



**JOÃO GABRIEL NOTEL DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO MODELO DE REANÁLISE  
GLDAS/NOAH E OBTENÇÃO DE FLUXOS DE  
ENERGIA A PARTIR DO SEBS, EM MINAS  
GERAIS**

**LAVRAS – MG**

**2015**

**JOÃO GABRIEL NOTEL DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO MODELO DE REANÁLISE GLDAS/NOAH E  
OBTENÇÃO DE FLUXOS DE ENERGIA A PARTIR DO SEBS, EM  
MINAS GERAIS**

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

Orientadora

Dra. Elizabeth Ferreira

Coorientador

Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas

**LAVRAS – MG**

**2015**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Souza, João Gabriel Notel de.

Avaliação do modelo de reanálise GLDAS/NOAH e obtenção  
de fluxos de energia a partir do SEBS, em Minas Gerais / João  
Gabriel Notel de Souza. – Lavras : UFLA, 2015.

103 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de  
Lavras, 2015.

Orientadora: Elizabeth Ferreira.

Bibliografia.

1. ILWIS. 2. MODIS. 3. INMET. I. Universidade Federal de  
Lavras. II. Título.

**JOÃO GABRIEL NOTEL DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO MODELO DE REANÁLISE GLDAS/NOAH E  
OBTENÇÃO DE FLUXOS DE ENERGIA A PARTIR DO SEBS, EM  
MINAS GERAIS**

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

APROVADA em 11 de Fevereiro de 2015.

Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas                      UFLA

Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade                      Embrapa

Dra. Elizabeth Ferreira  
Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2015**

*Aos meus avós João Notel Marques, Carlita Cândida da Silva, José Gabriel de Souza Filho e Maria Eliziária de Souza, e ao nosso grande amigo Frabinho.*

*Aos meus pais Donizetti Durval de Souza e Maria Lina Notel de Souza.*

*À minha irmã Érica Christiane Notel de Souza e ao meu sobrinho Pedro de Souza Benfica.*

*Aos amigos de toda a vida: André Luiz de Brito, Felipe Dias da Silva, Guilherme Coutinho da Gama, José Henrique do Lago Júnior, Rafael Krauss Renda e Robson Begalli.*

*E ao amor da minha vida, Aline Martins Moreira.*

***Dedico.***

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

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

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo CAG-APQ 01560-12.

À minha orientadora, professora Dra. Elizabeth Ferreira, e ao meu coorientador, professor Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas, pela confiança, pelos ensinamentos e pela orientação.

Ao professor Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade, pela contribuição e por aceitar participar como membro na banca examinadora.

Ao professor Dr. Luiz Gonsaga Carvalho, pelas valiosas contribuições e por participar como membro da banca do projeto de qualificação.

À *Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC)* que arquivam e distribuem os dados do produto GLDAS usados neste trabalho como parte da missão da *NASA's Earth Science Division*.

Ao INMET pelos dados de 46 estações meteorológicas localizadas em Minas Gerais e entorno.

À *NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)* e à *USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center* pela disponibilização das imagens e dos produtos MODIS usados neste trabalho e pela manutenção do sítio<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Disponível em: <[https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access)>. Acesso em: 21 jan. 2015.

A Wim Koolhoven e Jelle Wind e a todos que colaboraram com o desenvolvimento do *Software* ILWIS, fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, Otávio, Christiane, Mariana, Bruno, Dian, Delorme, Vânia e Alexssandra, pelos diversos auxílios e companheirismo.

E à Aline Martins Moreira, por ser constante fonte de inspiração e ajuda.

## RESUMO

Neste trabalho analisou-se um modelo que estima os fluxos de energia na superfície do solo e a evapotranspiração atual diária, no estado de Minas Gerais durante o ano de 2010. O fluxo de calor sensível, a radiação solar e a evapotranspiração atual diária foram estimados, por meio do modelo *Surface Energy Balance System* (SEBS), que é baseado na equação de balanço de energia, utilizando dados de imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), do modelo de reanálise *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), das estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do *software* de domínio público *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS). Foram avaliadas, também, algumas variáveis que são dados de entrada do SEBS, sendo a umidade específica próxima à superfície, à velocidade do vento próximo à superfície, à temperatura do ar próximo à superfície e à pressão na superfície, derivadas do produto GLDAS/Noah. Para isso, foi criado um *batch file* que permitiu a extração de informação de 11680 imagens e o cálculo da média diária e mensal dessas variáveis. Os resultados obtidos foram comparados com dados de 46 estações do INMET, por meio de correlação, erro médio sistemático e raiz média quadrática do desvio. A presença de nuvens, durante o ano de 2010, sobre a área de estudo, permitiu o uso do SEBS em apenas dez dias e foram gerados mapas de evapotranspiração atual diária, radiação solar e fluxo de calor sensível, para os dias 23/02, 22/06 e 27/08, que melhor permitiram a visualização da distribuição espacial dessas variáveis.

Palavras-chave: ILWIS. MODIS. INMET.

## ABSTRACT

In this study, we analyzed a model that estimates energy flows on soil surfaces and current daily evapotranspiration in the state of Minas Gerais, Brasil, in 2010. The flow of sensible heat, solar radiation and current daily evapotranspiration were estimated by means of the Surface Energy Balance System (SEBS), based on the energy balance equation, using image data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, Global Land Data Assimilation System (GLDAS), *Instituto Nacional de Meteorologia* (INMET) and Integrated Land and Water Information System (ILWIS) freeware. We also evaluated other SEBS input data variables: near surface specific humidity, near surface wind speed, near surface air temperature and surface pressure, originated of the GLDAS/Noah product. To do this, we created a batch file that allowed the extraction of information from 11,680 images and the calculation of the daily and monthly mean of each variable. The results obtained were compared to the data of 46 INMET meteorological stations using correlation coefficient, mean bias error and root mean square error. The presence of clouds over the study area allowed for the use of SEBS on only ten days, generating current daily evapotranspiration, solar radiation and sensible heat flow maps for days 02/23, 06/22 and 08/27, which better allowed the visualization of the spatial distribution of these variables.

Keywords: ILWIS. MODIS. INMET.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Comparação entre as estimativas feitas pelo SEBS e a fração evaporativa medida em campo para três áreas em Barrax.....	30
Figura 2	Visualização da variável umidade específica do produto GLDAS no aplicativo BEAM VISAT.....	45
Figura 3	Visualização dos parâmetros das bandas 1 e 2 da imagem MODIS MOD021KM apresentada pelo o software HDFView .....	47
Figura 4	Fluxograma que indica todos os scripts gerados pelo GLDAS_Script_para_o_ILWIS.bat. ....	49
Figura 5	Apresentação do batch file, criado para gerar scripts para a formatação do produto GLDAS .....	50
Figura 6	Passos para a execução do roteiro (script) de formatação do produto GLDAS .....	51
Figura 7	Etapas do pré-processamento dos dados de entrada para o cálculo do SEBS implementado no ILWIS.....	53
Figura 8	Interface da janela de entrada de dados do SEBS, implementado no software ILWIS .....	59
Figura 9	Correlação entre as médias diárias de umidade específica registradas pelo GLDAS/Noah com a umidade específica calculada por meio da equação de Penman-Monteith-FAO com dados das estações do INMET.....	64
Figura 10	Valores de correlação, durante o ano de 2010, entre a umidade específica registrada pelo o GLDAS e a umidade específica, calculada com a equação Penman-Monteith-FAO, a partir de dados das estações do INMET .....	65
Figura 11	Umidade específica obtida do GLDAS/Noah, da estação do INMET e o erro, em Caetité – BA, para o ano de 2010 .....	66

Figura 12	Umidade específica obtida do GLDAS/Noah, da estação do INMET e o erro, em Pirenópolis – GO, durante o ano de 2010.....	67
Figura 13	Dados de umidade específica em Frutal – MG, com valores obtidos do produto GLDAS/Noah, da estação do INMET e o erro .....	68
Figura 14	Comportamento do RMSE para a variável Qair, durante o ano de 2010, com o desvio médio do erro menor entre os meses de junho e outubro de 2010 .....	69
Figura 15	Correlação das médias mensais do Qair entre o GLDAS/Noah e as estações do INMET .....	70
Figura 16	Correlação entre médias diárias de velocidade do vento do produto GLDAS/Noah e das estações do INMET para o ano de 2010, com as cidades do Sul de Minas e Campos das Vertentes com valores de R próximos de zero.....	71
Figura 17	Dados de velocidade do vento em Pirenópolis – GO, durante o ano 2010 .....	72
Figura 18	Valores de velocidade do vento em Caetité - BA. As lacunas representam dias em que não houve registro pela estação meteorológica.....	73
Figura 19	Correlação mensal de velocidade de vento, comparando os dados do GLDAS/Noah com os dados das estações do INMET....	74
Figura 20	Frequência relativa da velocidade do vento registrada pelas estações do INMET na região de estudo, durante o ano de 2010.....	75
Figura 21	Correlação entre as médias diárias de temperatura do ar do produto GLDAS/Noah e das estações do INMET para o ano de 2010 .....	76

Figura 22	Varição da correlação entre os dados do produto GLDAS/Noah e as estações do INMET para a média diária da temperatura durante o ano de 2010 .....	77
Figura 23	Gráfico dos valores da temperatura em Franca – SP, cidade que apresentou o menor valor de correlação entre o produto GLDAS/Noah e a estação do INMET dentre as cidades estudadas durante o ano de 2010 (0,3429). Os valores de MBE e RMSE foram de -0,75 °C e 2,83 °C, respectivamente .....	78
Figura 24	Erro médio sistemático da temperatura do ar próxima à superfície no ano de 2010 .....	79
Figura 25	Varição do erro médio sistemático da pressão superficial entre o GLDAS e as estações do INMET no ano de 2010 .....	80
Figura 26	Gráfico exemplificando o comportamento tipicamente estável da pressão superficial. Aqui são apresentados os dados de Capinópolis – MG .....	81
Figura 27	Exemplo do comportamento constante do erro do PSurf. Dados referentes a Barbacena – MG .....	82
Figura 28	Mapa de evapotranspiração atual diária do dia de 23/02, em mm/d .....	83
Figura 29	Radiação solar instantânea para o dia 23/02, e Watts por metro quadrado .....	84
Figura 30	Fluxo de calor sensível, em $W/m^2$ , do dia 23/02 .....	85
Figura 31	Evapotranspiração atual diária do dia 22/06, em mm/d .....	86
Figura 32	Evapotranspiração atual diária calculada pelo SEBS, do dia 27/08, em mm/d .....	86
Figura 33	Fluxo de calor sensível, do dia 22/06, em $W/m^2$ .....	87
Figura 34	Fluxo de calor sensível registrado no dia 27/08, em $W/m^2$ .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros do GLDAS-2 Noah.....	33
Tabela 2	Estações meteorológicas do INMET, localizadas no estado de Minas Gerais e seu entorno, com as porcentagens de dias que possuem dados disponíveis para temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e pressão, durante o ano de 2010.....	39
Tabela 3	Data, hora e número de cidades avaliadas das imagens MODIS, livres de interferência de nuvens, no estado de Minas Gerais e seu entorno, durante o ano de 2010 .....	41
Tabela 4	As bandas dos produtos MODIS, usados nesse trabalho (MOD021KM, MOD03, MOD04_L2 e MOD07_L2) que são dados de entrada do modelo SEBS.....	42
Tabela 5	Valores estimados de ozônio, em atm cm, usados como dados de entrada no modelo SEBS .....	43
Tabela 6	Valores médios de horas de brilho solar usados como dado de entrada do modelo SEBS .....	60

## ANEXO A

Tabela 1	Valores de R, MBE e RMSE para as médias diárias de Pressão na Superfície (PSurf ), Temperatura do Ar Próximo à Superfície (Tair), Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair) e Velocidade do Vento Próximo à Superfície (Wind).....	98
Tabela 2	Valores de R, MBE e RMSE para as médias mensais de Pressão na Superfície (PSurf ), Temperatura do Ar Próximo à Superfície (Tair), Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair) e Velocidade do Vento Próximo à Superfície (Wind).....	101

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
2	OBJETIVOS .....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
3.1	Água na produção agrícola.....	18
3.2	Evapotranspiração.....	19
3.3	Modelos de estimação da evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto.....	24
3.4	<i>Surface Energy Balance System (SEBS)</i> .....	25
3.5	Modelo de reanálise GLDAS .....	31
3.6	Incertezas dos produtos derivados do sensoriamento remoto e do Sistema de Informação Geográfica .....	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
4.1	Área de estudo.....	37
4.2	Fontes de dados.....	37
4.2.1	GLDAS.....	37
4.2.2	INMET .....	38
4.2.3	MODIS .....	40
4.2.4	Ozônio .....	42
4.3	Softwares.....	43
4.3.1	ILWIS .....	44
4.3.2	BEAM VISAT .....	44
4.3.3	<i>MODIS Swath Tool</i> .....	46
4.3.4	HEG .....	46
4.3.5	HDFView.....	46
4.3.6	GDAL.....	47
4.3.7	GLDAS_Script_para_o_ILWIS.bat.....	48
4.4	Estimativa da evapotranspiração a partir do modelo SEBS .....	51
4.5	Critérios de avaliação .....	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1	GLDAS.....	63
5.1.1	Qair .....	64
5.1.2	Wind .....	71
5.1.3	Tair .....	76
5.1.4	PSurf .....	79
5.2	SEBS.....	82
6	CONCLUSÃO.....	89
	REFERENCIAS.....	90
	ANEXO .....	97

## 1 INTRODUÇÃO

O Estado de Minas Gerais é muito relevante no cenário nacional, dentro do contexto de recursos hídricos, pois nele estão localizadas quatro nascentes de importantes regiões hidrográficas para o Brasil: São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Paraná. As principais atividades econômicas de MG são diretamente ligadas à água, como mineração e siderurgia. No turismo, diversas atrações são dependentes da água, como a represa de Furnas, o circuito das águas no Sul de Minas e cachoeiras espalhadas por todo o Estado. No setor hidroelétrico, têm-se como exemplo as usinas de Furnas e Três Marias. No setor agropecuário, Minas Gerais é historicamente destaque na produção de café e na pecuária leiteira. Atualmente, a cultura do café foi expandida para regiões com períodos críticos de deficiência hídrica, como o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba, fazendo-se necessário o uso da irrigação. Na pecuária, cresce o número de produtores que utilizam pastagem irrigada. Na região Norte do Estado, localizado no semiárido, o uso de sistemas de irrigação produz frutas de alta qualidade, com potencial de expansão em razão da topografia plana.

Este contexto de diversidade de interesse no uso econômico da água, adicionado ao fato de que a água é essencial à vida, fundamental para a segurança alimentar da população e o acesso a esse recurso, é um fator de redução da diferença social e um direito do cidadão, gera diversos conflitos pelo uso da água, principalmente, em períodos de escassez. Técnicas de sensoriamento remoto, aplicadas na agricultura irrigada, são uma alternativa para o cálculo do consumo de água na atividade e como fonte complementar no monitoramento de bacias.

O custo do uso de ferramentas de sensoriamento remoto (SR) tem se reduzido muito para o cliente final, em decorrência do aumento de acesso aos programas de Sistema de Informação Geográfica (SIG) livres. O aumento da

capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores, combinado com a redução do custo de equipamentos sofisticados e aumento da eficiência energética, também, contribuíram para o desenvolvimento e o aumento da popularização do SR e permitiu a construção de bancos de dados que podem ser acessados por cientistas e interessados de todo mundo.

O monitoramento ambiental, por meio do SR, auxilia diversos estudos em escala regional e global e é fonte de dados para a reforma e/ou criação de políticas para o uso dos recursos ambientais, como por exemplo, a água, bem como para o melhor entendimento dos mecanismos de mudanças ambientais, como o ciclo hidrológico. Esses conhecimentos podem ser aplicados no aumento da eficiência da agricultura irrigada, por meio do monitoramento da evapotranspiração (ET).

Vários pesquisadores desenvolveram modelos que estimam a evapotranspiração em escala regional a partir de dados de sensoriamento remoto, podendo citar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (BASTIAANSEN et al., 1998), o *Surface Energy Balance Index* (SEBI) (MENENTI; CHOUDHURY, 1993), o *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI) (ROERINK; SU; MENENTI, 2000), o *Surface Energy Balance System* (SEBS) (SU, 2002) e *Mapping ET with Internalized Calibration* (METRIC) (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007). Diferente desses modelos, as técnicas convencionais são representativas somente em escala local.

O SEBS é um modelo que estima ET atual diária em escala regional e gera mapas de balanço de energia da superfície, utilizando dados de entrada derivados do SR como albedo, emissividade da superfície, temperatura da superfície do solo, porcentagem da cobertura vegetal, índice de área foliar entre outros. Os dados de superfície usados nesse modelo podem ser obtidos de estações meteorológicas ou substituídos por modelos de reanálise de dados, como o GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*), que estima dados de

22 diferentes parâmetros, por meio do produto GLDAS/Noah, que é acessado gratuitamente.

O SEBS está implementando *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS), que é um *software* de domínio público, característica que auxilia no avanço dos estudos sobre balanço de energia, no entendimento do ciclo hidrológico e na divulgação e na popularização das ferramentas do sensoriamento remoto aplicado a recursos ambientais.

## **2 OBJETIVOS**

Este trabalho teve como objetivos:

Avaliar as variáveis meteorológicas umidade específica, velocidade do vento, temperatura do ar e pressão na superfície, obtidas do produto de reanálise GLDAS/Noah com dados obtidos pelas estações do INMET. A comparação foi feita em duas escalas de tempo: entre médias diárias e entre médias mensais.

Obter a evapotranspiração atual diária e os fluxos de energia estimados pelo SEBS a partir dos dados do modelo de reanálise GLDAS/Noah.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Água na produção agrícola

Durante o desenvolvimento da humanidade, várias civilizações sobreviveram em ambientes com escassez de água e deixaram heranças importantes para o manejo de água, apesar de não terem enfrentado o problema da escassez de forma tão restritiva como acontece atualmente (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012). No futuro, a disponibilidade de água para a produção agrícola deverá ser menor, em virtude da competição com o setor industrial e doméstico, impondo o desafio de produzir 60% mais de alimento até 2050, comparado com o ano de 2000, para uma população crescente (estimada em 9,2 bilhões) com menor quantidade de água (LI et al., 2013; PFISTER et al., 2011). Soma-se à escassez de água, a redução simultânea da qualidade, o direito de acesso de toda a população e a distribuição justa da água (TEIXEIRA et al., 2009). As técnicas desenvolvidas, durante o último século, têm sido questionadas e substituídas por modernas tecnologias. Manejos importados de diferentes regiões e culturas nem sempre são adaptáveis às condições locais e nem sempre são adotados pelos agricultores (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012).

A água também tem um importante papel no clima da Terra. Além de ter um valor evidente no estado líquido, no estado de vapor é o maior contribuinte para o efeito estufa na atmosfera. O transporte do vapor d'água na atmosfera é o processo primário para a redistribuição da energia nas escalas regionais e globais (VINUKOLLU et al., 2011).

A irrigação é frequentemente citada como um meio de redução de pobreza e aumento da segurança nacional, pois viabiliza a produção de alimentos durante todo o ano e reduz a variabilidade dos preços dos produtos

agrícolas por meio da estabilização da oferta. É também uma técnica facilitadora para a implantação de novas culturas, aumentando a diversificação da produção agrícola. O acesso, a distribuição e o uso da irrigação devem ser disponibilizados, também, aos pequenos agricultores como um meio para a redução da injustiça social (BURNEY; NAYLOR, 2012). Meteorologicamente, a irrigação pode impactar no regime de chuvas, em escala local e regional, já que o aumento da evapotranspiração e o transporte lateral de vapor de água podem influenciar na circulação da atmosfera (LO; FAMIGLIETTI, 2013).

Em Minas Gerais, Ferreira et al. (2011) identificaram 3.781 sistemas de pivôs centrais, totalizando uma área total estimada de 254.875 ha e Cunha et al. (2014) concluíram que, nos próximos 30 anos, existe um aumento na probabilidade de agricultores adquirirem sistemas de irrigação, em todas as regiões do Brasil, com destaque para as regiões Sul e Sudeste, em razão de instabilidades climáticas.

### **3.2 Evapotranspiração**

A evapotranspiração é componente chave no balanço de água em culturas irrigadas, apresenta relevância nos processos ecológicos na superfície do solo e nos processos hidrológicos, pois está associada ao fluxo de energia na interface solo-atmosfera e ao ciclo hidrológico, associando esse último com outros ciclos biogeoquímicos, como o ciclo do carbono e outros ciclos de nutrientes. A ET influencia no clima, tanto em escala regional, como global. A avaliação dos recursos hídricos também pode ser feita com a ET, que também atua nos processos de reabastecimento dos lençóis freáticos e de escoamento superficial (MA et al., 2012; XUE et al., 2013).

A quantificação e o manejo da ET, que é composta pela soma da quantidade de água evaporada e transpirada, é uma importante estratégia para o

uso eficiente da água, já que a água evaporada é considerada uma perda por não participar diretamente na formação de biomassa e no rendimento da produção, apesar de contribuir indiretamente modificando o microclima dentro do dossel da plantação. Modelos que sejam capazes de estimar os valores de ET e seus componentes de forma prática contribuem para o uso eficiente da água (COLAIZZI et al., 2012), porém não existe uma forma prática para quantificar separadamente a evaporação e a transpiração (ALLEN et al., 1998). A avaliação da evapotranspiração em grandes regiões ou limitado por uma bacia hidrográfica fornece suporte para tomada de decisão no manejo do uso da água em diferentes níveis. A análise da produção de água e do turno de rega, planejamento da irrigação e distribuição de água depende de informação periódica e acurada sobre o consumo de água das culturas agrícolas (GONZÁLEZ-DUGO et al., 2013). Em solos cultivados, a evaporação é principalmente determinada pela água disponível na superfície do solo e pela incidência da radiação solar que atinge a superfície desse solo. Com o desenvolvimento da cultura agrícola, os raios solares são interceptados pelo dossel das plantas, antes de atingir o solo, reduzindo a evaporação e aumentando a transpiração. A transpiração se torna predominante no momento em que a planta está bem desenvolvida e a superfície do solo está praticamente toda sombreada (ALLEN et al., 1998).

O fato do relevo de Minas Gerais ter extensas cadeias de montanhas, sofrer influência orográfica em diferentes condições climáticas e ter vegetação e topografia diversificada, faz com que o Estado apresente clima variado, possuindo em um extremo regiões semiáridas e em outro regiões com clima tropical chuvoso e inverno seco. Esta grande diversidade de condições faz com que a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) apresente valores médios anuais que variam entre 2,51 mm/d até 4,59 mm/d. Os principais fatores que influenciaram na  $ET_0$  foram radiação solar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento (LEMOS FILHO et al., 2010).

Tradicionalmente, a evapotranspiração diária, que é a componente mais importante no manejo de recursos hídricos na agricultura, é obtida pontualmente, sobre campos homogêneos, utilizando a Relação de Bowen, Covariância de Vórtices Turbulentos e sistemas de lisímetros (ELHAG et al., 2011). Em contrapartida, métodos de sensoriamento remoto permitem o monitoramento em áreas extensas, permitindo o acompanhamento dos processos que envolvem clima e vegetação, como a evapotranspiração. O SR é importante também na construção de um banco de dados, com informações de diversos períodos que podem ser usadas como fonte de dados para reforma e/ou criação de políticas para o uso da água (LOTSCH; FRIEDL; ANDERSON, 2003; ELHAG et al., 2011). Trabalhos mostram que dados obtidos, por meio do sensoriamento remoto, capaz de assimilar diferentes resoluções espaço-temporais, permitem que modelos, baseados no balanço de energia, estimem a ET, porém a heterogeneidade da superfície e a consistência dos dados ainda são objetos de estudo dos pesquisadores (GONZÁLEZ-DUGO et al., 2013). Para monitorar a evapotranspiração em grandes áreas agrícolas, tem-se como regra geral que imagens de satélite não podem ser usadas sem um extensivo e cuidadoso trabalho de campo no período em que a imagem foi registrada. Assim, a validação dos resultados deve ser feita utilizando uma combinação de observações feitas em campo, entrevistas com os produtores e métodos de SR (GLENN et al., 2011).

De acordo com Senay et al. (2011), os métodos de estimação espacial da ET podem ser agrupados em três grandes classes, que se referem quanto à disponibilidade dos dados e quanto ao propósito da estimação da evapotranspiração: (1) Medidas pontuais que de alguma forma são regionalizadas; (2) utilização de dados climáticos e modelos hidrológicos e (3) estimações explícitas do espaço pautadas em dados de sensoriamento remoto e modelagem.

A classe 1 é conhecida na literatura como métodos diretos, ou seja, é a medição direta da evapotranspiração. Esses métodos são do lisímetro (lisímetro de subirrigação e lisímetro de pesagem), das parcelas experimentais (quando é efetuado o balanço de água em um volume de controle representativo para determinada cultura) e do controle de umidade do solo (que consiste em calcular a ET por meio diferença de duas amostragens sucessivas da umidade do solo em um intervalo de irrigação).

O principal modelo que representa a classe 2 é o Penman-Monteith-FAO (PM-FAO) elaborado por Allen et al. (1998). Esse modelo matemático estima a ET de referência foi concebido por meio da equação de Penman-Monteith original e as equações de aerodinâmica e resistência superficial, resultando em:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta \cdot \gamma (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

Em que  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência [mm/d],  $R_n$  é o saldo de radiação na superfície da cultura [MJ/(m<sup>2</sup>.d)],  $G$  é o fluxo de calor no solo [MJ.(m<sup>2</sup>.d)],  $T$  é a média diária da temperatura do ar medida a dois metros de altura [°C],  $u_2$  é a velocidade do vento a dois metros de altura [m/s],  $e_s$  é a pressão de vapor de saturação [kPa],  $e_a$  é a pressão de vapor atual [kPa],  $(e_s - e_a)$  é o déficit de pressão de vapor [kPa],  $\Delta$  é a inclinação da curva de vapor de pressão [kPa/°C] e  $\gamma$  é a constante psicométrica [kPa/°C]. Na Equação (1) as variáveis estão no padrão climatológico, com as medições feitas a 2 m de altura (ou convertidas para esta altura) sobre uma extensa superfície de grama verde cobrindo o solo e sem restrição de água.

O modelo Penman-Monteith-FAO é utilizado na ausência de medidas diretas, envolve o balanço de energia ao nível das plantas e é considerado como

padrão de estimativa da  $ET_0$  a partir de dados meteorológicos. O modelo considera que a vegetação de referência tem altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de 70 s/m e o albedo de 0,23, sem restrição de água. A evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ) é calculada a partir da  $ET_0$  multiplicada pelo coeficiente de cultura ( $k_c$ ). O modelo PM-FAO considera apenas fatores climáticos, fatores como doenças, compactação do solo, desnutrição, falta e excesso de água no solo, são desconsiderados (ALLEN et al., 1998).

O modelo Penman-Monteith-FAO é o principal representante da classe 2. É utilizado na ausência de medidas diretas, envolve o balanço de energia ao nível das plantas e é considerado como padrão de estimativa da  $ET_0$  a partir de dados meteorológicos. O modelo considera que a vegetação de referência tem altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de 70 s/m e o albedo de 0,23, sem restrição de água. A evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ) é calculada a partir da  $ET_0$  multiplicada pelo coeficiente de cultura ( $k_c$ ). O modelo PM-FAO considera apenas fatores climáticos, fatores como doenças, compactação do solo, desnutrição, falta e excesso de água no solo, são desconsiderados (ALLEN et al., 1998).

A classe 3 pode ser dividida em estimativas baseadas nos índices de vegetação e estimativas baseadas na troca de calor e massa. Métodos de balanço de energia na superfície do solo têm sido desenvolvidos e utilizados por vários pesquisadores para estimar o uso de água em regiões agrícolas e a ET de toda uma região ou uma bacia hidrográfica (SENAY et al., 2013).

Vinukollu et al. (2011) relataram que existem diversas dificuldades para estimar as taxas de evapotranspiração em escala global. No cálculo de evaporação devem-se levar em conta turbulências próximas à superfície do solo, as camadas limítrofes a serem consideradas e o saldo de energia na superfície. Já, no caso da transpiração, devem-se considerar os processos biofísicos que controlam esse parâmetro (JIA et al., 2003). O SEBS, modelo de estimação da

evapotranspiração e de fluxos de energia na superfície do solo em escala regional, utilizado neste trabalho, distingue a camada limítrofe entre camada limítrofe atmosférica ou camada limítrofe planetária e camada superficial atmosférica. A camada limítrofe atmosférica se refere à parte da atmosfera que é diretamente influenciada pela distância da superfície da Terra e responde às forças da superfície com uma escala de tempo de uma hora ou menos. Já, a camada superficial atmosférica se refere a 10% da parte inferior da camada limítrofe atmosférica, porém acima da subcamada de rugosidade, isto é, a camada superficial atmosférica é onde o fluxo de turbulência e a resistência ao fluxo variam menos que 10% da sua magnitude (STULL, 1988). A subcamada de rugosidade é próxima da fina camada da superfície com poucos centímetros onde o transporte molecular domina sobre transporte turbulento. A espessura da subcamada de rugosidade é proposta como sendo 35 vezes a altura da superfície de rugosidade, ou três vezes a altura da vegetação (KATUL; PARLANGE, 1992).

Os modelos que estimam a evapotranspiração a partir de dados de sensoriamento remoto são limitados pela condição atmosférica e o fluxo de energia é estimado somente no exato momento que o satélite faz o registro da imagem (ALLEN, 2000).

### **3.3 Modelos de estimação da evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto**

Existem vários modelos que estimam a evapotranspiração a partir de dados de sensoriamento remoto, podendo citar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (BASTIAANSEN et al., 1998), o *Surface Energy Balance Index* (SEBI) (MENENTI; CHOUDHURY, 1993), o *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI) (ROERINK; SU; MENENTI, 2000), o *Surface*

*Energy Balance System (SEBS)* (SU, 2002) e *Mapping ET with Internalized Calibration (METRIC)* (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007).

Courault, Seguin e Oliosio (2005) classificaram os modelos que usam dados provenientes do SR para estimar a ET em quatro grupos: métodos empíricos diretos, métodos que utilizam o resíduo da equação de balanço de energia na superfície do solo, métodos determinísticos e métodos que utilizam índices de vegetação para estimar fatores de redução como o coeficiente de cultura ( $k_c$ ). O modelo SEBS faz parte do segundo grupo, determinando a evapotranspiração em casos limites, ou seja, com o solo seco, sem disponibilidade de água para a evapotranspiração, e com o solo úmido, sem restrição de água para a evapotranspiração. Os autores alertam que, quando a temperatura da superfície do solo é obtida por satélites, por meio de sensores que captam comprimentos de ondas da região do infravermelho termal, estes valores devem ser corrigidos em razão de fatores como a influência da atmosfera e em decorrência de efeitos de emissividade da superfície.

### **3.4 Surface Energy Balance System (SEBS)**

O modelo SEBS, desenvolvido por Su (2002), utiliza dados de sensoriamento remoto e informações de estações meteorológicas para estimar o fluxo de energia na superfície do solo e a taxa de evaporação. O SEBS está disponível como um conjunto de ferramentas pré-determinadas no *software* ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*). O ILWIS é um SIG de domínio público disponível no endereço eletrônico<sup>2</sup>, permitindo que mesmo pessoas que não sejam necessariamente especialistas em micrometeorologia sejam capazes de estimar a ET. O fato do modelo SEBS estar disponível em um

---

<sup>2</sup> 52 NORTH INITIATIVE FOR GEOSPATIAL OPEN SOURCE SOFTWARE. Disponível em: <www.52north.org>. Acesso em: 03 jun. 2014.

*software* de código aberto auxilia no avanço das pesquisas e na implementação do modelo para a obtenção de resultados mais acurados (GIBSON; MUNCH; ENGELBRECHT, 2011).

O SEBS consiste de três módulos que estimam os diferentes parâmetros da equação (2).

$$R_n = G + H + LE \quad (2)$$

Em que  $R_n$  é o saldo de radiação,  $G$  é o fluxo de calor no solo,  $H$  é o fluxo de calor sensível e  $LE$  é o fluxo de calor latente. Esses parâmetros são medidos em unidades de potência por área, no caso, Watts por metro quadrado [ $W/m^2$ ] (SU, 2002; SU et al., 2005).

O primeiro módulo consiste em características do solo, como albedo ( $\alpha$ ), emissividade da superfície ( $\epsilon$ ), temperatura da superfície ( $T_0$ ), porcentagem da cobertura vegetal ( $f_c$ ) e índice de área foliar. Quando as informações sobre a vegetação não estão disponíveis, usa-se como substituto o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Essas informações são obtidas por dados derivados do sensoriamento remoto. Com os valores obtidos nesse primeiro módulo, é possível calcular o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo. O saldo de radiação é calculado por meio da equação (3):

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_{swd} + \epsilon \cdot R_{lwd} - \epsilon \cdot \sigma \cdot T_0^4 \quad (3)$$

Em que o  $R_{swd}$  é a radiação solar de ondas curtas que atinge o solo,  $R_{lwd}$  é a radiação de ondas longas que atinge o solo e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann. Na Equação (3),  $\alpha$ ,  $\epsilon$  e  $T_0$  são obtidos com base em sensores remotos que atuam nas faixas espectrais do visível até o infravermelho termal.

Já, o fluxo de calor no solo é calculado da seguinte forma:

$$G = R_n \cdot [T_c + (1 - f_c) \cdot (T_s - T_c)] \quad (4)$$

Em que a relação entre o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação,  $T_c$ , assume o valor de 0,05 quando o dossel da vegetação cobre completamente o solo e  $T_s$  tem o valor de 0,315 para o solo exposto. A interpolação entre estes dois casos limites é feita pela porcentagem de cobertura vegetal,  $f_c$ .

O segundo módulo de entrada de dados se refere a informações sobre a atmosfera, que são: pressão do ar, temperatura do ar, umidade específica e velocidade do vento a uma altura de referência. Para uma aplicação regional, a altura de referência é a camada limítrofe planetária. Os dados referentes à atmosfera são estimados por meio de modelos meteorológicos. O terceiro módulo de dados é a quantificação da radiação de ondas curtas e longas que atingem a superfície do solo que são medidas diretamente, por um modelo ou por parametrização (SU, 2002). A principal limitação do modelo SEBS é a necessidade de conhecer a altura de rugosidade aerodinâmica, porém existem várias pesquisas com o intuito de estimar essa variável, por meio de valores mais facilmente mensuráveis, como velocidade do vento, índices de vegetação e altura da cultura ou por meio de atribuição de valores dependendo do uso do solo (GOWDA et al., 2008).

Em termos gerais, o algoritmo do SEBS é estruturado, para estimar o fluxo de calor sensível ( $H$ ), baseado na temperatura superficial, no gradiente da temperatura do ar e na parametrização da resistência aerodinâmica. O calor latente ( $LE$ ) é estimado considerando o limite de umidade do solo. O  $LE$  é igual a zero para o limite inferior de umidade do solo, ou seja,  $H_{dry}$  representa uma indisponibilidade de água no solo. No limite superior de umidade do solo, o  $H_{wet}$  representa que a evapotranspiração potencial (ETP) é limitado pela energia disponível e pelas condições meteorológicas, assim restringindo o  $H$  a ser estimado por um valor máximo (para o solo úmido) ou mínimo (para o solo

seco). Essa restrição permite uma expressão para a evapotranspiração atual ser formulada a partir do conhecimento destes limites, resultando em uma equação para evaporação relativa ( $\Lambda_r$ ) e a fração evaporativa ( $\Lambda$ ) (SU, 2002) (VINUKOLLU et al., 2011).

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}} \quad (5)$$

$$\Lambda = \frac{\Lambda_r - LE_{wet}}{R_n - G} \quad (6)$$

Em que,  $R_n$  é o saldo de radiação da superfície [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] e  $G$  é o fluxo de calor na superfície do solo [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. O conjunto de Equações (2), (3), (4), (5) e (6) são a base do modelo SEBS. O fluxo de calor sensível  $H$  é obtido resolvendo um conjunto de equações não lineares que está restrito aos valores do fluxo de calor sensível inferior,  $H_{wet}$ , e do fluxo de calor sensível superior,  $H_{dry}$ .

O fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível são obtidos da Equação (5), resultando em:

$$H = (1 - \Lambda) \cdot (R_n - G) \quad (7)$$

$$LE = \Lambda \cdot (R_n - G) \quad (8)$$

Segundo Ma et al. (2012) e Elhag et al. (2011), quando a fração evaporativa é conhecida, a evapotranspiração atual diária pode ser determinada por meio da equação (9):

$$ET_{diária} = 8,64 \cdot 10^7 \cdot \Lambda_0^{24} \cdot \frac{\overline{R_n} - \overline{G}}{\lambda \rho_w} \quad (9)$$

Em que  $ET_{diária}$  é a evapotranspiração atual em base diária [mm/d].  $\Lambda_0^{24}$  é a média diária da fração evaporativa, que pode ser estimada pelo SEBS desde que a fração evaporativa seja conservada (CRAGO, 1996; SHUTTLEWORTH et al., 1989; SUGITA; BRUTSAERT, 1991)  $\overline{R_n}$  e  $\overline{G}$  são o fluxo do saldo de radiação diário e o fluxo do calor no solo diário,  $\lambda$  é o calor latente de vaporização [J/kg] e  $\rho_w$  é a densidade da água [kg/m<sup>3</sup>].

Su (2002) verificou a acurácia do SEBS em quatro diferentes tipos de vegetação: algodão, arbusto, grama e em uma região com vegetação heterogênea (Barrax, na Espanha). A região de Barrax é composta por áreas irrigadas e não irrigadas, solo exposto e alqueive. Apesar dessa heterogeneidade, as áreas são bem delimitadas e separadas em glebas. Os dados de sensoriamento remoto foram obtidos com o *Thematic Mapper Simulator* (TMS-NS001) captados pela plataforma ER2 da NASA, com 18,5 m de resolução espacial. Para a cultura do algodão, o fluxo de calor latente estimado pelo modelo SEBS foi, em média, de 289,97 W/m<sup>2</sup>, o  $LE$  mensurado foi, em média, de 304,74 W/m<sup>2</sup> e o coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 0,43. Para a vegetação de arbustos, o  $LE$  mensurado foi, em média, de 60,84 W/m<sup>2</sup>, com o desvio padrão de 130,87 W/m<sup>2</sup>. Essa grande variabilidade se deve à maior heterogeneidade da região. Os resultados para a grama foram muito similares ao do arbusto e a grande variabilidade do  $LE$  foi explicada pela heterogeneidade das regiões vizinhas ao experimento. O autor também explica que, quando os dados são obtidos nas primeiras horas da manhã, entre às 7h e 9h, carregam um erro sistemático, que foi percebido no experimento do arbusto e da grama. Para a região de Barrax, foi calculada a fração evaporativa, mostrado na Figura 1, que apresenta a comparação entre os

valores observados e os valores obtidos por meio do SEBS e dos respectivos desvios padrões.

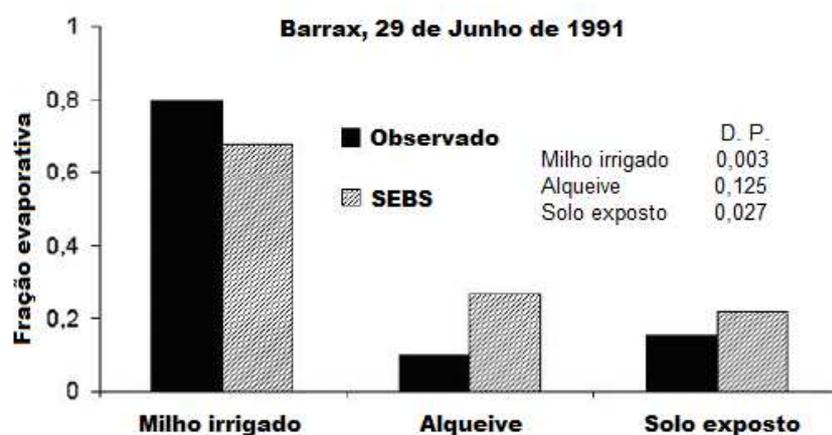


Figura 1 Comparação entre as estimativas feitas pelo SEBS e a fração evaporativa medida em campo para três áreas em Barrax

Fonte: Adaptado de Su (2002).

Ma et al. (2012) aplicaram o SEBS na área irrigada de Coleambally, na Austrália. Nessa região são cultivadas diversas culturas agrícolas, como soja, arroz, milho, uva, ameixa, girassol, trigo, centeio, aveia, entre outras. Foram utilizadas 16 imagens do Landsat-5 TM entre os anos de 2009 a 2011, com o objetivo de estimar  $G$  e  $ET_{diária}$ . Para a avaliação do fluxo de calor sensível foi usada a Diferença da Porcentagem Absoluta (DPA), que é calculada pelo módulo da diferença entre o  $G$  mensurado e o  $G$  observável, em relação ao  $G$  observável. O DPA apresentou um valor médio de 7,5%. Na avaliação da evapotranspiração atual foram confrontados os valores da  $ET_{diária}$  obtidos pelo sensoriamento remoto, com os valores observados em campo, que apresentou o  $R^2$  de 0,9476. Com estes resultados os autores concluíram que a ET regional, em

áreas heterogêneas, pode ser determinada utilizando imagens de satélite Landsat-5 e observações da camada limite da atmosfera.

O modelo SEBS também foi utilizado em áreas irrigadas no delta do Nilo para a estimação da ET diária e da fração evaporativa. Os resultados foram comparados com os resultados observados por uma rede de sensores alocados em 92 pontos espaçados regularmente que medem a  $ET_{diária}$ . Os valores estimados e observados obtiveram alta correlação. Foi observado que o modelo SEBS possui algumas limitações, que é a necessidade de inserir informações no modelo, como a rugosidade da superfície, a camada limítrofe planetária e o uso do solo (ELHAG et al., 2011).

### 3.5 Modelo de reanálise GLDAS

O modelo de reanálise *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) é um produto global que possibilita que diferentes lugares do planeta sejam comparados, usa majoritariamente observações derivadas do sensoriamento remoto e *in-situ* com assimilação de dados terrestre obtidos de uma rede de estações climáticas. O GLDAS foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *Goddard Space Flight Center* (GSFC), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). O desenvolvimento desse produto aumentou a capacidade de previsão da superfície terrestre, do tempo e do clima. Também tem importância como banco de dados para pesquisas e aplicações subsequentes que melhoram o entendimento e a avaliação da estrutura espaço-temporal das interações solo-atmosfera e o papel da superfície do solo na regulação de variáveis hidrológicas e climáticas (RODELL et al., 2004).

O GLDAS inclui quatro componentes: (1) Modelagem do solo: o produto começa a ser desenvolvido de forma modular, para facilitar a inclusão

de diferentes modelos de superfície terrestre, incluindo o *Mosaic, Common Land Model (CLM)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration's NOAA (NOAH LSM)* e *Variable Infiltration Capacity (VIC)*. (2) Observação da superfície terrestre: as previsões meteorológicas do NCEP é o principal fator na geração do GLDAS, porém, para evitar erros sistemáticos, correções por observações são disponíveis. Os satélites que serão usados na missão de observação terrestre incluem *Landsat TM, AVHRR, MODIS, ASTER, SSM/I, TRMM-TMI, AMSR, GRACE* e *TOPEX/Poseidon*. (3) Assimilação dos dados de superfície terrestre: as técnicas de fusão unem uma ampla diversidade de dados a um modelo de previsão, provendo o modelo com as melhores estimativas do estado natural do ambiente para que as previsões sejam mais acuradas. (4) Calibração e validação: o fato de vários modelos serem assimilados com um conjunto de dados observáveis, a acurácia da inicialização deve garantir o produto final, para isso, variáveis observáveis independentes da reprodução são comparadas com o produto, permitindo a avaliação e, se necessário, mudanças na estrutura do modelo, restringindo ou instituindo parâmetros para aumentar a confiança no produto. Atualmente o GLDAS apresenta resolução de até 0,25° e disponibiliza dois modelos: o NASA's GEOS 3.24 e o NOAA's GDAS (HOUSER et al., 2001).

O NOAH LSM é um componente básico do GLDAS/Noah, este produto simula a umidade do solo, a temperatura do ar, a temperatura da superfície, a profundidade da camada de neve equivalente, o teor de água no dossel e os termos de fluxo de energia e água de balanço de energia na superfície e do balanço de água na superfície (YANG et al., 2013).

O principal objetivo da versão 2 do produto GLDAS é gerar um conjunto de dados climatologicamente consistente, usando os dados forçantes da Universidade de *Princeton* desde 1948 até 2010 (*Global Meteorological Forcing Dataset*) e modelos de reanálise. A versão nº 2 utiliza o MODIS como parâmetro

base para a superfície terrestre, e a inicialização da umidade do solo é feita sobre o deserto. No modelo NOAH, os dados de temperatura também foram melhorados. Todas as atualizações feitas no produto GLDAS estão listadas no sítio<sup>3</sup>.

A Tabela 1 apresenta os 22 parâmetros disponibilizados pela segunda versão do GLDAS/Noah.

Tabela 1 Parâmetros do GLDAS-2 Noah

Nome	Unidade	Período
Pressão na superfície ( <i>Surface pressure</i> )	Pa	Instantâneo
Temperatura do ar próximo à superfície ( <i>Near surface air temperature</i> )	K	Instantâneo
Velocidade do vento próximo à superfície ( <i>Near surface Wind magnitude</i> )	m/s	Instantâneo
Umidade específica próxima à superfície ( <i>Near surface specific humidity</i> )	kg/kg	Instantâneo
Evapotranspiração total ( <i>Total evapotranspiration</i> )	kg/m <sup>2</sup> /s	Média das últimas 3 h
Água contida na neve ( <i>Snow water equivalent</i> )	kg/m <sup>2</sup>	Instantâneo
Total de água armazenada no dossel ( <i>Total canopy water storage</i> )	kg/m <sup>2</sup>	Instantâneo
Temperatura média do solo ( <i>Average layer soil temperature</i> )	K	Instantâneo
Umidade média do solo ( <i>Average layer soil moisture</i> )	kg/m <sup>2</sup>	Instantâneo
Degelo ( <i>Snowmelt</i> )	kg/m <sup>2</sup> /s	Média das últimas 3 h
Saldo de radiação de ondas curtas ( <i>Net shortwave radiation</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h

<sup>3</sup> GES DISC GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER. Disponível em: <<http://mirador.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

“Tabela 1, conclusão”

<b>Nome</b>	<b>Unidade</b>	<b>Período</b>
Saldo de radiação de ondas longas ( <i>Net longwave radiation</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h
Fluxo de calor latente ( <i>Latent heat flux</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h
Fluxo de calor sensível ( <i>Sensible heat flux</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h
Taxa de neve ( <i>Snow fall rate</i> )	kg/m <sup>2</sup> /s	Média das últimas 3 h
Precipitação ( <i>Rainfall rate</i> )	kg/m <sup>2</sup> /s	Média das últimas 3 h
Temperatura média da superfície ( <i>Average surface temperature</i> )	K	Instantâneo
Fluxo de calor no solo ( <i>Ground heat flux</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h
Incidência de radiação de onda curta na superfície ( <i>Surface incidente shortwave radiation</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h
Incidência de radiação de onda longa na superfície ( <i>Surface incident longwave radiation</i> )	W/m <sup>2</sup>	Média das últimas 3 h
Escoamento de subsuperfície ( <i>Subsurface runoff</i> )	kg/m <sup>2</sup> /s	Média das últimas 3 h
Escoamento superficial ( <i>Surface runoff</i> )	kg/m <sup>2</sup> /s	Média das últimas 3 h

Fonte: Adaptado de Rui e Beaudoin (2014).

Jiménez et al. (2011) avaliaram o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor latente, o saldo de radiação e a fração evaporativa de diversos produtos, dentre eles o GLDAS e concluíram que regiões com alta precipitação, maiores que 1700 mm, as médias anuais de LE possuem um desvio maior quando comparadas com regiões mais secas, com precipitação entre 500 mm e 1000 mm. Também foi verificado que os produtos apresentam ampla diferença em valores absolutos quando relacionados com a latitude. Do ponto de vista sazonal, os produtos GLDAS/Noah, GLDAS/CLM e GLDAS/Mosaico apresentaram alta correlação (de 0,70 a 0,79) com outros produtos.

Wang et al. (2011) compararam os produtos do GLDAS/Noah para precipitação e temperatura próxima à superfície do solo com dados observados por estações da *China Meteorological Administration* (CMA) diariamente, na

bacia do rio Songhua, China. Os resultados para precipitação diária apresentaram correlação (R) de 0,7599, erro médio sistemático (MBE) de 0,06 mm/d e raiz média quadrática do desvio (RMSE) de 3,48 mm/d. A temperatura próxima à superfície do solo teve R de 0,9933, MBE de -0,40 K e RMSE de 1,70 K. Esses resultados são muito satisfatórios e foram ainda melhores quando a comparação foi entre médias mensais, o valor da correlação (R) melhorou tanto para a precipitação (0,9425) como para a temperatura próxima à superfície do solo (0,9983), representando um melhor ajuste. O erro sistemático médio (MBE) apresentou um pior resultado na avaliação da precipitação (1,89 mm/mês), mas manteve o valor para a temperatura próxima à superfície do solo (-0,40 K). O RMSE das médias mensais foi de 22,64 mm/mês para precipitação e de 0,95 para a temperatura.

### **3.6 Incertezas dos produtos derivados do sensoriamento remoto e do Sistema de Informação Geográfica**

Produtos derivados do SR e do SIG geralmente resultam em mapas que representam variáveis discretas e variáveis contínuas. Essas variáveis podem estar associadas a várias fontes de erro e incertezas listadas abaixo por Gibson, Munch e Engelbrecht (2011, p. 298):

- a) Erros ou incertezas associados intrinsecamente aos dados obtidos por sensoriamento remoto;
- b) Erros ou incertezas introduzidas com o processamento e análise das imagens e dos dados de campo;
- c) Erros ou incertezas associados com um modelo específico;
- d) Erros e incertezas em virtude do aspecto posicional (incluindo a resolução da imagem);

- e) Erros de amostragem e de medição de dados colhidos para o processo de validação (verdade de campo);
- f) Erros de valores espectrais e de correção espectral das imagens;
- g) Erros em decorrência do não entendimento da relação entre a variável espectral e a variável temática;
- h) Erros de operação no SIG.

No momento de validação de modelos e produtos feitos com mensurações pontuais *in-situ*, são introduzidos erros que dependem basicamente de dois fatores: o tamanho do *pixel*, já que quanto maior o *pixel* menor é a representatividade do dado pontual; e a heterogeneidade do *pixel*, pois uma observação pontual não consegue captar toda a diversidade contida no *pixel* (VAN DER KWAST et al., 2009).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo é o Estado de Minas Gerais (MG), situado entre as coordenadas 14° e 24° de latitude Sul e 41° e 52° de longitude Oeste de Greenwich. O Estado de MG possui uma área de 586.523 km<sup>2</sup>, ocupando 6,9% da área do Brasil e é dividido em 853 municípios.

### 4.2 Fontes de dados

O modelo SEBS é alimentado por diversos parâmetros, que exige um banco de dados com um grande volume de informações extraídas de diferentes fontes de dados.

Nas seções seguintes foram listadas e caracterizadas as fontes de dados usadas neste trabalho.

#### 4.2.1 GLDAS

Neste trabalho foram usados os dados do GLDAS-2.0, ou GLDAS/Noah *Land Surface Model* LA 3-h 0,25° x 0,25° (GLDAS\_NOAH025SUBP\_3H) adquirido no sítio<sup>4</sup>, para as seguintes variáveis: Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair) [kg/kg], Velocidade do Vento Próxima à Superfície (Wind) [m/s], Temperatura do Ar Próxima à Superfície (Tair) [K], Pressão na Superfície (PSurf) [Pa] no ano de 2010, totalizando 11680 imagens. A longitude está entre

---

<sup>4</sup> GES DISC GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER. Disponível em: <<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/hydrology/data-holdings>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

180° E e 180° W e a latitude se encontra entre 60° S e 90° N, ficando, assim, excluído o Continente Antártico, compondo uma imagem com 1440 pixels na longitude e 600 pixels na latitude. O produto GLDAS-2.0 tem resolução espacial de 0,25° e resolução temporal de três horas. Esses foram uma parte dos dados de entrada necessários para estimação da evapotranspiração do modelo SEBS.

O dia primeiro de setembro não apresenta dados no horário de 6 horas GMT, sendo esta a única lacuna no banco de dados do GLDAS-2.0 no ano de 2010.

Também foram utilizadas as variáveis que estimam a incidência de radiação de ondas longas na superfície (LWdown) e a incidência de radiação de ondas curtas na superfície (SWdown), que também foram extraídas do produto GLDAS-2.0 e são utilizadas no cálculo da  $ET_{diária}$  por meio do modelo SEBS.

#### **4.2.2 INMET**

Para a avaliação do produto GLDAS, foi utilizado o banco de dados coletado nos postos de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia, com dados diários referentes ao ano de 2010.

A Tabela 2 mostra as 46 estações usadas neste trabalho e a porcentagem de dias com dados disponíveis para temperatura do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica, que foram mensurados diretamente nas estações e umidade relativa, calculada a partir da pressão de vapor do ar e da pressão atmosférica, durante o ano de 2010.

Tabela 2 Estações meteorológicas do INMET, localizadas no estado de Minas Gerais e seu entorno, com as porcentagens de dias que possuem dados disponíveis para temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e pressão, durante o ano de 2010

Estação - UF	Temp. do ar	Umid. relativa	Vel. do vento	Pressão
	----- (%) -----			
Caetité – BA	100	100	82,74	100
Brasília – DF	99,18	98,90	98,90	98,90
Formosa – GO	100	100	100	100
Pirenópolis – GO	100	100	100	100
Posse – GO	100	100	100	100
Rio Verde - GO	100	100	100	100
Aimorés – MG	100	100	100	100
Araxá - MG	100	100	100	100
Bambuí – MG	100	100	100	99,73
Barbacena – MG	100	100	100	100
Belo Horizonte - MG	100	100	100	100
Caparaó – MG	100	100	100	100
Capinópolis - MG	99,73	99,73	99,73	99,73
Caratinga - MG	100	100	100	100
Conceição do Mato Dentro - MG	100	100	100	100
Diamantina - MG	100	100	100	100
Divinópolis - MG	100	100	100	99,73
Formoso – MG	91,78	91,78	91,78	0
Frutal – MG	100	100	100	75,89
Ituiutaba – MG	100	100	100	100
Janaúba – MG	100	100	100	0
Januária – MG	97,81	97,81	97,81	97,81
Juiz de Fora – MG	100	100	100	100
Juramento – MG	100	100	100	0
Lavras – MG	100	100	100	100
Machado – MG	100	100	100	100

“Tabela 2, conclusão”

Estação - UF	Temp. do ar	Umid. específica	Vel. do vento	Pressão
	----- (%) -----			
Maria da Fé – MG	100	100	100	0
Mocambinho – MG	97,26	95,62	95,62	95,62
Montes Claros – MG	100	100	100	100
Paracatu – MG	100	100	100	100
Patos de Minas – MG	100	100	100	100
Pedra Azul – MG	100	100	100	100
Pirapora – MG	100	100	100	100
Poços de Caldas – MG	98,90	99,18	98,90	0
Salinas – MG	100	100	100	100
São Lourenço – MG	100	100	100	100
São Sebastião Paraíso – MG	82,74	83,01	82,47	0
Sete Lagoas – MG	100	100	100	100
Uberaba – MG	100	100	100	100
Viçosa – MG	100	100	100	100
Paranaíba - MS	100	100	100	100
Itaperuna – RJ	100	100	100	100
Franca – SP	100	100	100	20,55
São Carlos – SP	99,73	99,73	83,01	99,73
São Paulo – SP	100	99,73	83,29	100
São Simão - SP	100	100	100	100

#### 4.2.3 MODIS

As imagens *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), obtidas dos satélites Terra e Aqua, do programa EOS (*Earth Observing System*),

são adquiridas gratuitamente no endereço eletrônico <sup>5</sup>, no formato HDF (*Hierarchical Data Format*). A principal responsável pelo processamento e distribuição é a NASA.

Foram adquiridos inicialmente os produtos MOD021KM – *Level 1B Calibrated Radiances* – 1 km e MOD03 – *Geolocation* – 1 km, entre as latitudes 14° S e 24° S, e entre as longitudes 41° W e 52° W, obtidas, durante o dia para todo o ano de 2010, totalizando 1898 arquivos, dos quais foram selecionadas imagens que apresentaram pouca ou nenhuma interferência de nuvens, totalizando apenas 12 imagens que representaram 10 dias do ano de 2010. A Tabela 3 exibe as datas e os horários das imagens selecionadas, assim como o número de cidades que é avaliado em cada imagem.

Tabela 3 Data, hora e número de cidades avaliadas das imagens MODIS, livres de interferência de nuvens, no estado de Minas Gerais e seu entorno, durante o ano de 2010

<b>Data</b>	<b>Hora (GMT)</b>	<b>Dia Juliano</b>	<b>Número de cidades</b>
23/02	13 h 5 min	54	26
22/06	13 h 10 min	173	15
22/06	13 h 15 min	173	7
30/06	14 h	181	5
01/07	13 h 5 min	182	33
09/08	13 h 10 min	221	26
25/08	13 h 10 min	237	15
25/08	13 h 15 min	237	6
27/08	13 h	239	28
03/09	13 h 5 min	246	28
05/09	12 h 55 min	248	23
10/09	13 h 10 min	253	20
<b>Total:</b>			<b>232</b>

<sup>5</sup> LAADS WEB LEVEL 1 AND ATMOSPHERE ARCHIVE AND DISTRIBUTION SYSTEM. Disponível em: <[http://ladsweb.nascom.nasa.gov/browse\\_images](http://ladsweb.nascom.nasa.gov/browse_images)>. Acesso em: 30 abr. 2014.

Logo foram obtidos mais dois produtos do MODIS: MOD04\_L2 que estima a AOT e MOD07\_L2 que estima a pressão na superfície.

O MOD021KM possui 36 bandas, o MOD03 apresenta 10 bandas, o MOD04\_L2 tem 211 bandas e o MOD07\_L2 tem 153 bandas, porém as bandas necessárias para o cálculo da ET, por meio do modelo SEBS, são discriminadas abaixo, na Tabela 4.

Tabela 4 As bandas dos produtos MODIS, usados nesse trabalho (MOD021KM, MOD03, MOD04\_L2 e MOD07\_L2) que são dados de entrada do modelo SEBS

Produto MODIS	Dados	Bandas (faixa espectral)
MOD021KM	EV_250_Aggr1km_RefSB	1 (620-670 nm), 2 (841-876 nm)
	EV_500_Aggr1km_RefSB	3(459-479nm), 4 (545-565nm), 5 (1230-1250nm), 6 (1628-1652nm), 7(2105-2155nm)
	EV_1KM_RefSB	17 (890-920 nm), 18 (931-941 nm), 19 (915-965 nm)
	EV_1KM_Emissive	31 (10780-11280 $\mu$ m), 32(11770-12270 $\mu$ m)
MOD03	Ângulo zênite do sensor	Sensor Zenith
	Ângulo azimute do sensor	Sensor Azimuth
	Ângulo zênite do Sol	Solar Zenith
	Ângulo azimute do Sol	Solar Azimuth
	Altitude	Height
MOD04_L2	AOT a 0,55 $\mu$ m sobre o oceano e o continente	Optical_Depth_Land_And_Ocean
MOD07_L2	Pressão superficial	Surface_Pressure

#### 4.2.4 Ozônio

Os valores de ozônio foram estimados, por meio de mapas produzidos pelo governo do Canadá, que possui um projeto chamado *World Ozone Monitoring and Mapping*. Os mapas são construídos, utilizando diversas fontes de dados, sendo *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS), *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), *NOAA's Stratosphere Monitoring Ozone Blended*

*Analysis* (SMOBA), *NOAA's TIROS Operational Vertical Sounder* (TOVS), *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) e *NOAA's TOAST*, além de observações de estações meteorológicas de várias agências nacionais.

*World Ozone Monitoring and Mapping* possui um extenso banco de dados que disponibiliza mapas diários de ozônio a partir de 1978 até os dias atuais. Esses dados podem ser acessados por meio do endereço eletrônico<sup>6</sup>. A Tabela 5 mostra os valores estimados de ozônio que foram usados como dados de entrada no modelo SEBS, em cada dia selecionado no ano de 2010, na região do estado de Minas Gerais e seu entorno.

Tabela 5 Valores estimados de ozônio, em atm cm, usados como dados de entrada no modelo SEBS

<b>Data</b>	<b>Ozônio [atm cm]</b>
23/02	0,238
22/06	0,25
30/06	0,263
01/07	0,263
09/08	0,263
25/08	0,263
27/08	0,263
03/09	0,263
05/09	0,263
10/09	0,275

### 4.3 Softwares

Foi necessário o uso de diversos programas computacionais para extrair e processar as informações das diferentes fontes de dados.

Os *softwares* utilizados foram caracterizados nas próximas seções.

<sup>6</sup> WORLD OZONE MONITORING AND MAPPING. Disponível em: < <http://es-ee.tor.ec.gc.ca/e/ozone/ozoneworld.htm>>. Acesso em: 02 nov. 2014.

### 4.3.1 ILWIS

O *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS) é um *software* que integra Sistema de Informação Geográfica e ferramentas para trabalhar com dados de sensoriamento remoto. O ILWIS tem sido desenvolvido nas últimas duas décadas pela *Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation* (ITC) da Universidade de *Twente*. O ILWIS tem seu código aberto e a responsabilidade de sua manutenção é de uma das comunidades do *52° North* (BLOK et al., 2011). Mais informações no sítio <sup>7</sup>. Uma das principais características do *software* ILWIS é a disponibilidade do pacote SEBS, que permite que usuários com conhecimento de sensoriamento remoto, mesmo que não sejam especialistas em meteorologia, possam estimar a evapotranspiração (GIBSON; MUNCH; ENGELBRECHT, 2011).

Uma excelente ferramenta do ILWIS é o *script*. O *script* é uma lista de comandos e expressões que sequencialmente será executada pelo ILWIS, ou seja, é um roteiro de cálculos. Essa ferramenta permite ao pesquisador construção e análise completa de dados de SIG e SR.

### 4.3.2 BEAM VISAT

O BEAM é um *toolbox* e uma plataforma de visualização de domínio público, que analisa e processa dados de sensoriamento remoto no formato matricial. Atualmente suporta formatos GeoTIFF e NetCDF, assim como imagens dos sensores MODIS, AVHRR, PRISM e CHRIS/Proba. O VISAT é escrito inteiramente em JAVA, usado para a visualização, análise e processamento de dados matriciais derivados de SR. As diferentes ferramentas

---

<sup>7</sup> 52 NORTH INITIATIVE FOR GEOSPATIAL OPEN SOURCE SOFTWARE. Disponível em: <www.52north.org>. Acesso em: 03 jun. 2014.

podem ser acionadas por linhas de comando (que permite trabalhar com blocos de arquivos) ou pelos ícones do VISAT (que trabalha com os arquivos individualmente). O *download* e mais informações sobre o *software* BEAM VISAT estão disponíveis na página<sup>8</sup>.

O BEAM VISAT foi utilizado neste trabalho, para visualizar parâmetros e metadados do produto GLDAS e as bandas e metadados das imagens MODIS, porém sua principal função foi a conversão dos arquivos dos produtos GLDAS, de NetCDF para GeoTIFF.

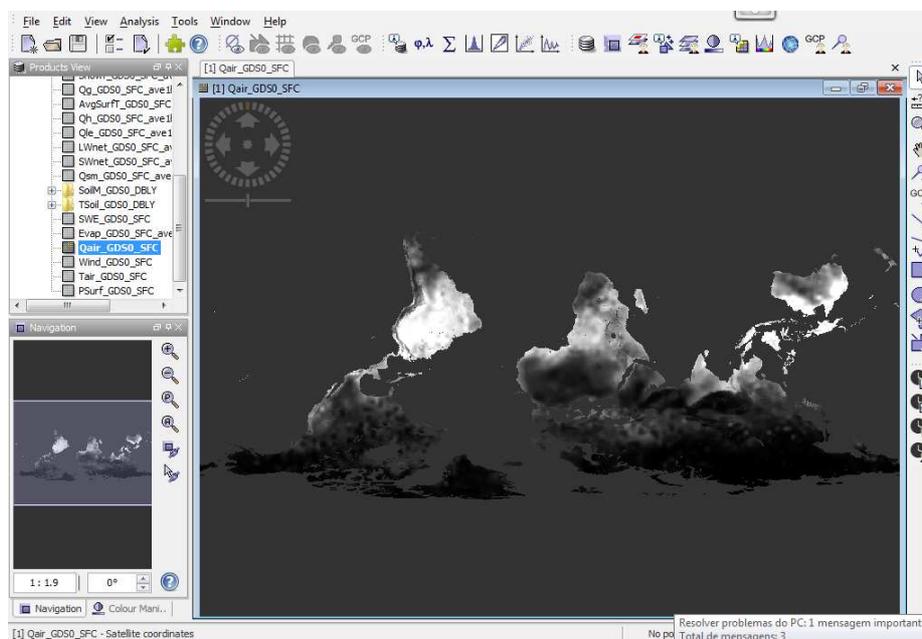


Figura 2 Visualização da variável umidade específica do produto GLDAS no aplicativo BEAM VISAT

<sup>8</sup> EARTH OBSERVATION TOOLBOX AND DEVELOPMENT PLATFORM. Disponível em: <<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/releases>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

### 4.3.3 MODIS Swath Tool

O MODIS *Reprojection Tool Swath* (MODIS Swath Tool) permite a seleção e a extração das bandas de imagens MODIS (MOD021KM e MOD03 no caso deste trabalho). Esse programa faz o recorte da imagem definido pelas coordenadas geográficas máximas e mínimas, define a projeção cartográfica (*Geographic*, Mercator, Sinuzoidal, etc.), permite a definição da extensão do arquivo e o tamanho do *pixel*<sup>9</sup>.

### 4.3.4 HEG

O HEG possui exatamente as mesmas características do MODIS Swath Tool, com a exceção de que o último não extrai informações dos produtos MOD04\_L2 e MOD07\_L2<sup>10</sup>.

### 4.3.5 HDFView

O HDFView é uma ferramenta Java e de domínio público que permite a visualização de dados de arquivos com extensão HDF4 e HDF5 em formato de tabela, permitindo a visualização dos parâmetros de correção das imagens MODIS que foi utilizado no pré-processamento para o cálculo do modelo SEBS em conjunto com o *software* ILWIS.

A Figura 3 exemplifica uma tabela de atributos com os valores de correção das bandas 1 e 2 do produto MOD021KM. Os valores nas linhas

---

<sup>9</sup> LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Washington. Disponível em: <[https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access)>. Acesso em: 11 fev. 2014.

<sup>10</sup> HEG HDF-EOS TO GEOTIFF CONVERSION TOOL. Disponível em: <<http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG/HEGHome.html>>. Acesso em: 07 set. 2014.

*radiance\_scales*, *radiance\_offset*, *reflectance\_scales* e *reflectance\_offset* são os utilizados nas correções de imagens.

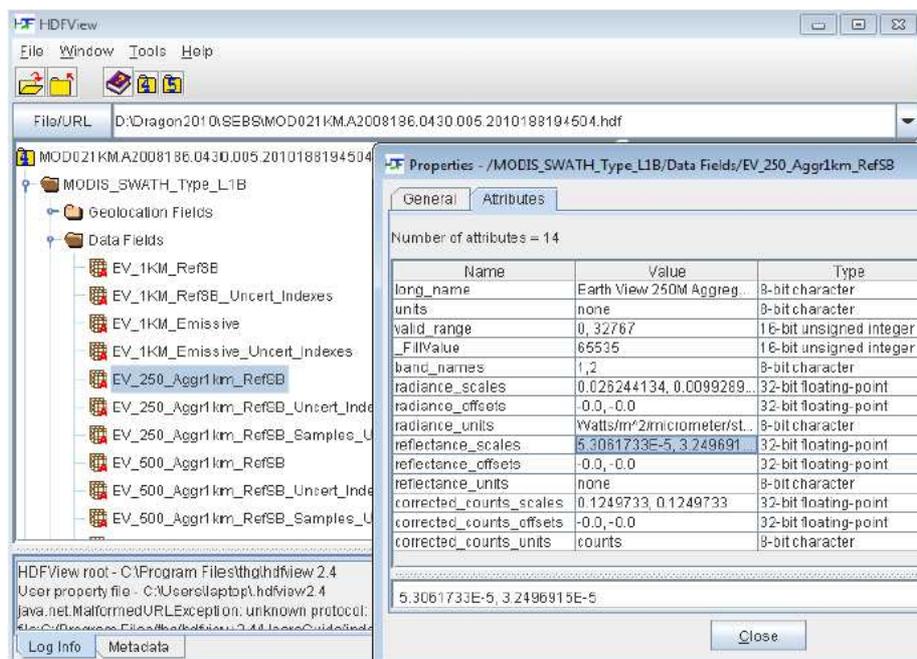


Figura 3 Visualização dos parâmetros das bandas 1 e 2 da imagem MODIS MOD021KM apresentada pelo o *software* HDFView

No HDFView, os objetos do arquivo, são organizados hierarquicamente, facilitando a organização e a navegação.<sup>11</sup>

#### 4.3.6 GDAL

O GDAL-OGR (*Geospatial Data Abstraction Library – Open source Resources*) é usado como um tradutor que transforma dados geoespaciais no

<sup>11</sup> THE HDF GROUP. Disponível em: <<http://www.hdfgroup.org/>>. Acesso em: 17 out. 2014.

formato de matriz para o formato de vetore vice-versa (LE BRIS; PAUL, 2013). É uma biblioteca que apresenta dados matriciais e vetoriais abstratos para ser usados nos mais variados tipos de aplicações. Suporta 133 formatos de arquivos em matriz, entres eles NetCDF, GeoTIFF e ILWIS RasterMap usados neste trabalho. Diversos *softwares* de SIG utilizam o pacote GDAL, dentre os mais conhecidos podem-se citar o ILWIS, ArcGIS, Google Earth e Quantum GIS. Qualquer *software* construído com o GDAL pode acessar facilmente todos os formatos de imagens que esse suporta. O GDAL está disponível para toda comunidade pelo site<sup>12</sup>.

O `gdal_translate.exe` faz parte da biblioteca GDAL-OGR e tem a função de converter diferentes arquivos matriciais em diferentes formatos. Neste trabalho, o `gdal_translate.exe` é usado para converter arquivos GeoTIFF em arquivos do formato ILWIS Raster Map.

#### 4.3.7 GLDAS\_Script\_para\_o\_ILWIS.bat

O `GLDAS_Script_para_o_ILWIS.bat` é um *batch file* que foi criado para automatizar a formatação e o cálculo da média diária do produto GLDAS/Noah. O GLDAS/Noah disponibiliza dados a cada 3 horas e o cálculo da média diária é necessário para comparar com os dados das estações do INMET.

Ao final do processamento, o `GLDAS_Script_para_o_ILWIS.bat` gera um arquivo de texto (`GLDASscript.txt`) com o roteiro de todos os comandos e expressões necessários para formatar e calcular as médias diárias do produto GLDAS, para posteriormente ser inserido no ILWIS, que armazena e executa as linhas de comandos.

---

<sup>12</sup> GEOSPATIAL DATA ABSTRACTION LIBRARY. Disponível em: <<http://www.gdal.org>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

O *batch file* foi desenvolvido para trabalhar com os seguintes parâmetros do GLDAS: Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair), Velocidade do Vento Próximo à Superfície (Wind), Temperatura do Ar Próximo à Superfície (Tair) e Pressão na Superfície (PSurf). A Figura 4 mostra separadamente cada atividade de formatação e cálculo para qual o GLDAS\_Script\_para\_o\_ILWIS.bat cria um roteiro (*script*) específico para ser executado pelo ILWIS.

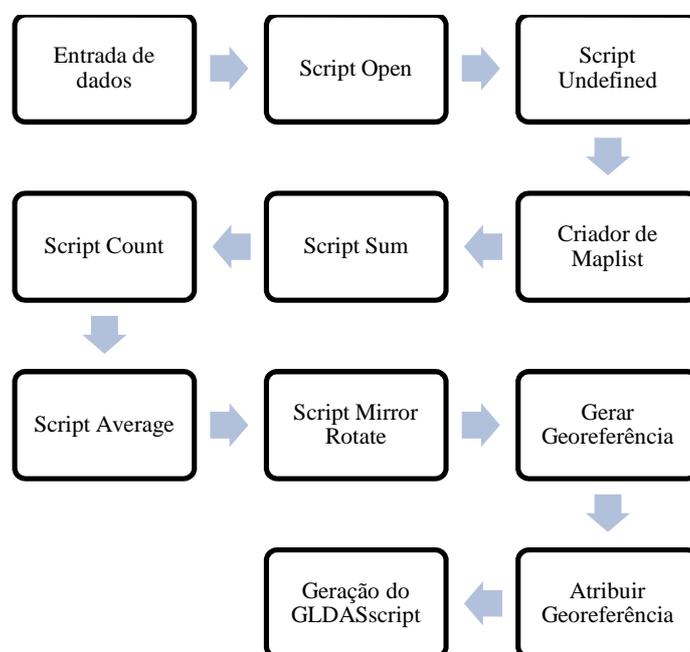


Figura 4 Fluxograma que indica todos os *scripts* gerados pelo GLDAS\_Script\_para\_o\_ILWIS.bat.

A automação por meio de *batch file* permite trabalhar com grande quantidade de imagens de forma eficiente, reduzindo erros humanos. O GLDAS\_Script\_para\_o\_ILWIS.bat é compatível com o sistema operacional Windows XP.



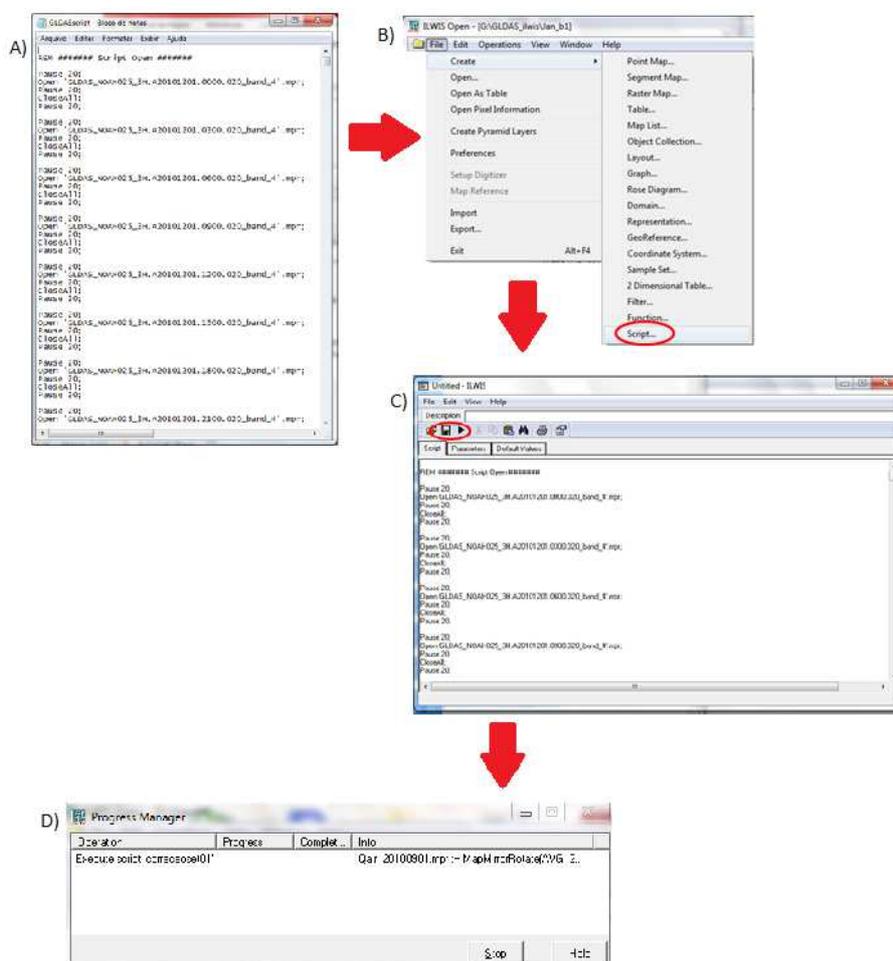


Figura 6 Passos para a execução do roteiro (*script*) de formatação do produto GLDAS

#### 4.4 Estimativa da evapotranspiração a partir do modelo SEBS

No *software* ILWIS está implementado um conjunto de rotinas que extrai parâmetros biogeofísicos, para produzir os mapas resultantes do SEBS, sendo esses os mapas de saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível mínimo, fluxo de calor

sensível máximo, fração evaporativa, evapotranspiração atual diária. As rotinas combinam dados de sensoriamento remoto e informações de estações meteorológicas.

O SEBS é baseado na equação de balanço de energia. A energia que vem do Sol e da atmosfera, em forma de radiação com comprimentos de onda curtos e longos, é dissipada e transformada no solo. Assim, o total de energia disponível (ou o saldo de radiação) é a soma do calor que aquece o solo (ou fluxo de calor no solo), com o aquecimento da superfície que transfere calor para o ambiente (ou fluxo de calor sensível), mais a energia que transforma água em vapor (ou fluxo de calor latente), conforme a equação (2).

A água que se encontra no sistema regula, de forma determinante, a distribuição de energia disponível para os diferentes processos, isto é, em áreas úmidas boa parte da energia disponível transforma água em vapor, ou seja, o fluxo de calor latente é maior; em áreas secas, maior parte da energia disponível aquece a superfície, resultando na majoração do fluxo de calor sensível. Práticas que reduzam o fluxo de calor latente são desejáveis porque a água que seria consumida pelas plantas e transpirada para a atmosfera é evaporada diretamente do solo e dos corpos d'água, não participando da formação de biomassa nos vegetais. A avaliação da água evaporada é essencial em qualquer estudo de balanço de água.

Todo o procedimento do SEBS, apresentado nesta seção, a partir deste ponto, é sustentado pelas notas de aula *An Introduction to the Surface Energy Balance System* (SEBS) de Su (2013), por um exercício proposto por Su e Wang (2013) aos seus alunos no ano de 2013, intitulado *Practical Session Instructions - Earth Observation of Water Resources* (SEBS), e da ajuda disponibilizada no *software* ILWIS.

A Figura 7 apresenta, de forma geral, as etapas do pré-processamento dos dados de entrada para o cálculo do SEBS.

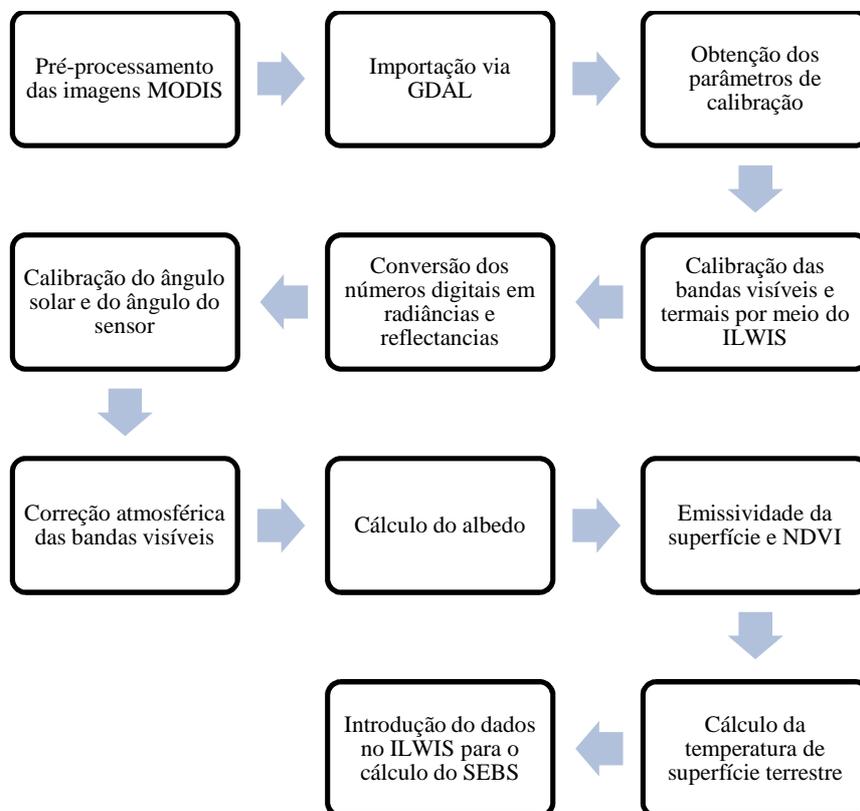


Figura 7 Etapas do pré-processamento dos dados de entrada para o cálculo do SEBS implementado no ILWIS.

A primeira parte consiste no pré-processamento das imagens MODIS. As imagens MODIS Level-1B são inicialmente pré-processadas com o programa *Modis Swath Tool*, para que as imagens fiquem no formato GeoTIFF, ou seja, prontas para serem importadas para o ILWIS via GDAL. Serão exportadas as bandas 1 e 2 do EV\_250\_Aggr1km\_RefSB, as bandas de 3 a 7 do EV\_500\_Aggr1kmRefSB, as bandas 17, 18 e 19 do EV\_1KM\_RefSB, e os canais 31 e 32 do EV\_1KM\_Emissive de *Data File*. Do arquivo de geolocalização (*Geolocation File*) serão extraídas as bandas *Height*, *Sensor Azimuth*, *Sensor Zenith*, *Solar Azimuth* e *Solar Zenith*. Dos produtos

MOD04\_L2 e MOD07\_L2 foram extraídas as bandas Optical\_Depth\_Land\_And\_Ocean e Surface\_Pressure, respectivamente, por meio do *software* HEG. A Tabela 4 mostra de forma mais detalhada esses dados.

A segunda parte é a importação das imagens MODIS para o *Software* ILWIS, via GDAL, utilizando o aplicativo `gdal_translate.exe` por meio do *prompt* de comando do sistema operacional Windows. O `gdal_translate.exe` tem a função de converter imagens do formato GeoTIFF para ILWIS Raster Map.

A próxima etapa é a obtenção dos parâmetros de calibração por meio do programa *HDFView*. Os coeficientes de calibração têm pequenas mudanças com o passar do tempo, em virtude da degradação do sensor.

Na quarta etapa, é feita a conversão dos números digitais (ND) em radiâncias e reflectâncias. Nas bandas do visível, de 1 a 7, o número digital será convertido à radiância pela seguinte equação:

$$\text{Radiância} = \text{Fator de conversão da radiância} \times (\text{ND} - \text{Fator de compensação da radiância}) \quad (10)$$

A conversão para as bandas termais 31 e 32 é similar a das bandas visíveis, mas com um processo extra para converter a radiância termal em temperatura de brilho (*brightness temperature*), que envolve a inversa da equação de Plank:

$$T_c = \frac{c_2}{\lambda_c \log \left( \frac{c_1}{\lambda_c^5 \pi L_s} + 1 \right)} \quad (11)$$

Em que  $T_c$  é a temperatura de brilho do comprimento de onda central,  $\lambda_c$  é o comprimento de onda central do sensor e  $c_1$  e  $c_2$  são as constantes de Plank.

O ND das bandas Optical\_Depth\_Land\_And\_Ocean e Surface\_Pressure também são convertidos em AOT e pressão, respectivamente, por meio de

equação linear utilizando os fatores de correção extraídos exibidos pelo *software* HDFview.

O próximo passo é a calibração do ângulo solar e do ângulo do sensor. Essa calibração é feita multiplicando cada uma das imagens que registram o ângulo solar zenital (SolarZenith), o ângulo solar azimutal (SolarAzimuth), o ângulo zenital do sensor (SensorZenith) e o ângulo azimutal do sensor (SensorAzimuth) pelo fator de correção 0,01. Foram excluídas partes das imagens SolarZenith e SensorZenith, em que o ângulo é maior que 60° e 50°, respectivamente, para que essas imagens se enquadrem nos pré-requisitos do modelo que faz as correções atmosféricas, SMAC.

A correção atmosférica das bandas do visível é essencial no trabalho com equações de balanço de energia. No ILWIS está implementado o algoritmo *Simplified Method for the Atmospheric Correction* (SMAC) (RAHMAN; DEDIEU, 1994). O SMAC requer informações da quantidade de ozônio e vapor de água na atmosfera, a profundidade ótica do aerossol e o modelo padrão de distribuição desses componentes na atmosfera. Além dos constituintes atmosféricos, também, são necessários os dados de pressão na superfície, ângulo solar zenital, ângulo solar azimutal, ângulo zenital do sensor e ângulo azimutal do sensor.

A próxima etapa é o cálculo do albedo ( $\alpha$ ), usando as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do MOD021KM, conforme a equação definida por Liang (2001) e Liang et al. (2003).

$$\alpha = 0,160.r_1 + 0,291.r_2 + 0,243.r_3 + 0,116.r_4 + 0,112.r_5 + 0,018.r_7 - 0,0015 \quad (12)$$

Em que  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  e  $r_7$  são as reflectâncias de superfície derivadas da calibração das bandas visíveis do MODIS.

A etapa seguinte é obter a emissividade da superfície por meio das duas bandas termais. Emissividade é uma propriedade do material, cuja água tem maior influência e, ao mesmo tempo, varia com o comprimento de onda o que faz a emissividade também ser dependente do sensor e afetado pelos componentes da atmosfera. Este problema é continuamente pesquisado e existem soluções principalmente baseadas nas propriedades das duas bandas do termal para anular o efeito da correção atmosférica, exceto do vapor d'água.

No SEBS, a emissividade da superfície terrestre é estimada por meio das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Os autores consideram três diferentes correções atmosféricas dependendo do valor do NDVI. De maneira geral, o modelo é baseado na média e na diferença de emissividade das duas bandas termais usadas no SEBS com pesos que dependem da vegetação e do solo exposto. Ambas a emissividade média ( $e$ ) e a diferença de emissividade ( $de$ ) é usada para estimar a temperatura da superfície terrestre. O método também fixa faixa de valores de NDVI para fazer a diferenciação entre pixels de solo exposto e vegetação. *Pixels* que contenham tanto solo exposto como vegetação são considerados intermediários. As equações de 13 a 18 são usadas para estimar ( $e$ ) e ( $de$ ), em função dos valores de NDVI:

$$e = 0,9825 - 0,051 \cdot B_{red}; \text{ para } NDVI < 0,2 \quad (13)$$

$$de = -0,0001 - 0,041 \cdot B_{red}; \text{ para } NDVI < 0,2 \quad (14)$$

$$e = 0,971 + 0,018 \cdot P_v; \text{ para } 0,2 \leq NDVI \leq 0,5 \quad (15)$$

$$de = 0,006 \cdot (1 - P_v); \text{ para } 0,2 \leq NDVI \leq 0,5 \quad (16)$$

$$e = 0,990; \text{ para } NDVI > 0,5 \quad (17)$$

$$de = 0; \text{para } NDVI > 0,5 \quad (18)$$

As equações 13, 14, 15, 16, 17 e 18 são exclusivas para *pixels* localizados sobre o solo. Os valores de NDVI menor que 0,2 representam solos expostos, maior que 0,5 representam vegetação e a faixa entre 0,2 e 0,5 representam *pixels* que contenham tanto solo exposto como vegetação.  $B_{red}$  representa valores da banda do vermelho e  $P_v$  é a proporção de vegetação. Para *pixels* localizados sobre a água, o albedo é menor que 0,035 e a emissividade é 0,995.

O NDVI é calculado com a equação (19).

$$NDVI = \frac{B_{nir} - B_{red}}{B_{nir} + B_{red}} \quad (19)$$

Em que  $B_{nir}$  são os valores registrados pela banda do infravermelho próximo. O  $P_v$  é calculado pela seguinte equação:

$$P_v = \frac{(NDVI - NDVI_{min})^2}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})^2} \quad (20)$$

Em que o  $NDVI_{max}$  é igual a 0,5 e o  $NDVI_{min}$  é igual a 0,2.

O último passo do pré-processamento é o cálculo da temperatura da superfície terrestre que pode ser obtida por meio da *Split Window Technique* (SWT). Esta técnica usa a emissividade e a temperatura de brilho para calcular a temperatura de superfície terrestre. A vantagem do SWT é que os efeitos dos componentes da atmosfera são cancelados, com exceção do vapor de água na atmosfera. A equação (21) calcula a temperatura da superfície terrestre:

$$\begin{aligned}
LST = & btm_2 + (1,97 + 0,2.W). (btm_2 - btm_1) \\
& - (0,26 - 0,08.W). \sqrt{btm_2 - btm_1} \\
& + (0,02 - 0,67.W) \\
& + (64,5 - 7,35.W). (1 - e) \\
& - (119 - 20,4.W). de
\end{aligned} \tag{21}$$

Em que  $LST$  é a temperatura da superfície terrestre,  $btm_1$  e  $btm_2$  são as temperaturas de brilho, obtidas das bandas 31 e 32 do MODIS,  $W$  é o teor de água da atmosfera,  $e$  é a emissividade e  $de$  é a diferença de emissividade.

Se o  $W$  não estiver disponível, ele pode ser calculado pela equação (22) sugerida por Li et al. (2003):

$$W = 13,73 - 13,662 \cdot \frac{T_j}{T_i} \tag{22}$$

Em que  $T_j / T_i$  é a razão de transmitância das bandas 31 e 32 do MODIS.

Neste ponto é finalizado o pré-processamento dos dados de entrada do SEBS. Os mapas de albedo, NDVI, emissividade média, diferença de emissividade e temperatura da superfície terrestre entram nos cálculos apresentados na Seção 3.4 - *Surface Energy Balance System* (SEBS). Esses cálculos também estão implementados no ILWIS, cuja janela para a introdução dos mapas acima citados está apresentada na Figura 8:

The screenshot shows the 'Surface Energy Balance System (SEBS)' window with the following settings:

- Land Surface Temperature: 0541305\_1st
- Emissivity: 0541305\_emis
- Land Surface Albedo: 0541305\_albedo
- NDVI: 0541305\_ndvi
- Vegetation Fraction (Fc)
- Leaf Area Index
- Sun Zenith Angle Map (degree): 0541305\_sza\_lim
- DEM map: 0541305\_Height
- Inst. downward solar radiation map(Watts/m<sup>2</sup>): 0541305\_DownSolar
- Inst. downward solar radiation value(Watts/m<sup>2</sup>)
- Land use map with associated surface parameters:
  - Canopy height map [m]
  - Displacement height map [m]
  - Surface roughness map [m]
  - Julian day number: 54
- Reference Height (m): 10.00
- PBL height (m): 1000.00
- Specific humidity map (kg/kg): 0541305\_Qair
- Wind speed map (m/s): 0541305\_Wind
- Air temperature map (Celsius): 0541305\_Tair
- Pressure at reference height map (Pa): 0541305\_Psurf
- Pressure at surface map (Pa): 0541305\_pressurf
- Mean daily air temperature map (Celsius): 0541305\_Tmedia
- Sunshine hours per day: 10.12
- Input kB<sup>-1</sup>
- Output Raster Map: 0541305\_SEBS\_ET

Figura 8 Interface da janela de entrada de dados do SEBS, implementado no *software* ILWIS

Na Figura 8, o parâmetro *Inst. downward solar radiation map* (mapa de radiação solar instantânea) é obtido, por meio da soma dos mapas de radiação de ondas curtas e longas, do produto GLDAS/Noah, com o horário mais próximo do momento em que a imagem MODIS foi registrada. O parâmetro *Sunshine hours per day* (número de horas de brilho solar por dia) é a média das horas de brilho solar das cidades que participam do cálculo, num dado dia, a partir dos dados do INMET. Os valores usados no cálculo estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 Valores médios de horas de brilho solar usados como dado de entrada do modelo SEBS

<b>Data</b>	<b>Hora (GMT)</b>	<b>Horas de brilho solar</b>
23/02	13 h 5min	10,12
22/06	13 h 10min	9,45
22/06	13 h 15min	8,00
30/06	14 h	9,37
01/07	13 h 5min	9,23
09/08	13 h 10min	9,90
25/08	13 h 10min	10,26
25/08	13 h 15min	9,82
27/08	13 h	9,98
03/09	13 h 5min	9,87
05/09	12 h 55min	9,69
10/09	13 h 10min	9,47

Os mapas de saída de SEBS são evapotranspiração instantânea, evapotranspiração atual diária, fluxo de calor no solo, saldo de radiação, fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível.

O SEBS, ocasionalmente, pode apresentar resultados muito incompatíveis com a realidade. Quando isso acontece, deve-se fazer uma revisão das condições. Em geral, o estabelecimento de algumas recomendações apresentadas abaixo, ajuda a alcançar bons resultados com o algoritmo:

- a) Usar imagens próximas do meio-dia. Os ângulos zenitais do Sol e do sensor são fortemente afetados pelos componentes da atmosfera assim como a temperatura de superfície;
- b) O SEBS apresenta melhor resultado, em áreas agrícolas planas, onde o efeito de gradiente da temperatura com a altitude é minimizado;
- c) O SEBS é muito sensível aos dados de entradas meteorológicos, principalmente à temperatura do ar, a diferença entre a temperatura do ar e da superfície influencia o fluxo de calor sensível e deve ser avaliado com cuidado;
- d) A altura de rugosidade é fator de suma importância. É recomendado o uso de um dado de entrada externo para essa informação;
- e) O mapa de radiação solar é preferível que tenha baixa resolução espacial;
- f) O fluxo de calor no solo em áreas florestais precisa ser checado, pois o algoritmo é específico para vegetação e áreas agrícolas. Áreas florestais terão o valor de G superestimado.

#### **4.5 Critérios de avaliação**

Os critérios de avaliação usados neste trabalho para a comparação dos valores médios obtidos pelo GLDAS/Noah com os valores registrados pelas estações meteorológicas do INMET para as variáveis de velocidade do vento, temperatura do ar e pressão superficial; e com os resultados obtidos pela equação Penman-Monteith-FAO para a variável umidade específica, foram a correlação (R), o erro médio sistemático (MBE) e a raiz média quadrática do desvio (RMSE).

$$R = \frac{\sum(X_s - \bar{X}_s)(X_o - \bar{X}_o)}{\sqrt{\sum(X_s - \bar{X}_s)^2 \sum(X_o - \bar{X}_o)^2}} \quad (23)$$

$$MBE = \frac{(\sum X_s - \sum X_o)}{n} \quad (24)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum(X_s - X_o)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$X_s$  representa valores obtidos pelo sensoriamento remoto e  $\bar{X}_s$  representa a média desses valores.  $X_o$  são valores registrados nas estações meteorológicas e  $\bar{X}_o$  é seu valor médio.  $n$  é o total de vezes em que  $X_s$  e  $X_o$  foram comparados. O  $R$  indica a existência de uma relação linear entre  $X_s$  e  $X_o$ , variando em 1 e -1 e valores próximos de zero implicam que não existe relação entre as duas variáveis. MBE e RMSE igual a zero indicam o ajuste perfeito, mas como as observações são imperfeitas este valor nunca é alcançado (WANG et al., 2011). É importante ressaltar que os valores das variáveis, obtidos por meio de SR, não são exatamente iguais aos valores das mesmas variáveis obtidos nas estações, já que os dados de SR representam uma área ou um *pixel* na imagem e os dados das estações são pontuais.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 GLDAS**

Foi feita a comparação dos valores médios diários e mensais do produto GLDAS/Noah com os valores registrados e estimados pelas 46 estações do INMET citadas na Tabela 2. As variáveis estudadas foram Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair), Velocidade do Vento Próximo à Superfície (Wind), Temperatura do Ar Próximo à Superfície (Tair) e Pressão na Superfície (PSurf). O Qair foi obtido, por meio do modelo PM-FAO, utilizando dados das estações, e as outras variáveis foram mensuradas diretamente pelas estações meteorológicas.

Os valores aqui comparados possuem as seguintes características: os valores extraídos do GLDAS/Noah representam a área de um pixel e os valores registrados pelas estações são pontuais.

### 5.1.1 Qair

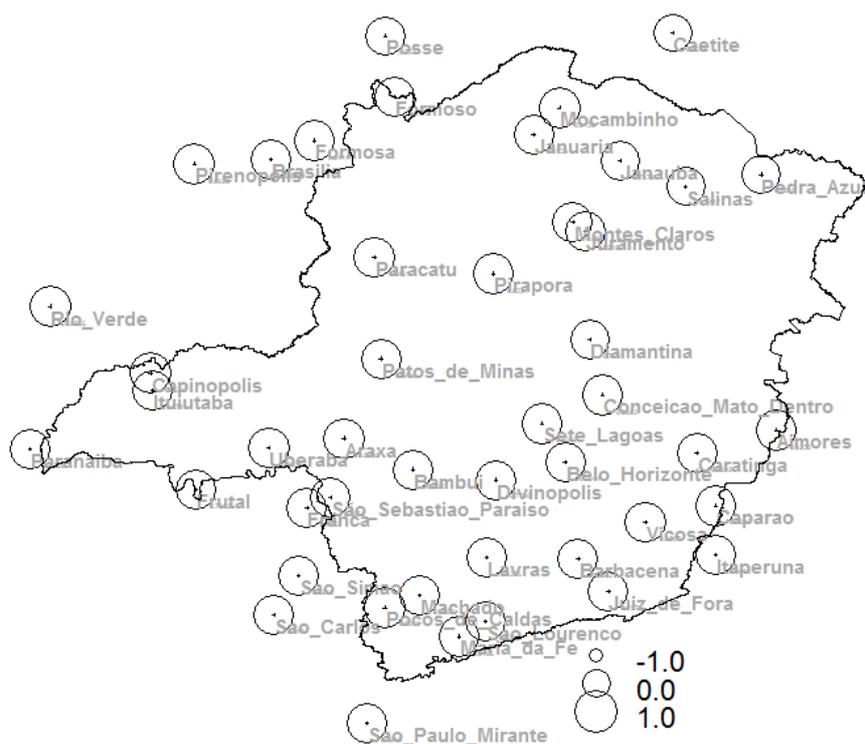


Figura 9 Correlação entre as médias diárias de umidade específica registradas pelo GLDAS/Noah com a umidade específica calculada por meio da equação de Penman-Monteith-FAO com dados das estações do INMET

Os valores de médias diárias registrados pelo GLDAS apresentaram boas correlações com os valores obtidos pelas estações do INMET. Os valores variaram entre 0,6644 (na estação de Caetité – BA) e 0,8826 (em Pirenópolis – GO) durante o ano de 2010. No mapa da Figura 9 observe-se que toda região dentro da área de estudo apresenta boa correlação para a variável Qair.

Temporalmente, a correlação entre as umidades específicas variou de -0,2942 (29/10/2010) a 0,8734 (15/05/2010), sem a existência de um período definido que apresente um padrão, como pode ser observado na Figura 10.

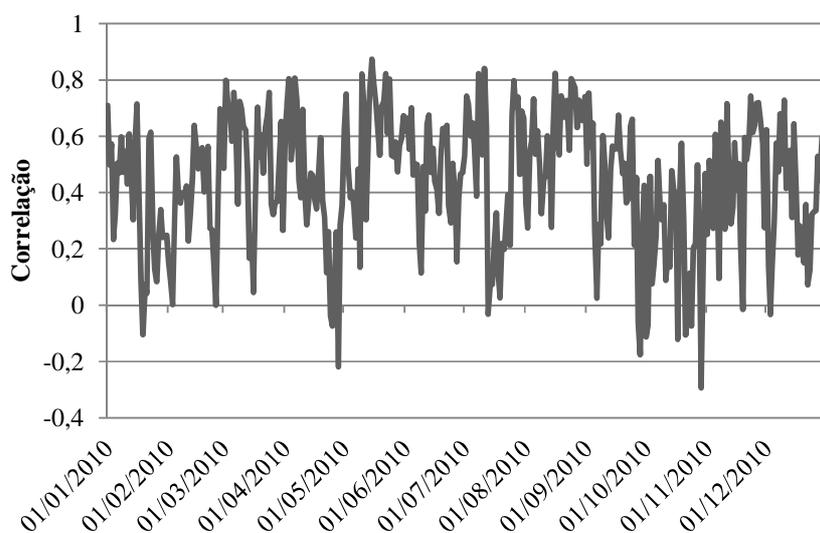


Figura 10 Valores de correlação, durante o ano de 2010, entre a umidade específica registrada pelo o GLDAS e a umidade específica, calculada com a equação Penman-Monteith-FAO, a partir de dados das estações do INMET

As figuras seguintes apresentam os gráficos das duas cidades, Caetité, no estado da Bahia, que apresentou a menor correlação (0,6644) entre as cidades estudadas para a variável Qair, e Pirenópolis, em Goiás, que teve o maior valor de correlação (0,8826). O MBE e o RSME de Caetité foram 0,003436 kg/kg e 0,004064 kg/kg, respectivamente. A comparação, durante o ano de 2010, é vista no gráfico da Figura 11. Em Pirenópolis o MBE foi de 0,002219 kg/kg e o RSME foi de 0,003167 kg/kg, e a comparação entre os valores extraídos do GLDAS/Noah e da estação do INMET é vista no gráfico da Figura 12.

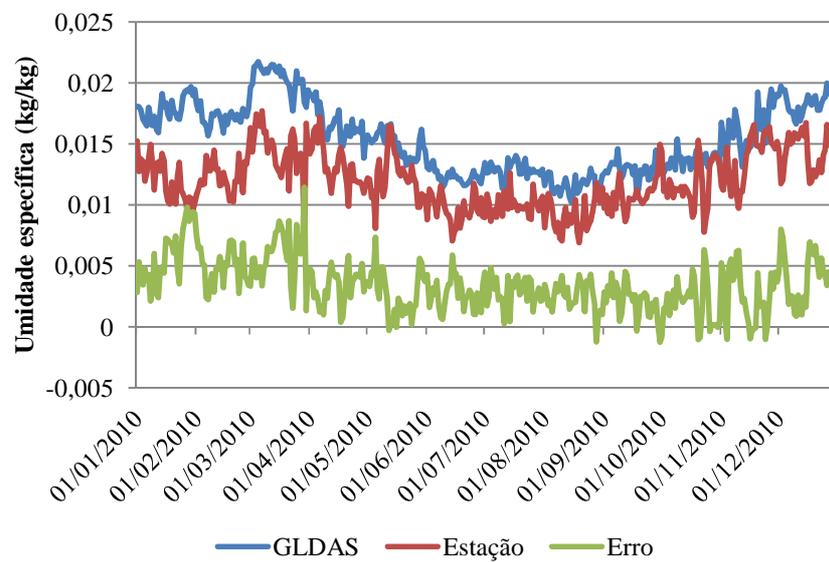


Figura 11 Umidade específica obtida do GLDAS/Noah, da estação do INMET e o erro, em Caetité – BA, para o ano de 2010

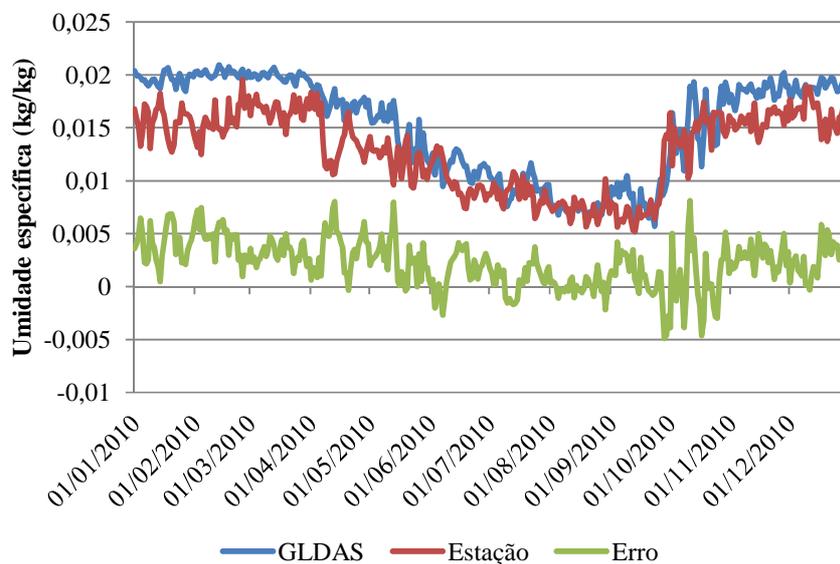


Figura 12 Umidade específica obtida do GLDAS/Noah, da estação do INMET e o erro, em Pirenópolis – GO, durante o ano de 2010

A confiabilidade no produto GLDAS/Noah para médias diárias do Qair pode ser observada analisando o caso específico da cidade de Frutal – MG. O RMSE dessa cidade foi o maior, dentre todas as cidades estudadas, com o valor de 0,0049 kg/kg. Frutal também apresentou o segundo pior MBE entre as localidades estudadas (0,003835 kg/kg). Apesar disso, pode-se perceber, pela Figura 13, que a relação entre o GLDAS e a estação de Frutal é muito boa, indicando que o produto GLDAS/Noah, para a média diária de umidade específica, é confiável como dados de entrada de modelos como o SEBS.

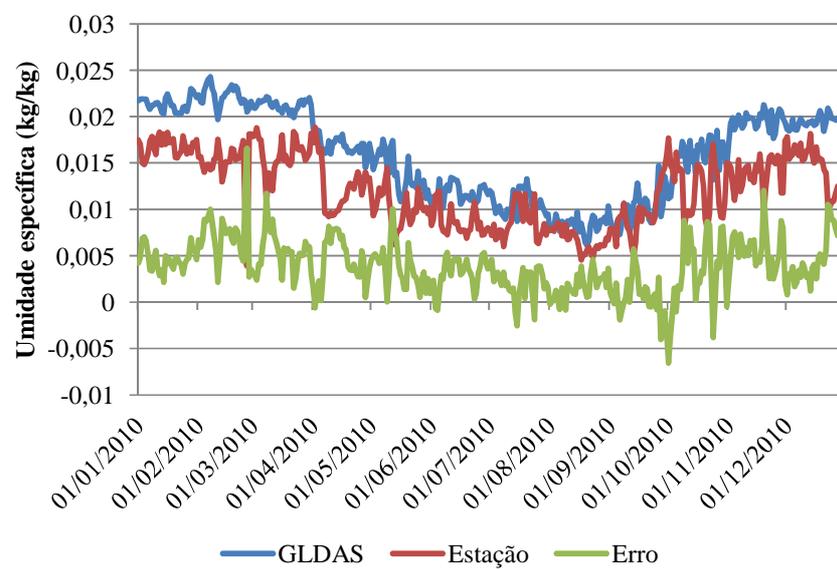


Figura 13 Dados de umidade específica em Frutal – MG, com valores obtidos do produto GLDAS/Noah, da estação do INMET e o erro

Os valores de média diária do Qair, extraídos do GLDAS, teve uma tendência de aproximação dos valores registrados nas estações do INMET entre os meses de junho e outubro de 2010, registrando RMSE com valores mais próximos de zero, como ilustra a Figura 14.

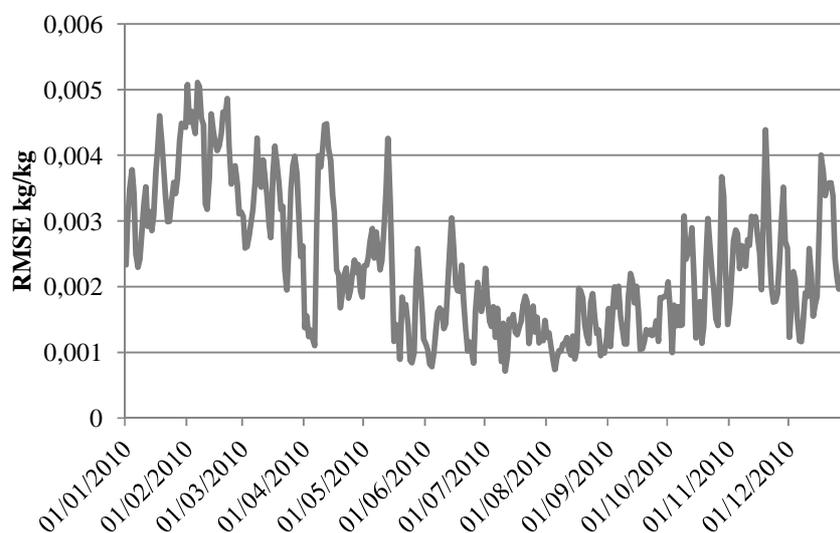


Figura 14 Comportamento do RMSE para a variável Qair, durante o ano de 2010, com o desvio médio do erro menor entre os meses de junho e outubro de 2010

O produto GLDAS/Noah é ainda mais confiável quando se avaliam as médias mensais de umidade específica, que apresentaram excelentes correlações com as estações do INMET, com valores entre 0,8387 (em Juramento – MG) e 0,9860 (em Ituiutaba – MG). A única exceção foi a cidade de São Sebastião do Paraíso, que teve uma discrepância no mês de março com o R igual a 0,4050. A Figura 15 ilustra que não existe uma tendência regional para os valores de correlação na área de estudo. O MBE e o RMSE das médias mensais da umidade específica foram semelhantes aos valores das médias diárias. Temporalmente, a umidade específica manteve a tendência de registrar valores mais confiáveis entre os meses de junho e outubro de 2010. Os valores exatos do R, MBE e RMSE foram registrados nas tabelas em anexo.

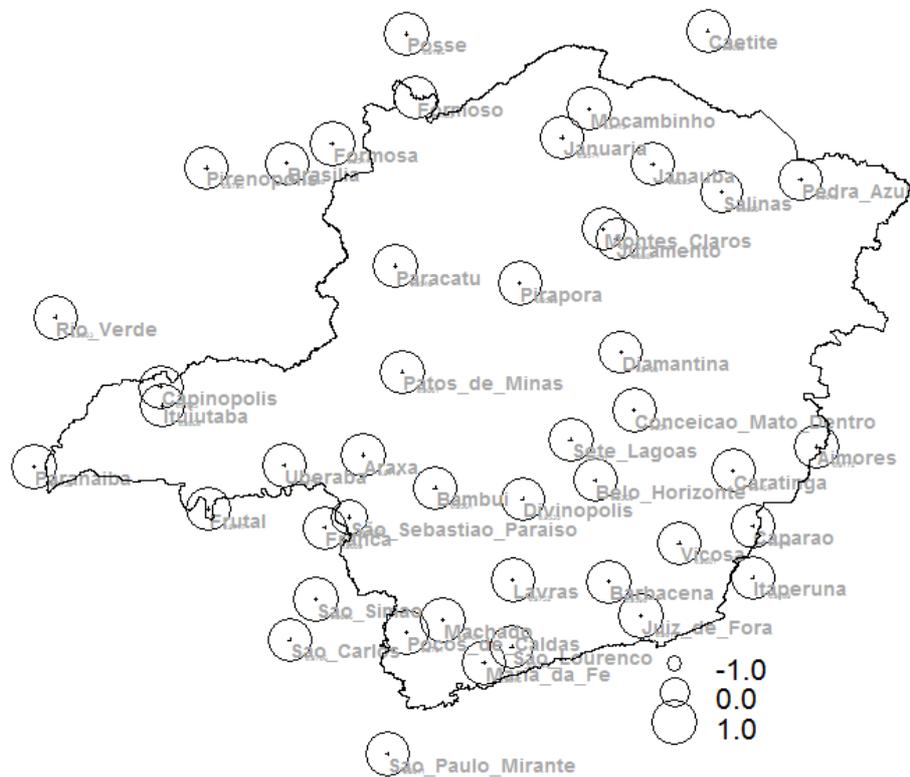


Figura 15 Correlação das médias mensais do Qair entre o GLDAS/Noah e as estações do INMET

### 5.1.2 Wind

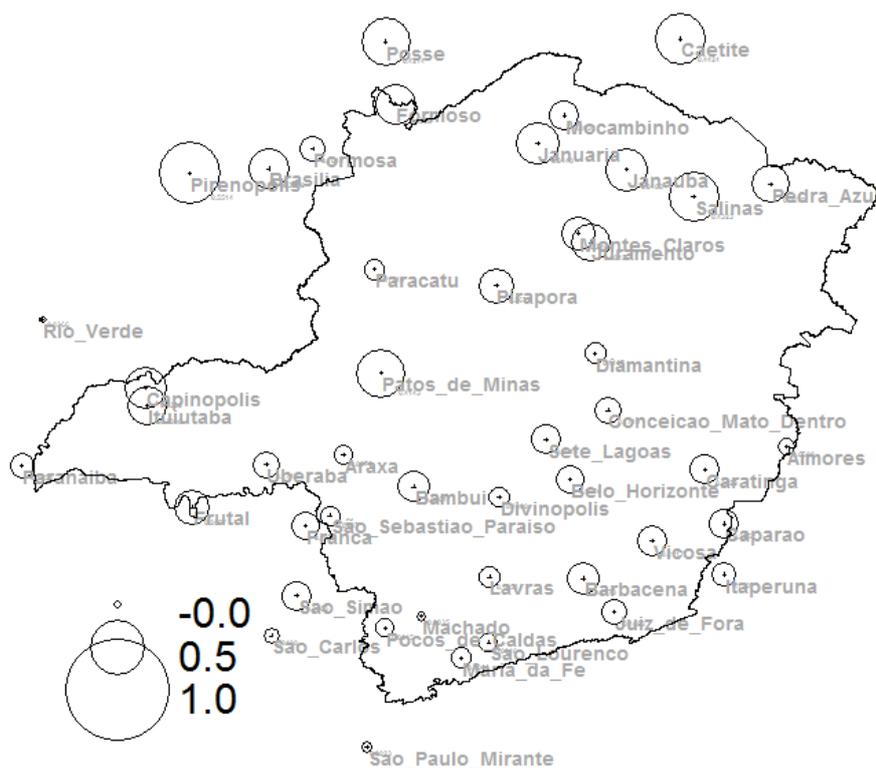


Figura 16 Correlação entre médias diárias de velocidade do vento do produto GLDAS/Noah e das estações do INMET para o ano de 2010, com as cidades do Sul de Minas e Campos das Vertentes com valores de R próximos de zero

As médias diárias de velocidade do vento, obtidas do GLDAS, apresentaram baixos índices de correlação com as estações INMET, geralmente com valores próximos de zero em cidades com o relevo acidentado como, por exemplo, Diamantina (0,1167), Lavras (0,1051), Machado (-0,0035), Poços de Caldas (0,0845) e São Lourenço (0,0846). Especialmente, o Sul de Minas e o Campo das Vertentes tenderam a não ter correlação entre dados do

GLDAS/Noah e as estações do INMET. As melhores correlações aconteceram na cidade de Pirenópolis (0,5514) e Caetité (0,4424) e essa última cidade teve lacunas nos registros do INMET. Esses valores indicam que locais com o relevo menos acidentado tendem a apresentar maior correlação. A comparação entre os valores extraídos do GLDAS e do INMET para Pirenópolis e Caetité foi registrada na Figura 17 e Figura 18.

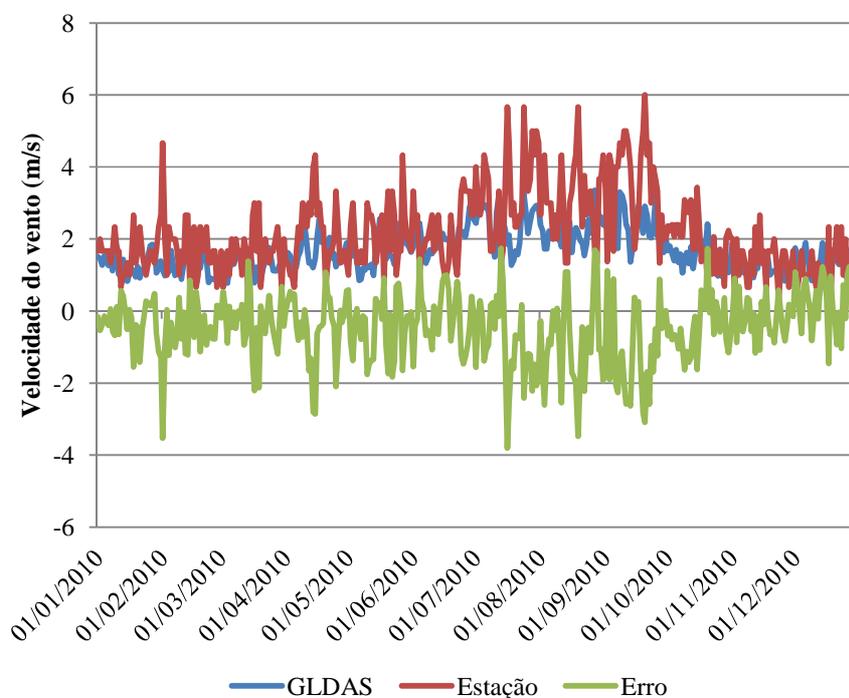


Figura 17 Dados de velocidade do vento em Pirenópolis – GO, durante o ano 2010

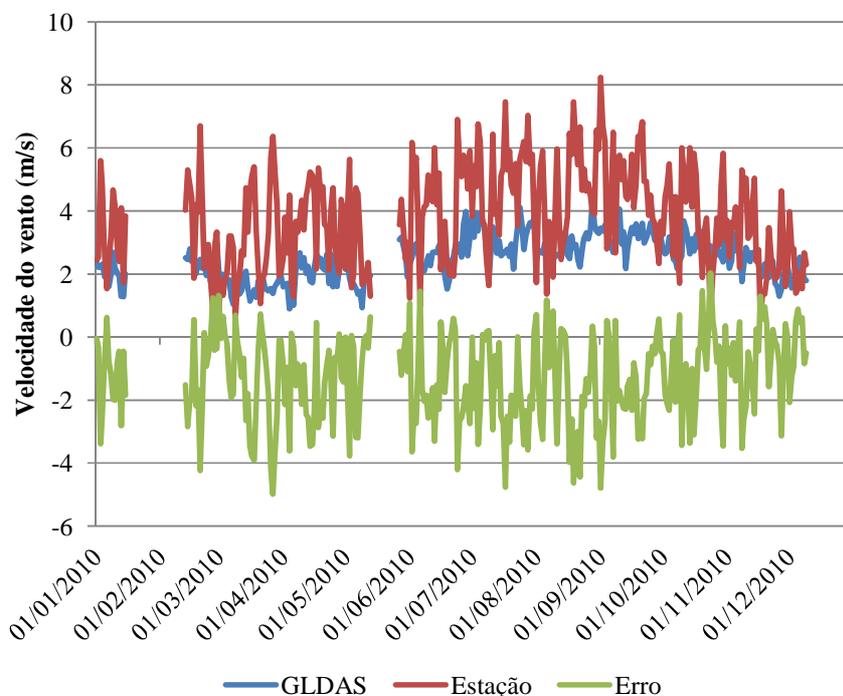


Figura 18 Valores de velocidade do vento em Caetité - BA. As lacunas representam dias em que não houve registro pela estação meteorológica

As médias mensais de Wind apresentaram valores de correlação mais altos, o R para a cidade de Pirenópolis foi de 0,9478. Lavras, praticamente, não apresentou relação nos dados diários (0,1051), mas mensalmente o R foi igual a 0,7606. Esses valores de R indicam que mensalmente o produto GLDAS/Noah para a velocidade do vento é confiável. A Figura 19 apresenta os valores de correlação, graficamente, os valores numéricos estão no anexo deste trabalho.



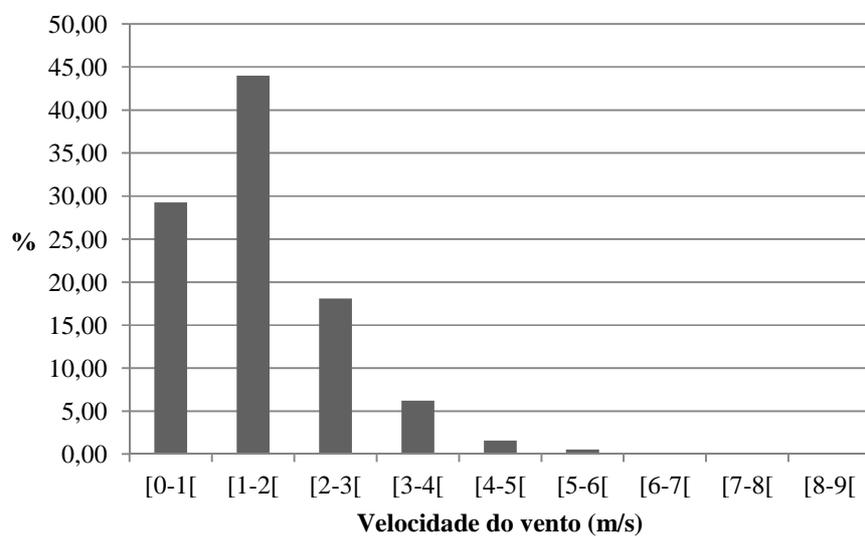


Figura 20 Frequência relativa da velocidade do vento registrada pelas estações do INMET na região de estudo, durante o ano de 2010

### 5.1.3 Tair

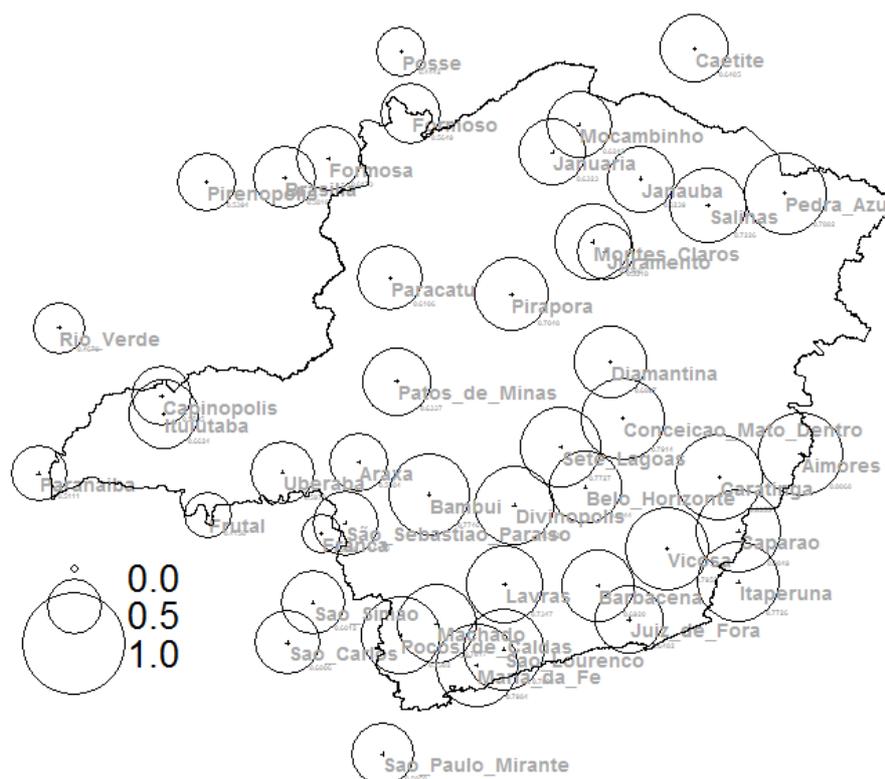


Figura 21 Correlação entre as médias diárias de temperatura do ar do produto GLDAS/Noah e das estações do INMET para o ano de 2010

A correlação diária para o Tair variou entre 0,3429 (Franca –SP) e 0,8355 (Caratinga – MG), distante do valor 0,9933 encontrado por Wang et al. (2011) na China. Os valores de correlação para a média diária da temperatura se mantiveram altas, durante todo ano, com raras exceções, a principal no dia 14/07/2010 com o valor de 0,17, a variação da temperatura durante o ano de 2010 é mostrada na Figura 22.

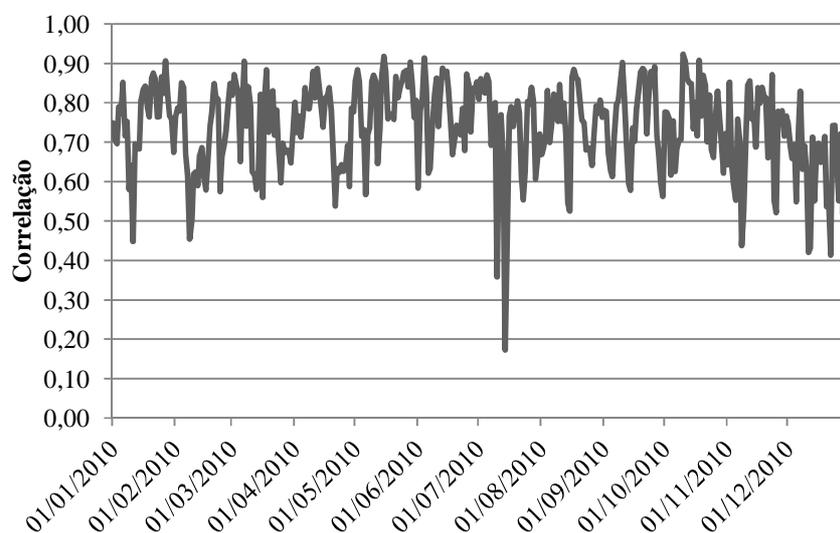


Figura 22 Variação da correlação entre os dados do produto GLDAS/Noah e as estações do INMET para a média diária da temperatura durante o ano de 2010

O gráfico da cidade de Franca com os valores de temperatura registrados pelo GLDAS/Noah e a estação do INMET é visto na Figura 23.

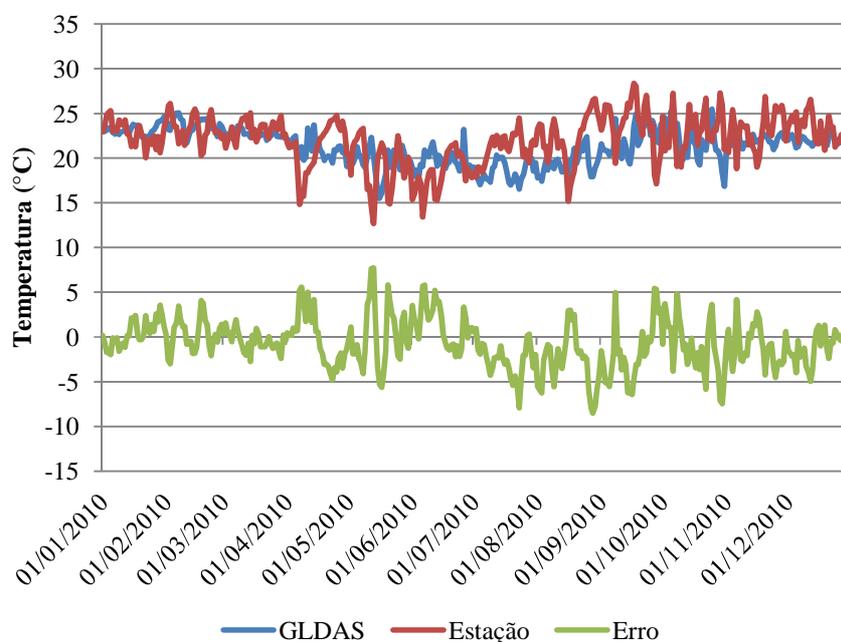


Figura 23 Gráfico dos valores da temperatura em Franca – SP, cidade que apresentou o menor valor de correlação entre o produto GLDAS/Noah e a estação do INMET dentre as cidades estudadas durante o ano de 2010 (0,3429). Os valores de MBE e RMSE foram de  $-0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $2,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente

Novamente as correlações das médias mensais foram mais altas, variando entre 0,7357 (Juramento – MG) e 0,9898 (Caratinga – MG). O GLDAS tende a superestimar a temperatura no mês de junho (MBE igual a  $1,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e, no restante do ano, esse produto estima bem a temperatura. A Figura 24 apresenta o MBE de todos os meses de 2010. Maiores detalhes nas tabelas em anexo.

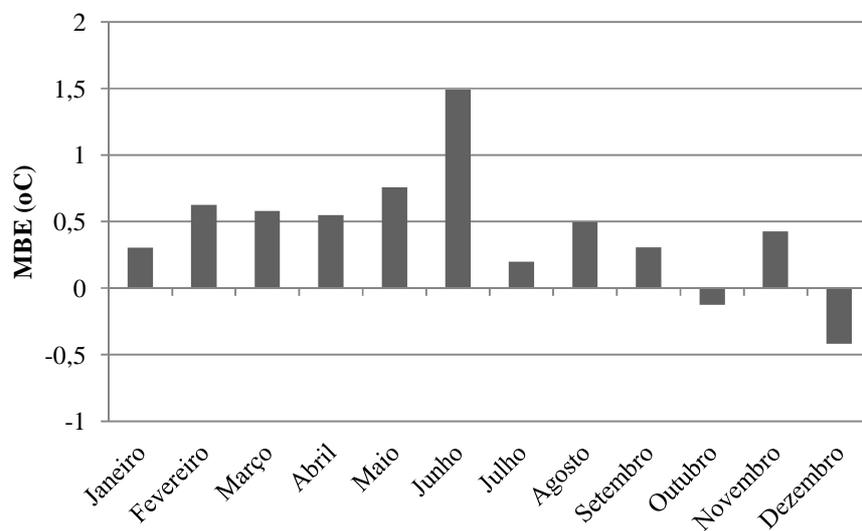


Figura 24 Erro médio sistemático da temperatura do ar próxima à superfície no ano de 2010

#### 5.1.4 PSurf

A pressão superficial tende a se manter constante, durante o ano. O critério de avaliação mais adequado é MBE, que permite perceber a diferença dos valores obtidos pelo o GLDAS/Noah e pelas estações do INMET. A Figura 25 mostra que o GLDAS/Noah tende sempre a superestimar os valores da pressão superficial em relação aos valores obtidos nas estações do INMET.

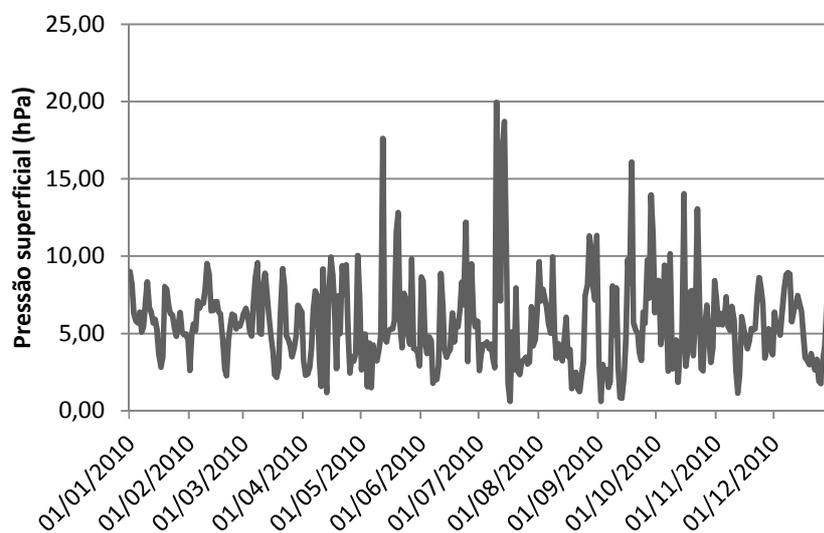


Figura 25 Variação do erro médio sistemático da pressão superficial entre o GLDAS e as estações do INMET no ano de 2010

Os valores de pressão superficial variam muito pouco durante o ano, a Figura 26 e Figura 27 exemplificam esta afirmação. O que é visto nessas figuras para as cidades de Capinópolis – MG e Barbacena – MG acontece de forma semelhante para as outras cidades analisadas neste estudo, sendo o MBE o melhor critério de avaliação para pressão superficial.

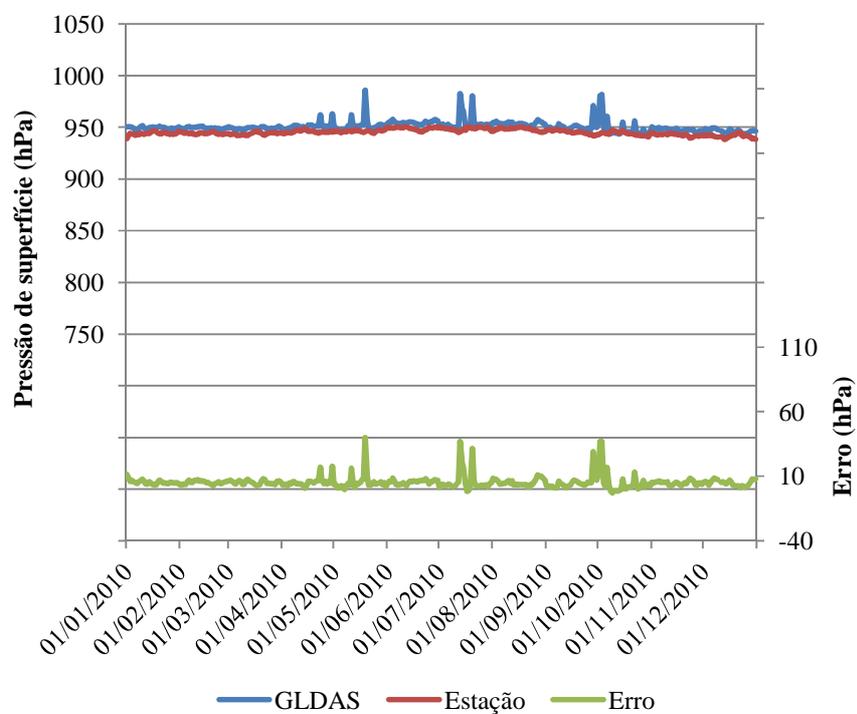


Figura 26 Gráfico exemplificando o comportamento tipicamente estável da pressão superficial. Aqui são apresentados os dados de Capinópolis – MG

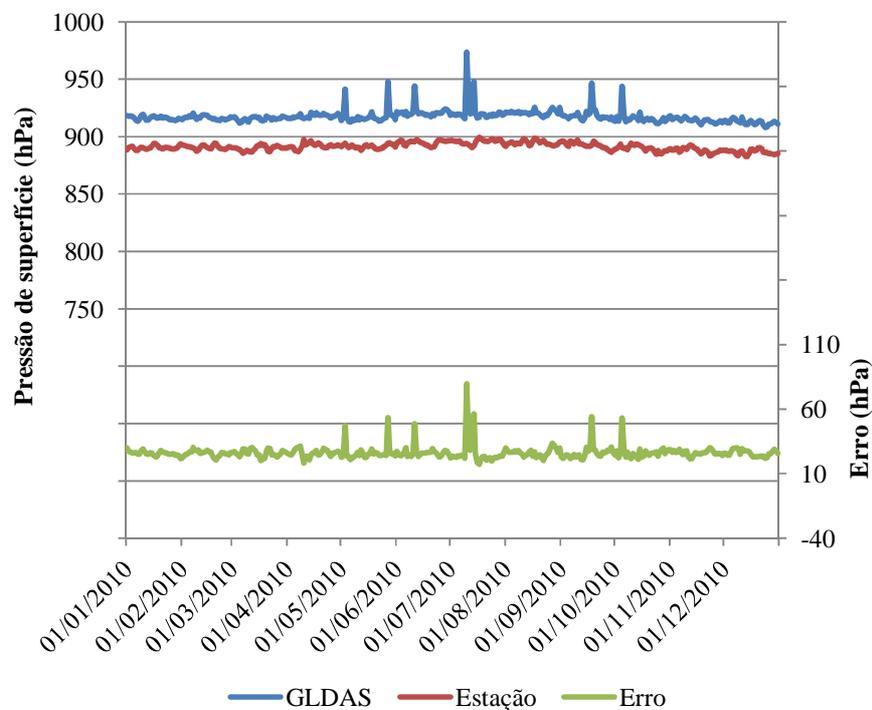


Figura 27 Exemplo do comportamento constante do erro do PSurf. Dados referentes a Barbacena – MG

Neste estudo o MBE variou entre -21,70 hPa (Caratinga – MG) e 41,18 hPa (Diamantina – MG). O melhor resultado foi apresentado em Divinópolis 3,09 hPa. Esses valores praticamente se mantiveram constantes na avaliação das médias mensais, em razão da estabilidade do PSurf durante o ano. As estatísticas das outras cidades estudadas estão nas tabelas em anexo.

## 5.2 SEBS

Os principais resultados gerados pelo SEBS são os componentes da equação de balanço de energia ( $W/m^2$ ), que são registrados no momento em que

a imagem é registrada, e a evapotranspiração atual diária, que estima a evapotranspiração total de um dia, em mm/d, é um resultado de interesse na produção agrícola.

As imagens resultantes do SEBS apresentam lacunas onde não houveram valores estimados, em virtude da influência de nuvens e a não sobreposição da imagem MODIS a toda região de estudo em um dado momento.

Dentre os dias estudados, o que apresentou maior valor de  $ET_{diária}$  foi 23 de fevereiro, atingindo 7,97 mm/d. Esse resultado é apresentado na Figura 28.

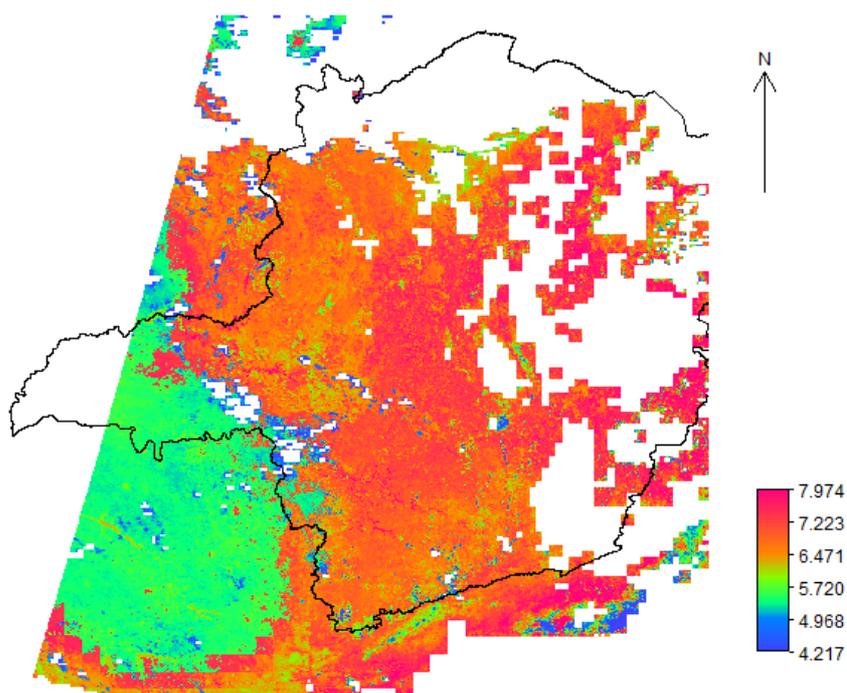


Figura 28 Mapa de evapotranspiração atual diária do dia de 23/02, em mm/d

Apesar de a radiação solar ser um dos principais fatores que contribuem para o aumento da evapotranspiração, no caso do dia 23/02, os locais, que receberam maior incidência de radiação, não coincidiram com os maiores

valores de evapotranspiração diária. O mapa de radiação solar do dia 23/02 é exibido na Figura 29.

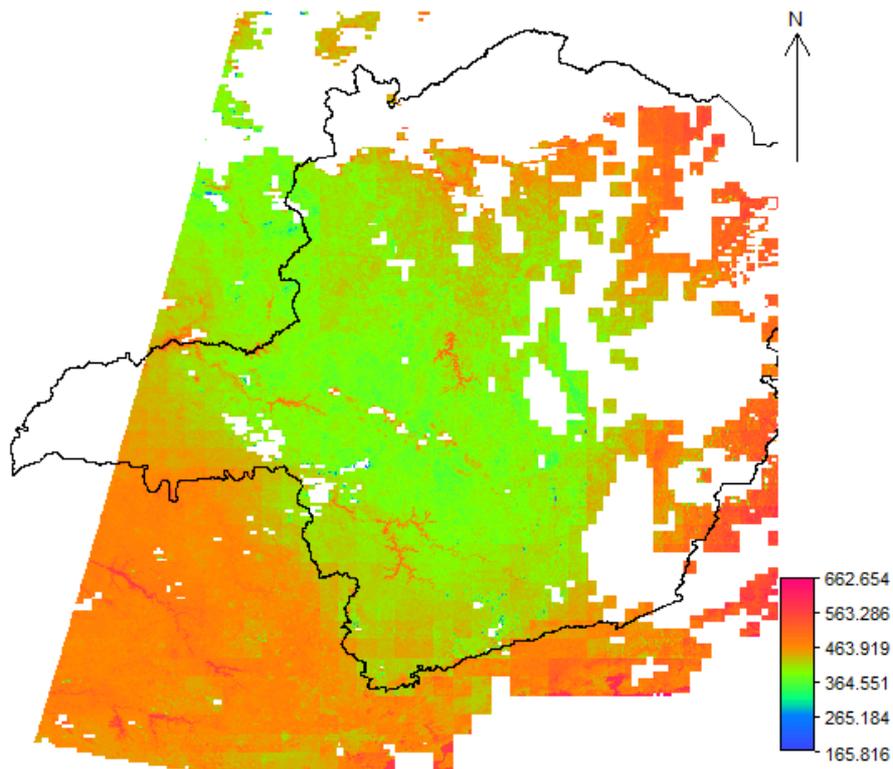


Figura 29 Radiação solar instantânea para o dia 23/02, e Watts por metro quadrado

Isso ocorreu por causa da indisponibilidade de água no solo, que limita a ocorrência da evapotranspiração, ou fluxo de calor latente, sendo parte da radiação incidente transformada em fluxo de calor sensível, como mostrado na Figura 30.

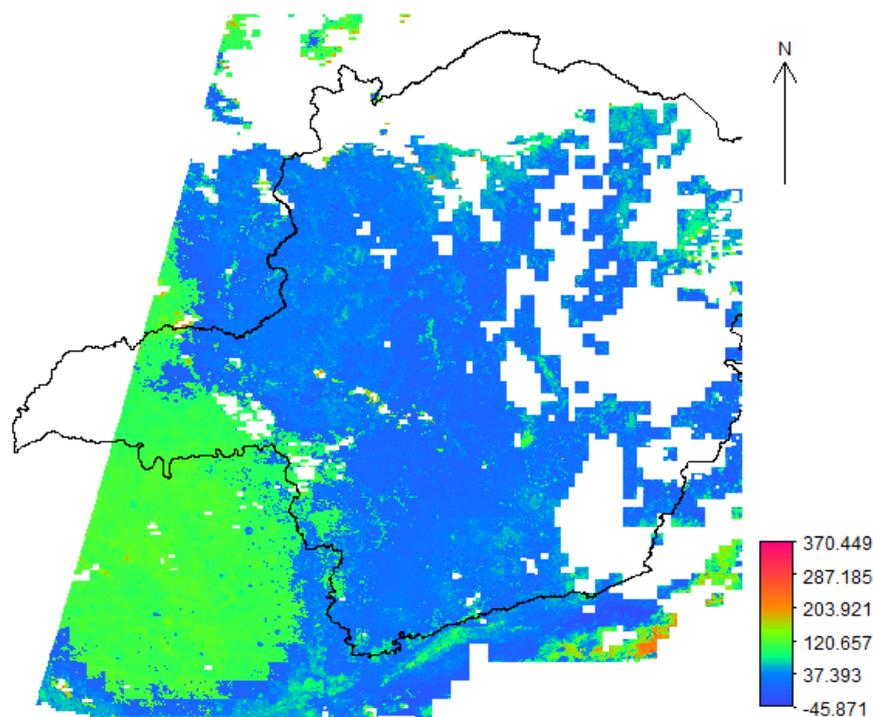


Figura 30 Fluxo de calor sensível, em  $W/m^2$ , do dia 23/02

Todos os outros dias do ano de 2010, que foram estudados, ocorreram durante a estação do inverno, que é seco e frio no Estado de Minas Gerais. Assim todas as evapotranspirações diárias máximas foram menores que a do dia 23 de fevereiro, pois nesse período a radiação solar e a disponibilidade de água no solo são menores. Para exemplificar essa situação, os mapas de evapotranspiração atual diária, gerados pelo o SEBS, do dia 22 de junho e 27 de agosto, são apresentados na Figura 31 e Figura 32.

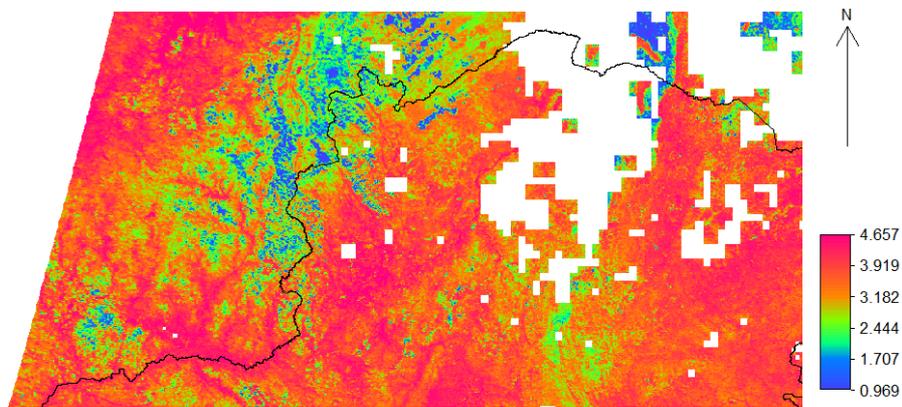


Figura 31 Evapotranspiração atual diária do dia 22/06, em mm/d

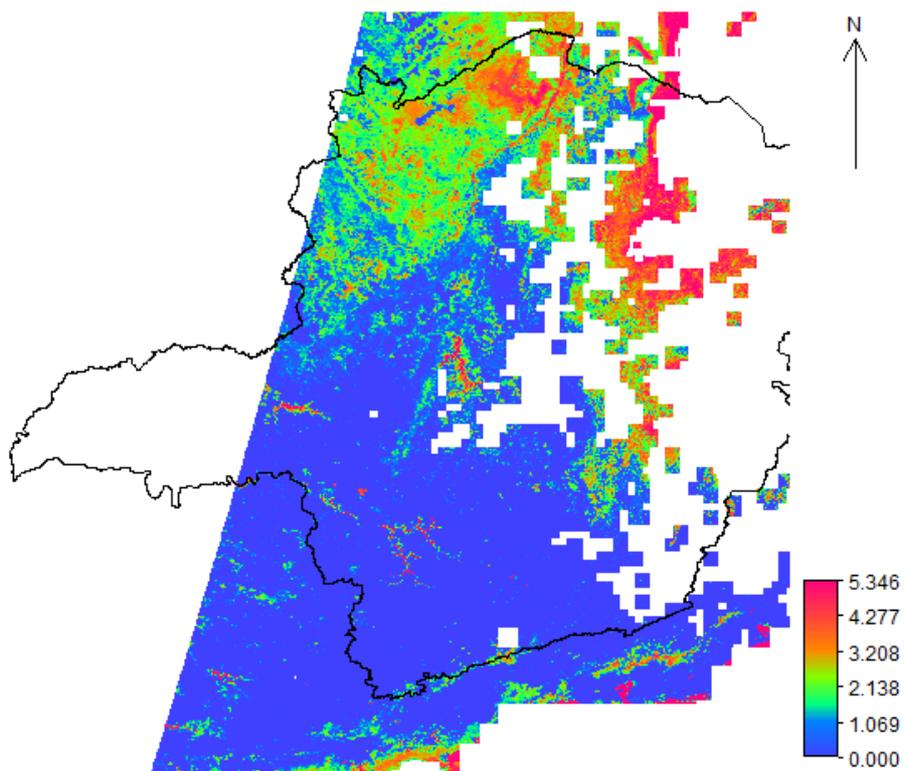


Figura 32 Evapotranspiração atual diária calculada pelo SEBS, do dia 27/08, em mm/d

O dia 22/06 apresentou baixos valores de fluxo de calor sensível em grande parte da área imageada, exibido na Figura 33, isso indica a existência de disponibilidade de água no solo para que ocorra a evapotranspiração, que foi limitada principalmente pela radiação solar.

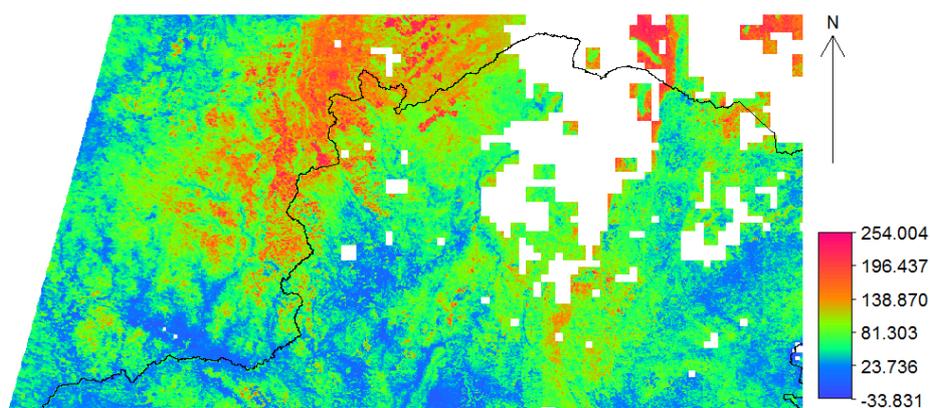


Figura 33 Fluxo de calor sensível, do dia 22/06, em  $W/m^2$

Já no dia 27/08, os altos valores de fluxo de calor sensível, apresentados na Figura 34, indicam indisponibilidade de água no solo, o que explica os baixos valores de  $ET_{diária}$  nesse dia em boa parte da área imageada.

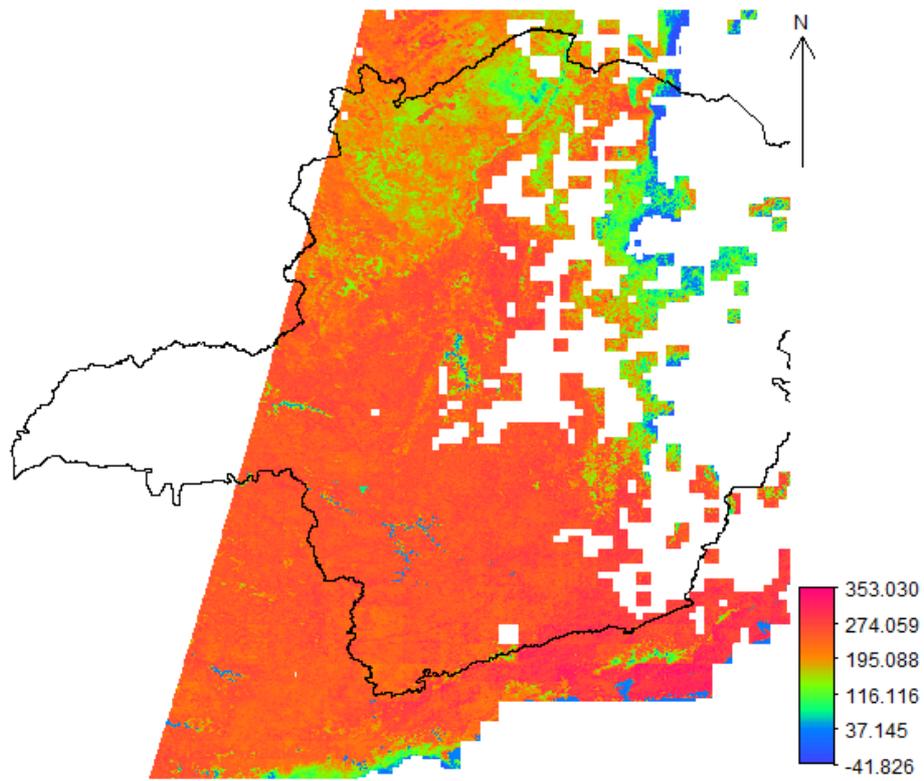


Figura 34 Fluxo de calor sensível registrado no dia 27/08, em  $\text{W/m}^2$

## 6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos foi possível concluir que:

- a) De forma geral, as médias diárias das variáveis umidade específica próxima à superfície, temperatura do ar próximo à superfície e pressão na superfície, obtidas pelo produto GLDAS/Noah obtiveram boa concordância com as estações do INMET, sendo o GLDAS/Noah uma excelente fonte de dados de entrada para o modelo SEBS, no estado de Minas Gerais e seu entorno, durante o ano de 2010;
- b) As médias diárias de velocidade do vento próximo à superfície extraídas do GLDAS/Noah não obtiveram boa concordância com as estações do INMET, influenciado principalmente pelo relevo acidentado do estado de Minas Gerais.
- c) As médias mensais das variáveis estudadas extraídas do GLDAS/Noah obtiveram excelente concordância com as estações do INMET;
- d) A evapotranspiração atual diária estimada pelo SEBS é dependente da disponibilidade de água no solo, que reduz o fluxo de calor sensível na superfície do solo.

Em conclusão, espera-se que este trabalho tenha contribuído com o melhor entendimento do balanço de energia e do modelo SEBS; com a divulgação do produto GLDAS e das imagens MODIS; com a divulgação de *softwares* de domínio público, como o ILWIS. Ademais, espera-se ter fornecido mais um subsídio para a utilização racional dos recursos hídricos na agricultura por meio do sensoriamento remoto.

## REFERENCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 336 p.(FAO. Irrigation and Drainage Paper, n. 56).
- ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, n. 1/2, p. 27-41, Mar. 2000.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) e model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 133, n. 4, p. 380-394, Ago. 2007.
- BASTIAANSEN, W. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212/213, p. 198-212, Dec. 1998.
- BLOK, C. A. et al. Development of an open-source toolbox for the analysis and visualization of remotely sensed time series. **Cartographica**, Toronto, v. 46, n. 4, p. 227-238, Jan. 2011.
- BURNEY, J. A.; NAYLOR, R. L. Smallholder irrigation as a poverty alleviation tool in sub-Saharan Africa. **World Development**, Oxford, v. 40, n. 1, p. 110-123, Jan. 2012.
- COLAIZZI, P. D. et al. Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 50, p. 134-151, Dec. 2012.
- COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. **Irrigation and Drainage Systems**, Dordrecht, v. 19, n. 3/4, p. 223-249, Nov. 2005.
- CRAGO, R. D. Comparison of the evaporative fraction and the Priestley-Taylor  $\alpha$  for Parameterizing Daytime Evaporation. **Water Resources Research**, Washington, v. 32, n. 5, p. 1403-1409, May 1996.

CUNHA, D. A. D. et al. Effects of climate change on irrigation adoption in Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 1, p. 1-9, Jan./Mar. 2014.

EARTH OBSERVATION TOOLBOX AND DEVELOPMENT PLATFORM. Disponível em: <<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/releases>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

ELHAG, M. et al. Application of the sebs water balance model in estimating daily evapotranspiration and evaporative fraction from remote sensing data over the Nile Delta. **Water Resources Management**, Dordrecht, v. 25, n. 11, p. 2731-2742, May 2011.

FERREIRA, E. et al. Cadastral maps of irrigated areas by center pivots in the state of Minas Gerais, using CBERS-2B/CCD satellite imaging. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 771-780, July/Ago. 2011.

GEOSPATIAL DATA ABSTRACTION LIBRARY. Disponível em: <<http://www.gdal.org>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

GES DISC GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER. Disponível em: <<http://mirador.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

GIBSON, L. A.; MUNCH, Z.; ENGELBRECHT, J. Particular uncertainties encountered in using a pre-packaged SEBS model to derive evapotranspiration in a heterogeneous study area in South Africa. **Hydrology and Earth System Sciences**, Nova Jersey, v. 15, n. 1, p. 295-310, Jan. 2011.

GLENN, E. P. et al. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, n. 26, p. 4050-4062, Dec. 2011.

GONZÁLEZ-DUGO, M. P. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images: II. application on basin scale. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 125, p. 92- 104, July 2013.

GOWDA, P. et al. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 3, p. 223-237, Mar. 2008.

HEG HDF-EOS TO GEOTIFF CONVERSION TOOL. Disponível em: <<http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG/HEGHome.html>>. Acesso em: 07 set. 2014.

HOUSER, P. R. et al. **Global land data assimilation system**. Washington, 2001. Disponível em: <[http://users.monash.edu.au/~jpwalker/papers/tmp/GEWEX\\_news\\_01.pdf](http://users.monash.edu.au/~jpwalker/papers/tmp/GEWEX_news_01.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2014.

JIA, L. et al. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 28, n. 1/3, p. 75-88, Jan. 2003.

JIMÉNEZ, C. et al. Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates. **Journal of Geophysical Research Atmosphere**, Roboken, v. 116, n. 1, p. 1-27, Jan. 2011.

KATUL, G. G.; PARLANGE, M. B. A Penman-Brutsaert model for wet surface evaporation. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 1, p. 121-126, Jan. 1992.

LAADS WEB LEVEL 1 AND ATMOSPHERE ARCHIVE AND DISTRIBUTION SYSTEM. Disponível em: <[http://ladsweb.nascom.nasa.gov/browse\\_images](http://ladsweb.nascom.nasa.gov/browse_images) >. Acesso em: 30 abr. 2014.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Disponível em: <[https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access)>. Acesso em: 21 jan. 2015.

LE BRIS, R.; PAUL, F. An automatic method to create flow lines for determination of glacier length: a pilot study with Alaskan glaciers. **Computers and Geosciences**, New York, v. 52, p. 234-245, Mar. 2013.

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

LI, F. et al. Remote sensing monitoring on regional crop water productivity in the Haihe River Basin. **Journal of Geographical Sciences**, London, v. 23, n. 6, p. 1080-1090, Oct. 2013.

LI, Z. L. et al. A new approach for retrieving precipitable water from ATSR2 split-window channel data over land area. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 24, n. 24, p. 5095-5117, July 2003.

LIANG, S. et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo II: validation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 84, n. 1, p. 25-41, Jan. 2003.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, n. 2, p. 213-238, May 2001.

LO, M. H.; FAMIGLIETTI, J. S. Irrigation in California's central valley strengthens the southwestern U.S. water cycle. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 40, n. 2, p. 301-306, Jan. 2013.

LOTSCH, A.; FRIEDL, M. A.; ANDERSON, B. T. Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 30, n. 14, p. 1774-1776, July 2003.

MA, W. et al. Retrieved actual ET using SEBS model from Landsat-5 TM data for irrigation area of Australia. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 59, p. 408-414, Nov. 2012.

MENENTI, M.; CHOUDHURY, B. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. In: BOLLE, H. J.; FEDDES, R. A.; KALMA, J. D. (Ed.). **Exchange processes on the land surface for a range of space and time scales**. Oxford: IAHS Press, 1993. p. 561-568. (IAHS Publications, n. 212).

52 NORTH INITIATIVE FOR GEOSPATIAL OPEN SOURCE SOFTWARE.  
Disponível em: <[www.52north.org](http://www.52north.org)>. Acesso em: 03 jun. 2014.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 108, p. 39-51, May 2012.

PFISTER, S. et al. Projected water consumption in future global agriculture: scenarios and related impacts. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 409, n. 20, p. 4206-4216, Sept. 2011.

RAHMAN, H.; DEDIEU, G. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 15, n. 1, p. 123-143, 1994.

RODELL, M. et al. The global land data assimilation system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 85, n. 3, p. 381-394, Mar. 2004.

ROERINK, G.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, Oxford, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.

RUI, H.; BEAUDOING, H. **README document for Global Land Data Assimilation System version 2 ( GLDAS-2) products**. Washington, 2014. p. 1-22. Disponível em: <<http://hydro1.sci.gsfc.nasa.gov/data/s4pa/GLDAS/README.GLDAS2.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

SENAY, G. B. et al. Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by water balance and remote sensing methods. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, n. 26, p. 4037-4049, Dec. 2011.

SENAY, G. B. et al. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 49, n. 3, p. 577-591, June 2013.

SHUTTLEWORTH, W. J. et al. FIFE: the variation in energy partition at surface flux site. In: RANGO, A. (Ed.). **Remote sensing and large-scale global processes**. Oxford: IAHS Press, 1989. p. 67-74. (IAHS Publication, n. 186).

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Amsterdam: Springer, 1988. 666 p.

SUGITA, M.; BRUTSAERT, W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes. **Water Resources Research** Washington, v. 27, n. 5, p. 747-752, May 1991.

SU, H. et al. Modeling evapotranspiration during SMACEX: comparing two approaches for local- and regional-scale prediction. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 6, n. 6, p. 910-922, Dec. 2005.

SU, Z. **An introduction to the surface Energy Balance System**

(SEBS). Enschede: ITC, 2013. 43p. Disponível em:

<[http://www.researchgate.net/publication/228741488\\_An\\_introduction\\_to\\_the\\_surface\\_energy\\_balance\\_system\\_%28SEBS%29](http://www.researchgate.net/publication/228741488_An_introduction_to_the_surface_energy_balance_system_%28SEBS%29)>. Acesso em: 14 set. 2014.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Washington, v. 6, n. 1, p. 85-100, 2002.

SU, Z.; WANG, L. **Practical session instructions: earth observation of water resources**. Enschede: ITC, 2013. 44 p. Disponível em:

<[https://earth.esa.int/documents/10174/643007/D5P1c-1\\_SEBS\\_LTC2013.pdf](https://earth.esa.int/documents/10174/643007/D5P1c-1_SEBS_LTC2013.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2014.

TEIXEIRA, A. H. D. C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil part B: application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, n. 3/4, p. 477-490, Mar, 2009.

THE HDF GROUP. Disponível em: <<http://www.hdfgroup.org/>>. Acesso em: 17 out. 2014.

VAN DER KWAST, J. et al. Evaluation of the Surface Energy Balance System (SEBS) applied to ASTER imagery with flux-measurements at the SPARC 2004 site (Barrax, Spain). **Hydrology and Earth System Sciences**, Washington, v. 13, n. 7, p. 1337-1347, July 2009.

VINUKOLLU, R. K. et al. Multi-model, multi-sensor estimates of global evapotranspiration: climatology, uncertainties and trends. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, n. 26, p. 3993-4010, Dec. 2011.

WANG, F. et al. Evaluation and application of a fine-resolution global data set in a semiarid mesoscale river basin with a distributed biosphere hydrological model. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, Hoboken, v. 116, n. 21, p. 1-20, Nov. 2011.

WORLD OZONE MONITORING AND MAPPING. Disponível em: <<http://es-ee.tor.ec.gc.ca/e/ozone/ozoneworld.htm>>. Acesso em: 02 nov. 2014.

XUE, B. et al. Evaluation of evapotranspiration estimates for two river basins on the Tibetan Plateau by a water balance method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 492, p. 290-297, June 2013.

YANG, T. et al. Characterization of spatio-temporal patterns for various GRACE- and GLDAS-born estimates for changes of global terrestrial water storage. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 109, p. 30-37, Oct. 2013.

**ANEXO**

**ANEXO A - Avaliação das médias diárias e mensais extraídas do produto  
GLDAS**

Tabela 1 Valores de R, MBE e RMSE para as médias diárias de Pressão na Superfície (PSurf), Temperatura do Ar Próximo à Superfície (Tair), Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair) e Velocidade do Vento Próximo à Superfície (Wind)

Estação	PSurf			Tair			Qair			Wind		
	R	MBE ---(hPa)---	RMSE	R	MBE ---(°C)---	RMSE	R	MBE ---(kg/kg)---	RMSE	R	MBE ---(m/s)---	RMSE
Caetitê	0,3755	27,84	28,47	0,6405	1,79	2,48	0,6644	0,003436	0,004064	0,4424	-1,32	1,92
Brasília	0,3567	28,81	29,30	0,5810	1,00	1,85	0,8241	0,003015	0,003947	0,3169	-0,22	1,28
Formosa	0,3291	12,16	13,73	0,6173	0,21	1,61	0,8444	0,002735	0,003709	0,1614	0,83	1,21
Pirenópolis	0,2316	3,34	6,58	0,5394	0,37	1,69	0,8826	0,002219	0,003167	0,5514	-0,48	1,05
Posse	0,3670	12,25	13,32	0,4442	0,59	1,97	0,7577	0,003018	0,004217	0,4214	1,04	1,33
Rio Verde	0,3326	15,74	16,40	0,4679	1,27	2,59	0,8566	0,003801	0,004735	-0,0366	-0,40	1,13
Aimorés	0,5588	-19,77	20,29	0,8060	-0,39	1,88	0,8358	0,002862	0,003428	0,0690	2,03	2,18
Araxá	0,3715	5,18	7,55	0,5404	-0,29	2,17	0,8309	0,002092	0,003155	0,0976	-0,06	0,86
Bambuí	0,2989	-13,38	14,86	0,7746	1,52	2,70	0,8357	0,002063	0,003244	0,2264	0,83	1,06
Barbacena	0,4457	26,15	26,65	0,6920	0,90	2,44	0,8083	0,001058	0,002234	0,2378	0,72	1,14
Belo Horizonte	0,3813	11,46	13,10	0,6844	-0,81	2,15	0,7944	0,003352	0,004159	0,1976	0,32	0,74
Caparaó	0,5098	10,78	11,66	0,8049	0,43	2,02	0,8286	0,001683	0,002424	0,2052	2,38	2,56
Capinópolis	0,3992	5,37	7,22	0,5505	1,42	2,51	0,8666	0,003410	0,004325	0,3369	0,56	0,85
Caratinga	0,4827	-21,70	22,26	0,8355	-0,67	1,81	0,8202	0,001840	0,002687	0,2029	0,90	1,28
ConceiçãoMatoDentro	0,3351	7,91	11,45	0,7914	1,47	2,51	0,8283	0,002534	0,003450	0,1719	0,32	0,88
Diamantina	0,2681	41,18	41,89	0,6897	1,60	2,56	0,7651	0,002140	0,003253	0,1167	0,86	1,22
Divinópolis	0,3510	3,09	7,43	0,7527	0,62	2,18	0,7798	0,003590	0,004526	0,1088	-0,15	0,78
Formoso				0,5649	0,56	1,83	0,8110	0,003588	0,004409	0,3268	0,46	0,88

“Tabela 1, continua”

Estação	PSurf			Tair			Qair			Wind		
	R	MBE ---(hPa)---	RMSE	R	MBE ---(°C)---	RMSE	R	MBE ---(kg/kg)---	RMSE	R	MBE ---(m/s)---	RMSE
Frutal	0,5287	-6,82	8,31	0,4156	-0,23	2,95	0,7912	0,003885	0,004898	0,2657	0,78	0,97
Ituiutaba	0,4078	-2,71	5,51	0,6624	0,65	2,30	0,8743	0,002976	0,003919	0,3086	1,00	1,17
Janaúba				0,6239	-0,92	1,98	0,7679	0,003417	0,004103	0,3483	0,71	1,52
Januária	0,4108	-14,81	15,64	0,6323	1,32	2,22	0,8158	0,003799	0,004530	0,3440	0,23	0,92
JuizdeFora	0,5231	36,72	36,99	0,6482	1,28	2,85	0,7979	0,002071	0,002952	0,1693	-0,09	1,10
Juramento				0,5318	-0,14	2,14	0,7249	0,002036	0,003349	0,3042	0,64	1,08
Lavras	0,3547	21,84	22,87	0,7347	0,30	2,12	0,8306	0,002751	0,003569	0,1051	-0,21	0,95
Machado	0,3891	14,02	15,19	0,7617	-0,38	2,09	0,8285	0,001426	0,002478	-0,0035	1,68	1,81
Maria da Fé				0,7984	0,63	2,20	0,8466	0,001098	0,002018	0,1066	1,58	1,76
Mocambinho	0,5061	-15,61	16,23	0,6242	1,00	2,10	0,8456	0,004200	0,004708	0,2032	1,26	1,51
Montes Claros	0,5085	2,16	5,03	0,7302	0,64	1,77	0,8013	0,003757	0,004451	0,2499	0,42	0,94
Paracatu	0,3939	5,82	8,00	0,6106	1,38	2,30	0,8421	0,003081	0,004150	0,1118	-0,38	1,09
Patos deMinas	0,3665	9,90	11,41	0,6337	1,15	2,16	0,8406	0,003252	0,004073	0,4143	0,41	0,76
Pedra Azul	0,5279	15,73	16,43	0,7882	0,91	1,84	0,7081	0,003207	0,003760	0,2975	0,77	1,15
Pirapora	0,5624	-7,16	8,21	0,7048	0,15	1,92	0,8524	0,002793	0,003767	0,2672	0,52	0,97
Poços deCaldas				0,7502	0,20	2,25	0,8360	0,001223	0,002228	0,0845	1,62	1,80
Salinas	0,5054	-9,41	10,67	0,7226	0,61	1,90	0,7417	0,002457	0,003323	0,4323	0,58	0,93
São Lourenço	0,4640	23,06	23,65	0,7804	0,15	2,18	0,8363	0,001565	0,002443	0,0846	1,39	1,61

“Tabela 1, conclusão”

Estação	PSurf			Tair			Qair			Wind		
	R	MBE ---(hPa)---	RMSE	R	MBE ---(°C)---	RMSE	R	MBE ---(kg/kg)---	RMSE	R	MBE ---(m/s)---	RMSE
São Sebastião Paraíso				0,6120	0,10	2,12	0,7868	0,001975	0,003307	0,0997	1,41	1,54
Sete Lagoas	0,3398	1,99	7,58	0,7727	0,88	1,95	0,8362	0,003137	0,003962	0,2049	0,72	1,06
Uberaba	0,4584	-6,53	7,97	0,5970	-0,03	2,21	0,8355	0,002514	0,003538	0,1742	0,59	1,15
Viçosa	0,6017	-4,87	6,14	0,7952	1,44	2,39	0,8507	0,002909	0,003560	0,2117	1,13	1,38
Paranaíba	0,5072	4,91	6,32	0,5111	0,45	2,82	0,8336	0,003219	0,004373	0,1553	0,70	1,00
Itaperuna	0,6445	-18,04	18,48	0,7726	-0,67	2,16	0,8018	0,003036	0,003716	0,1507	2,46	2,66
Franca	0,2431	11,14	11,29	0,3429	-0,75	2,83	0,7952	0,001852	0,003056	0,1830	-0,26	1,05
São Carlos	0,4150	-6,67	8,43	0,6006	-0,67	2,59	0,8124	0,001948	0,002958	0,0480	0,92	1,26
São Paulo	0,3304	27,51	28,35	0,5950	-1,28	3,18	0,7918	0,001559	0,002498	0,0023	0,10	1,11
São Simão	0,4098	-12,73	14,05	0,6012	-0,10	2,46	0,8216	0,003177	0,003967	0,2103	1,36	1,54

Tabela 2 Valores de R, MBE e RMSE para as médias mensais de Pressão na Superfície (PSurf ), Temperatura do Ar Próximo à Superfície (Tair), Umidade Específica Próxima à Superfície (Qair) e Velocidade do Vento Próximo à Superfície (Wind)

Estação	PSurf			Tair			Qair			Wind		
	R	MBE ---(hPa)---	RMSE	R	MBE ---(°C)---	RMSE	R	MBE ---(kg/kg)---	RMSE	R	MBE ---(m/s)---	RMSE
Caetité	0,9987	27,77	27,77	0,9371	1,79	1,89	0,9029	0,003439	0,003683	0,8945	-1,24	1,30
Brasília	0,9998	28,73	28,73	0,9815	1,01	1,04	0,9498	0,003033	0,003564	0,8008	-0,21	0,40
Formosa	0,9998	12,13	12,13	0,9656	0,21	0,42	0,9544	0,002759	0,003322	0,6853	0,82	0,90
Pirenópolis	0,9997	3,33	3,34	0,9030	0,37	0,74	0,9795	0,002237	0,002652	0,9478	-0,48	0,60
Posse	0,9988	12,21	12,22	0,8977	0,59	0,80	0,9196	0,003040	0,003732	0,7990	1,03	1,10
Rio Verde	0,9998	15,69	15,69	0,9067	1,28	1,44	0,9803	0,003821	0,004286	-0,1188	-0,40	0,62
Aimorés	0,9997	-19,72	19,72	0,9891	-0,39	0,71	0,9772	0,002874	0,003095	0,3013	2,03	2,09
Araxá	0,9998	5,16	5,17	0,9079	-0,28	0,78	0,9710	0,002112	0,002621	0,3176	-0,07	0,32
Bambuí	0,9988	-13,34	13,35	0,9708	1,52	1,94	0,9564	0,002084	0,002782	0,3974	0,83	0,87
Barbacena	0,9997	26,08	26,09	0,9789	0,90	1,03	0,9598	0,001078	0,001683	0,7605	0,72	0,76
Belo Horizonte	0,9999	11,43	11,43	0,9801	-0,81	0,92	0,9366	0,003377	0,003900	0,5676	0,32	0,44
Caparaó	0,9985	10,76	10,77	0,9847	0,43	0,79	0,9649	0,001698	0,002026	0,8554	2,38	2,40
Capinópolis	0,9995	5,35	5,36	0,9235	1,42	1,56	0,9795	0,003422	0,003845	0,8452	0,55	0,59
Caratinga	0,9999	-21,64	21,65	0,9898	-0,67	0,85	0,9464	0,001860	0,002324	0,6417	0,89	0,97
Conceição Mato Dentro	0,9997	7,89	7,89	0,9811	1,48	1,72	0,9514	0,002557	0,003110	0,4053	0,31	0,51
Diamantina	0,9988	41,07	41,08	0,9785	1,61	1,66	0,9108	0,002167	0,002945	0,3595	0,86	0,96
Divinópolis	0,9998	3,08	3,09	0,9868	0,62	0,90	0,9533	0,003616	0,004111	0,4699	-0,15	0,32
Formoso				0,9301	0,56	0,80	0,9485	0,003610	0,004053	0,8652	0,46	0,55

“Tabela 2, continua”

Estação	PSurf			Tair			Qair			Wind		
	R	MBE ---(hPa)---	RMSE	R	MBE ---(°C)---	RMSE	R	MBE ---(kg/kg)---	RMSE	R	MBE ---(m/s)---	RMSE
Frutal	1,0000	-6,59	6,64	0,9085	-0,22	0,81	0,9717	0,003908	0,004320	0,7536	0,78	0,81
Ituiutaba	0,9996	-2,70	2,72	0,9379	0,65	1,25	0,9860	0,002993	0,003411	0,6411	1,00	1,04
Janaúba				0,9344	-0,92	1,11	0,9205	0,003431	0,003717	0,6236	0,71	0,94
Januária	0,9982	-14,78	14,79	0,9076	1,33	1,53	0,9374	0,003796	0,004157	0,7437	0,24	0,45
Juiz de Fora	0,9989	36,62	36,63	0,9788	1,28	1,37	0,9613	0,002092	0,002526	0,5868	-0,09	0,40
Juramento				0,7361	-0,13	1,35	0,8387	0,002063	0,003042	0,7454	0,64	0,72
Lavras	0,9995	21,78	21,78	0,9834	0,30	0,59	0,9752	0,002771	0,003198	0,7606	-0,21	0,30
Machado	0,9993	13,98	13,99	0,9682	-0,37	0,82	0,9767	0,001442	0,001831	0,1867	1,68	1,71
Maria da Fé				0,9804	0,64	0,98	0,9815	0,001108	0,001407	0,0369	1,58	1,63
Mocambinho	0,9997	-15,58	15,58	0,9111	0,97	1,23	0,9475	0,004083	0,004335	0,6118	1,25	1,33
Montes Claros	0,9991	2,16	2,19	0,9642	0,65	0,84	0,9173	0,003780	0,004166	0,5690	0,41	0,63
Paracatu	0,9999	5,81	5,81	0,9119	1,38	1,60	0,9546	0,003110	0,003833	0,2643	-0,39	0,61
Patos de Minas	0,9994	9,88	9,88	0,9129	1,15	1,39	0,9661	0,003277	0,003694	0,9124	0,41	0,44
Pedra Azul	0,9999	15,69	15,69	0,9830	0,91	1,04	0,9049	0,003214	0,003430	0,8014	0,77	0,81
Pirapora	0,9992	-7,14	7,15	0,9571	0,15	0,80	0,9539	0,002819	0,003431	0,7658	0,52	0,59
Poços de Caldas				0,9527	0,21	1,11	0,9764	0,001246	0,001526	0,1409	1,61	1,64
Salinas	0,9990	-9,38	9,39	0,9521	0,61	0,90	0,8693	0,002470	0,002919	0,8708	0,58	0,63
São Lourenço	0,9994	22,99	23,00	0,9705	0,16	0,90	0,9792	0,001579	0,001885	0,2384	1,39	1,44

“Tabela 2, conclusão”

Estação	PSurf			Tair			Qair			Wind		
	R	MBE ---(hPa)---	RMSE	R	MBE ---(°C)---	RMSE	R	MBE ---(kg/kg)---	RMSE	R	MBE ---(m/s)---	RMSE
São Sebastião Paraíso				0,9105	0,10	0,91	0,4050	0,003138	0,005183	0,4441	1,41	1,43
Sete Lagoas	0,9999	1,98	1,99	0,9825	0,88	1,02	0,9651	0,003159	0,003647	0,7004	0,71	0,76
Uberaba	0,9999	-6,51	6,51	0,8952	-0,02	0,99	0,9762	0,002532	0,002986	0,7905	0,58	0,62
Viçosa	0,9995	-4,86	4,87	0,9851	1,44	1,54	0,9681	0,002930	0,003289	0,5438	1,13	1,19
Paranaíba	0,9999	4,89	4,89	0,9423	0,46	0,83	0,9752	0,003238	0,003802	0,3834	0,70	0,76
Itaperuna	0,9990	-17,99	18,00	0,9814	-0,67	0,88	0,9489	0,003058	0,003402	0,6352	2,45	2,49
Franca	0,5207	11,14	11,15	0,7357	-0,74	1,41	0,9609	0,001868	0,002433	0,6584	-0,26	0,36
São Carlos	0,9997	-6,66	6,66	0,9311	-0,66	1,05	0,9706	0,001963	0,002352	0,2041	0,92	0,98
São Paulo	0,9993	27,44	27,45	0,9430	-1,28	1,52	0,9611	0,001579	0,001882	0,0368	0,10	0,50
São Simão	0,9998	-12,70	12,70	0,9170	-0,09	0,96	0,9666	0,003196	0,003481	0,8589	1,36	1,37