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa) gerando-se, assim, o mapa de classes de altitude em cada cobertura vegetal (Figura 19).

Figura 19 – Classes de altitude separadas por cada cobertura vegetal

A partir do resultado apresentado na Figura 19, foi possível realizar o cruzamento com todas as estimativas de ET real mensais para os dois anos de estudo, sendo que os resultados, por cobertura vegetal, estão representados nas Tabelas de 11 a 13.

Tabela 11 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas por classes de altitude

Mês	Cana-de-açúcar					
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)					
	Classes de altitude					
	< 600m	600-700m	700-800m	800-900m	900-1000m	> 1000m
abr/13	83,9	81,7	80,9	80,9	83,3	85,4
mai/13	62,6	60,8	59,7	60,0	61,3	62,6
jun/13	61,2	60,3	59,2	59,5	59,5	60,9
jul/13	64,6	64,8	65,9	65,1	65,0	65,8
ago/13	63,9	63,0	63,5	63,2	64,0	58,4
set/13	90,4	88,1	83,4	84,1	85,8	80,5
out/13	95,5	95,3	91,2	91,4	98,7	97,6
nov/13	98,8	96,8	95,6	96,1	105,4	94,4
dez/13	111,0	108,8	104,9	98,7	110,9	111,4
jan/14	116,4	112,9	110,5	105,7	115,3	117,4
fev/14	139,3	135,9	114,4	117,9	140,7	146,4
mar/14	108,9	108,0	107,1	104,5	109,8	110,2
abr/14	100,2	100,3	100,1	98,3	110,0	106,7
mai/14	82,2	82,0	88,8	76,5	73,9	76,0
jun/14	115,4	109,3	90,7	89,5	93,7	118,0
jul/14	60,7	63,1	64,1	64,3	67,1	74,9
ago/14	73,2	71,3	70,0	73,8	75,8	76,3
set/14	55,4	55,1	56,8	56,5	58,0	58,2
out/14	65,4	64,9	65,9	67,1	73,5	72,4
nov/14	74,5	73,7	74,5	73,3	81,0	77,7
dez/14	125,8	124,6	126,7	124,7	129,0	124,5
jan/15	104,1	100,2	102,6	104,9	115,5	113,4
fev/15	98,4	95,3	93,5	91,2	104,7	103,1
mar/15	103,1	102,3	99,2	95,1	101,9	103,6
Média	89,8	88,3	86,2	85,1	91,0	91,5
Desvio-Padrão	23,5	22,5	20,0	19,4	23,5	24,1

Tabela 12 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas por classes de altitude

Mês	Floresta Plantada					
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)					
	Classes de altitude					
	< 600m	600-700m	700-800m	800-900m	900-1000m	> 1000m
abr/13	90,6	93,6	92,8	93,7	97,7	99,6
mai/13	69,7	70,6	70,6	70,5	71,6	71,8
jun/13	63,9	61,9	63,9	64,1	65,2	64,1
jul/13	71,2	72,0	72,0	72,1	72,7	73,4
ago/13	79,5	81,1	80,7	80,7	83,3	83,4
set/13	106,2	108,6	109,0	108,5	113,8	116,3
out/13	137,7	134,0	122,2	125,2	132,1	135,4
nov/13	133,0	134,7	128,9	132,0	140,7	143,0
dez/13	133,6	135,4	131,7	133,9	136,6	136,7
jan/14	134,3	136,4	132,5	132,8	141,3	142,0
fev/14	148,0	148,9	141,5	141,3	177,3	188,5
mar/14	121,0	122,8	123,1	124,5	135,2	130,0
abr/14	110,1	116,6	123,7	129,7	156,5	138,6
mai/14	83,1	81,3	77,1	74,7	87,3	82,8
jun/14	118,1	111,2	97,2	97,4	108,6	113,1
jul/14	71,4	73,4	77,0	76,8	77,3	74,7
ago/14	98,1	98,8	101,8	96,8	111,1	96,0
set/14	75,1	76,4	76,7	73,6	82,6	73,5
out/14	96,9	95,6	95,5	91,6	103,5	91,8
nov/14	109,5	107,8	105,9	103,0	111,9	98,4
dez/14	147,3	147,5	145,0	143,0	146,2	143,1
jan/15	108,5	113,2	120,3	120,9	135,7	116,2
fev/15	114,2	113,4	112,5	112,4	118,7	114,4
mar/15	111,0	111,3	109,0	108,8	109,8	109,2
Média	105,5	106,1	104,6	104,5	113,2	109,8
Desvio-Padrão	25,8	25,8	24,2	25,1	29,8	30,8

Tabela 13 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas por classes de altitude

Mês	Mata Nativa					
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)					
	Classes de altitude					
	< 600m	600-700m	700-800m	800-900m	900-1000m	> 1000m
abr/13	88,1	90,0	90,4	93,0	93,7	96,6
mai/13	67,8	68,7	68,6	69,6	69,9	71,0
jun/13	64,8	63,1	62,8	62,5	62,8	64,0
jul/13	70,6	71,3	71,3	71,8	71,9	72,3
ago/13	77,4	78,9	78,6	80,0	79,6	80,5
set/13	100,4	103,1	102,6	104,7	104,6	107,7
out/13	117,2	123,0	121,0	126,2	126,6	129,2
nov/13	120,9	127,3	128,9	135,7	135,1	134,1
dez/13	131,5	133,5	133,2	135,5	134,5	133,1
jan/14	129,6	132,8	133,0	136,1	136,6	137,5
fev/14	147,7	143,1	138,1	147,4	150,4	160,0
mar/14	120,0	122,8	123,5	124,1	123,7	124,2
abr/14	108,5	118,9	122,9	122,3	122,7	127,6
mai/14	79,2	76,5	80,9	79,3	81,1	84,5
jun/14	114,4	108,1	100,5	101,8	106,0	119,7
jul/14	65,2	69,0	70,8	70,3	71,3	77,0
ago/14	82,8	89,3	92,0	90,6	93,4	100,9
set/14	65,7	69,6	71,9	72,8	74,4	78,1
out/14	80,5	87,6	91,3	96,6	97,6	99,6
nov/14	93,0	98,3	102,0	107,5	106,8	106,7
dez/14	144,3	146,0	145,6	146,9	146,7	146,7
jan/15	104,3	102,7	116,0	125,7	127,6	128,2
fev/15	109,2	109,2	111,0	115,8	116,7	116,7
mar/15	110,1	109,4	108,4	109,7	109,7	110,5
Média	99,7	101,8	102,7	105,2	106,0	108,6
Desvio-Padrão	25,6	25,5	24,9	26,5	26,4	26,5

Também, obteve-se os valores de ET real anual para cada uso, separados por classes de altitude, conforme as Tabelas de 14 a 16.

Tabela 14 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas por classes de altitude

Ano	Cana-de-açúcar					
	ET real ajustada total mensal (mm.ano ⁻¹)					
	Classes de altitude					
	< 600m	600-700m	700-800m	800-900m	900-1000m	> 1000m
2013/14	1096,5	1076,6	1036,3	1027,0	1099,7	1091,1
2014/15	1058,5	1042,0	1032,9	1015,1	1083,9	1104,8
Média	1077,5	1059,3	1034,6	1021,1	1091,8	1097,9

Tabela 15 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas por classes de altitude

Ano	Floresta Plantada					
	ET real ajustada total mensal (mm.ano ⁻¹)					
	Classes de altitude					
	< 600m	600-700m	700-800m	800-900m	900-1000m	> 1000m
2013/14	1288,6	1300,0	1268,8	1279,3	1367,7	1384,2
2014/15	1243,4	1246,5	1241,6	1228,6	1349,1	1251,9
Média	1266,0	1273,2	1255,2	1253,9	1358,4	1318,0

Tabela 16 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas por classes de altitude

Ano	Mata Nativa					
	ET real ajustada total mensal (mm.ano ⁻¹)					
	Classes de altitude					
	< 600m	600-700m	700-800m	800-900m	900-1000m	> 1000m
2013/14	1236,0	1257,5	1251,9	1286,5	1289,3	1310,1
2014/15	1157,1	1184,6	1213,4	1239,3	1254,0	1296,1
Média	1196,5	1221,1	1232,7	1262,9	1271,6	1303,1

Pela análise dos resultados apresentados, para os dados mensais, apresentados nas Tabelas de 11 a 13, observou-se que, para a cana-de-açúcar, não houve uma variação mensal expressiva entre as classes de altitude tal como ocorreu na floresta plantada, já que, por exemplo, no mês de fevereiro de 2014, a variação de ETr entre a classe de altitude menor que 600 metros para a maior que 1000 metros foi de apenas 7,1mm para a cana-de-açúcar, enquanto para a floresta plantada foi de 40,5mm. Isso pode ser explicado pelo fato da floresta plantada apresentar um maior consumo de água em todas as classes de altitude pelos dois anos estudados, quando comparada à cultura da cana-de-açúcar.

Buriol et al. (2014) realizaram uma análise da ET potencial média mensal e anual de toda a área da bacia hidrográfica do Rio Vacaraí, no Rio Grande do Sul, com dados estimados a partir de equações de regressão obtidas pela relação entre a ETP (calculada por Penman-Monteith) e a altitude, latitude e longitude, sem analisar nenhuma cultura ou cobertura vegetal específica no local. Nesse contexto, os autores encontraram que, para todos os meses do ano, as áreas com menor altitude e latitude apresentaram as maiores médias de ETP, corroborando, em parte, com os valores obtidos para a cana-de-açúcar e para a floresta plantada no presente trabalho, as quais apresentaram valores médios mensais estimados de ETr maiores para as classes mais baixas no terreno (menor que 600 metros e de 600 a 700 metros), quando comparadas com as classes de altitude superior às anteriormente citadas (de 700 a 800 metros e de 800 a 900 metros).

Porém, como no presente trabalho avaliou-se, também, áreas com altitude maiores do que as que Buriol et al. (2014) trabalharam (altitude de, no máximo, 500 metros), obteve-se, que, para as culturas da cana-de-açúcar e floresta plantada, houve um maior consumo de água nos pontos mais altos do terreno (áreas com altitude maior que 900 metros), tendo sido essa estimativa da ETr mais alta, inclusive, que os pontos mais baixos do terreno. Esse fato pode ser explicado pelo aumento do vento nas regiões mais altas do terreno, já que esse fator, combinado com a temperatura e a radiação global, que para a latitude da região do estudo não se alteram muito durante o ano, são determinantes na variação da ETr, conforme descrito por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007). Adicionalmente, as áreas com altitude maiores que 900 metros, na região estudada, se mostraram como áreas com maiores declividades (como, por exemplo, a Serra de São Pedro), sendo esse fator essencial para explicar os resultados de ETr maiores nessas classes.

Para os dados mensais e anuais, observou-se que, para a mata nativa, houve acréscimo gradual da estimativa de ET real conforme o terreno foi se mostrando com maior altitude (principalmente nas classes de 900 a 1000 metros e de mais de 1000 metros), ou seja, quanto mais alta a localização da mata nativa no terreno, maiores foram os valores absolutos de evapotranspiração.

Já para a cana-de-açúcar e para a floresta plantada (coberturas vegetais que ainda precisaram se desenvolver vegetativamente – diferentemente da mata nativa, que já se encontrava com crescimento estabilizado), o comportamento da ETr anual

segiu o mesmo comportamento das estimativas mensais: as regiões abaixo de 700 metros e acima de 900 metros consumiram mais água que as classes intermediárias de altitude.

Assim, o fator altitude pode ser considerado como importante para projetos de implantação das culturas (principalmente para a cana-de-açúcar e floresta plantada), já que as áreas com altitudes mais elevadas, no presente estudo, apresentaram uma evapotranspiração maior quando comparadas às áreas mais baixas no terreno.

Além disso, esse fator está diretamente associado com as classes de declividade, havendo necessidade de se avaliar esse outro aspecto do terreno em conjunto, para se obter uma correlação entre elas.

Dessa forma, as classes de declividade foram cruzadas com os três usos estudados (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa) gerando-se, assim, o mapa de classes de declividade em cada cobertura vegetal (Figura 20).

Figura 20 – Classes de declividade separadas por cada cobertura vegetal

A partir do resultado apresentado na Figura 20, foi possível realizar o cruzamento com todas as estimativas de ET real mensais para os dois anos de estudo, sendo que os resultados, por cobertura vegetal, estão representados nas Tabelas de 17 a 19.

Tabela 17 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas por classes de declividade

Mês	Cana-de-açúcar				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	Classes de declividade				
	0-3%	3-6%	6-12%	12-18%	maior 18%
abr/13	81,7	81,5	82,2	83,8	85,2
mai/13	60,9	60,5	60,6	62,1	63,4
jun/13	60,3	59,9	59,9	60,2	60,6
jul/13	65,5	65,2	64,8	64,4	64,5
ago/13	63,3	63,0	63,3	65,3	67,7
set/13	86,4	85,8	87,0	89,2	90,9
out/13	90,8	93,1	97,0	104,2	109,9
nov/13	92,7	95,8	101,4	110,3	116,6
dez/13	103,6	105,7	110,3	118,1	124,2
jan/14	111,4	111,3	113,1	117,9	122,6
fev/14	129,3	129,0	130,5	133,0	131,8
mar/14	107,5	106,9	108,1	112,4	116,1
abr/14	100,1	99,7	101,7	108,9	115,4
mai/14	84,8	83,2	79,7	76,7	74,9
jun/14	102,8	101,6	102,6	101,6	96,3
jul/14	63,6	63,0	64,0	67,8	68,0
ago/14	71,4	71,2	72,7	76,2	77,0
set/14	55,4	55,6	56,6	58,6	59,3
out/14	63,7	65,1	68,7	74,6	77,9
nov/14	72,3	73,6	76,6	81,7	86,6
dez/14	123,3	124,9	127,5	131,6	135,8
jan/15	101,5	102,4	105,2	108,6	111,2
fev/15	94,5	95,1	96,8	100,7	104,9
mar/15	100,5	100,8	101,1	101,7	102,4
Média	87,0	87,3	88,8	92,1	94,3
Desvio-Padrão	21,2	21,4	22,1	23,2	24,4

Tabela 18 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas por classes de declividade

Mês	Floresta Plantada				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	Classes de declividade				
	0-3%	3-6%	6-12%	12-18%	maior 18%
abr/13	93,3	93,4	93,9	94,8	96,3
mai/13	70,6	70,6	70,7	71,0	71,8
jun/13	64,1	63,7	63,0	63,2	63,2
jul/13	72,1	72,1	72,1	72,0	72,1
ago/13	80,9	80,9	81,1	81,2	82,1
set/13	109,2	109,1	109,5	109,8	110,5
out/13	125,2	125,8	129,0	130,3	133,8
nov/13	131,3	131,0	133,5	134,8	139,9
dez/13	133,2	133,0	134,2	134,9	136,8
jan/14	132,9	133,7	135,9	136,6	139,0
fev/14	144,3	145,2	150,0	153,8	158,0
mar/14	123,3	123,9	124,9	126,7	131,2
abr/14	123,5	125,2	125,8	132,7	154,4
mai/14	76,9	78,1	80,2	80,3	81,1
jun/14	98,9	100,8	105,2	107,9	105,4
jul/14	77,0	76,0	75,1	74,4	73,5
ago/14	99,4	100,2	101,0	102,3	103,4
set/14	75,1	75,9	77,1	77,5	78,1
out/14	93,1	94,5	96,5	98,3	103,5
nov/14	104,0	105,5	107,4	108,5	113,5
dez/14	144,3	145,0	145,9	146,6	147,0
jan/15	119,3	119,5	119,2	119,8	128,9
fev/15	112,1	112,9	114,0	115,0	117,5
mar/15	109,1	109,4	110,0	110,1	110,7
Média	104,7	105,2	106,5	107,6	110,5
Desvio-Padrão	24,7	24,9	25,6	26,4	28,7

Tabela 19 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas por classes de declividade

Mês	Mata Nativa				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	Classes de declividade				
	0-3%	3-6%	6-12%	12-18%	maior 18%
abr/13	87,9	88,6	90,4	92,8	95,8
mai/13	67,6	67,8	68,6	69,8	71,0
jun/13	63,3	63,0	63,0	63,3	63,1
jul/13	70,8	70,9	71,3	71,8	72,2
ago/13	77,3	77,7	78,7	80,0	81,4
set/13	100,7	100,9	102,6	105,1	107,8
out/13	117,4	118,3	121,7	126,1	132,5
nov/13	124,2	124,8	127,9	132,7	139,4
dez/13	131,6	132,0	133,2	134,9	137,2
jan/14	130,6	131,2	133,0	135,3	138,5
fev/14	139,0	139,9	142,2	146,6	153,5
mar/14	121,1	121,6	122,7	124,3	126,5
abr/14	114,7	116,5	119,3	123,2	129,4
mai/14	79,5	79,4	79,0	78,8	78,8
jun/14	101,7	103,6	106,1	108,0	108,2
jul/14	68,0	68,0	69,3	71,2	72,5
ago/14	89,3	87,1	88,9	93,0	95,6
set/14	69,9	69,4	70,3	72,3	74,2
out/14	87,4	86,2	88,6	93,5	100,1
nov/14	98,4	97,8	99,4	103,7	109,9
dez/14	144,2	144,5	145,6	147,2	149,2
jan/15	110,5	109,4	110,3	115,5	124,3
fev/15	109,2	109,1	110,4	113,6	117,6
mar/15	108,2	108,5	109,1	110,0	111,1
Média	100,5	100,7	102,1	104,7	107,9
Desvio-Padrão	24,4	24,8	25,2	25,9	27,4

Também, obtiveram-se os valores de ET real anual para cada uso, separados por classes de declividade, conforme as Tabelas de 20 a 22.

Tabela 20 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas por classes de declividade

Ano	Cana-de-açúcar				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	Classes de declividade				
	0-3%	3-6%	6-12%	12-18%	maior 18%
2013/14	1053,2	1057,8	1078,1	1120,9	1153,5
2014/15	1033,9	1036,2	1053,2	1088,6	1109,8
Média	1043,6	1047,0	1065,6	1104,8	1131,7

Tabela 21 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas por classes de declividade

Ano	Floresta Plantada				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	Classes de declividade				
	0-3%	3-6%	6-12%	12-18%	maior 18%
2013/14	1280,5	1282,3	1297,7	1309,2	1334,5
2014/15	1232,7	1243,0	1257,5	1273,3	1317,1
Média	1256,6	1262,6	1277,6	1291,3	1325,8

Tabela 22 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas por classes de declividade

Ano	Mata Nativa				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	Classes de declividade				
	0-3%	3-6%	6-12%	12-18%	maior 18%
2013/14	1231,2	1236,8	1255,2	1282,7	1318,8
2014/15	1181,0	1179,4	1196,2	1230,1	1271,0
Média	1206,1	1208,1	1225,7	1256,4	1294,9

Pela análise dos resultados apresentados, observa-se que, em todas as coberturas vegetais estudadas, houve acréscimo da estimativa de ET real conforme o terreno foi se mostrando mais inclinado, ou seja, quanto maior a declividade do terreno, maiores foram os valores absolutos de evapotranspiração, tanto quando os dados analisados foram mensais quanto anuais.

Esse resultado corrobora com a conclusão apresentada por Menezes et al. (2009), que analisaram que a estimativa de ET por imagem de satélite foi menor em condições de relevo plano do que em condições de relevo montanhoso, para todas as áreas avaliadas.

Dessa maneira, independentemente dos valores absolutos de cada ano, observa-se, pela análise das Tabelas de 20 a 22, que o comportamento da evapotranspiração espacializada das coberturas vegetais, conforme a classe de declividade em que estão localizadas, foi de relação positiva (ascendência), ou seja, em todos os casos estudados a ET real aumentou à medida que aumentou a declividade.

Esse fato pode servir como base para novas implantações das referidas culturas, já que, como observado, recomenda-se que se implantem as culturas da cana-de-açúcar e de florestas plantadas nos terrenos mais planos possíveis, já que estas áreas tenderão a fazer com que a vegetação apresente uma evapotranspiração menor e, por conseguinte, necessite de menos água para chegar ao seu ponto máximo de produtividade; além disso, algumas culturas (como a cana-de-açúcar, por exemplo) possuem limitações de maquinário para colheitas, dependendo da declividade na qual os talhões estão locados.

Comparando-se os resultados da ETr nas classes de declividade com os apresentados para as classes de altitude, observa-se que a declividade apresentou um padrão mais bem definido na alteração da demanda por água pelas coberturas vegetais do que a altitude, já que as três vegetações analisadas demonstraram o mesmo padrão de crescimento do valor de ETr com o aumento da declividade, fato que não ocorreu com o mesmo padrão para as três coberturas vegetais, quando avaliada a altitude.

Outro fator analisado no presente trabalho foram as faces de exposição do terreno à radiação solar, também utilizando o MDT SRTM Banda X, para a obtenção desses dados.

Assim, foram obtidas as faces de exposição (plano, norte, sul, leste e oeste) para toda a região do presente estudo, as quais foram cruzadas com os três usos estudados (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa) gerando-se, assim, o mapa de faces de exposição em cada cobertura vegetal (Figura 21).

Figura 21 – Faces de exposição do terreno separadas por cada cobertura vegetal

A partir do processo realizado na Figura 21, foi possível realizar o cruzamento com todas as estimativas de ET real mensais para os dois anos de estudo, sendo que os resultados, por cobertura vegetal, estão apresentados nas Tabelas de 23 a 25.

Tabela 23 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas pelas faces de exposição do terreno

Mês	Cana-de-açúcar				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	Faces de exposição do terreno				
	Plano	Norte	Leste	Sul	Oeste
abr/13	82,1	81,2	80,9	82,8	82,8
mai/13	61,5	60,2	60,3	61,4	61,1
jun/13	60,5	59,7	59,9	60,3	60,3
jul/13	65,5	64,6	64,7	65,6	65,5
ago/13	63,4	62,2	62,4	64,2	64,5
set/13	87,8	85,6	85,6	87,1	87,7
out/13	89,1	94,0	93,4	93,7	95,7
nov/13	91,1	97,6	97,5	96,4	98,1
dez/13	102,5	107,2	108,3	105,9	107,2
jan/14	112,0	112,5	111,9	110,9	113,6
fev/14	130,7	129,7	128,7	130,0	130,6
mar/14	107,7	107,8	107,2	107,0	108,7
abr/14	99,6	101,2	100,4	99,9	102,0
mai/14	85,6	82,6	81,1	82,6	82,7
jun/14	106,3	100,3	101,7	103,6	103,4
jul/14	62,9	62,4	62,4	65,7	64,4
ago/14	71,9	70,5	70,1	73,7	73,8
set/14	55,0	55,3	55,2	56,7	56,9
out/14	62,1	65,8	66,1	66,3	67,0
nov/14	71,0	74,2	75,2	74,3	74,7
dez/14	122,5	125,7	127,1	124,9	124,8
jan/15	101,8	103,3	103,6	102,1	104,2
fev/15	94,3	95,6	96,2	94,8	96,2
mar/15	101,4	101,1	101,3	100,5	100,5
Média	87,0	87,5	87,5	87,9	88,6
Desvio-Padrão	21,5	21,9	21,9	21,0	21,5

Tabela 24 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas pelas faces de exposição do terreno

Mês	Floresta Plantada				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	FACES de exposição do terreno				
	Plano	Norte	Leste	Sul	Oeste
abr/13	94,0	93,2	93,2	94,1	94,2
mai/13	70,6	70,6	70,4	70,8	70,9
jun/13	64,4	63,7	63,8	63,3	63,5
jul/13	72,2	72,0	72,0	72,2	72,1
ago/13	81,3	81,0	81,0	81,0	81,1
set/13	110,5	109,5	109,4	109,1	109,2
out/13	126,1	128,1	125,6	126,2	127,8
nov/13	132,5	133,6	130,6	131,0	133,4
dez/13	133,6	134,3	133,0	133,1	133,9
jan/14	133,1	134,7	133,9	134,3	134,7
fev/14	145,5	148,3	148,4	145,9	146,2
mar/14	123,0	124,2	124,7	124,6	124,0
abr/14	122,5	125,6	127,2	126,3	125,3
mai/14	76,5	78,7	78,3	78,9	78,3
jun/14	99,2	102,2	102,1	102,1	102,1
jul/14	79,0	76,5	75,6	75,8	75,4
ago/14	100,4	99,8	98,9	101,8	101,0
set/14	75,8	75,6	75,1	77,2	76,8
out/14	93,7	94,7	93,4	95,9	96,2
nov/14	104,3	105,8	104,7	106,5	106,7
dez/14	144,8	145,1	145,6	145,2	145,0
jan/15	119,0	120,4	117,7	119,0	120,9
fev/15	112,0	113,3	112,4	113,1	113,9
mar/15	109,3	109,5	109,4	109,6	109,7
Média	105,1	105,8	105,3	105,7	105,9
Desvio-Padrão	24,7	25,5	25,3	24,9	25,2

Tabela 25 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas pelas faces de exposição do terreno

Mês	Mata Nativa				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	Faces de exposição do terreno				
	Plano	Norte	Leste	Sul	Oeste
abr/13	71,3	89,6	89,8	91,9	91,1
mai/13	55,5	68,5	68,8	69,2	68,6
jun/13	54,3	63,2	63,2	63,0	63,0
jul/13	68,6	71,3	71,3	71,4	71,3
ago/13	62,8	78,7	78,9	79,2	78,7
set/13	92,9	102,7	103,1	103,6	102,6
out/13	97,1	123,4	122,0	122,3	122,7
nov/13	102,2	130,7	128,2	128,3	129,6
dez/13	107,0	134,2	133,8	133,2	133,3
jan/14	115,0	134,5	132,8	132,9	133,8
fev/14	132,5	143,5	144,2	143,6	142,5
mar/14	119,3	123,3	123,4	122,8	122,5
abr/14	109,0	121,3	121,1	119,1	119,1
mai/14	79,0	78,6	79,0	79,5	79,1
jun/14	96,9	104,8	106,6	105,9	104,2
jul/14	68,3	68,6	69,9	70,5	69,0
ago/14	78,7	88,0	89,1	92,2	90,0
set/14	57,4	69,7	69,8	72,3	71,3
out/14	87,9	90,6	88,1	90,7	91,3
nov/14	82,8	102,5	100,1	100,8	101,2
dez/14	144,3	146,1	146,5	145,8	145,3
jan/15	112,8	116,2	108,3	111,8	116,2
fev/15	106,9	112,4	111,0	111,0	111,7
mar/15	103,9	109,3	109,5	109,3	108,9
Média	91,9	103,0	102,4	102,9	102,8
Desvio-Padrão	24,6	26,0	25,5	25,0	25,4

Também, obtiveram-se os valores de ET real anual para cada uso, separados pelas faces de exposição do terreno, conforme as Tabelas de 26 a 28.

Tabela 26 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas pelas faces de exposição do terreno

Ano	Cana-de-açúcar				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	FACES de exposição do terreno				
	Plano	Norte	Leste	Sul	Oeste
2013/14	1053,7	1062,3	1060,8	1065,3	1075,7
2014/15	1034,5	1037,9	1040,2	1045,1	1050,7
Média	1044,1	1050,1	1050,5	1055,2	1063,2

Tabela 27 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas pelas faces de exposição do terreno

Ano	Floresta Plantada				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	FACES de exposição do terreno				
	Plano	Norte	Leste	Sul	Oeste
2013/14	1286,8	1293,1	1285,9	1285,6	1291,0
2014/15	1236,5	1247,1	1240,2	1251,5	1251,3
Média	1261,7	1270,1	1263,1	1268,6	1271,1

Tabela 28 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas pelas faces de exposição do terreno

Ano	Mata Nativa				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	FACES de exposição do terreno				
	Plano	Norte	Leste	Sul	Oeste
2013/14	1078,5	1263,6	1259,5	1261,4	1259,6
2014/15	1128,0	1208,1	1199,0	1209,0	1207,3
Média	1103,2	1235,8	1229,3	1235,2	1233,5

Pela análise dos resultados, primeiramente, observa-se que, para a mata nativa, as áreas planas apresentaram menores valores de evapotranspiração real entre todas as faces de exposição do terreno, tanto nos valores mensais quanto nos anuais (em torno de 130mm de diferença na média dos dois anos estudados), contrapondo a cana-de-açúcar e a floresta plantada; essas últimas apresentaram apenas, respectivamente, 19mm e 10mm de diferença de médias anuais, entre os valores estimados de ET em áreas planas e na face de exposição de maior consumo.

Desta forma, percebe-se que, principalmente para a cana-de-açúcar, o consumo de água em áreas planas é menor, sendo esse terreno o mais apropriado para implantação de novos plantios.

Adicionalmente, para a cultura da cana-de-açúcar, observa-se que as faces de exposição do terreno que propiciaram um menor consumo de água nos dois anos estudados (tanto nos dados mensais quanto nos anuais) foram as faces norte e leste, sendo o lado oeste o de maior consumo de água (maior ET real) na região do estudo.

Já para a floresta plantada e a mata nativa, pode-se observar que a variação entre as faces de exposição (norte, sul, leste e oeste), tanto nos valores mensais quanto nos anuais, foi bem pequena (em torno de 2 mm em nível mensal e de 10 mm em nível anual nas suas variações máximas). Assim sendo, no presente estudo, não foi possível estabelecer um padrão de ET real no decorrer dos meses para as faces de exposição estudadas, nem para as florestas plantadas nem para a mata nativa. Isso pode ser explicado pelo fato da cultura da cana-de-açúcar possuir uma menor altura de dossel e um formato específico de talhamento, que proporciona tal resultado, quando comparada à floresta plantada e à mata nativa, que possuem dosséis mais altos. Nas matas e florestas, a parte da vegetação que realiza a evapotranspiração (folhas) está quase sempre no alto dessas coberturas, não fazendo tanta diferença ao ângulo de incidência da radiação no somatório de um ano.

Além disso, como no hemisfério sul o sol, que possui uma trajetória aparente leste-oeste, sofre uma declinação para o norte no inverno de quase 45°, os raios solares tendem a interceptar as superfícies voltadas para o norte e tangenciar as voltadas para o sul nessa época, sendo tal efeito mais pronunciado quanto maior a latitude e/ou mais ondulado for o relevo da área (FERREIRA, et al., 2005).

Segundo Birkeland (1999), esse efeito possui maior influência em latitudes maiores que 40 graus, determinando inclusive classes diferentes de solos nas faces norte e sul (HUNCKLER; SCHAETZL, 1997; FERREIRA, et al., 2005). Dessa forma, analisou-se os resultados do presente trabalho, e como a área de estudo do presente trabalho se localiza próxima ao Trópico de Capricórnio (aproximadamente 23° 27" Sul), para as três coberturas vegetais estudadas, a ETr estimada para a face norte, no período de inverno, não foi maior, em valores absolutos e de forma

constante, que os das outras faces, corroborando com o trabalho apresentado por Birkeland (1999).

Outro fator analisado no presente trabalho foram as classes de solo. Ferreira et al. (2005) citaram que a ET é bastante dependente da quantidade de calor recebida na superfície evapotranspirante e que, por isso, em climas quentes e muito úmidos, com bastante água no perfil do solo, as reações de transformação no solo serão mais rápidas, pois o intemperismo químico será acelerado, tanto pela maior temperatura quanto pelo maior desequilíbrio químico entre reagentes e produtos, já que estes são mais prontamente retirados do sistema.

Assim, a partir do mapa pedológico do Estado de São Paulo, foram extraídos os solos presentes na região do presente estudo (Tabela 29).

Tabela 29 – Classes de solo presentes na região de estudo

Classe de solo	Sigla
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA
Latossolo Vermelho	LV
Neossolo Quartzarênico	RQ
Organossolo Háptico	OY
Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA
Gleissolo Háptico	GX
Neossolo Litólico	RL

As classes de solo foram cruzadas com os três usos estudados (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa) gerando-se, assim, o mapa de classes de solo em cada cobertura vegetal (Figura 22).

Figura 22 – Classes de solo separadas por cada cobertura vegetal

A partir do processo realizado na Figura 22, foi possível realizar o cruzamento com todas as estimativas de ET real mensais para os dois anos de estudo, sendo que os resultados, por cobertura vegetal, estão apresentados nas Tabelas de 30 a 32.

Tabela 30 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas pelas classes de solo

Mês	Cana-de-açúcar				
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)				
	Classes de Solo				
	LVA	LV	RQ	PVA	RL
abr/13	81,7	80,2	79,1	82,9	83,1
mai/13	60,5	59,9	57,8	61,5	61,7
jun/13	59,6	60,1	57,4	60,7	60,1
jul/13	65,5	65,2	64,1	65,1	64,7
ago/13	63,3	62,0	63,4	63,9	62,5
set/13	84,2	86,6	84,2	88,9	82,9
out/13	90,0	92,4	93,1	97,0	97,1
nov/13	94,2	94,7	95,0	100,3	99,2
dez/13	103,4	102,3	104,7	110,9	109,6
jan/14	110,4	107,5	107,4	115,4	114,3
fev/14	124,4	140,6	118,8	131,9	128,6
mar/14	108,8	100,1	108,0	108,5	111,9
abr/14	104,0	91,4	104,8	99,9	107,6
mai/14	83,7	83,7	79,1	82,6	76,4
jun/14	94,9	100,1	93,1	108,5	104,4
jul/14	65,3	67,4	61,4	61,6	66,2
ago/14	72,2	71,1	70,5	72,0	73,5
set/14	56,9	54,1	56,2	55,8	57,0
out/14	66,4	62,3	67,0	66,4	70,4
nov/14	75,7	70,9	72,1	75,6	74,1
dez/14	126,4	119,7	125,2	126,7	126,4
jan/15	108,6	100,5	95,6	101,7	107,7
fev/15	96,6	92,8	92,0	96,1	99,3
mar/15	99,7	98,6	97,9	102,9	100,1
Média	87,3	86,0	85,3	89,0	89,1
Desvio-Padrão	20,9	21,4	20,5	22,4	22,2

Em que: LVA representa Latossolo Vermelho-Amarelo; LV representa Latossolo Vermelho; RQ representa Neossolo Quartzarênico; PVA representa Argissolo Vermelho-Amarelo e RL representa Neossolo Litólico.

Tabela 31 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas pelas classes de solo

Mês	Floresta Plantada						
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)						
	Classes de Solo						
	LVA	LV	RQ	OY	PVA	GX	RL
abr/13	93,6	94,6	94,1	88,3	93,4	96,1	95,7
mai/13	70,4	71,6	71,0	70,9	70,2	70,6	70,9
jun/13	64,8	62,8	63,6	66,4	61,3	65,0	62,6
jul/13	72,0	71,9	72,2	71,1	72,2	73,3	72,1
ago/13	81,0	81,9	81,2	78,6	81,0	81,8	81,2
set/13	108,5	111,0	110,1	106,7	108,8	111,2	109,6
out/13	126,0	140,9	122,4	115,1	131,9	128,2	133,1
nov/13	132,5	140,6	129,6	123,5	133,8	139,1	135,7
dez/13	134,2	136,5	131,7	128,9	135,5	135,8	135,8
jan/14	134,4	139,0	131,9	130,1	137,1	134,7	138,5
fev/14	149,2	164,2	142,7	139,2	142,7	135,6	160,5
mar/14	127,4	122,0	122,6	120,1	123,1	121,9	130,6
abr/14	138,6	112,8	122,0	115,0	115,3	115,8	146,4
mai/14	75,7	91,7	78,3	78,1	77,7	76,3	78,9
jun/14	102,1	118,3	95,4	89,9	108,3	97,4	110,8
jul/14	76,4	79,1	76,9	90,3	72,3	72,3	72,0
ago/14	98,0	106,6	102,2	106,7	96,3	106,2	98,5
set/14	74,2	80,7	76,7	78,2	75,7	78,9	75,9
out/14	91,7	103,4	96,0	97,8	93,6	99,1	96,1
nov/14	102,7	116,9	105,8	107,8	106,2	108,3	105,6
dez/14	144,0	149,0	145,0	142,9	146,6	144,5	145,6
jan/15	119,0	123,1	122,6	120,5	111,5	127,8	122,0
fev/15	111,6	118,0	114,1	110,4	111,9	116,0	115,0
mar/15	108,3	113,1	109,5	108,3	110,7	109,9	109,7
Média	105,7	110,4	104,9	103,5	104,9	106,1	108,4
Desvio-Padrão	26,2	27,0	24,2	22,4	25,6	24,8	28,4

Em que: LVA representa Latossolo Vermelho-Amarelo; LV representa Latossolo Vermelho; RQ representa Neossolo Quartzarênico; OY representa Organossolo Háplico; PVA representa Argissolo Vermelho-Amarelo; GX representa Gleissolo Háplico e RL representa Neossolo Litólico.

Tabela 32 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas pelas classes de solo

Mês	Mata Nativa						
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)						
	Classes de Solo						
	LVA	LV	RQ	OY	PVA	GX	RL
abr/13	90,6	86,5	89,5	86,8	90,4	89,8	93,7
mai/13	68,8	67,0	67,9	67,2	68,8	68,0	70,1
jun/13	63,2	62,7	61,9	64,7	63,5	63,7	62,9
jul/13	71,4	70,6	70,8	69,6	71,4	71,4	71,8
ago/13	78,7	77,0	78,1	75,5	78,9	78,5	80,2
set/13	102,2	100,8	102,1	103,3	102,9	102,7	105,4
out/13	120,7	116,9	120,3	99,5	122,2	124,7	129,1
nov/13	129,7	124,3	127,5	110,1	127,4	132,3	134,3
dez/13	133,6	130,3	132,5	127,4	133,3	132,6	135,6
jan/14	134,4	126,7	129,6	123,0	133,7	131,1	136,7
fev/14	142,2	141,3	138,4	135,7	144,3	128,5	147,4
mar/14	124,2	118,1	123,1	119,5	121,8	121,6	125,0
abr/14	125,4	105,0	125,5	118,9	113,1	112,6	125,7
mai/14	79,4	83,4	79,2	72,3	79,8	72,2	77,1
jun/14	102,0	101,7	98,0	89,6	108,6	95,1	111,2
jul/14	71,0	65,9	70,8	84,9	68,2	67,7	70,4
ago/14	91,4	85,4	91,6	99,7	87,9	98,8	92,2
set/14	72,8	68,7	71,1	70,3	69,2	75,5	72,3
out/14	93,3	83,5	91,5	81,0	86,8	98,6	94,1
nov/14	103,8	97,7	100,9	84,9	98,9	106,5	103,8
dez/14	146,1	142,2	144,1	140,8	146,0	143,0	147,8
jan/15	119,3	110,5	109,6	113,5	107,7	115,2	118,4
fev/15	112,5	108,3	110,4	102,6	110,0	114,0	114,7
mar/15	109,0	106,8	107,9	105,5	110,4	108,1	109,5
Média	103,6	99,2	101,8	97,8	101,9	102,2	105,4
Desvio-Padrão	25,4	24,2	24,7	22,6	25,4	24,3	26,7

Em que: LVA representa Latossolo Vermelho-Amarelo; LV representa Latossolo Vermelho; RQ representa Neossolo Quartzarênico; OY representa Organossolo Háplico; PVA representa Argissolo Vermelho-Amarelo; GX representa Gleissolo Háplico e RL representa Neossolo Litólico.

Obtiveram-se também os valores de ET real anual para cada uso, separados por classes de solo, conforme as Tabelas de 33 a 35.

Tabela 33 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas pelas classes de solo

Ano	Cana-de-açúcar				
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)				
	Classes de Solo				
	LVA	LV	RQ	PVA	RL
2013/14	1045,9	1051,5	1032,9	1087,0	1075,7
2014/15	1050,3	1012,6	1015,0	1050,0	1062,9
Média	1048,1	1032,0	1023,9	1068,5	1069,3

Em que: LVA representa Latossolo Vermelho-Amarelo; LV representa Latossolo Vermelho; RQ representa Neossolo Quartzarênico; PVA representa Argissolo Vermelho-Amarelo e RL representa Neossolo Litólico.

Tabela 34 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas pelas classes de solo

Ano	Floresta Plantada						
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)						
	Classes de Solo						
	LVA	LV	RQ	OY	PVA	GX	RL
2013/14	1294,0	1337,1	1273,1	1238,8	1290,9	1293,2	1326,2
2014/15	1242,3	1312,8	1244,4	1245,9	1225,9	1252,6	1276,5
Média	1268,2	1324,9	1258,8	1242,3	1258,4	1272,9	1301,3

Em que: LVA representa Latossolo Vermelho-Amarelo; LV representa Latossolo Vermelho; RQ representa Neossolo Quartzarênico; OY representa Organossolo Háplico; PVA representa Argissolo Vermelho-Amarelo; GX representa Gleissolo Háplico e RL representa Neossolo Litólico.

Tabela 35 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas pelas classes de solo

Ano	Mata Nativa						
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)						
	Classes de Solo						
	LVA	LV	RQ	OY	PVA	GX	RL
2013/14	1259,7	1222,1	1241,7	1182,1	1258,6	1245,0	1292,3
2014/15	1226,0	1158,9	1200,6	1163,9	1186,6	1207,2	1237,3
Média	1242,9	1190,5	1221,1	1173,0	1222,6	1226,1	1264,8

Em que: LVA representa Latossolo Vermelho-Amarelo; LV representa Latossolo Vermelho; RQ representa Neossolo Quartzarênico; OY representa Organossolo Háplico; PVA representa Argissolo Vermelho-Amarelo; GX representa Gleissolo Háplico e RL representa Neossolo Litólico.

Pela análise dos resultados separados por classe de solo, primeiramente, observa-se que não foram encontradas áreas plantadas de cana-de-açúcar em Gleissolo Háplico e em Organossolo Háplico, já que ambos os solos estão presentes em apenas 0,695 e 1,311% da área total, respectivamente. Adicionalmente, as ausências desses solos sob cultura da cana-de-açúcar podem ser explicadas pelo fato de que ambos os solos se encontram, normalmente, em várzeas e nas áreas mais baixas e de encostas do terreno; essa região é naturalmente mal drenada e não propícia para o cultivo de cana-de-açúcar. Já para as outras coberturas vegetais, o Organossolo Háplico foi o solo em que houve a menor média de evapotranspiração entre os anos estudados. Isso pode ser explicado pelo fato desse referido solo ter conhecidamente grandes restrições ao uso agrícola e ao desenvolvimento de árvores por sua drenagem ser muito lenta. Desta forma, a vegetação de gramíneas típicas dessas áreas deve ter a ET real reduzida, pois a má aeração afeta o desenvolvimento de outros vegetais.

Na sequência, avaliou-se a evapotranspiração real nos tipos de solo presentes na cultura da cana-de-açúcar, sendo que, para os valores de ET mensais, não foi possível estabelecer um padrão de variação constante entre os solos estudados. Em alguns meses mais frios, como, por exemplo, julho de 2013, todos os solos apresentaram ET de 64 a 65 mm.mês⁻¹, enquanto que em meses mais quentes, como fevereiro de 2014, o solo em que a cana-de-açúcar apresentou a maior estimativa de ET real resultou em 140 mm.mês⁻¹ (Latossolo Vermelho), enquanto o menor valor nesse mês se apresentou para o Neossolo Quartzarênico.

Infelizmente, sem uma análise química e física do solo, não é possível obter uma explicação exata para cada um dos resultados, já que esses foram obtidos de um satélite a 800 km do alvo, além de serem resultados médios, representando grandes áreas.

Já quanto aos valores das médias anuais, obteve-se um padrão entre os tipos de solo quando comparados os dois anos da cana-de-açúcar. O Argissolo Vermelho e o Neossolo Litólico apresentaram os maiores valores de evapotranspiração nos dois anos. Já o Neossolo Quartzarênico foi o solo que apresentou a menor média dos dois anos. Esse resultado pode ser explicado pelo fato desse último solo não conseguir reter água no seu interior para servir de fonte armazenada para as raízes da cultura, como os outros solos mais argilosos.

Para as áreas com floresta plantada, observou-se que o Latossolo Vermelho apresentou uma grande diferença de evapotranspiração em relação aos outros solos, principalmente em relação ao Organossolo Háplico (em torno de 80 mm.ano⁻¹), o que resulta em uma grande diferença de consumo de água. Neste caso, observa-se que, possivelmente, o Latossolo Vermelho, por ser um solo teoricamente mais antigo, intemperizado e plano, pode acumular mais água, permitindo, assim, à floresta plantada consumir mais água e apresentar uma maior evapotranspiração, auxiliando no seu desenvolvimento estrutural e de biomassa.

Já para a mata nativa, o solo que propiciou a maior evapotranspiração real anual média durante os dois anos estudados foi o Neossolo Litólico, seguido pelo Latossolo Vermelho-Amarelo.

O último parâmetro analisado no presente trabalho foram as fitofisionomias (biomas brasileiros). Assim, foram separadas as áreas com os biomas brasileiros existentes na região do presente estudo (Cerrado e Mata Atlântica).

Os biomas foram cruzados com os três usos estudados (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa), gerando-se o mapa de biomas em cada cobertura vegetal (Figura 23).

Figura 23 – Biomas separados por cada cobertura vegetal

A partir do processo realizado na Figura 23, foi possível realizar o cruzamento com todas as estimativas de ET real mensais para os dois anos de estudo, sendo que os resultados, por cobertura vegetal, estão apresentados nas Tabelas de 36 a 38.

Tabela 36 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas por biomas

Mês	Cana-de-açúcar	
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)	
	Biomas	
	Cerrado	Mata Atlântica
abr/13	81,8	82,2
mai/13	60,4	61,4
jun/13	59,7	60,8
jul/13	64,9	65,5
ago/13	63,4	63,0
set/13	85,4	88,9
out/13	94,1	94,5
nov/13	98,8	94,3
dez/13	107,2	107,0
jan/14	111,3	114,3
fev/14	126,4	136,8
mar/14	108,3	106,5
abr/14	102,5	97,5
mai/14	79,6	87,8
jun/14	98,1	110,9
jul/14	64,8	61,4
ago/14	72,1	71,6
set/14	56,2	55,7
out/14	67,6	63,6
nov/14	75,4	72,8
dez/14	127,4	121,8
jan/15	104,7	100,2
fev/15	95,8	95,4
mar/15	100,5	101,6
Média	87,8	88,1
Desvio-Padrão	21,4	22,3

Tabela 37 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas por biomas

Mês	Floresta Plantada	
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)	
	Biomas	
	Cerrado	Mata Atlântica
abr/13	93,6	94,0
mai/13	70,6	71,1
jun/13	63,9	62,0
jul/13	72,1	72,1
ago/13	80,9	81,5
set/13	109,1	110,2
out/13	125,1	138,1
nov/13	131,3	137,8
dez/13	133,2	135,9
jan/14	133,6	138,9
fev/14	145,8	154,7
mar/14	124,8	121,9
abr/14	128,3	112,3
mai/14	76,9	88,0
jun/14	99,6	116,8
jul/14	75,7	76,4
ago/14	100,0	102,3
set/14	75,7	79,1
out/14	94,5	98,4
nov/14	104,8	112,4
dez/14	144,8	147,7
jan/15	119,6	119,5
fev/15	112,7	115,9
mar/15	109,1	112,1
Média	105,2	108,3
Desvio-Padrão	25,1	26,2

Tabela 38 – Estimativas mensais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas por biomas

Mês	Mata Nativa	
	ET real ajustada total mensal (mm.mês ⁻¹)	
	Biomas	
	Cerrado	Mata Atlântica
abr/13	91,2	87,7
mai/13	69,0	67,8
jun/13	63,2	62,0
jul/13	71,4	71,0
ago/13	79,0	77,7
set/13	103,1	102,6
out/13	122,9	120,1
nov/13	129,8	123,6
dez/13	133,8	131,8
jan/14	133,2	134,6
fev/14	143,9	140,2
mar/14	123,5	119,4
abr/14	121,9	106,9
mai/14	78,5	83,4
jun/14	104,5	111,5
jul/14	70,5	63,5
ago/14	91,1	83,3
set/14	71,3	68,3
out/14	91,4	82,2
nov/14	101,5	97,5
dez/14	146,2	143,9
jan/15	114,0	105,2
fev/15	111,9	108,3
mar/15	109,3	108,5
Média	103,2	100,0
Desvio-Padrão	25,5	25,2

Obtiveram-se também os valores de ET real anual para cada uso, separados por biomas, nas Tabelas de 39 a 41.

Tabela 39 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a cana-de-açúcar, separadas por biomas

Ano	Cana-de-açúcar	
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)	
	Biomas	
	Cerrado	Mata Atlântica
2013/14	1061,8	1075,1
2014/15	1044,8	1040,2
Média	1053,3	1057,7

Tabela 40 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a floresta plantada, separadas por biomas

Ano	Floresta Plantada	
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)	
	Biomas	
	Cerrado	Mata Atlântica
2013/14	1284,0	1318,0
2014/15	1241,7	1280,9
Média	1262,9	1299,5

Tabela 41 - Estimativas anuais de ET real realizadas pela metodologia proposta para a mata nativa, separadas por biomas

Ano	Mata Nativa	
	ET real ajustada total anual (mm.ano ⁻¹)	
	Biomas	
	Cerrado	Mata Atlântica
2013/14	1263,9	1238,5
2014/15	1212,1	1162,5
Média	1238,0	1200,5

Pela análise dos resultados de ET real mensal, para as três coberturas vegetais estudadas, observa-se que não há um padrão de resultados entre os dois biomas para todos os meses, sendo que, em determinados meses, para uma mesma cobertura vegetal, a ET foi maior em área de Cerrado, enquanto em outros meses os resultados em Mata Atlântica se apresentaram maiores.

Mesmo assim, pela análise dos resultados de ET real mensal nas coberturas vegetais localizadas em zona de Cerrado e de Mata Atlântica, observa-se que, para a cana-de-açúcar e para as áreas de floresta plantada, a evapotranspiração foi maior nas áreas localizadas na Mata Atlântica para a maior parte dos meses analisados. Já

para as matas nativas, o resultado foi o contrário, tendo a ET apresentado maiores valores no bioma Cerrado, para a maioria dos meses.

Já quanto aos resultados de ET real anual para as coberturas vegetais estudadas, pode ser observado que, para a cultura da cana-de-açúcar, a variação da média dos dois anos em relação aos dois biomas foi de apenas 4 mm.ano⁻¹; esse valor pode ser considerado como irrisório para avaliar se houve alguma diferença entre os biomas, tendo em vista que se trata de uma estimativa.

Porém, quando se compara floresta plantada com mata nativa, os resultados do presente estudo apresentaram a média de ET real entre os dois anos estudados com variação em torno de 40 mm.ano⁻¹; a primeira cobertura consumiu mais água no bioma Mata Atlântica, enquanto o segundo tipo de vegetação estudado consumiu mais água no bioma Cerrado.

Isso pode ser explicado pelo fato do Cerrado ser um bioma do tipo savana, que normalmente apresenta menor umidade relativa do ar e maior temperatura média do ar, quando comparado à Mata Atlântica. Segundo Lemos Filho et al. (2010), de maneira geral, para uma dada região, quanto maior a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e vento e quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser, também, a taxa de evapotranspiração (CUNHA; ESCOBEDO, 2003; EVANGELISTA; PEREIRA, 2003; FIETZ; FISCH, 2009).

Assim, como a floresta plantada normalmente se apresenta, especialmente, mais aglutinada que a mata nativa e, que, a segunda, na maior parte da região estudada, se localiza ao longo dos cursos d'água, a floresta plantada pode acabar criando microclimas e possuir idades diferentes de plantio, as quais, cada uma, pode apresentar uma ET diferenciada, contrariando o aspecto geral da teoria comentada por Lemos Filho et al. (2010), uma vez que essa cobertura apresentou maior evapotranspiração média nos dois anos estudados nas áreas locadas no bioma Mata Atlântica.

Já quanto à mata nativa, que é uma cobertura vegetal perene e estabilizada no local, houve uma maior evapotranspiração média nos dois anos no bioma Cerrado. Esse resultado pode ser explicado pelo fato da mata nativa estar mais espalhada pela região e, portanto, mais propensa a seguir a relação ambiente e clima citada por Lemos Filho et al. (2010).

Adicionalmente, decidiu-se comparar os resultados das médias anuais de ETr de todos os parâmetros estudados para cada cobertura vegetal, a fim de se determinar em qual situação uma certa cobertura apresenta uma tendência de menor ou maior consumo de água.

Assim, obteve-se a combinação da menor e da maior ETr anual média entre os anos estudados para a cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa nas Tabelas de 42 a 44.

Tabela 42 – Resultados dos parâmetros de menor e de maior ETr anual média para a cana-de-açúcar

Classes	Cana-de-açúcar	
	Menor ETr anual média	Maior ETr anual média
Altitude	800-900m	> 1000m
Declividade	0-3%	> 18%
Faces de exposição	Plano	Oeste
Solos	Neossolo Quartzarênico	Neossolo Litólico
Biomassas	Cerrado	Mata Atlântica

Tabela 43 – Resultados dos parâmetros de menor e de maior ETr anual média para a floresta plantada

Classes	Floresta Plantada	
	Menor ETr anual média	Maior ETr anual média
Altitude	800-900m	900-1000m
Declividade	0-3%	> 18%
Faces de exposição	Plano	Oeste
Solos	Organossolo Háplico	Latossolo Vermelho
Biomassas	Cerrado	Mata Atlântica

Tabela 44 – Resultados dos parâmetros de menor e de maior ETr anual média para a mata nativa

Classes	Mata Nativa	
	Menor ETr anual média	Maior ETr anual média
Altitude	< 600m	> 1000m
Declividade	0-3%	> 18%
Faces de exposição	Plano	Norte
Solos	Organossolo Háplico	Neossolo Litólico
Biomassas	Mata Atlântica	Cerrado

Analisando-se os dados das Tabelas de 42 a 44, observa-se que, para a cana-de-açúcar, a configuração dos parâmetros em conjunto que apresentou a

menor ETr anual média foram os talhões locados na faixa de altitude entre 800 e 900 metros, com declividade baixa (de 0 a 3%), face de exposição plana, implantado em Neossolo Quartzarênico e em área de Cerrado; já os talhões que apresentaram maior demanda por água se localizaram em áreas com altitude média de mais de 1000 metros, maior declividade possível (maior que 18%), face de exposição do terreno à oeste, sobre Neossolo Litólico e em Mata Atlântica.

As áreas de floresta plantada apresentaram resultados semelhantes à cana-de-açúcar, alterando-se apenas o solo no qual obteve-se um menor consumo de água (Organossolo Háplico). Já para as áreas de maior consumo, aquelas localizadas em altitudes entre 900 e 1000 metros e em Latossolo Vermelho apresentaram maiores médias anuais de ETr durante os dois anos avaliados.

Já a mata nativa apresentou algumas variações quanto às áreas de menor e maior consumo anual médio, quando comparada aos outros dois usos. Para as áreas onde houve a menor demanda por água, destacaram-se regiões abaixo de 600 metros de altitude, declividade 0 a 3%, face de exposição plana, Organossolo Háplico e em área de Mata Atlântica. Quando observadas as áreas onde houve um maior consumo de água, obtiveram-se áreas com altitude maior de 1000 metros, declividade maior que 18% e voltadas para o norte, em Neossolo Litólico e região de Cerrado.

Como se observa nas Tabelas de 42 a 44, apenas o parâmetro declividade apresentou igualdade de classes entre os usos, tanto para a menor ETr anual média quanto para a maior, tendo apresentado a tendência de maior consumo de água nas regiões com maior declividade. Cana-de-açúcar e floresta plantada apresentaram menor demanda por água em terrenos planos, em altitudes médias de 800 a 900 metros e em região de Cerrado. A mata nativa também apresentou menor consumo em regiões planas, porém mostrou uma demanda menor de água em áreas com altitude ainda mais baixas (600 metros) e em região de Mata Atlântica. Já quanto aos tipos de solo, houve uma maior variação entre as coberturas vegetais estudadas, sendo que para a floresta plantada e para a mata nativa, o menor consumo de água foi observado para o Organossolo Háplico. Já a cana-de-açúcar apresentou a menor demanda de água quando plantada em áreas com Neossolo Quartzarênico.

Por fim, como observaram-se algumas variações, tanto qualitativas quanto quantitativas, entre os resultados envolvendo todos os parâmetros e coberturas vegetais estudadas, sugere-se que os dados obtidos no presente trabalho possam servir de base para novas análises estatísticas entre os aspectos analisados e que, possivelmente, uma árvore de regressão multivariada possa auxiliar na obtenção de novas conclusões, quando comparados todos os dados mensais dos parâmetros espacializados em conjunto.

3.4 Conclusão

A partir das análises realizadas utilizando as três coberturas vegetais propostas no presente estudo, para diferentes parâmetros temporais e espaciais, verificou-se que, temporalmente, tanto analisando os resultados mensais e sazonais quanto os anuais, a cana-de-açúcar consumiu menos água (obteve uma ET real menor) do que a floresta plantada e a mata nativa, sendo que essas duas últimas coberturas vegetais apresentaram resultados de ET real anual próximos.

Já para as análises espaciais, verificou-se que, quanto maior a altitude ocupada pela cobertura vegetal no terreno, maiores foram os valores absolutos de evapotranspiração real. Já quanto à declividade, concluiu-se que existe influência da declividade do terreno na evapotranspiração real, sendo que, para todas as coberturas vegetais estudadas (cana-de-açúcar, floresta plantada e mata nativa), quanto maior a declividade, maior foi a ET real anual estimada.

Quanto às faces de exposição do terreno, concluiu-se que, a face plana foi a que menos demandou água, para as três coberturas estudadas. Especificamente, para a mata nativa, as outras faces (norte, sul, leste e oeste) apresentaram resultados de ET real anual semelhantes entre elas, concluindo-se que, para essa cobertura, não houve efeito das faces. Já para a floresta plantada, nos resultados anuais, as faces norte e oeste consumiram mais água. Por fim, a cultura da cana-de-açúcar apresentou maiores valores de ET real na face oeste, sendo essa a face que demandou uma maior quantidade de água para as plantas na região do estudo; portanto, tal face de exposição pode ser possivelmente evitada no planejamento agrícola na área.

Para os solos estudados, a cana-de-açúcar apresentou um maior consumo de água quando plantada em Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico. Para as

áreas de floresta plantada, concluiu-se que, quando plantadas em solo Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico, estas apresentaram um maior valor de ET real anual. Já para a mata nativa, o solo que propiciou a maior evapotranspiração real anual média dos dois anos estudados foi o Neossolo Litólico, seguido pelo Latossolo Vermelho-Amarelo.

Por fim, para a cultura da cana-de-açúcar, não se verificam diferenças na estimativa de ET real anual quando plantadas em áreas de Cerrado ou de Mata Atlântica. Porém, quando se trata de floresta plantada e de mata nativa, os resultados do presente estudo apresentaram média de ET real dos dois anos estudados com variação em torno de 40 mm.ano^{-1} ; contudo, a primeira cobertura consumiu mais água no bioma Mata Atlântica, enquanto que a segunda vegetação estudada consumiu mais água no bioma Cerrado.

Referências

ALLEN, R.G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator; version 3.1. Kimberly: University of Idaho Research and Extension Center, 2008. 61 p.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 35-91, 1994.

ANDERSON, M.C.; NEALE, C.M.U.; LI, F.; NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; JAYANTHI, H.; CHAVEZ, J. Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, p. 447-464, 2004.

BARSI, J.A.; BARKER, J.L.; SCHOTT, J.R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 16., 2003, Toulouse. **Proceedings...** Disponível em: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi_IGARSS03.PDF>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BARSI, J.A.; SCHOTT, J.R.; PALLUCONI, F.D.; HOOK, S.J. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. **Proc. of SPIE**, Bellingham, v.5882, p. 1-7, 2005. Disponível em: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi_AtmCorr_SPIE05.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2016.

BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212/213, p. 198-212, 1998.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BEZERRA, J.M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. 2013. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <www.pgea.ufrpe.br/downloads/dissertacoes/JoelBezerra.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BIRKELAND, W.P. **Soils and Geomorphology**. New York: Oxford University Press, 1999. 448 p.

BORLAUG, N.E. Feeding a world of 10 billion people: the miracle ahead. In: BAILEY, R. (Ed.). **Global warming and other eco-myths**. Roseville: Competitive Enterprise Institute, 2002. p. 29-60.

BRUNSELL, N.A.; GILLIES, R.R. Incorporating surface emissivity into a thermal atmospheric correction. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 68, n. 12, p. 1263-1269, 2002.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications**. Houten: Springer, 1982. 299 p.

BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; SWAROWSKY, A.; TODESCHINI, R. Espacialização da evapotranspiração potencial mensal e anual na bacia hidrográfica do rio Vacaraí – RS, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 275-284, 2014.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998. 286 p.

CASTRO, P.; LOPES, J.D.S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa: CPT, 2001. 84 p.

CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F. Alterações micrometeorológicas causadas pela estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 15-26, 2003.

EITEN, G. Delimitação do conceito de Cerrado. **Arquivos do Jardim Botânico**, Rio de Janeiro, v. 21, p. 125-134, 1977.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS professional GIS for the desktop: version 10**. Redlands, 2010.

EVANGELISTA, A.W.P.; PEREIRA, G.M. Avaliação de dois tipos de evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência, no interior de casa de vegetação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1348-1353, 2003.

FERREIRA, A.S.; MEIRELLES, M.S.P. Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na Mesorregião do Sul Goiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5576-5583.

FERREIRA, F.P.; AZEVEDO, A.C.; WAPPLER, D.; KANIESKI, A.J.; GIRELLI, D.; PEDROTTI, J. Exposição solar e propriedades do solo em Santa Maria – RS. **R. bras. Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 3, p. 377-381, 2005.

FIETZ, C.R.; FISCH, G.F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 449-453, 2009.

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

GARRATT, J.R.; HICKS, B.B. Momentum, heat and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Reading, v. 99, p. 680–687, 1973.

GELI, H.M.E. **Modeling spatial surface energy fluxes of agricultural and riparian vegetation using remote sensing**. 2012. 182 p. Thesis (Ph.D. in Civil and Environmental Engineering) – Utah State University, Logan, 2012. Disponível em: <<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2158&context=etd>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

GELI, H.M.E.; NEALE, C.M.U. Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface (SETMI). **IAHS Proceedings and Reports**, Wallingford, v. 352, p. 171-174, 2012.

HERNANDEZ, F.B.T.; NEALE, C.M.U.; TAGHVAEIAN, S.; TEIXEIRA, A.H. de C. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5209-5216.

HUNCKLER, R.V.; SCHAETZL R.J. Spodosol development as affected by geomorphic aspect. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, p. 1105-1115, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de biomas do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Murais/biomas_pdf.zip>. Acesso em: 03 maio 2016.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Revista Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 94, p. 13–29, 1999.

_____. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surface. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 847–854, 2000.

KUSTAS, W.P.; ZHAN, X.; SCHMUGGE, T.J. Combining optical and microwave remote sensing for mapping energy fluxes in a semiarid watershed. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 64, p. 116–131, 1998.

KUSTAS, W.P.; LI, F.; JACKSON, T.J.; PRUEGER, J.H.; MACPHERSON, J.L.; WOLDE, M. Effects of remote sensing pixel resolution on modelled energy flux variability of croplands in Iowa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, p. 535–547, 2004.

LANDIS, R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LEIVAS, J.F.; ANDRADE, R.G.; NOGUEIRA, S.F.; BOLFE, E.L. Estimativa da evapotranspiração em áreas com diferentes características ambientais utilizando o algoritmo SEBAL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SIGERA, 2011. p. 1-5.

LEMO FILHO, L.C.A.; CARVALHO, L.G.; EVANGELISTA, A.W.P.; ALVES JÚNIOR, J. 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.

LI, F.; KUSTAS, W.P.; PRUEGER, J.H.; NEALE, C.M.U.; JACKSON, T.J. Utility of remote sensing based two-source energy balance model under low and high vegetation cover conditions. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 6, n. 6, p. 878–891, 2005.

MARTINS, V.A.; OLIVETTE, M.P.A. Cana-de-açúcar - safra 2013/14 – e fatores climáticos: panorama dos impactos na produtividade nos Escritórios de Desenvolvimento Rural (EDRs) no Estado de São Paulo. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 1-10, 2015.

MELLO, G. de; BUENO, C.R.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 315-322, 2006.

MENEZES, S.J.M.C.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V.P.; GLERIANI, J.M.; ANDRADE, R.G. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 6, p. 491-503, 2009.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 6, 1964, Swansea. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.

MOREIRA, L.C.J.; DURAND, B.J.; TEIXEIRA, A.S.; ANDRADE, E.M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1148-1159, 2010.

NEALE, C.M.U.; GELI, H.M.E.; KUSTAS, W.P.; ALFIERI, J.G.; GOWDA, P.H.; EVETT, S.R.; PRUEGER, J.H.; HIPPS, L.E.; DULANEY, W.P.; CHAVEZ, J.L.; FRENCH, A.N.; HOWELL, T.A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, Oxford, v. 50, p. 152-161, 2012.

NEVES, B.V.B.; VERSIANI, B.R.; RODRIGUES, P.C.H. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 87-102, 2007.

NORMAN, J.M.; KUSTAS W.P.; HUMES, K.S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Boston, v. 77, p. 263–293, 1995.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo; EMBRAPA Solos, 1999. 64 p.

OLIVEIRA, J.S. **Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solo em ambiente SIG**. 2012. 103 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-31052012-075705>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia agrícola**: edição revista e ampliada. Piracicaba: ESALQ, 2007. 202 p. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf>. Acesso em: 02 maio 2016.

PEREIRA, E.Q. **Integração de parâmetros morfodinâmicos e adequação de uso das terras para o ordenamento territorial da bacia do rio Muricizal – Tocantins.** 2000. 106 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/pgsere/Pereira-E-Q-2000/publicacao.pdf> Acesso em: 26 abr. 2016.

RIBEIRO, J.F.; SANO, S.M.; SILVA, J.A. da. Chave preliminar de identificação dos tipos fisionômicos da vegetação do Cerrado. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 32., 1981, Teresina. **Anais...** Brasília: Sociedade Botânica do Brasil, 1981. p. 124-133.

ROSENFELD, G.H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 52, n. 2, p. 223-227, 1986.

RUHOFF, A.L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais.** 2011. 162 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/32468/000785522.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2016.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo.** Brasília, 2013. 188 p.

SILVA, B.B. da; BEZERRA, M.V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

SILVA, B.B. da; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SOARES, F.S.; ALMEIDA, R.K.; RUBIM, I.B.; BARROS, R.S.; CRUZ, C.B.M.; MELLO, G.V.; BAPTISTA NETO, J.A. Análise comparativa da correção atmosférica de imagem do Landsat 8: o uso do 6S e do ATCOR2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 1821-1828.

TANGERINO, D.F.; LOURENÇO, R.T. Comparação da exatidão de métodos de classificação supervisionada e não supervisionada a partir do índice kappa na microbacia do Ribeirão Duas Águas em Botucatu/SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 4093-4100.

TIMMERMANS, W.; KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C.; FRENCH, A.N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 108, p. 369-384, 2007.

TONELLO, K.C.; DIAS, H.C.T.; SOUZA, A.L.; ALVARES, C.A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F.P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

TROPPEMAIR, H.; MACHADO, M.L.A. **Variação da estrutura da mata galeria na bacia do Rio Corumbataí (SP) em relação à água do solo, do tipo de margem e do traçado do rio**. São Paulo: USP, Instituto de Geografia, 1974. 22 p. (Série Biogeografia, 8).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8 (L8) data users handbook**: version 1.0. 2015. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

_____. **User guide**: Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) On Demand Interface; version 3.1. 2016. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/espa_odi_userguide.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2016.

XAVIER, A.C.; VETTORAZZI, C.A.; MACHADO, R.E. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/LANDSAT. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 421-430, 2004.

ANEXOS

ANEXO A – Dados de cada uso e ocupação do solo presente na área de estudo para serem utilizados na interface SETMI

Uso	Kcbini	Kcbmid	Kcbend	Dia	Lini	Ldev	Lmid	Llast	Root Depth (m)	Min Cover Height (m)	Max Cover Height (m)	p
Floresta	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1	362	2	0,1	18	0,5
Mata Nativa	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1	362	2	0,1	12	0,5
Cana-de-açúcar	0,15	1,2	0,7	300	50	70	220	140	1,5	0,1	3	0,65
Solo exposto	0,15	0,15	0,15	1	1	1	1	362	0,1	0,1	0,1	0,5
Pastagem	1	1	1	1	1	1	1	362	1	0,1	0,5	0,5
Área construída	0,15	0,15	0,15	1	1	1	1	362	0,1	0,1	0,1	0,5
Outros	0,15	1,2	0,15	1	30	30	270	34	1	0,1	3	0,5
Água	0,15	0,15	0,15	1	1	1	1	362	0,1	0,1	0,1	0,5

Sendo: Kcbini o Kcb inicial da cultura; Kcbmid o Kcb de estágio intermediário da cultura; Kcbend o Kcb final da cultura; Lini o período inicial de crescimento da cultura, em dias; Ldev o período de desenvolvimento da cultura, em dias; Lmid o período de crescimento intermediário da cultura, em dias; Llast o período final do desenvolvimento da cultura, em dias; p a fração de depleção.

ANEXO B – Dados meteorológicos interpolados (INMET) de cada data, hora e minuto de passagem do satélite Landsat 8 nos meses estudados para serem utilizados na interface SETMI

Mês	Ta (°C)	U (m/s)	Rs (w/m ²)	Ea (kPa)	ETo (mm/h)	ETref (mm/d)	Zwind (m)	Atm press (kPa)	Zt (m)
abr/13	21,61	4,04	753,8	1,51	0,484	4,02	10	95,266	2
mai/13	22,82	0,8	586,2	2,01	0,377	2,81	10	95,648	2
jun/13	18,45	0,78	604,1	1,61	0,35	2,56	10	95,663	2
jul/13	23,45	1,16	587,7	1,65	0,385	2,9	10	95,505	2
ago/13	23,15	1,25	642,3	1,61	0,421	3,36	10	95,367	2
set/13	25,72	1,95	810,3	1,28	0,574	4,95	10	95,688	2
out/13	28,34	3,08	939,1	1,94	0,708	5,85	10	95,037	2
nov/13	32,76	2,29	920,0	1,87	0,741	6,73	10	94,561	2
dez/13	26,29	0,87	987,9	1,94	0,704	5,6	10	94,782	2
jan/14	31,95	2,44	946,5	1,60	0,761	6,31	10	95,262	2
fev/14	28,64	2,82	797,1	2,11	0,595	5,34	10	95,058	2
mar/14	27,51	1,19	823,2	2,25	0,591	4,95	10	94,985	2
abr/14	27,26	3,87	664,1	2,26	0,493	4,8	10	95,409	2
mai/14	28,03	4,18	409,2	1,49	0,396	2,97	10	94,975	2
jun/14	26,45	2,76	550,6	1,81	0,401	3,61	10	94,919	2
jul/14	23,65	3,65	671,6	1,23	0,483	3,11	10	95,555	2
ago/14	28,81	1,76	711,9	1,13	0,132	1,34	10	95,173	2
set/14	31,62	2,28	840,8	1,15	0,666	4,19	10	95,228	2
out/14	34,39	2,76	830,3	1,05	0,716	5,85	10	95,148	2
nov/14	29,36	3,66	954,2	1,30	0,765	6,11	10	94,814	2
dez/14	25,08	0,9	939,9	1,81	0,651	6	10	95,165	2
jan/15	29,86	3,58	790,2	2,64	0,621	6,08	10	94,955	2
fev/15	31,19	2,43	893,6	2,42	0,692	5,62	10	95,092	2
mar/15	27,76	0,45	654,3	2,62	0,478	4,53	10	95,126	2

Sendo: Ta a temperatura do ar; U a umidade relativa do ar; Rs a radiação solar; Ea a pressão de vapor instantânea; ETo a evapotranspiração de referência instantânea; ETref a evapotranspiração de referência diária; Zwind a altura do anemômetro; Atm press a pressão atmosférica; Zt a altura do medidor de temperatura.