



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia


Alexandre da Silva Ferreira

**Aplicação do algoritmo SEBAL para estimativa da
evapotranspiração na mesorregião do sul goiano**

Rio de Janeiro
2011

Alexandre da Silva Ferreira

Aplicação do algoritmo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na mesorregião do sul goiano



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração Geomática.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Margareth Simões Penello Meirelles

Coorientador: Prof. Dr. José Carlos Mendonça

Rio de Janeiro

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

F383 Ferreira Alexandre da Silva.
Aplicação do algoritmo SEBAL para estimativa da
evapotranspiração na mesorregião do sul goiano / Alexandre da
Silva Ferreira. - 2011.
214 f.

Orientadora: Margareth Simões Penello Meirelles
Coorientador: José Carlos Mendonça
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia de Computação. 2. Evapotranspiração. 3.
Algoritmos. I. Meirelles, Margareth Simões Penello. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 004.41:551.573

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Alexandre da Silva Ferreira

Aplicação do algoritmo SEBAL para estimativa da
evapotranspiração na mesorregião do Sul Goiano

Dissertação apresentada, como requisito
parcial para obtenção do título de
Mestre, ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Computação, da
Universidade do Estado do Rio de
Janeiro. Área de concentração
Geomática.

Aprovado em: 11 de outubro de 2011.

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Margareth Simões Penello Meirelles (Orientadora)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. José Carlos Mendonça (Coorientador)
Universidade Estadual Norte Fluminense - UENF

Prof. Dr. Guilherme Lúcio Abelha Mota
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Valdo da Silva Marques
Universidade Estadual Norte Fluminense - UENF

Rio de Janeiro

2011

DEDICATÓRIA

A minha família, a minha namorada Alessa, presenças constantes e seguras nas horas mais difíceis. E aos meus amigos, especialmente aqueles que acompanharam essa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que esta sobre todas as coisas e por ter me concedido mais esta vitória.

À Margareth Simões, minha orientadora, pelo apoio e crédito ao meu trabalho.

Ao José Carlos Mendonça, meu co-orientador, e família, pelo apoio incondicional, pelas horas de estudo dedicadas e preocupação em realizar um trabalho de qualidade.

A minha namorada Alessa, pelo cuidado dispensado às minhas letras.

Ao amigo Marcos da PUC – RJ pelas contribuições para finalizar este trabalho.

Aos professores do Departamento da Geomática da UERJ pelos ensinamentos e ao secretário Alexandre pela ajuda prestada.

Ao Departamento da Geociência da UFF pelo apoio nas horas difíceis.

A fé em Deus nos faz crer no incrível, ver o invisível e realizar o impossível.

(autor desconhecido)

RESUMO

FERREIRA, Alexandre da Silva. **Aplicação do algoritmo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na mesorregião do Sul Goiano**. 2011. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

As preocupações com o uso da terra têm permeado inúmeros estudos científicos, no âmbito nacional e internacional, voltados para a avaliação dos impactos ambientais causados pelas atividades agropecuárias. Alguns processos do ciclo hidrológico, a exemplo da evapotranspiração apresentam modificações consideráveis, devido às constantes mudanças nos usos dos solos. Desta forma, o presente trabalho busca destacar o problema das rápidas e intensas mudanças no uso do solo oriundas da expansão da atividade agropecuária e seus impactos ao meio ambiente, especialmente sobre o processo da evapotranspiração regional, na mesorregião do Sul Goiano, região típica de cerrado, localizada no centro-oeste brasileiro. A aplicação do algoritmo “Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL” consistiu o cerne da metodologia utilizada, com vista à estimativa dos fluxos de energia e da evapotranspiração em escala regional, obtidos com base no equacionamento do balanço de energia à superfície, complementado por dados de temperatura do ar e velocidade do vento adquiridos em estações meteorológicas (PCD's) instaladas na área de estudo. Foram utilizados dados do sensor MODIS/TERRA dos anos 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010. O algoritmo foi testado em sua forma clássica e modificado por alterações nos critérios de seleção dos pixels âncoras, utilizados no procedimento da estimativa do fluxo de calor sensível. Pode-se concluir que a alteração dos critérios influenciou positivamente os resultados obtidos e que os valores da evapotranspiração, na região estudada, indicaram a potencialidade da metodologia empregada para o monitoramento sistemático dos componentes do balanço de energia em escala regional.

Palavras-chave: Balanço de energia; Evapotranspiração; SEBAL; MODIS.

ABSTRACT

Concerns over land use have permeated many scientific studies at the national and international, aimed at assessing the environmental impacts caused by agricultural activities. Some processes of the hydrological cycle, such as the present evapotranspiration significant changes, due to constant changes in land uses. Thus, this paper seeks to highlight the problem of rapid and intense changes in land use arising from the expansion of agricultural activities and their impacts on the environment, especially on the process of regional evapotranspiration in southern Goiás Greater Region, a region typical of cerrado located in central Brazil. The application of the algorithm "Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL" was the core of the methodology used for the estimation of energy fluxes and evapotranspiration on a regional scale, based on the obtained solution of the surface energy balance, supplemented by data of air temperature and wind speed acquired in weather stations (PCDs) installed in the study area. We used data from MODIS / TERRA the years 2006, 2007, 2008, 2009 and 2010. The algorithm was tested in its classic form and modified by changes in the criteria for selecting pixels anchors used in the procedure of estimating the sensible heat flux. It can be concluded that the change in criteria positively influenced the results obtained and the values of evapotranspiration in the study area, indicated the potential of the methodology used for the systematic monitoring of the components of energy balance on a regional scale.

Keywords: Energy balance; Evapotranspiration; SEBAL; MODIS.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGETOP	Agência Goiana de Transportes e Obras
AIRS	Atmospheric InfraRed Sounder
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A
ANA	Agência Nacional de Águas
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CADU	Chanel Access Data Units
CELG	Companhia Energética de Goiás
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
DAAC	Distributed Active Archive Centers
DAAC	Distributed Active Archive Center
DJ	Dia Juliano
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EOS	Earth Observing System
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Food and Agriculture Organization
GSFC	Goddard Space Flight Center - NASA
HDF	Hierarchical Data Format
HSB	Humidity Sounder for Brazil
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISIN	Integerized Sinusoidal
IV	Infravermelho
IVM	Infravermelho Médio
IVP	Infravermelho Próximo
IVT	Infravermelho Termal
LOA	Laboratoire d'Optique Atmospherique
LPDAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center

LST	Land Surface Temperature
MDE	Modelo Digital de Elevação
MISR	Multi-angle Imaging Spectro Radiometer
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	Measurement of Pollution in the Troposphere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCSA	Nacional Center for Supercomputing Applications
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PDS	Production Data Sets
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
QA	Quality Assessment
REM	Radiação Eletromagnética
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
SANEAGO	Empresa de Saneamento básico do Estado de Goiás
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SEAGRO	Secretaria do Estado de Agricultura, Pecuária e Irrigação
SEBAL	Surface Energy Balance for Land
SECTEC	Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás
SEFAZ	Secretaria da Fazenda do Estado de Goiás
SEGPLAN	Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento
SEMARH	Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SGM	Superintendência de Geologia e Mineração
SIC	Secretaria de Indústria e Comércio
SIEG	Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográfica de Goiás
SEPLAN	Secretaria de Estado, Gestão e Planejamento
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sinusoidal
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre

SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVAT	Modelos de Transferência Solo-Vegetação-Atmosfera (SVAT)
UMD	University of Maryland
USGS	United States Geological Survey
USTL	Université des Sciences et Technologies de Lille
UTC	Coordinated Universal Time
UTM	Universal Transverse Mercator
UV	Radiação Ultravioleta
VIS	Visível

LISTA DE SÍMBOLOS

(eV)	Elétronvolts
<	Menor que
=	Igual
>	Maior que
°C	Grau Celsius
cm	Centímetro
C_0	Velocidade da luz no vácuo
C_p	Calor específico do ar à pressão constante
CosZ	Coseno do ângulo Z
d_r	Quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol
dT	Diferença de temperatura entre duas alturas z_1 e z_2
E	Evapotranspiração
E_{bf}	Emitância espectral de um corpo negro
ET_h	Evapotranspiração real horária
ET_{24h}	Evapotranspiração real diária
ET _{rF}	Fração evaporativa de referência
$ET_{o_{inst}}$	Evapotranspiração instantânea
ET_{FAO56}	Evapotranspiração método FAO56
ET_{RF}	Evapotranspiração de referência
ET_{FE}	Evapotranspiração com fração evaporativa
F	Frequência da radiação
FE	Fração evaporativa
g	Constante gravitacional
G	Fluxo de calor ao solo
G	Trocas com as reservas de água
h	Ângulo horário solar
$h_{(zom)}$	Altura média da vegetação
H	Constante de Planck
H	Fluxo de calor sensível ao ar
J	Joules

$J.kg^{-1}$	Joule por quilograma
L	Comprimento de Monin-Obukov
k	Constante de Boltzmann
km	Quilômetro
kPa	Quilopascal
$Kg.m^{-3}$	Quilograma por metro cúbico
$\lambda_v E$	Fluxo de calor latente
m	Metro
mm	Milímetros
$mm.h^{-1}$	Milímetros por hora
$mm.d^{-1}$	Milímetros por dia
M	Total de radiação excitada pela superfície do material
M	Trocas de energia entre os processos metabólicos
nl	Logaritmo Neperiano
nm	Nanômetro
N	Fotoperíodo
P	Precipitação
P	Taxa de fotossíntese
Q	Energia de um <i>quanta</i>
R	Excedente hídrico
R^2	Correlação
r_{ah}	Resistência aerodinâmica do ar para o transporte de calor medido
r_{ah_0}	Resistência aerodinâmica inicial
$R_{c\downarrow}$	Radiação de onda curta incidida sobre à superfície
R_{g+}	Radiação solar global
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa incidente à superfície
R_n	Radiação líquida
R_{n24h}	Saldo de radiação médio de 24 horas
$R_{S\downarrow}$	Radiação de ondas curtas incidente à superfície
$s.m^{-1}$	Unidade de medida da resistência aerodinâmica
T	Temperatura do corpo negro
T_s	Temperatura da superfície
T_{st}	Temperatura da superfície

u^*	Velocidade de atrito
u_x	Velocidade do vento
u_2	Velocidade do vento a 2 metros
u_{10}	Velocidade do vento a 10 metros
u_{100}	Velocidade do vento a 100 metros
ν	Frequência
$W.m^{-2}$	Watts por metro quadrado
z	Ângulo zenital solar
Z_1	Plano de altitude 1
Z_2	Plano de altitude 2
z_a	Altitude
z_x	Altura
z_{om}	Comprimento de rugosidade
α	Albedo
ϵ_0	Emissividade da superfície
ϵ_a	Emissividade da atmosfera
λ	Calor latente de vaporização
λ	Comprimento de onda
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Comprimento máximo de onda
μm	Micrômetro
π	Pi
ρ	Densidade do ar úmido
ρ_1	Banda de refletância de superfície 1
ρ_2	Banda de refletância de superfície 2
σ	Constante Stefan-Boltzmann
φ	Latitude local
ϕ	Elevação solar
δ	Declinação solar
T_{sw}	Transmissividade atmosférica
T_{AR}	Temperatura do ar
ψ_c	Coeficiente <i>momentum</i>
ψ_m	Coeficiente de transporte de calor

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados orbitais do sensor MODIS/TERRA adquiridas para implementação no algoritmo SEBAL.....	81
Tabela 2 -	Especificações técnicas dos produtos MODIS/TERRA, tais como faixa do espectro coberta, resolução espacial, aspectos de armazenamento dos dados e fator de escala correção. Fonte: Rudorff, Shimabukuro e Ceballos (2007).....	83
Tabela 3 -	Período de seleção dos dados pluviométricos referentes aos 15 dias anteriores às imagens selecionadas.....	87
Tabela 4 -	Valores de NDVI, SAVI e IAF e albedo coletado nos sete pontos de controles na área de estudo, para as datas 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	116
Tabela 5 -	Valores médios de NDVI calculados a partir de cada imagem processada no modelo SEBAL.....	119
Tabela 6 -	Valores médios de NDVI dos recortes representativos de cada tipo de uso do solo.....	119
Tabela 7 -	Valores do Índice de Área Foliar das imagens processadas nas datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	124
Tabela 8 -	Valores médios de IAF dos recortes representativos de cada tipo de uso do solo.	124
Tabela 9 -	Valores de temperatura de superfície (°K e °C) obtida por meio da banda termal (LST), sensor MODIS.....	128
Tabela 10 -	Valores de albedo de superfície obtidos pelos pontos de controles na mesorregião do Sul Goiano.....	133
Tabela 11 -	Valores médios de albedo de superfície obtidos pelos recortes de 16 pixels na mesorregião do Sul Goiano.....	133
Tabela 12 -	Valores dos parâmetros obtidos na análise estatística dos mapas de albedo de superfície gerados pelo produto MODIS.....	134
Tabela 13 -	Parâmetros retirados do cabeçalho das imagens do sensor MODIS/TERRA, referentes ao período de imageamento.....	144

Tabela 14 -	Parâmetros físicos e trigonométricos obtidos das estações Morrinhos e São Simão. DJ (dia juliano), h (ângulo horário), Φ (elevação solar) (CosZ coseno do ângulo zenital), ϕ (declinação solar, em radianos), Z (ângulo zenital), T_{sw} (transmissividade atmosférica), D_r (distancia relativa Terra-Sol) e $R_{s\downarrow}$ (Radiação de onda curta incidente $W.m^{-2}$).....	145
Tabela 15 -	Parâmetros para o cálculo de radiação de onda longa incidente. T_{AR} (temperatura do ar em °C), ϵ_a (emissividade atmosférica), σ (Constante Stefan-Boltzmann) e $R_{L\downarrow}$ (radiação de onda longa incidente, em $W.m^{-2}$).....	145
Tabela 16 -	Valores de temperatura de superfície (T_s) (°K), Albedo (α), emissividade de superfície (ϵ_0), radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$) ($W.m^{-2}$), saldo de radiação à superfície (R_n) ($W.m^{-2}$), fluxo de calor no solo (G) ($W.m^{-2}$), fluxo de calor sensível (H) ($W.m^{-2}$) e fluxo de calor latente (λET) ($W.m^{-2}$) – datas julianas 114/2006, 85/2007 e 116/2008.....	150
Tabela 17 -	Valores de temperatura de superfície (T_s) (°K), Albedo (α), emissividade de superfície (ϵ_0), radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$) ($W.m^{-2}$), saldo de radiação de superfície (R_n) ($W.m^{-2}$), fluxo de calor no solo (G) ($W.m^{-2}$), fluxo de calor sensível (H) ($W.m^{-2}$) e Fluxo de calor latente (λET) ($W.m^{-2}$) – datas julianas 109/2009, 100/2010 e valores médios de todas as datas.....	151
Tabela 18 -	Valores de fluxo de calor ao solo (G) (em $W.m^{-2}$).....	153
Tabela 19 -	Valores de velocidade do vento a 10m, obtidos das estações meteorológicas e estimados para 2m e 100m. DJ (dia juliano), h_{zom} (altura média da vegetação), Z_1 (Plano de altitude 1), Z_2 (Plano de altitude 2), Z_{om} (comprimento de rugosidade), K (Constante de Von Karman), U^* (velocidade de fricção do vento $m.s^{-1}$), U_2 (velocidade do vento a 2 m, em $m.s^{-1}$), U_{10} (Velocidade do vento a 10 m, em $m.s^{-1}$), U_{100} (Velocidade do vento a 100 m, em $m.s^{-1}$) e R_{ah} (resistência aerodinâmica).....	160

Tabela 20 -	Coordenadas geográficas dos pixels âncoras e seus respectivos valores de referências obtidos do pixel quente. R_{ah} (resistência aerodinâmica), R_n (saldo de radiação à superfície $W.m^{-2}$), G (fluxo de calor ao solo $W.m^{-2}$), U^* (de fricção do vento $m.s^{-1}$) e Z_{om} (comprimento de rugosidade).....	160
Tabela 21 -	Valores de ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) estimados pelo método Penman-Monteith FAO-56 e pelo algoritmo SEBAL com Fração Evaporativa de Referencia (ET_{rf}) e Fração Evaporativa (FE), por meio das proposições “Clássica” e “Estação”.....	179
Tabela 22 -	Valores de ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) da mesorregião do Sul Goiano para cada ponto de controle dos usos e coberturas do solo do cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar, soja e área urbana. ET_{RF} (Evapotranspiração de Referência) e ET_{FE} (Evapotranspiração com fração evaporativa).....	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do balanço de energia em superfície. Fonte: adaptado de Allen (2002).....	46
Figura 2 - Esquema representativo do balanço de radiação de superfície. Relação entre as radiações absorvidas e emitidas pela superfície terrestre. Fonte: adaptado de Allen (2002).....	48
Figura 3 - Esquema representativo de uma onda eletromagnética. Fonte: Jensen (2009).....	53
Figura 4 - Esquema representativo da obtenção de imagens por sensores orbitais. Adaptado de Konecny (2003).....	56
Figura 5 - Distribuição da energia eletromagnética pelo espectro e suas regiões. Fonte: Figueiredo (2005).....	55
Figura 6 - Processo de varredura e digitalização da superfície terrestre pela plataforma orbital MODIS/TERRA. Fonte: Rudorff, Shimabukuro e Ceballos (2007).....	61
Figura 7 - Distribuição dos <i>tiles</i> na cobertura da superfície terrestre realizada pelo Sensor MODIS/TERRA. Fonte: Rudorff, Shimabukuro e Ceballos (2007).....	62
Figura 8 - Mapa de localização da mesorregião do Sul Goiano.....	70
Figura 9 - Visualização do aplicativo on-line MRTWeb 4.1 para aquisição das imagens MODIS/TERRA. (a) abas referentes às três etapas para aquisição das imagens MODIS/TERRA; (b) seleção das imagens segundo o recorte temporal (ano, mês e dia); (c) escolha das bandas a serem processadas.....	78
Figura 10 - Etapas de processamento e download das imagens MODIS/TERRA pelo aplicativo <i>MRTWeb 4.1</i> . (a) recorte da imagem por retângulo envolvente; (b) reamostragem das imagens; (c) escolha do sistema de projeção; (d) escolha do formato de saída e etapa do download.....	79

Figura 11 - Distribuição das estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas para levantamento dos dados de chuvas para os quinze dias anteriores a cada imagem MODIS/TERRA processadas pelo algoritmo SEBAL. Fonte: ANA/Hidroweb, INMET e SIEG/SEPLAN – GO.....	86
Figura 12 - Fluxograma da metodologia para o cálculo do saldo de radiação de superfície (R_n).....	92
Figura 13 - Modelo construído na ferramenta <i>Model Maker</i> do software ERDAS Imagine 9.1 para calcular os parâmetros biofísicos, o saldo de radiação de superfície (R_n), fluxo de calor no solo (G) e a resistência aerodinâmica (r_{ah_0}). Fonte: Mendonça (2007).....	93
Figura 14 - Fluxograma representativo do cálculo do fluxo de calor sensível (H). Destaque para o processo iterativo de estabilização aerodinâmica de grande complexidade. Fonte: adaptado de Nicácio (2008).....	101
Figura 15 - Modelo construído para calcular o fluxo de calor sensível (H) e todo o processo iterativo de correção da resistência aerodinâmica (r_{ah}). Fonte: Mendonça (2007).....	102
Figura 16 - Extensão do ERDAS Imagine 9.1 utilizada para consultar os pixels âncoras na imagem MOD11A1 (LST).....	105
Figura 17 - Modelo construído para calcular o fluxo de calor latente (λET), da evapotranspiração real horária (ET_h) e da evapotranspiração real diária (ET_{24H}). Fonte: Mendonça (2007).....	112
Figura 18 - Posicionamento dos pontos de controles utilizados para coleta dos dados processados através do algoritmo SEBAL na mesorregião do Sul Goiano. Composição R (banda6), G (banda2) e B (banda1) de imagem do sensor MODIS/TERRA. Data Juliana: 100/2010.....	115

Figura 19 - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores de NDVI dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	118
Figura 20 - Mapa de espacialização do Índice da Diferença Normalizada da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 114/2006.....	120
Figura 21 - Mapas de espacialização do Índice da Diferença Normalizada da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 85/2007 e 116/2008.....	121
Figura 22 - Mapas de espacialização do Índice da Diferença Normalizada da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 109/2009 e 100/2010.....	122
Figura 23 - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores de IAF dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	123
Figura 24 - Mapa de espacialização do Índice de Área Foliar (IAF) da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 114/2006.....	125
Figura 25 - Mapa de espacialização do Índice de Área Foliar (IAF) da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 85/2007 e 116/2008.....	126
Figura 26 - Mapa de espacialização do Índice de Área Foliar (IAF) da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 109/2009 e 100/2010.....	127
Figura 27 - Mapa de espacialização da temperatura de superfície (Ts), em graus Kelvin, da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 114/2006.....	129
Figura 28 - Mapas de espacialização da temperatura de superfície (Ts), em graus Kelvin, da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 85/2007 e 116/2008.....	130
Figura 29 - Mapas de espacialização da temperatura de superfície (Ts) da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 109/2009 e 100/2010.....	131

Figura 30 - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores do albedo de superfície dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	132
Figura 31 - Mapas de espacialização do albedo de superfície da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 114/2006 e 85/2007.....	135
Figura 32 - Mapas de espacialização do albedo de superfície da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 116/2008 e 109/2009.....	136
Figura 33 - Mapas de espacialização do albedo de superfície da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 100/2010.....	137
Figura 34 - Gráfico ilustrativo dos valores médios de precipitação obtidos nas estações pluviométricas na mesorregião do Sul Goiano para os quinze dias anteriores às datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	138
Figura 35 - Mapas da espacialização das médias pluviométricas dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA para as datas julianas 114/2006 e 85/2007.....	139
Figura 36 - Mapas da espacialização das médias pluviométricas dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA para as datas julianas 116/2008 e 109/2010.....	140
Figura 37 - Mapas da espacialização das médias pluviométricas dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA para o dia Juliano 100/2010.....	141
Figura 38 - Gráficos ilustrativos da relação entre valores pluviométricos médios e os valores de albedo de superfície coletados nos pixels de dez estações pluviométricas na mesorregião do Sul Goiano.....	142
Figura 39 - Mapa de espacialização do saldo de radiação à superfície (R_n) da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 114//2006 e 85/2007.....	146

Figura 40 -	Mapa de espacialização do saldo de radiação à superfície (R_n) da mesorregião do Sul Goiano – datas Julianas 116/2008 e 109/2009.....	147
Figura 41 -	Mapa de espacialização do saldo de radiação à superfície (R_n) da mesorregião do Sul Goiano – data jualiana 100/2010.....	148
Figura 42 -	Histogramas das imagens de saldo de radiação à superfície referente às imagens das datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	149
Figura 43 -	Gráfico de comparação entre os valores médios de saldo de radiação à superfície (R_n) e fluxo de calor ao solo (G), considerando como 10% do valor de R_n	154
Figura 44 -	Mapas de distribuição do fluxo de calor ao solo (G), estimados pelo algoritmo SEBAL para as datas julianas de 114/2006 e 852007.....	155
Figura 45 -	Mapas de distribuição do fluxo de calor ao solo (G), estimado pelo algoritmo SEBAL para as datas julianas de 116/2008 e 109/2009.....	156
Figura 46 -	Mapas de distribuição do fluxo de calor ao solo (G), estimado pelo algoritmo SEBAL para a data Juliana de 100/2010.....	157
Figura 47 -	Histogramas das imagens de G referentes às imagens das datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	158
Figura 48 -	Mapa com a distribuição do fluxo de calor sensível (H) calculados através dos parâmetros da estação Morrinhos da mesorregião do Sul Goiano. Data juliana de 114/2006.....	161
Figura 49 -	Mapa com a distribuição do fluxo de calor sensível (H) calculados através dos parâmetros da estação Morrinhos da mesorregião do Sul Goiano. Datas julianas 85/2007 e 116/2008.....	162
Figura 50 -	Mapa com a distribuição do fluxo de calor sensível (H) calculados através dos parâmetros da estação São Simão para data Juliana de 109/2009 e Morrinhos para data juliana de 100/2010.....	163

Figura 51 - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores de fluxo de calor sensível (H) dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	164
Figura 52 - Gráficos representativos do processo de convergência numérica realizado para estabilização de r_{ah} , segundo a proposição “H Estação”.....	166
Figura 53 - Mapas com a distribuição do fluxo de calor latente (λET) na mesorregião do Sul Goiano. Datas julianas de: 114/2006 e 85/2007.....	168
Figura 54 - Mapas com a distribuição do fluxo de calor latente (λET) na mesorregião do Sul Goiano. Datas julianas de: 116/2008 e 109/2009.....	169
Figura 55 - Mapas com a distribuição do fluxo de calor latente (λET) na mesorregião do Sul Goiano. Data juliana de: 100/2010.....	170
Figura 56 - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores de fluxo de calor latente (λET) (em $W.m^{-2}$) dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.....	171
Figura 57 - Gráfico representativo dos valores médios instantâneos (em $W.m^{-2}$) de R_n , G, H e λET estimados pelo algoritmo SEBAL para o momento da passagem do sensor MODIS/TERRA.....	173
Figura 58 - Gráficos dos valores percentuais médios da partição da radiação de superfície estimada pelo algoritmo SEBAL para os pontos de controles do cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana.....	175
Figura 59 - Gráficos comparativos dos valores horários de radiação global (R_{g+}) e ET_h a partir do método Penman-Monteith FAO-56, para as estações Morrinhos, referentes às datas julianas 114/2006, 85/2007, 116/2008 e 100/2010 e para a estação São Simão	

	referente à data juliana 109/2009.....	178
Figura 60 -	Gráficos representativos das relações existentes entre os quatro métodos aplicados para estimativa da ET_{24h} (em $mm.d^{-1}$).....	180
Figura 61 -	Gráficos com as correlações entre os resultados das proposições “H Clássico” e “H Estação”.....	181
Figura 62 -	Mapa da espacialização da ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) da mesorregião do Sul Goiano estimada através da proposição “H Estação” e por meio do algoritmo SEBAL para o dia juliano 114/2006.....	182
Figura 63 -	Mapa da espacialização da ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) da mesorregião do Sul Goiano estimada através da proposição “H Estação” e por meio do algoritmo SEBAL para o dia juliano 85/2007.....	183
Figura 64 -	Mapa da espacialização da ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) da mesorregião do Sul Goiano estimada através da proposição “H Estação” e por meio do algoritmo SEBAL para o dia juliano 116/2008.....	184
Figura 65 -	Mapa da espacialização da ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) da mesorregião do Sul Goiano estimada através da proposição “H Estação” e por meio do algoritmo SEBAL para o dia juliano 109/2009.....	185
Figura 66 -	Mapa da espacialização da ET_{24hs} (em $mm.d^{-1}$) da mesorregião do Sul Goiano estimada através da proposição “H Estação” e por meio do algoritmo SEBAL para o dia juliano 100/2010.....	186
Figura 67 -	Gráficos representativos da distribuição dos valores de ET_{24h} , pelos métodos ET_{RF} e ET_{FE} (em $mm.d^{-1}$) nas cinco imagens processadas pelo algoritmo SEBAL e seus os valores médios.....	188

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 -	Equação de representação do balanço hídrico.....	44
Equação 2 -	Cálculo do balanço de energia.....	45
Equação 3 -	Estimativa da radiação líquida recebida pela superfície terrestre.....	47
Equação 4 -	Cálculo do valor de radiação de onda longa incidida na superfície.....	47
Equação 5 -	Descrição da energia eletromagnética e seu princípio físico, por meio da teoria das ondas.....	53
Equação 6 -	Função de Planck.....	53
Equação 7 -	Emitância espectral de um corpo negro (E_{bf}) em função de sua temperatura média e da frequência da radiação.....	54
Equação 8 -	Relação existente entre a quantidade de energia radiante de um corpo e sua temperatura, expressa pela Lei de Stefan-Boltzmann.....	54
Equação 9 -	Determinação de um comprimento máximo de onda, segundo a formulação apresentada pela Lei de Wien.....	55
Equação 10 -	Obtenção dos valores referentes ao saldo de radiação para superfície (R_n) medidos em $W.m^{-2}$, conforme Allen (2002).....	91
Equação 11 -	Cálculo do albedo de superfície.....	94
Equação 12 -	Obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	94
Equação 13 -	Cálculo do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).....	95
Equação 14 -	Cálculo do Índice de Área Foliar (IAF).....	95
Equação 15 -	Cálculo da emissividade da superfície.....	96
Equação 16 -	Cálculo da radiação de onda longa emitida pela superfície.....	96
Equação 17 -	Estimativa da radiação de longa emitida pela atmosfera em direção da superfície terrestre, por meio da Equação de Stefan-Boltzman.....	97

Equação 18 - Cálculo da emissividade da atmosfera.....	97
Equação 19 - Obtenção da transmissividade atmosférica para condições de céu claro.....	97
Equação 20 - Cálculo da radiação de onda curta incidente.....	98
Equação 21 - Cálculo dos valores do fluxo instantâneo de calor no solo (G) medido em $W.m^{-2}$, em função da carta do saldo de radiação.....	98
Equação 22 - Correções dos valores de fluxo de calor no solo para corpos d'água cujo NDVI < 0.....	99
Equação 23 - Cálculo do fluxo de calor sensível (H).....	99
Equação 24 - Obtenção da carta de densidade do ar ρ , em $Kg.m^{-3}$	100
Equação 25 - Cálculo da pressão atmosférica do ar.....	100
Equação 26 - Cálculo da resistência aerodinâmica ao calor de transporte (rah).....	103
Equação 27 - Cálculo da velocidade de atrito (u^*), usando a lei logarítmica do vento neutro para as condições atmosféricas.....	103
Equação 28 - Cálculo da velocidade do vento a 100 m.....	104
Equação 29 - Estimativa da velocidade de fricção u^* para cada pixel da imagem.....	104
Equação 30 - Obtenção do comprimento de rugosidade, em função da carta do NDVI.....	104
Equação 31 - Cálculo da diferença de temperatura (dT), para cada pixel das imagens.....	104
Equação 32 - Obtenção do fluxo de calor latente, se o fluxo de calor sensível for igual a zero	105
Equação 33 - Obtenção do fluxo de calor sensível, considerando o fluxo de calor latente nulo.....	106
Equação 34 - Cálculo das constantes de a e b e determinação do valor de H para todos os pixels das imagens orbitais - pixel quente.....	106
Equação 35 - Cálculo das constantes de a e b , e determinação do valor de H para todos os pixels das imagens orbitais - pixel frio.....	106

Equação 36 -	Cálculo da estabilidade atmosférica pela teoria de Monin-Obukhov.....	
Equações 37 e 38 -	Cálculo dos coeficientes de correção de estabilidade atmosférica e para o transporte de calor e <i>de momentum</i> , levando em consideração as condições de estabilidade.....	107
Equações 39 a 46 -	Cálculo dos coeficientes de correção de estabilidade atmosférica e para o transporte de calor e <i>de momentum</i> , levando em consideração as condições de estabilidade.....	108
Equações 47 e 48 -	Correção dos valores de u^* e r_{ah} para os pixels de cada imagem, também, por meio dos valores de ψ_m e ψ_c corrigidos.....	109
Equação 49 -	Estimativa do fluxo de calor latente instantâneo (λET)	109
Equação 50 -	Conversão do fluxo de calor latente em evapotranspiração real horária.....	109
Equação 51 -	Cálculo do calor latente de vaporização.....	110
Equação 52 -	Obtenção da evapotranspiração real diária, a partir do cálculo da evapotranspiração horária, com base no conceito de fração evaporativa.....	110
Equação 53 -	Obtenção da fração evaporativa diária, considerando que para dias de céu claro existe uma regularidade e uma constância para a fração evaporativa.....	110
Equação 54 -	Obtenção do saldo de radiação médio de 24 horas (BASTIAANSEN et al., 2005) ($W.m^{-2}$).....	111
Equações 55 e 56 -	Determinação dos valores de $R_{s_{24h}}$ para estimativa dos ciclos diurnos do R_n e da $R_{s\downarrow}$ para dias de céu claro.....	111
Equação 57 -	Cálculo do fotoperíodo (N) para determinar os horários do nascer (T_{nasc}) e do ocaso (T_{por}) do Sol, feito pela Equação 57.....	113
Equação 58 -	Calculo de H, medido em graus.....	113
Equações 59 e 60 -	Determinação dos horários, em UTC, do nascer e do ocaso do Sol.....	113
Equação 61 e 62 -	Cálculo dos valores de $R_{n_{24h}}$ e $R_{s\downarrow_{24h}}$	113
Equação 63 -	Determinação da regressão linear.....	114

Equação 64 - Cálculo da fração evaporativa de referencia (ET _{rF})	114
Equação 65 - Relação diária de coeficiente de cultivo horário.....	114
Equação 66 - Obtenção de ET _{24h} em mm dia ⁻¹	114

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	32
1.1.	Motivação	34
1.2.	Hipóteses	35
1.3.	Justificativa	35
1.4.	Objetivos	38
1.4.1.	<u>Objetivos geral</u>	38
1.4.2.	<u>Objetivos específicos</u>	38
1.5.	Estrutura da dissertação	39
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	40
2.1.	O ciclo hidrológico	40
2.1.1.	<u>O processo da evapotranspiração</u>	41
2.1.2.	<u>Balanço hídrico</u>	43
2.2.	Componentes do balanço de energia	44
2.2.1.	<u>Radiação solar líquida (R_n)</u>	48
2.2.2.	<u>Fluxo de calor ao solo (G)</u>	48
2.2.3.	<u>Fluxo de calor sensível ao ar (H)</u>	49
2.2.4.	<u>Fluxo de calor latente (LE)</u>	49
2.3.	O sensoriamento remoto e os estudos ambientais	50
2.3.1.	<u>Os princípios do sensoriamento remoto</u>	51
2.3.2.	<u>Espectro eletromagnético</u>	56
2.4.	O sensor MODIS	59
2.4.1.	<u>Descrição técnica dos produtos MODIS</u>	60
2.5.	Modelagem de processos ambientais	62
2.5.1.	<u>Modelagem da evapotranspiração</u>	64
2.5.2.	<u>Modelagem da evapotranspiração por sensoriamento remoto</u>	66
2.5.3.	<u>O algoritmo SEBAL e suas aplicações</u>	67
3.	ÁREA DE ESTUDO	70
3.1.	Descrição geográfica regional	72
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	77

4.1.	Aquisição dos dados e pré-processamento das imagens orbitais	77
4.1.1.	<u>Imagens MODIS/TERRA</u>	77
4.1.1.1.	Produto MOD09GQ.....	84
4.1.1.2.	Produto MOD09GA.....	84
4.1.1.3.	Produto MOD11A1.....	84
4.1.2.	<u>Levantamento dos dados climatológicos</u>	84
4.1.3.	<u>Arquivos vetoriais</u>	88
4.2.	Implementação do algoritmo SEBAL	90
4.2.1.	<u>Correções das imagens MODIS</u>	90
4.2.2.	<u>Cálculo do saldo de radiação (R_n)</u>	90
4.2.3.	<u>Cálculo do albedo de superfície (α)</u>	94
4.2.4.	<u>Cálculo dos parâmetros biofísicos</u>	94
4.2.4.1.	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).....	94
4.2.4.2.	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).....	95
4.2.4.3.	Índice de Área Foliar (IAF).....	95
4.2.5.	<u>Emissividade da superfície (ϵ_0)</u>	96
4.2.6.	<u>Radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$)</u>	96
4.2.7.	<u>Radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$)</u>	97
4.2.8.	<u>Radiação de onda curta incidente ($R_{S\downarrow}$)</u>	98
4.3.	Fluxo de calor ao solo (G)	98
4.4.	Fluxo de calor sensível (H)	99
4.4.1.	<u>Resistência aerodinâmica ao transporte de calor (R_{ah})</u>	103
4.4.2.	<u>Diferença de temperatura (dT)</u>	104
4.4.3.	<u>Correção da estabilidade atmosférica</u>	106
4.5.	Fluxo de calor latente (λET)	109
4.6.	Evapotranspiração real horária (ET_h)	109
4.7.	Evapotranspiração real diária (ET_{24H})	110
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
5.1.	Parâmetros biofísicos	116
5.1.1.	<u>NDVI</u>	117
5.1.2.	<u>IAF</u>	123
5.2.	Fluxos de radiação de superfície	128

5.2.1.	<u>Temperatura de superfície</u>	128
5.2.2.	<u>Albedo de superfície (α)</u>	132
5.2.3.	<u>Saldo de radiação à superfície (R_n)</u>	144
5.2.4.	<u>Fluxo de calor ao solo (G)</u>	153
5.2.5.	<u>Fluxo de calor sensível (H)</u>	159
5.2.6.	<u>Fluxo de calor latente (λET)</u>	167
5.2.7	<u>Avaliação da partição da radiação de superfície</u>	172
5.3.	Evapotranspiração Regional	177
6.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	190
	REFERÊNCIAS	193
	ANEXOS I - Relação dos índices pluviométricos para os quinze dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA pela mesorregião do Sul Goiano.	204
	ANEXOS II - Valores obtidos no processo interativo para estabilidade do fluxo de calor sensível (H) a partir dos valores de referencias obtidos do pixel da estação Morrinhos, no dia 114/2006.....	205
	ANEXOS III - Valores obtidos no processo interativo para estabilidade do fluxo de calor sensível (H) a partir dos valores de referencias obtidos do pixel da estação Morrinhos, no dia 85/2007.....	206
	ANEXOS IV - Valores obtidos no processo interativo para estabilidade do fluxo de calor sensível (H) a partir dos valores de referencias obtidos do pixel da estação Morrinhos, no dia 116/2008.....	207
	ANEXOS V - Valores obtidos no processo interativo para estabilidade do fluxo de calor sensível (H) a partir dos valores de referencias obtidos do pixel da estação São Simão, no dia 109/2009.....	208
	ANEXOS VI - Valores obtidos no processo interativo para estabilidade do fluxo de calor sensível (H) a partir dos valores de referencias obtidos do pixel da estação São Simão, no dia 100/2010.....	209

ANEXOS VII - Estimativa da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO-56 para estação Morrinhos, dia 114/2006.....	210
ANEXOS VIII - Estimativa da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO-56 para estação Morrinhos, dia 85/2007.....	211
ANEXOS IX - Estimativa da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO-56 para estação Morrinhos, dia 116/2008.....	212
ANEXOS X - Estimativa da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO-56 para estação Morrinhos, dia 109/2009.....	213
ANEXOS XI - Estimativa da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO-56 para estação Morrinhos, dia 100/2010.....	214