



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO
IMAGENS MODIS**

Geissa Samira Lima Nascimento

Profa. Dra. Célia Campos Braga
Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva
(Orientadores)

Campina Grande, Agosto de 2012

GEISSA SAMIRA LIMA NASCIMENTO

**OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO
IMAGENS MODIS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Área de concentração: **Meteorologia de Meso e Grande Escalas**

Linha de pesquisa: **Sensoriamento Remoto Aplicado**

Orientadores: Profa. Dra. Célia Campos Braga

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB

Agosto – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N244o Nascimento, Geissa Samira Lima.
Obtenção do saldo de radiação no estado do Ceará utilizando imagens MODIS / Geissa Samira Lima Nascimento. - Campina Grande, 2012.
85f.: il., color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Prof^ª. Dr^ª. Célia Campos Braga, Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva.

Referências.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Imagens MODIS. 3. Semiárido. I. Título.

CDU 528.8(043)

GEISSA SAMIRA LIMA NASCIMENTO

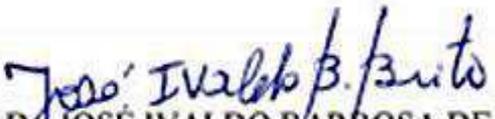
OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO
IMAGENS DO SENSOR MODIS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/08/2012

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. ADRIANO MARLISOM LEÃO DE SOUSA
Universidade Federal Rural da Amazônia

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais David e Edneide, a base da família, que nos permitem erguer nossos sonhos muitas vezes sacrificando os seus.

Aos meus irmãos Georgia e Júnior com os quais divido inúmeras experiências.

À Marylia Barreto e Ana Nery pela amizade e apoio.

Aos amigos conquistados na pós-graduação pelo companheiro, dedicação e os ensinamentos, em especial a Argemiro Lucena, Raianny Leite, Francineide Amorim, Fernanda Rocha e Vinícius Júnior.

Ao amigo Juliano Brandt pela disponibilidade quando precisei de conhecimento dentro da sua área de atuação.

Aos orientadores, Profa. Dra. Célia Campos e Prof. Dr. Bernardo Barbosa, que deram o suporte necessário dentro de suas possibilidades.

Ao Dr. Saulo de Tasso Araújo da Silva pela disponibilidade dos dados do experimento de campo.

Aos membros da banca examinadora, particularmente aos professores Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito e Dr. Adriano Marlison Leão de Sousa, pelas correções e sugestões.

À Divanete C. Rocha pela amizade e por todas as vezes que esteve disposta a me ouvir.

Ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG e a todos os professores pelos ensinamentos transmitidos.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado.

Por fim, a todos aqueles que lutaram ou ainda lutam por um mundo mais justo onde a educação e o respeito mútuo estejam no lugar que é merecido.

*“É um paradoxo a Terra se mover ao
redor do Sol e a água ser
constituída por dois gases
altamente inflamáveis. A verdade
científica é sempre um paradoxo,
se julgada pela experiência cotidiana
que se agarra à aparência
efêmera das coisas”.*

(Karl Marx)

*“Educação é aquilo que fica
depois que você esquece o
que a escola ensinou.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

As componentes do balanço de energia vêm sendo cada vez mais estudadas, especialmente por contribuírem para a gestão dos recursos hídricos e em modelos numéricos e climáticos. O saldo de radiação é um desses componentes, sendo empregado como entrada para modelos que determinam a evapotranspiração. Porém, por ser uma variável dependente da natureza da superfície, sua medição em estações meteorológicas possibilita valores pontuais que não podem ser utilizados em áreas heterogêneas. Assim, o sensoriamento remoto é uma ferramenta bastante útil, pois permite obter informações meteorológicas e ambientais indispensáveis no cálculo do balanço de radiação de diferentes áreas geográficas. Nesse sentido, este estudo tem por objetivo determinar o saldo de radiação instantâneo e diário na bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe, através de produtos do sensor MODIS a bordo dos satélites Aqua e Terra. Foram utilizadas trinta e cinco imagens referentes aos meses de setembro a dezembro do ano de 2005. A metodologia proposta foi validada através dos saldos de radiação instantâneo e diário calculados com dados de torre micrometeorológica instalada em pomar de bananas irrigado localizado na Fazenda Frutacor, no município de Quixeré – CE, Brasil. Os resultados obtidos foram comparados com os dados observados através dos erros médio percentual e absoluto e da raiz do erro quadrático médio. Para o saldo de radiação instantâneo o erro médio encontrado foi 7,40% para o satélite Terra e 15,61% para o satélite Aqua. Já para o saldo diário os erros médios foram menores: 6,91% e 8,43%, respectivamente. Os resultados obtidos evidenciam que o procedimento é adequado para obtenção do saldo de radiação na bacia do Baixo Jaguaribe, principalmente com produtos do satélite Terra.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, imagens MODIS, semiárido, validação.

ABSTRACT

The energy balance components have been increasingly studied, especially because of their contribution to the management of water resources and numerical models and climate. The net radiation is one of these components and is used as an input to models that determine evapotranspiration. However, as it is a variable which is dependent on the nature of the surface, measuring weather stations enables exact values which cannot be used in heterogeneous areas. Thus, remote sensing is a useful tool because it allows weather and environmental information necessary to calculate the radiation balance in different geographical areas. Accordingly, this study aims to determine instantaneous and daily net radiation in the lower Jaguaribe water basin, through products of the MODIS sensor, onboard Aqua and Terra satellites. Thirty five images were used between the months of September at December, for the year 2005. The proposed methodology has been validated through instantaneous and daily net radiation calculated with data from a micrometeorological tower installed on an irrigated banana orchard located on the Frutacor Farm, in the municipality of Quixeré-CE, Brazil. The results were compared with data observed through the absolute and percent mean and root mean square errors. For the instantaneous net radiation, the mean error found was 7.40% for the Earth satellite and 15.61% for Aqua satellite. As for the mean daily balance errors were lower: 6.91% and 8.43% respectively. With these results, it is evident that the procedure is suitable for obtaining the radiation balance in the basin of the Lower Jaguaribe, especially with products from the Terra satellite.

Key-Works: remote sensing, MODIS images, semiarid, validation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço de radiação à superfície (Fonte: adaptado de Allen et al., 2002).	24
Figura 2 – Esquema dos elementos que compõem o sistema de imagens. Fonte: CCRS (2007)	27
Figura 3 – Localização do município de Quixeré no Estado do Ceará	36
Figura 4 – Instrumentos do experimento instalado na Fazenda Frutacor, Quixeré (CE): (a) anemômetro sônico 3D CSAT3; (b) saldo radiômetro CNR1; (c) analisador de H ₂ O/CO ₂ LI-7500; (d) sensor HPM45C; (e) torre micrometeorológica no interior do bananal e (f) estação automática ET106 (Fonte: Silva, 2009).....	38
Figura 5 – Tiles do sensor MODIS, com destaque para o <i>tile</i> em que se encontra a área de estudo. Fonte: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview (2011)	39
Figura 6 – Imagem do sensor MODIS/ Aqua para o dia 30 de outubro de 2005, com destaque para a bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, o recorte da área de estudo e a localização da Fazenda Frutacor e do DIJA.....	42
Figura 7 – Etapas do processamento da imagem para obtenção do saldo de radiação instantâneo (R_n) e o diário ($R_{n,24h}$).....	43
Figura 8 – Distribuição espacial do albedo (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005	49
Figura 9 – Distribuição espacial do NDVI (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005	53
Figura 10 – Distribuição espacial da temperatura da superfície (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005	55
Figura 11 – Histogramas da temperatura da superfície (°C) (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005	56

Figura 12 – A relação entre a temperatura do ar (T_a) obtida no experimento de campo e da temperatura de superfície (T_s) derivada da imagem térmica do sensor MODIS para os dias estudados do satélite Aqua	57
Figura 13 – A relação entre a temperatura do ar (T_a) obtida no experimento de campo e da temperatura de superfície (T_s) derivada da imagem térmica do sensor MODIS para os dias estudados do satélite Terra	57
Figura 14 – Distribuição espacial da radiação de onda longa emitida pela superfície (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.	66
Figura 15 – Distribuição espacial do saldo de radiação (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis empregadas no cômputo das componentes do balanço de radiação na Fazenda Frutacor para o satélite Aqua	47
Tabela 2 – Variáveis empregadas no cômputo das componentes do balanço de radiação na Fazenda Frutacor para o satélite Terra	48
Tabela 3 – Albedo medido (α) (%), Albedo estimado (α_T) (%), erro relativo percentual e médio para o satélite Aqua	50
Tabela 4 – Albedo medido (α) (%), Albedo estimado (α_T) (%), erro relativo percentual e médio para o satélite Terra	51
Tabela 5 – Radiação de onda curta incidente medida ($R_{s\downarrow}$) ($W m^{-2}$), Radiação de onda curta incidente estimada ($R_{s\downarrow Z}$) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua	59
Tabela 6 – Radiação de onda curta incidente medida ($R_{s\downarrow}$) ($W m^{-2}$), Radiação de onda curta incidente estimada ($R_{s\downarrow Z}$) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra	60
Tabela 7 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para a radiação de onda curta incidente dos satélites Aqua e Terra	61
Tabela 8 – Radiação de onda longa incidente medida ($R_{L\downarrow}$) ($W m^{-2}$), Radiação de onda longa incidente estimada ($R_{L\downarrow S}$) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua..	63
Tabela 9 – Radiação de onda longa incidente medida ($R_{L\downarrow}$) ($W m^{-2}$), Radiação de onda longa incidente estimada ($R_{L\downarrow S}$) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra	64
Tabela 10 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para a radiação de onda longa incidente dos satélites Aqua e Terra	65
Tabela 11 – Saldo de radiação medido (R_n) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação estimado (R_n estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua	69

Tabela 12 – Saldo de radiação medido (R_n) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação estimado (R_n estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra	70
Tabela 13 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para o saldo de radiação dos satélites Aqua e Terra.	71
Tabela 14 – Saldo de radiação diário medido ($R_{n,24h}$) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação diário estimado ($R_{n,24h}$ estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua..	72
Tabela 15 – Saldo de radiação diário medido ($R_{n,24h}$) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação diário estimado ($R_{n,24h}$ estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra ..	73
Tabela 16 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para o saldo de radiação diário dos satélites Aqua e Terra.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações das Bandas do sensor MODIS.	30
Quadro 2 – Descrição dos produtos MODIS utilizados	40
Quadro 3 – Dias selecionados para o estudo, onde DSA é o Dia Sequencial do Ano.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMSR-E – Advance Microwave Scanning Radiometer

AMSU – Advanced Microwave Sounding Unit

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

BOC – Balanço de Onda Curta

BOL – Balanço de Onda Longa

CERES – Clouds and the Earth's Radiant Energy System Network

DIJA – Distrito Irrigado Jaguari-Apodi

DSA – Dia Sequencial do Ano

EA – Erro Absoluto

EMA – Erro Médio Absoluto

EMP – Erro Médio Percentual

EOS – Earth Observing System

EP – Erro Percentual

ESE – Earth Science Enterprises

ET – Evapotranspiração

EVI – Índice de Vegetação Melhorado

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

HDF – Hierarchical Data Format

HSB – Humidity Sounder for Brazil

IAF – Índice de Área Foliar

IV – Índices de Vegetação

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite

LST – Land-Surface Temperature

METRIC – Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration

MISR – Multi-angle Imaging Spectroradiometer

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MOPITT – Measurements of Pollution in the Troposphere

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration's

REQM – Raiz do erro quadrático médio

SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land

SR – Sensoriamento Remoto

SST – Sea Surface Temperature

TIR – Infravermelho Termal

TM – Thematic Mapper

TOA – Radiação no Topo da Atmosfera

UR – Umidade Relativa do Ar

LISTA DE SÍMBOLOS

m – Metro

α – Albedo da superfície

T_a – Temperatura do ar

T_s – Temperatura da superfície

$R_{s\downarrow}$ – Radiação de onda curta incidente

$R_{L\downarrow}$ – Radiação de onda longa incidente

$R_{L\uparrow}$ – Radiação de onda longa emitida

ε_0 – Emissividade da superfície

R_n – Saldo de radiação instantâneo

$R_{n,24h}$ – Saldo de radiação diário

σ – Constante de Stefan-Boltzmann

W – Watt

°C – Grau Celsius

ha – Hectare

L – Litro

H – Hora

S_{solar} – Fluxo de radiação solar incidente

S_{ref} – Fluxo de radiação refletida

L_{atm} – Fluxo de radiação de onda longa emitida pela atmosfera

L_{sup} – Fluxo de radiação de onda longa emitida pela superfície

G – Fluxo de calor no solo

Hz - Hertz

CO₂ – Dióxido de carbono

H₂O – Água

u_x – Velocidade do vento na direção x

u_y – Velocidade do vento na direção y

u_z – Velocidade do vento na direção z

θ_z – Ângulo zenital solar

e₀ – Pressão de vapor

S₀ – Constante solar no topo da atmosfera

ε_a – Emissividade atmosférica

R_{s↓24h} – Radiação solar média incidente diária

τ_{24h} – Transmitância atmosférica média diária

R_{s,TOA,24h} – Radiação solar diária incidente no topo da atmosfera

x_i – Valor observado

x_i[?] – Valor estimado

N – Número de observações

r – coeficiente de correlação

Sumário

1. INTRODUÇÃO	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1. Balanço de radiação.....	23
2.1.1. Balanço de onda curta.....	24
2.1.2. Balanço de onda longa.....	25
2.2. Sensoriamento remoto	26
2.2.1. Sensor MODIS	28
2.2.2. Estimativa do saldo de radiação	29
2.2.3. Índice de vegetação da diferença normalizada	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. Área geográfica do estudo	35
3.2. Experimento de Campo	36
3.3. Obtenção e tratamento das imagens de satélite	39
3.4. Metodologia empregada	42
3.4.1. Albedo da superfície.....	44
3.4.2. Radiação de onda curta incidente	44
3.4.3. Radiação atmosférica.....	44
3.4.4. Saldo de radiação instantâneo	45
3.4.5. Saldo de radiação diário	45
3.5. Análise estatística dos resultados	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Mapas temáticos do albedo	48
4.2. Mapas temáticos do NDVI	51

4.3. Mapas temáticos da temperatura da superfície.....	54
4.4. Radiação de onda curta incidente	58
4.5. Radiação de onda longa.....	62
4.6. Saldo de radiação instantâneo	66
4.7. Saldo de radiação diário	72
5. CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grande extensão territorial (8 547 403,5 km²) e privilegiado em termos de recursos hídricos, abrigando 11,6% da água doce superficial do mundo, sendo que 70% da água disponível para o uso encontram-se na Região Amazônica e os outros 30% distribuídos desigualmente pelo país, para atender 93% da população, sendo que destes a região Nordeste abriga 3,30% (Universidade da Água, 1992).

A má distribuição das chuvas traz como resultado escassez de um lado e abundância de outro. Enquanto que em mais de 90% do território brasileiro encontram-se volumes entre 1000 e mais de 3000 mm/ano, no contexto semiárido do Nordeste, elas são mais escassas, entre 400 e 800 mm/ano. Assim, os dados da disponibilidade de água para a região Nordeste apontam esta discrepância, principalmente no seu contexto semiárido, onde cada habitante tem metade do total considerado mínimo para o consumo – 500 m³/ano (Tucci et al., 2001; Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2008). A Universidade da água (1992) afirma que 8% dos recursos hídricos mundiais são utilizados nas residências, 22% na indústria e 70% para agricultura. É necessário que haja um controle desses recursos tendo em vista que a agricultura no Brasil é uma das bases da economia, sendo a região Nordeste a principal responsável pelo cultivo de cana-de-açúcar e, mais recentemente, lavouras de fruticultura para exportação (Portal São Francisco, 2002).

Muitos processos biológicos e físicos são controlados pela quantidade de energia solar recebida, refletida e emitida pela Terra e a atmosfera, a qual é determinada por meio do saldo de radiação (R_n), componente fundamental do balanço de energia. E a energia total disponível na superfície é destinada ao aquecimento do solo e do ar e ao processo de evapotranspiração. (Franco et al., 2007; Folhes, 2007; Mello & Silva, 2007; Santos et al., 2011). Como o Nordeste brasileiro está localizado na região tropical com grande incidência de insolação durante todo o ano, tendo como consequência uma elevada demanda de evapotranspiração que se torna superior à quantidade de precipitação o que gera um déficit hídrico, este é corrigido na agricultura por meio da irrigação (Silva, 2007). O uso em excesso de irrigação traz como consequência, a perda de água que, por sua vez, ocasiona custos mais altos e sérios impactos ambientais.

Além disso, conhecer o R_n tem importância em diversas áreas científicas, como engenharia, arquitetura, meteorologia, agricultura, hidrologia e, ainda, como indicador da variabilidade climática (Lohmann et al., 2006).

Em face do exposto muitos estudos (Di Pace et al., 2008; Menezes Neto et al., 2009; Blonquist Jr. et al., 2009; Silva et al., 2010b; Souza et al., 2012) vêm sendo realizados visando a sua determinação em escalas local e global. Porém, há uma limitação: a baixa densidade de estações radiométricas que meçam essa variável e também, as estações que medem fornecem valores pontuais do R_n que não podem ser utilizados em escala regional. Tendo em vista esta limitação tem-se motivado o uso de dados de sensoriamento remoto (SR) obtidos de satélites que possibilitam avaliar o R_n em vastas áreas (Allen et al., 2002; Allen et al., 2005a, b).

Neste estudo utilizou-se o sensor Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) dos satélites Terra e Aqua por se tratar de uma ferramenta de alta resolução temporal (um a dois dias), o que aumenta a probabilidade de obtenção de imagens de boa qualidade sobre condições de céu claro (Compaoré et al., 2008). E a área de interesse é o estado do Ceará, localizado no extremo norte do Nordeste brasileiro, que necessita de um manejo de irrigação sustentável, por estar inserido no clima semiárido. O principal rio do estado é o Jaguaribe, que dá nome a uma das mesorregiões, na qual se encontra a microrregião do Baixo Jaguaribe. Ela está dividida em dez municípios, entre eles Quixeré, área geográfica desse estudo. Essa microrregião apresenta grande importância econômica no estado por ser um polo de desenvolvimento da fruticultura irrigada. Assim, torna-se importante estudar o R_n para as áreas próximas do rio viabilizando o consumo de água na irrigação das diversas culturas.

A proposta deste trabalho consiste em aperfeiçoar estudos (Silva, 2009; Araújo, 2010) realizados na área experimental da fazenda Frutacor (Quixeré – CE), usando o sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, para estimar o R_n instantâneo e diário para alguns dias do ano de 2005. Os objetivos específicos da pesquisa são:

- avaliar a dinâmica da cobertura vegetal por meio de mapas temáticos do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) a partir de imagem sensor MODIS;
- calcular as componentes do saldo de radiação e avalia-las através dos dados medidos na torre micrometeorológica, instalada sobre a cultura da banana no perímetro de irrigado da Fazenda
- avaliar o R_n estimado com produtos do sensor MODIS, sobre diferentes alvos na região de estudo;

- validar o R_n estimado pela metodologia proposta neste estudo, com o R_n calculado através de dados medidos na torre micrometeorológica.
- validar o $R_{n,24h}$ estimado pela metodologia proposta neste estudo, com o $R_{n,24h}$ calculado através de dados medidos na torre micrometeorológica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Balanço de radiação

A radiação solar é uma componente fundamental do balanço de energia no sistema Terra-atmosfera, uma vez que muitos processos físicos e biológicos são controlados pela quantidade de energia solar recebida, refletida e emitida pela Terra e a atmosfera (Ceballos, 2000; Santos et al., 2011). Sendo o principal elemento meteorológico e um dos fatores determinantes do tempo e do clima. Além disso, afeta diversos processos: físicos (aquecimento/ evaporação), bio-físicos (transpiração) e biológicos (fotossíntese) (Azevedo et al., 1990). A quantidade da radiação solar recebida depende da inclinação com que os raios solares atingem o planeta; assim, em média regiões mais próximas ao Equador recebem maior radiação solar (Giacomoni, 2005; Collischonn & Tassi, 2008).

Através do balanço de radiação quantifica-se o R_n , o qual juntamente com o fluxo de calor do solo serve como uma força motriz fundamental para a evapotranspiração (Bish et al., 2005). Assim, esses componentes são utilizados no planejamento racional da irrigação, no uso adequado do solo, no zoneamento agrícola regional, no impacto das variações meteorológicas sobre os cultivos agrícolas, na proteção de plantas, entre outros (André et al., 2010). O R_n ainda é de extrema importância para estudos de trocas de massa e energia com a atmosfera; para identificar mudanças em diversos biomas terrestres; na estimativa das perdas de água das superfícies vegetadas – através do cômputo da evapotranspiração (ET); em modelagem hidrológica (Bish et al., 2005; Angelocci et al., 2008; Sentelhas & Angelocci, 2009; Silva et al., 2010a).

O R_n pode ser medido com radiômetros específicos (saldo radiômetros), os quais são caros e requerem técnicas especiais de operação e calibração, sendo portanto, de uso restrito à pesquisa (Azevedo et al., 1990). Além disso, os instrumentos utilizados nas estações proporcionam medidas pontuais que são representativas apenas para áreas de pequena dimensão, devido à variação temporal e espacial dessa variável, pois ela depende das características ópticas da superfície analisada, da irradiância solar global e das condições de temperatura e umidade da superfície e do ar (Di Pace et al., 2008; Gomes, 2009).

Desse modo, o R_n (representado na Figura 1) vem sendo obtido por meio do SR, especialmente quando trata-se de estudos em áreas heterogêneas (Araújo, 2010; Silva et al., 2010a). Ele é computado através da diferença entre os fluxos radiativos incidentes, refletidos

e emitidos do balanço de ondas curtas, o qual é expresso por meio da radiação solar global e do albedo da superfície (α), e ondas longas, dado em função da temperatura do ar (T_a) e da temperatura da superfície (T_s) (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007):

$$R_n = R_{s\downarrow}(1 - \alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (1)$$

em que $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta ou solar incidente, α é o albedo da superfície, $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície ou incidente, $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície, o termo $(1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow}$ representa a radiação de onda longa refletida pela superfície e ε_0 é a emissividade da superfície. R_n é dado em $W\ m^{-2}$.

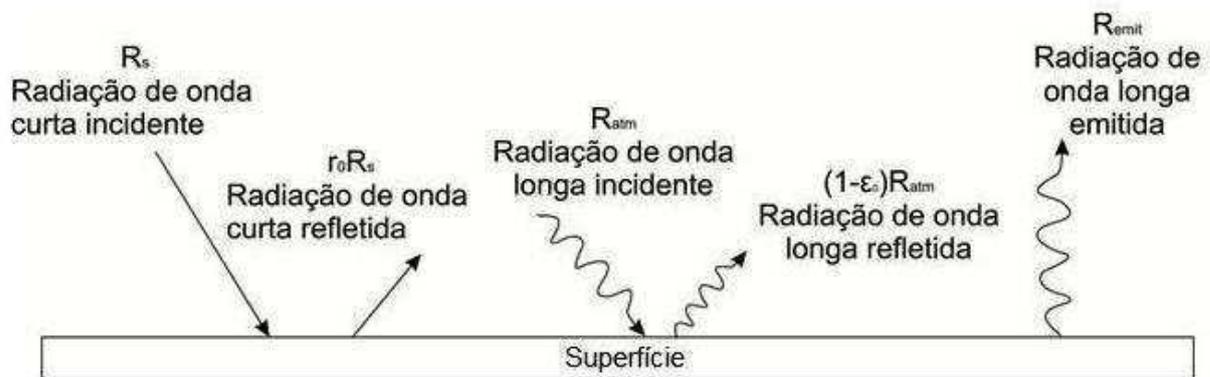


Figura 1 – Balanço de radiação à superfície (Fonte: adaptado de Allen et al., 2002)

2.1.1. Balanço de onda curta

A radiação de onda curta é proveniente do Sol e compreende os comprimentos de onda eletromagnética entre 0,3 a 4 μm (Gusmão, 2011). Seu balanço é função direta da radiação solar global, nas suas componentes direta e difusa, e do albedo.

O albedo da superfície (α) determina o poder refletor da superfície no domínio de 0,3 a 4,0 μm , sendo determinado pela razão entre a radiação de onda curta refletida e a incidente, portanto é uma grandeza adimensional. Essa variável varia ao longo do período diurno em função do ângulo zenital e ao longo da estação de cultivo, em função das características da superfície, da cobertura vegetal, do tipo de solo, do estado de umidade do solo e ainda, das atividades humanas – desflorestamento, agricultura e urbanização (Azevedo et al., 1990; Pereira et al., 2000; Gomes, 2009; Gusmão, 2011). O albedo decresce com a

elevação do Sol, no período diurno, apresentando valores máximos próximos ao nascer e ao pôr do Sol e os valores mínimos são observados em torno do meio dia (Leitão et al., 2002).

O balanço de radiação de onda curta (BOC) em um dado instante é dado por:

$$BOC = R_{s\downarrow}(1 - \alpha) \quad (2)$$

em que $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente e α é o albedo da superfície.

Analisando a equação (2) tem-se que se em dado instante a $R_{s\downarrow}$ for constante o BOC dependerá apenas inversamente do albedo, ou seja, se seu valor for elevado o BOC será reduzido e se for um valor baixo o BOC será elevado.

2.1.2. Balanço de onda longa

Ao adentrar na atmosfera, parte da radiação solar é absorvida pela atmosfera, a qual gera aquecimento do corpo e por sua vez emite radiação de onda longa. Da mesma forma, a atmosfera emite radiação de onda longa, isso se dá pela absorção da radiação solar e também pela reflexão da mesma para a superfície (Giacomoni, 2005). A emissão da atmosfera quase não sofre alteração ao longo do dia, já a emissão da superfície tem um ciclo diurno bem definido (Freitas, 2005).

O balanço de ondas longas (BOL) (4 a 100 μm) é uma das componentes mais importantes no balanço de energia, sendo imprescindível na determinação da troca de energia no período noturno, quando há ocorrência de orvalho e geadas (Heitor et al., 1991). Esta é a porção de maior incerteza no cômputo do R_n , pois os instrumentos não possibilitam medições com precisão satisfatória. Por outro lado, cálculos precisos do R_n , que modulam as componentes do balanço de energia à superfície, dependem de boas estimativas da radiação de onda longa descendente ou radiação atmosférica ($R_{L\downarrow}$) (Santos et al., 2011). Assim, são utilizados modelos empíricos; entretanto, a $R_{L\downarrow}$ depende da temperatura do ar, do conteúdo de vapor d'água no ar e da nebulosidade, as quais são informações dificilmente disponíveis (Azevedo et al., 1990). Portanto, o BOL tem sido obtido através da lei de Stefan-Boltzmann aplicada à atmosfera e à superfície (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007):

$$BOL = R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (3)$$

em que $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente, $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície, ε_a e ε_0 são as emissividades atmosférica e da superfície, respectivamente; T_a e T_s são as temperaturas do ar e da superfície, respectivamente e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

2.2. Sensoriamento remoto

Toda ação de planejamento, ordenação ou monitoramento do espaço deve incluir a análise dos diferentes componentes do ambiente, incluindo o meio físico-biótico, a ocupação humana e seus inter-relacionamentos. Para este tipo de análise é grande a contribuição da tecnologia de sensoriamento remoto (Di Maio & Sausen, 2008).

Colwell (1983) define sensoriamento remoto (SR) como a medição ou aquisição de informações de alguma propriedade do objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo. Isto é feito através da detecção e registro de energia emitida ou refletida e do processamento das informações (CCRS, 2007). Os sensores orbitais, a bordo dos satélites, são instrumentos que compõem o sistema de captação de dados e imagens, cuja evolução tem contribuído para a coleta de imagens de melhor qualidade e de maior poder de definição.

Conforme CCRS (2007), o processo do sensoriamento remoto envolve uma interação entre a radiação e os alvos de interesse, além de envolver detecção de energia emitida e a utilização de sensores não-imageadores. Nos sistemas de imagens são envolvidos sete elementos: fonte de energia ou iluminação (A), radiação e a atmosfera (B), interação com o alvo (C), registro de energia pelo sensor (D), transmissão, recepção e processamento (E), interpretação e análise (F) e aplicação (G) (Figura 2).

CCRS (2007) descreve que um sensor remoto óptico é constituído de um coletor que intercepta a radiância vinda do alvo e a direciona para um conjunto de detectores que, por sua vez, transformam a radiância em sinal elétrico, cuja intensidade é transformada em um valor numérico digital que, no caso de sensores orbitais, pode ser registrado a bordo do satélite ou transmitido para os receptores em terra.

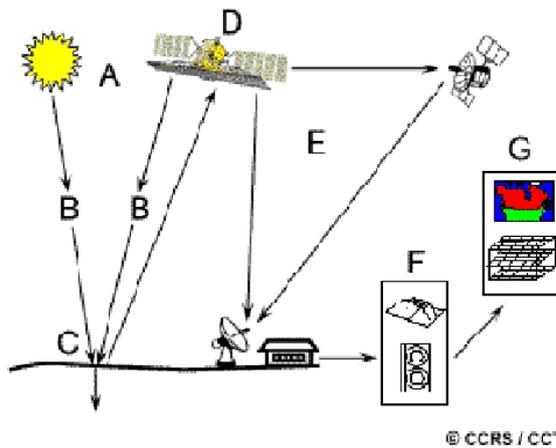


Figura 2 – Esquema dos elementos que compõem o sistema de imagens. Fonte: CCRS (2007)

Jensen (2011) menciona vantagens e limitações do SR. Dentre as vantagens estão: não intrusivo, quando se trata do SR passivo; os equipamentos coletam dados sistematicamente, que podem ser obtidos para áreas geográficas muito grandes; fornece nova e fundamental informação científica. Para as limitações cita-se: geralmente é superestimado, ele simplesmente provê alguma informação espacial, espectral e temporal de valor, de forma eficiente e econômica; o erro produzido pelo ser humano, através da seleção do sistema de SR mais apropriado para a coleta dos dados, da calibração dos sensores, da plataforma que irá portar o sensor; os instrumentos podem ficar descalibrados e os dados podem ser muito caros para coleta – devido ao custo operacional do satélite, desde a construção, lançamento, coleta de informações, equipamentos de recepção de sinais, decaimento de equipamentos e substituição – e análise, principalmente devido ao gasto com analistas de imagens bem treinados (Jensen, 2011).

Deste modo, por se tratar de uma ferramenta de baixo custo operacional e facilidade de obtenção das imagens, dados multitemporais obtidos por SR de diferentes satélites meteorológicos e ambientais têm sido utilizados por pesquisadores com diferentes finalidades (Santos, 2011). Srivastava et al. (1997) utilizaram os dados remotos para encontrar a relação entre NDVI e totais sazonais da precipitação e transpiração no estado de Karnataka (Índia).

Já Wessel et al. (2004) utilizaram dados do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e *Thematic Mapper* (TM) para avaliar áreas degradadas e não degradadas na África do Sul, enquanto que Dantas et al. (2010) encontraram uma correlação significativa entre os albedo medido e estimado pelos satélites AVHRR/ *National Oceanic*

and Atmospheric Administration's (NOAA) e TM/ Land Remote Sensing Satellite (LANDSAT) para diferentes coberturas na região de Quixeré-CE.

Formigoni (2008) avaliou o comportamento temporal do Índice de vegetação melhorado (EVI) derivado do sensor MODIS para os principais biomas e tipos de vegetação da região Nordeste do Brasil, no período de fevereiro de 2000 a julho de 2006. Além disso, analisou a relação do EVI dos diferentes biomas com a pluviometria. A vegetação do tipo caatinga foi analisada na cidade de Petrolina – PE. Os resultados obtidos, para este bioma, mostraram que ele apresentou a maior variação dos valores de EVI, pois na época de seca perde todas as folhas e na época de chuva se torna verde.

2.2.1. Sensor MODIS

Nos últimos anos o planeta Terra vem sofrendo diversas mudanças, em geral resultantes de ações antrópicas que em particular impactam as condições climáticas. Anderson et al. (2003) afirmam que é necessário que se estude o planeta Terra como um sistema integrado, devido às relações entre a vida, os oceanos e a atmosfera estarem intrinsecamente ligadas. Com esse intuito a comunidade científica se empenha em encontrar soluções plausíveis que possibilitem obter informações a respeito da dinâmica dos ecossistemas, então se buscaram novos instrumentos de coleta de dados através de sensores instalados a bordo dos satélites meteorológicos e ambientais.

Com relação à coleta de dados sobre o planeta Terra, o programa mais ambicioso que existe no momento é, sem dúvida, o programa lançado pela NASA, denominado de *Earth Science Enterprises (ESE)*, para estudar fenômenos físicos, químicos e biológicos desse planeta e da atmosfera. Esse programa é composto por três segmentos: uma série de satélites de observação da Terra; um avançado sistema de banco de dados e uma equipe de cientistas que estudará os dados coletados (Moreira, 2008).

O primeiro satélite lançado pelo *Earth Observing System (EOS)* foi o Terra, em dezembro de 1999, com vários sensores a bordo: MODIS, MISR, ASTER, CERES e MOPITT, sendo o MODIS o principal sensor. O segundo satélite lançado foi o Aqua, em maio de 2002, com MODIS, AMSU, HSB, AMSR-E e CERES como sensores. Neste estudo os dados utilizados são do sensor MODIS.

Conforme Anderson et al. (2003), uma das metas da NASA é testar novas tecnologias com o sensor MODIS que possui 36 bandas espectrais, com resolução

radiométrica de 12 bits. Este sensor apresenta maior número de bandas espectrais que os outros imageadores de baixa e média resolução espacial, já lançados. Ele foi projetado para suprir três campos de estudos diferentes: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e oferecer uma cobertura global quase diária com resolução espacial das bandas 1 e 2 de 250 m, 3 e 7 de 500 m e as demais de 1000 m (Huete et al., 1997; Justice et al., 2002). Os 36 canais do sensor MODIS incluem sete bandas de ondas curtas, similares ao LANDSAT/TM, que fornecem cobertura global contínua 1-2 dias (Quadro 1).

As características positivas dele compreendem a sua cobertura global; a alta resolução radiométrica; as faixas dinâmicas adequadas para estudos da atmosfera, terra ou oceano, e a calibração precisa em múltiplas bandas TIR projetadas para consultas de *Sea Surface Temperature* (SST), *Land Surface Temperature* (LST) e propriedades da atmosfera (Wan et al., 2002). É mais vantajoso utilizar o sensor MODIS, por possuir resolução espectral e radiométrica melhorada quando comparada com outros sensores mais antigos como, por exemplo, o NOAA /AVHRR para obter temperatura da superfície, bem como índices de vegetação (Nishida et al., 2003).

Outra importante característica desse sensor é que os dados são disponibilizados georreferenciados e corrigidos para efeitos atmosféricos (Santos, 2011).

2.2.2. Estimativa do saldo de radiação

As imagens obtidas por sensoriamento remoto passam a representar uma das formas mais viáveis no monitoramento ambiental tanto em escala local como global, devido à rapidez, eficiência, periodicidade e visão sinótica que as caracterizam (Ataíde, 2006). Além de produzir informações atualizadas com frequência devido à característica de repetitividade de aquisição das imagens e, ainda, a existência de dezenas de programas espaciais voltados para obtenção de dados para estudo de ambientes continentais, aquáticos e atmosféricos (Di Maio & Sausen, 2008).

Quadro 1 - Especificações das Bandas do Sensor MODIS

Uso Primário	Banda s	Largura da banda (nm)	Radiância Espectral (W/m².µm.sr)	Resolução Espacial (m)
Superfície terrestre, nuvens e aerossóis	1	620 - 670	21,8	250
	2	841 - 876	24,7	
Propriedades da superfície terrestre, nuvens e aerossóis	3	459 - 479	35,3	500
	4	545 - 565	29,0	
	5	1230 - 1250	5,4	
	6	1628 - 1652	7,3	
	7	2105 - 2155	1,0	
Cor dos Oceanos/Fitoplâncton/ Bioquímica	8	405 - 420	44,9	1000
	9	438 - 448	41,9	
	10	483 - 493	32,1	
	11	526 - 536	27,9	
	12	546 - 556	21,0	
	13	662 - 672	9,5	
	14	673 - 683	8,7	
	15	743 - 753	10,2	
Vapor d'água Atmosférico	17	890 - 920	10,0	1000
	18	931 - 941	3,6	
	19	915 - 965	15,0	
Temperatura nuvens/superfície	20	3,660 - 3,840	0,45(300K)	1000
	21	3,929 - 3,989	2,38(335K)	
	22	3,929 - 3,989	0,67(300K)	
	23	4,020 - 4,080	0,79(300K)	
Temperatura atmosférica	24	4,433 - 4,498	0,17(250K)	1000
	25	4,482 - 4,549	0,59(275K)	
Nuvens Cirrus Vapor D'água	26	1,360 - 1,390	6,00	1000
	27	6,535 - 6,895	1,16(240K)	
	28	7,175 - 7,475	2,18(250K)	
Propriedades das nuvens	29	8,400 - 8,700	9,58(300K)	1000
Ozônio	30	9,580 - 9,880	3,69(250K)	1000
Temperatura nuvens/superfície	31	10,780 - 11,280	9,55(300K)	1000
	32	11,770 - 12,270	8,94(300K)	
Altitude Topo da nuvem	33	13,185 - 13,485	4,52(260K)	1000
	34	13,485 - 13,785	3,76(250K)	
	35	13,785 - 14,085	3,11(240K)	
	36	14,085 - 14,385	2,08(220K)	

Fonte: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

Em geral, as metodologias para estimar R_n ou suas componentes através de SR são divididas em duas categorias, com base nos dados utilizados: (i) dados próximos da superfície (isto é, temperatura da superfície da terra, albedo da superfície, temperatura do ar próxima da superfície); (ii) radiação do topo da atmosfera (TOA) (Bisht & Bras, 2010). Na prática, o saldo de radiação instantâneo não é tão aplicável quanto o saldo de radiação diário, portanto é mais importante a estimativa deste último, sob o ponto de vista das aplicações práticas, vez que alimenta modelos que estimam a evapotranspiração diária (Bisht et al., 2005; Araújo, 2010; Santos, 2011).

O *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen, 1995), utilizado desde a década de 90, é um método residual da equação do balanço de energia para estimar a ET, com auxílio de dados espectrais de imagens de satélite e de poucos elementos meteorológicos disponíveis em estações meteorológicas. Bastiaanssen et al. (1998a) ajustaram as relações empíricas a diferentes regiões geográficas e dados de satélite e Bastiaanssen et al. (1998b) validaram os fluxos de superfície obtidos com o algoritmo SEBAL, através dos dados disponíveis em um experimento de campo de grande escala na Espanha, Níger e China. Segundo Folhes (2007) este método pode ser empregado em sistemas agrícolas ou naturais e não requer dados complementares sobre uso da terra ou tipo de cultivo.

Diversos estudos vêm sendo realizados para determinação dos componentes do balanço radioativo e, conseqüentemente, a estimativa da evapotranspiração. Estas pesquisas estão relacionadas ao planejamento de atividades agrícolas e ao gerenciamento racional dos recursos hídricos disponíveis no sistema terra-atmosfera (Leitão et al., 2002; Ataíde, 2006; Giongo, 2008; Novas, 2008; Tang & Li, 2008; Silva et al., 2008; Wang & Liang, 2009; Araújo, 2010; Bisht e Bras, 2010; Santos et al., 2011).

Leitão et al. (2002) estimaram albedos relativos às radiações de onda curta, infravermelho e fotossinteticamente ativa foram estimados para três ecossistemas da floresta amazônica. Silva et al. (2008) compararam as metodologias SEBAL e *Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration* (METRIC) na obtenção do albedo da superfície para imagens espectrais do TM – Landsat 5 no estado do Ceará.

Tang & Li (2008) desenvolveram um método de regressão estatística para estimar a radiação de onda longa incidente instantânea para dias sem nuvens usando apenas as radiações baseadas em imagens de satélite e, depois, combinaram essas estimativas com

produtos MODIS da temperatura da superfície terrestre e emissividade (MOD11_L2) para obter o saldo de radiação de onda longa à superfície instantânea.

Giongo (2008) utilizou o algoritmo SEBAL para estimar o Balanço de Radiação à Superfície, a partir de dados do sensor TM do satélite LANDSAT 5, com a utilização do algoritmo SEBAL na região de Cerrado e em área com plantio de Cana-de-Açúcar. Novas (2008) também utilizou o SEBAL e dados do sensor TM/ LANDSAT 5 para mapear as componentes do balanço de radiação à superfície e índices de vegetação para a bacia do rio Pratagy, em Alagoas.

Wang & Liang (2009) desenvolveram novos modelos lineares e não lineares utilizando um método híbrido para obter a radiação de onda longa incidente instantânea, em dias de céu claro, a partir da TOA MODIS com 1 km de resolução espacial.

Na região semiárida do Brasil, o estudo de Ataíde (2006) objetivou a determinação do saldo de radiação, da radiação global em superfície no instante da passagem do satélite e também analisou a distribuição temporal e espacial sobre grandes áreas heterogêneas em dias de céu claro. Enquanto que Araújo (2010) calibrou o maior número de equações possíveis para melhorar a precisão das estimativas de diferentes componentes do balanço de radiação à superfície para a mesma região brasileira.

Bisht e Bras (2010) ampliaram a metodologia proposta por Bisht et al. (2005) com a finalidade de estimar os componentes do balanço de energia à superfície utilizando o produto de nuvem MODIS (MOD06_L2) sob condições de céu nublado.

Santos et al. (2011) desenvolveram uma equação, a partir de dados observados em área experimental com pomar de bananeiras, para região semiárida do Nordeste do Brasil e avaliaram diversos modelos utilizados no cômputo da radiação de onda longa incidente para condições de céu claro. A equação encontrada pelos autores apresentou os melhores resultados tanto para as comparações durante o dia quanto para as noturnas, com a raiz quadrática do erro médio igual a $4,7 \text{ W m}^{-2}$ e $5,4 \text{ W m}^{-2}$ para o período diurno e noturno, respectivamente. Eles ainda afirmam que essas parametrizações que utilizam a pressão de vapor e a temperatura do ar para obter a emissividade atmosférica apresentam melhores resultados durante o dia.

2.2.3. Índice de vegetação da diferença normalizada

A vegetação é um indicador sensível das propriedades do ecossistema que influenciam no balanço de energia, no clima, na hidrologia e nos ciclos biogeoquímicos (Huete et al., 1994). Nas últimas décadas do século passado, técnicas de sensoriamento remoto e algoritmos de processamento de imagens foram desenvolvidos para caracterizar o dossel de extensas áreas vegetadas, a partir de diversos índices de vegetação (IV).

O monitoramento operacional da cobertura vegetal da Terra envolve a utilização de índices espectrais de vegetação, os quais possuem uma relação com a quantidade e o vigor da vegetação de uma dada área da superfície terrestre (Huete et al., 1997; Rizzi, 2004). Os IVs são escalas radiométricas adimensionais, geralmente envolvendo uma razão e/ou combinação linear das porções no vermelho e infravermelho próximo do espectro. Eles podem ser computados a partir de radiâncias/ refletâncias ou usando albedos espectrais hemisféricos (Huete et al., 1994).

Os agrupamentos de bandas utilizados para o cômputo dos IVs são diversificados e os que mais se destacam são as razões, normalizações, distâncias no espaço cartesiano e suas variantes. Em geral, esses índices realçam o componente espectral da vegetação e correlacionam-se com os parâmetros biofísicos da mesma, como biomassa, IAF, percentagem de cobertura vegetal (Epiphanio et al., 1996).

Os índices de vegetação (Huete et al., 2002) são destinados a indicar as propriedades da vegetação e permitir comparações espaciais e temporais confiáveis da atividade fotossintética terrestre e variações na estrutura da copa, além de permitir o monitoramento das variações sazonais, inter-anuais fenológica e parâmetros biofísicos da vegetação a longo prazo. A base da proposição desses índices está no comportamento antagônico da refletância da vegetação nas regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo. A princípio, quanto maior a densidade da cobertura vegetal em certa área, menor a refletância na faixa do visível (de 0,4 a 0,7 μm), devido à absorção da radiação solar pela ação dos pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas. Para a faixa do infravermelho próximo (0,725 a 1,10 μm), a refletância é maior devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética nas diferentes camadas das folhas (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).

Ainda de acordo com Ponzoni & Shimabukuro (2010) inclui-se a região específica do vermelho em substituição à do visível, porque existe uma menor influência dos efeitos da atmosfera e da maior absorção da radiação eletromagnética pela ação da clorofila que se verifica nessa faixa espectral em relação às demais referentes à região do visível.

Huete et al.(1994) definem alguns critérios para validar um índice de vegetação: a) ele deve aumentar a sensibilidade aos parâmetros biofísicos da planta, de preferência com uma resposta linear; b) ele deve normalizar os efeitos externos (ângulo solar, ângulo de visão, nuvens e atmosfera); c) ele deve minimizar a contaminação da terra causada por variações no fundo do dossel; d) o índice deve ser um produto global, permitindo comparações espacial e temporal das condições da vegetação; e) ele deve ser acoplado a um parâmetro biofísico, por exemplo IAF, como parte da validação e do controle de qualidade.

Segundo Rosendo & Rosa (2009), a refletância espectral da cobertura vegetal tem sido transformada em vários índices de vegetação com o intuito de minimizar a variabilidade causada por fatores externos, tais como fonte de radiação, espalhamento atmosférico, características da folha e do dossel, teor de umidade, a interferência da refletância do solo, sombra, entre outros.

Um dos índices mais utilizados é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Index Normalized Difference Vegetation* – NDVI) (Rouse et al., 1973) dado pela seguinte proporção:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (4)$$

em que ρ_{IVP} e ρ_V são as refletâncias nas bandas infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

Os valores do NDVI variam entre -1 e 1, sendo que as áreas com cobertura vegetal estão associadas aos valores positivos do NDVI. Materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve) apresentam NDVI negativo. Solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo quase na mesma intensidade, por conseguinte, seu NDVI aproxima-se de zero (Rizzi, 2004).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área geográfica do estudo

O estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil, estende-se por 148.825,602 km² e é limitado ao norte pelo Oceano Atlântico, ao sul pelo estado de Pernambuco, leste pelos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba e oeste pelo Piauí. Ele detém aproximadamente 93% do seu território inserido na região do semiárido nordestino, tornando-se vulnerável ao fenômeno da seca – irregularidade e escassez de chuvas (Araújo, 2010).

A região de estudo está situada no leste desse estado nas proximidades do município de Quixeré (Figura 3), localizado a 212,1 km da capital Fortaleza. A cidade apresenta clima tropical quente e semiárido e é classificada, por Köppen, como BSw'h'. Dados fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) indicam temperatura média anual de 28,5°C, sendo as médias de temperatura do ar mínima e máxima de 22,5°C e 35,3°C, respectivamente. A média pluviométrica anual da área de estudo é de 772 mm, cuja estação chuvosa vai de fevereiro a junho.

A área selecionada corresponde a Fazenda Frutacor e inclui ainda parte do Distrito Irrigado Jaguarí-Apodi (DIJA). A cobertura vegetal da região é bastante heterogênea formada por fazendas de agriculturas irrigadas (melão, banana e mamão) e áreas de vegetação nativa (caatinga, representada por espécies como algaroba, mulungu, aroeira, pau branco, juazeiro, sabiá, marmeleiro e pedreiro). Os solos encontrados são os aluviais, Cambissolo e Vertissolo, cujo relevo dominante é o planalto sedimentar da Chapada do Apodi, com altitudes que não ultrapassam 250 m, além de apresentar planícies fluviais e depressões sertanejas (FUNCEME).

Na fazenda há aproximadamente 250 ha de cultivo de bananeiras, principalmente das espécies Pacovan Apodi (*Musa sp.*, AAB) e a Pacovan (*Musa so.*, AAAB). Para o estudo foi utilizada uma área composta de 3,0 ha contendo a cultivar Pacovan Apodi, cujo porte é de 6 a 7 m, espaçada em fileiras duplas. O método de irrigação utilizado foi por gotejamento, com três gotejadores por planta, cuja vazão era de 3,5 L/h.

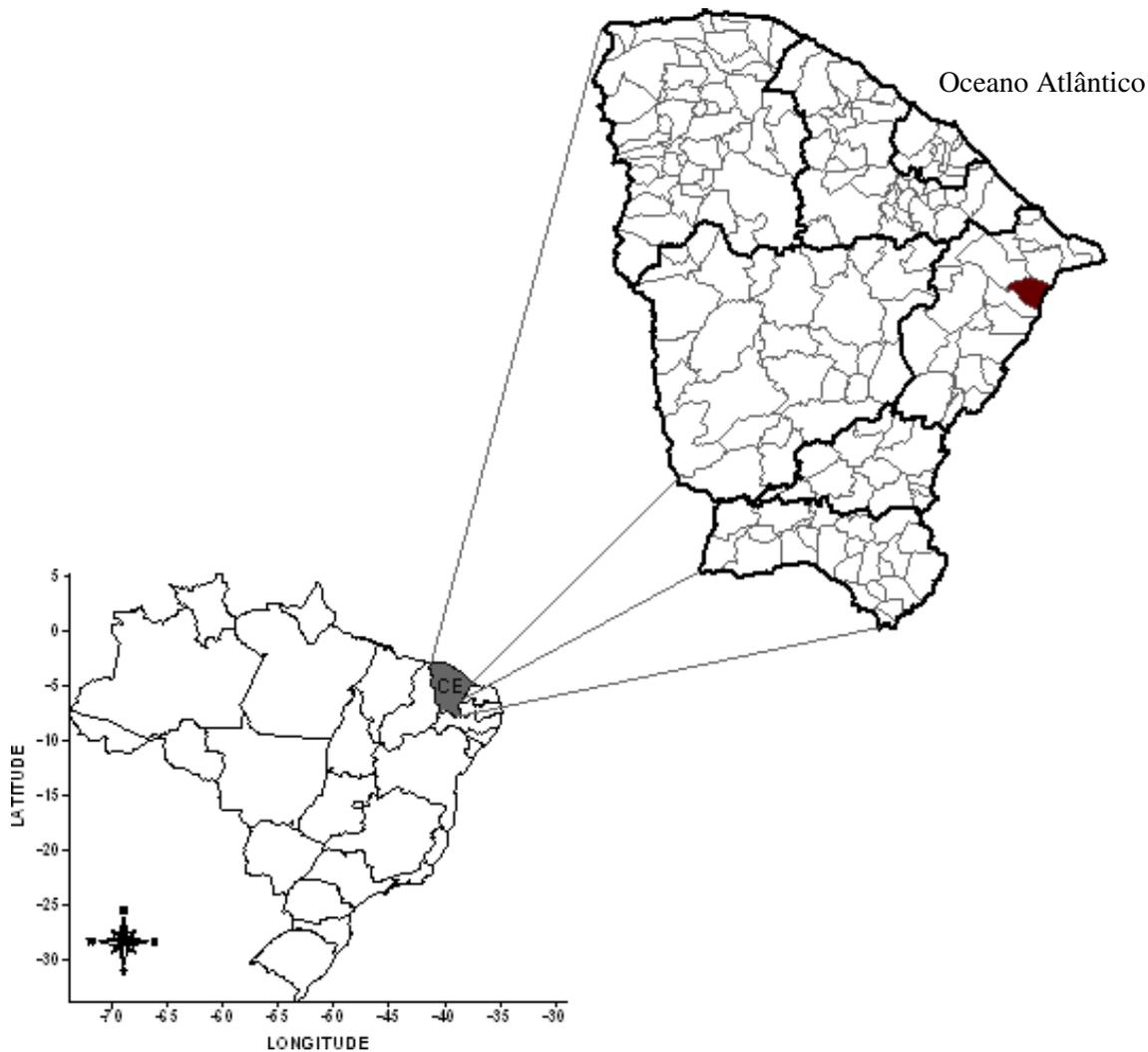


Figura 3 – Localização do município de Quixeré no Estado do Ceará.

3.2. Experimento de Campo

Os dados foram adquiridos através do Projeto Mapeamento da Evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto (Número: 142602/2004-3; Chamada/Edital: CT-HIDRO (GM/GD) – Bolsas de Mestrado e Doutorado – CT-HIDRO (03/2007)), coordenado pelo Dr. Bernardo Barbosa da Silva e tendo como bolsista o Dr. Saulo Tasso Araújo da Silva.

O experimento foi montado na fazenda Frutacor ($5^{\circ}04'35,34''$ S; $37^{\circ}51'54,18''$ W; 135 m) através de instrumentos instalados a 8 metros de altura em torre micrometeorológica no centro da área.

Para medir os componentes do saldo de radiação (R_n) foi empregado o saldo radiômetro CNR1 (Kipp & Zonen B. V., Delft, Holanda), enquanto que a temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas através do sensor (Vaisala, HMP45C). O cômputo do R_n foi obtido pela expressão:

$$R_n = S_{solar} - S_{ref} + L_{atm} - L_{sup} \quad (5)$$

onde S_{solar} é o fluxo de radiação solar incidente, S_{ref} é o fluxo de radiação refletida, L_{atm} é o fluxo de radiação de onda longa emitida pela atmosfera e L_{sup} é o fluxo de radiação de onda longa emitida pela superfície (Tanaka et al., 2008).

A medição do fluxo de calor no solo (G) foi obtida a partir de duas placas modelo HFP01SC (Hukseflux – Delft, Holanda), com frequência de 0,2 Hz, alojadas a 0,02 m de profundidade, dos quais foi extraída a média dos seus valores. Um analisador de CO_2/H_2O Li-7500 (LI-COR, Lincoln, EUA) para obtenção dos dados de concentração de vapor d'água e de gás carbônico e um anemômetro sônico 3D CSAT3 (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA), posicionado na direção predominante do vento (sudeste), foram empregados para medir as componentes da velocidade do vento nas três direções (u_x, u_y, u_z) e a temperatura sônica. Para a medição dos demais parâmetros meteorológicos a altura de 3 m da superfície foi instalada uma estação automática modelo ET106 (Campbell Scientific, Logan, EUA).

O armazenamento dos dados foi feito por meio de um sistema de aquisição de dados (Datalogger) CR23X (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA), programado para coletar os dados a uma frequência de 10 Hz e armazenar as médias e covariâncias inicialmente a cada 10 min, posteriormente no intervalo de 20 min e por fim, 30 min.

Na Figura 4 está representada a disposição dos instrumentos utilizados no campo experimental na Fazenda Frutacor – Quixeré – CE. Com estas medições calcularam-se o saldo de radiação instantâneo e diário para validar os dados obtidos por meio do sensor MODIS Terra e Aqua.

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



Figura 4 – Instrumentos do experimento instalado na Fazenda Frutacor, Quixeré (CE): (a) anemômetro sônico 3D CSAT3; (b) saldo radiômetro CNR1; (c) analisador de H₂O/CO₂ LI-7500; (d) sensor HPM45C; (e) torre micrometeorológica no interior do bananal e (f) estação automática ET106 (Fonte: Silva, 2009).

3.3. Obtenção e tratamento das imagens de satélite

Os produtos MODIS são obtidos gratuitamente da NASA através do site *Wist Echo* (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>). Eles são adquiridos no formato HDF (*Hierarchical Data Format*) e são transformados no formato “.img” através de softwares de processamento digital de imagens.

Esses produtos encontram-se arranjados em mosaicos denominados “*tiles*”. O estado do Ceará encontra-se entre os *tiles* v9 e h13_14, porém a área de estudo está inserida apenas no tile v9_h14, em destaque na Figura 5. Todos os produtos são calibrados e corrigidos atmosféricamente antes de serem cedidos aos centros de distribuição.

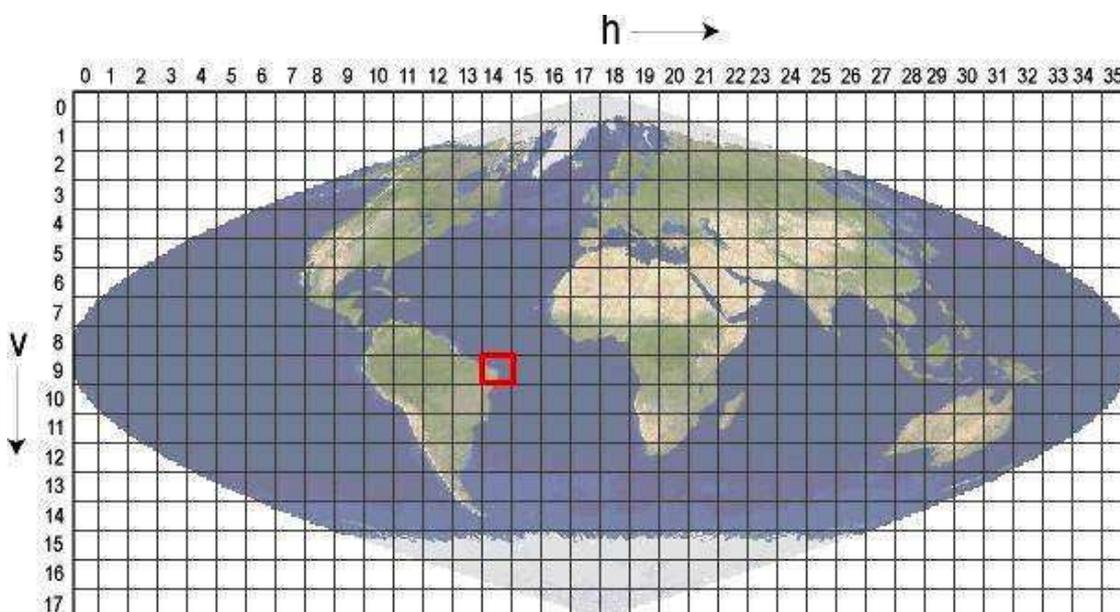


Figura 5 – Tiles do sensor MODIS, com destaque para o *tile* em que se encontra a área de estudo. Fonte: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview (2011).

Os dados utilizados na pesquisa encontram-se descritos no Quadro 2, com os respectivos fatores de correção que são aplicados para converter os dados. Os produtos dos dois satélites apresentam as mesmas características, o que os difere é a denominação MOD para o satélite Terra e MYD para o satélite Aqua.

Quadro 2 – Descrição dos produtos MODIS utilizados.

Produto	Descrição	Fator multiplicativo	Fator adicional	Resolução (espacial e temporal)	Unidades
MOD11A1 MYD11A1	Temperatura da superfície	0,02	-	1000 m diária	Kelvin
	Emissividade das bandas 31 e 32	0,002	0,490		Adimensional
	Hora da passagem do satélite	0,1			Hora
MOD09GA MYD09GA	Refletância da superfície	0,0001	-	500 m diária	Adimensional
	Ângulo zenital solar	0,01	-	1000 m diária	Grau
MOD09GQ MYD09GQ	Refletância da superfície	0,0001	-	250 m diária	Adimensional

Fonte: <http://modis.gsfc.nasa.gov/> (2011).

Somente foram empregados os produtos de temperatura e emissividade do MODIS, para dias de céu claro porque os sinais termais infravermelho só devem ser usados para calcular a temperatura da superfície sobre estas condições, ou seja, céu claro (Nagler et al., 2005).

Os dias selecionados para o estudo estão discriminados no Quadro 3. Na Figura 6 encontra-se a imagem do satélite Aqua para o dia 30 de outubro de 2005 com destaque para a fazenda Frutacor – a área de estudo está marcada no retângulo entre as latitudes (4° 59' 60, 00" S e 5° 19' 22, 50" S) e longitudes (38° 15' 51, 69" W e 37° 45' 44, 81" W; 38° 17' 01, 83" W e 37° 47' 01, 57" W), correspondendo a uma área de 2142,7 km².

Quadro 3 – Dias selecionados para o estudo, onde DSA é o Dia Sequencial do Ano.

Ano 2005			
Satélite Terra		Satélite Aqua	
DSA	Data	DSA	Data
245	02/setembro	248	05/setembro
248	05/setembro	253	10/setembro
255	12/setembro	255	12/setembro
261	18/setembro	257	14/setembro
273	30/setembro	259	16/setembro
275	02/outubro	264	21/setembro
276	03/outubro	275	02/outubro
283	10/outubro	276	03/outubro
286	13/outubro	283	10/outubro
289	16/outubro	288	15/outubro
293	20/outubro	297	24/outubro
296	23/outubro	298	25/outubro
298	25/outubro	303	30/outubro
299	26/outubro		
300	27/outubro		
303	30/outubro		
305	01/novembro		
307	03/novembro		
311	07/novembro		
312	08/novembro		
321	17/novembro		
344	10/dezembro		

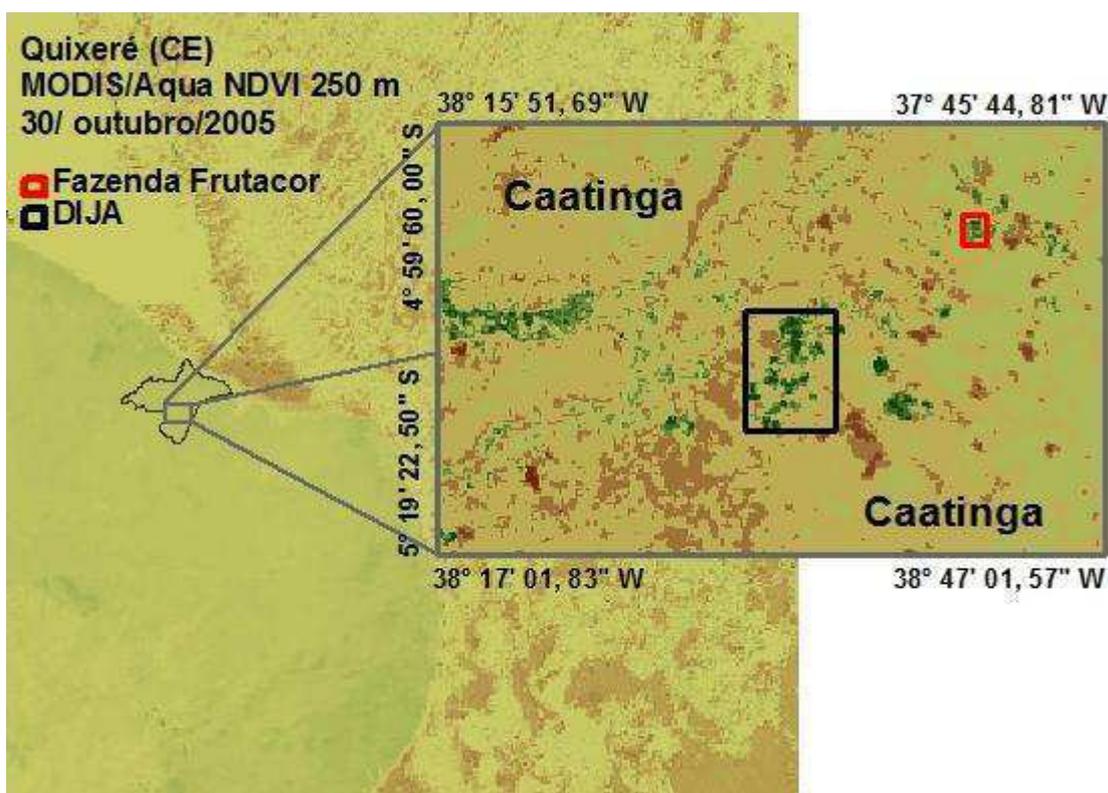


Figura 6 – Imagem do sensor MODIS/ Aqua para o dia 30 de outubro de 2005, com destaque para a bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, o recorte da área de estudo e a localização da Fazenda Frutacor e do DIJA.

3.4. Metodologia empregada

Os dados remotos utilizados neste estudo são composições temporais diárias obtidas do sensor MODIS /Terra e Aqua para uma área localizada na Fazenda Frutacor nas proximidades de Quixeré – CE. Calculou-se o albedo através da metodologia proposta por Tasumi et al. (2008) e posteriormente estimou-se as radiações de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) e de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$) através da metodologia de Zillman (1972) e Santos et al. (2011), respectivamente. Na sequência, computou-se o saldo de radiação instantâneo (R_n) e o diário ($R_{n,24h}$). E, finalmente os dados estimados foram comparados com o R_n e $R_{n,24h}$ obtidos a partir da estação meteorológica instalada no campo experimental na Fazenda Frutacor, objetivando fazer a validação dos mesmos.

A Figura 7 representa o esquema de todo procedimento empregado para estimar o R_n e o $R_{n,24h}$ a partir das imagens MODIS/Terra e Aqua. Posteriormente, os resultados

estimados foram comparados com medidas em solo utilizando as estatísticas apresentadas na seção 3.5.

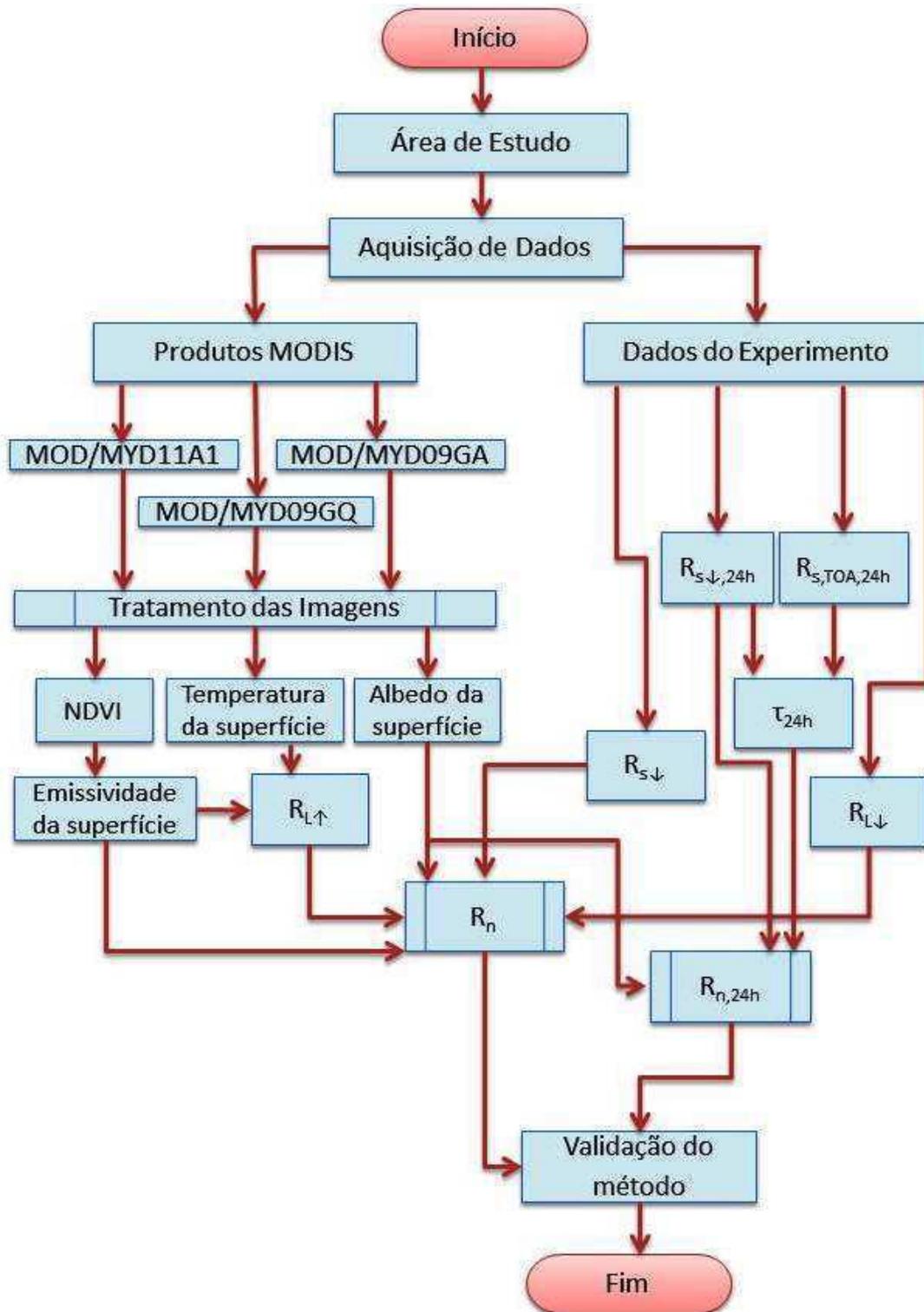


Figura 7 – Etapas do processamento da imagem para obtenção do saldo de radiação instantâneo (R_n) e o diário ($R_{n,24h}$).

3.4.1. Albedo da superfície

O albedo da superfície (α) foi obtido por meio do produto de refletância (MOD/MYD09GA) para o período de estudo, através da equação:

$$\alpha_T = 0,215 r_1 + 0,215 r_2 + 0,242 r_3 + 0,129 r_4 + 0,101 r_5 + 0,062 r_6 + 0,036 r_7 \quad (6)$$

em que α_T é o albedo estimado através da combinação linear proposta por Tasumi et al. (2008) e r_1, r_2, \dots, r_7 são as refletâncias da banda 1, 2, ..., 7.

3.4.2. Radiação de onda curta incidente

O esquema de parametrização desenvolvida por Zillman (1972) para estimar radiação de onda curta ($R_{s\downarrow}$) utiliza como variáveis de entrada o ângulo zenital solar, θ_z [rad], e a pressão de vapor, e_0 [hPa]:

$$R_{s\downarrow} = \frac{S_0 \cos^2(\theta_z)}{1,085 \cos(\theta_z) + e_0(2,7 + \cos(\theta_z)) \cdot 10^{-3} + \beta} \quad (7)$$

em que S_0 é a constante solar no topo da atmosfera (1367 W m^{-2}) e β é 0,1.

Alguns autores (Niemelä et al., 2001; Bisht et al., 2005) mostraram que o modelo de Zillman (1972) tende a superestimar a $R_{s\downarrow}$. Portanto, eles propõem o valor de β igual a 0,2, o qual foi utilizado nesse estudo.

3.4.3. Radiação atmosférica

A radiação atmosférica ou radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$) é usada como variável de entrada nesse modelo e foi calculada por meio da equação de Stefan-Boltzmann, com parametrização da emissividade proposta por Santos et al. (2011):

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (8)$$

onde,

$$\varepsilon_a = 0,6905 \cdot \left(\frac{e_0}{T_a}\right)^{0,0881} \quad (9)$$

em que e_0 é a pressão de vapor [Pa] e T_a é a temperatura do ar medida na estação [K] e ε_a é a emissividade atmosférica.

3.4.4. Saldo de radiação instantâneo

O saldo de radiação (R_n) foi calculado com base na equação (10):

$$R_n = R_{s\downarrow}(1 - \alpha) - \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} \quad (10)$$

em que todos os termos já foram definidos anteriormente.

A emissividade da superfície (ε_0) foi computada, para cada pixel, em função do NDVI a partir da expressão (Van Der Griend & Owe, 1993):

$$\varepsilon_0 = 1,004 + 0,059 \ln(NDVI) \quad (11)$$

3.4.5. Saldo de radiação diário

De acordo com De Bruin (1987) e De Bruin & Stricker (2000) o saldo de radiação diário ($R_{n,24h}$) pode ser calculado por:

$$R_{n,24h} = (1 - \alpha)R_{s\downarrow 24h} - a\tau_{24h} \quad (12)$$

em que α é o albedo, $R_{s\downarrow 24h}$ é a radiação solar média incidente diária [$W m^{-2}$], a é coeficiente de regressão da relação entre o saldo de radiação de onda longa e a transmissividade atmosférica em escala diária e τ_{24h} é a transmitância atmosférica média diária.

Teixeira et al (2009) calibraram esse modelo para condições verificadas no semiárido brasileiro e encontraram o valor de a igual a 123, o qual foi utilizado neste estudo. A τ_{24h} foi obtida por:

$$\tau_{24h} = \frac{R_{s\downarrow 24h}}{R_{s,TOA,24h}} \quad (13)$$

em que $R_{s\downarrow 24h}$ é a radiação solar diária incidente à superfície [MJ m^{-2}], obtida através da estação meteorológica e $R_{s,TOA,24h}$ é a radiação solar diária incidente no topo da atmosfera [MJ m^{-2}], calculada a partir da equação descrita por Iqbal (1983):

$$R_{s,TOA,24h} = S_0 E_0 (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (14)$$

em que S_0 é a constante solar, E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, δ é a declinação do sol, ϕ é a latitude e ω é o ângulo horário.

3.5. Análise estatística dos resultados

Para encontrar a relação existente entre os parâmetros estudados, a partir dos seus valores de R_n medidos no experimento e os estimados através do sensor MODIS foram utilizados o Erro Médio Percentual (EMP), Erro Médio Absoluto (EMA), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA) e o Erro Percentual (EP), dados pelas expressões abaixo (Wilks, 2006):

$$EMP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x'_i - x_i}{x_i} \right| \quad (15)$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x'_i - x_i| \quad (16)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2}{N}} \quad (17)$$

$$EA = |x_i - x'_i| \quad (18)$$

$$EP = \frac{EA}{x_i} \cdot 100 \quad (19)$$

onde x_i é o valor observado, x'_i é o valor estimado e N é o número de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussão dos componentes do saldo de radiação e NDVI obtidos do sensor MODIS/Terra e Aqua para 35 imagens. A análise espacial das variáveis foi realizada para quatro dias do satélite Terra, os quais apresentaram maiores diferenças. Em seguida, os valores estimados – obtidos no pixel das coordenadas da torre – são comparados com os medidos na Torre Micrometeorologica (Figura 4) instalada na Fazenda Frutacor Quixeré- Ceará, a fim de validar a metodologia.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas algumas informações empregadas no cômputo das componentes do saldo de radiação para os satélites Aqua e Terra, respectivamente. A hora é referente à hora local e foi obtida dos produtos MOD/MYD11A1 e o ângulo zenital solar (Z) foi adquirido por meio dos produtos MOD/MYD09GA, enquanto os demais parâmetros foram conseguidos através do experimento realizado na Fazenda Frutacor (Quixeré – CE).

Tabela 1 – Variáveis empregadas no cômputo das componentes do balanço de radiação na Fazenda Frutacor para o satélite Aqua.

DSA	Hora (h)	Z (°)	Ta (°C)	UR (%)	P (kPa)
248	12,90	23,99	34,1	31,47	96,3
253	13,17	27,77	32,7	31,99	96,5
255	12,96	24,79	33,1	30,01	96,5
257	12,74	19,99	33,5	30,75	96,5
259	12,53	16,99	33,4	27,84	96,6
264	12,80	21,57	32,5	38	96,2
275	12,44	17,76	34,7	27,9	96,2
276	13,13	29,35	34,3	31,4	96,2
283	13,20	30,82	35,2	28,86	96,2
288	13,48	36,25	34,1	27,99	96,3
297	13,36	35,48	34,8	29,31	96,2
298	12,46	22,82	33,9	31,42	96,3
303	12,76	27,28	34,1	36,61	96,4

Tabela 2 – Variáveis empregadas no cômputo das componentes do balanço de radiação na Fazenda Frutacor para o satélite Terra.

DSA	Hora (h)	Z (°)	Ta (°C)	UR (%)	P (kPa)
245	9,52	32,33	30,2	41,28	96,6
248	10,00	24,76	30,5	44,39	96,8
255	10,06	21,71	29,3	44,07	96,9
261	9,42	29,13	29,8	46,4	96,8
273	9,75	21,23	31,7	43,4	96,6
275	9,54	24,03	29,9	42,08	96,7
276	10,23	13,29	30,2	44,13	96,6
283	10,30	13,38	30,7	37,5	96,6
286	9,19	27,82	29,5	46,69	96,7
289	9,68	20,28	30,4	42,87	96,6
293	9,27	28,39	29,5	45,01	96,8
296	9,76	19,12	30,6	39,49	96,7
298	9,56	24,54	30,3	42,37	96,6
299	10,26	15,71	31,7	42,13	96,6
300	9,36	25,13	29,3	48,02	96,8
303	9,86	18,47	31,1	50,05	96,7
305	9,66	24,11	29,3	50,41	96,9
307	9,46	24,38	29,3	50,63	96,8
311	9,07	30,32	29,1	49,03	96,6
312	9,77	24,04	30,8	44,1	96,5
321	9,70	31,1	31,5	41,4	96,3
344	9,93	26,54	31,1	44,4	96,4

4.1. Mapas temáticos do albedo

Os mapas do albedo da superfície (α) estão representados na Figura 8. Percebe-se que para os dias 05 de setembro (Figura 8a), 10 de outubro (Figura 8b) e 26 de outubro (Figura 8c) apresentam praticamente a mesma distribuição espacial, com valores que variaram de 10% a 25% (tons de azul). Em meados de novembro (Figura 8d) os valores aumentaram em toda a cena, predominando albedos entre 20 e 25% (azul escuro e claro). Em termos médios no mês de outubro o albedo foi 25% e em novembro de 22%, respectivamente. Em

geral, nas áreas irrigadas são encontrados os menores valores de albedo, quando comparadas com a vegetação nativa. Porém, no mês de novembro esse padrão é um pouco diferenciado quando se trata do DIJA (demarcado pelo retângulo maior) observando-se valores que chegam aos 30%, evidenciando uma redução na densidade vegetal. Os valores obtidos neste estudo estão em concordância com aqueles encontrados por Bezerra (2006), Leivas et al. (2007), Novas (2008), Andrade (2008), Oliveira & Galvêncio (2009), Cunha (2011).

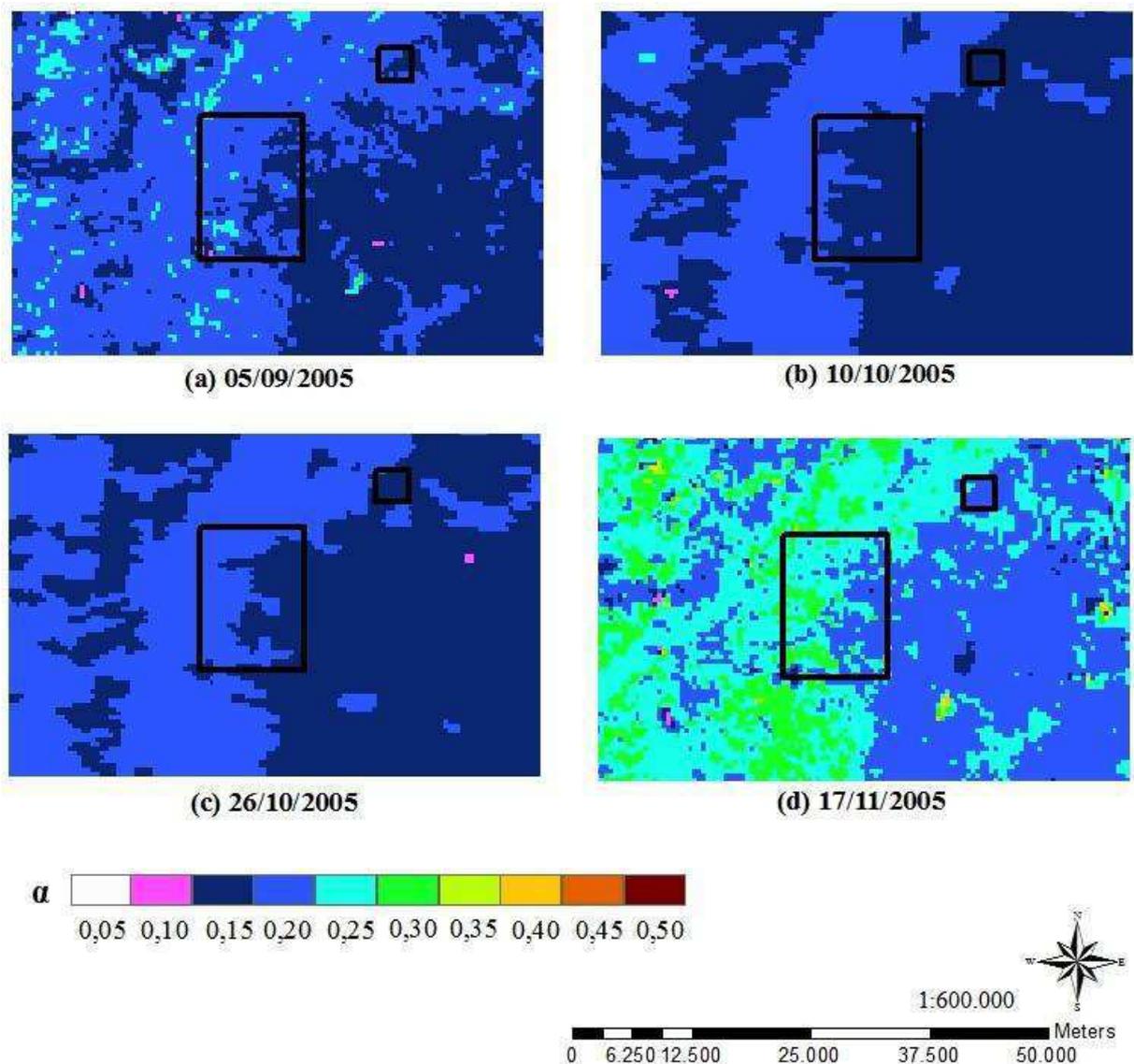


Figura 8 – Distribuição espacial do albedo (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.

Nas Tabelas 3 e 4 constam os erros relativo e médio entre os valores medidos e estimados do albedo na Fazenda Frutacor sobre a plantação de bananeiras. Nota-se que a tendência da metodologia usada é superestimar os valores obtidos pelo satélite Aqua, ou seja,

dos treze dias estimados, cinco deles foram subestimaram. Comportamento idêntico foi observado para o satélite Terra, embora o erro médio tenha sido bem menor (Tabela 4). Em termos médios, o satélite Aqua apresentou um erro médio de 25,25% contra 16,05% do Terra.

Araújo (2010) utilizando o sensor TM/ Landsat 5 encontrou, para a mesma localidade deste estudo, erros médios percentuais de 17,27%, 40,76% e 6,71%, usando os métodos do METRIC, SEBAL e o coeficiente calibrado pelo autor, respectivamente. Já Gomes (2009) utilizando imagens espectrais do TM/ Landsat 5 sobre a bacia do rio Mogi-Guaçu obteve erro médio de 44,23, 9,10 e 26,83%, através dos métodos METRIC, Idaho e Allen, respectivamente. Santos (2011) apresentou um erro médio de 22,35% para a cana-de-açúcar, no município de Santa Rita do Passa Quatro (SP), utilizando o satélite Terra e uma metodologia semelhante do presente estudo.

Tabela 3 – Albedo medido (α) (%), Albedo estimado (α_T) (%), erro relativo percentual e médio para o satélite Aqua.

DSA	α	α_T	EP (%)
248	15,0	15,2	1,01
253	14,5	15,8	8,64
255	14,9	17,7	18,76
257	15,2	14	7,98
259	14,2	13,5	4,63
264	14,9	14,2	4,50
275	14,4	13,9	3,77
276	14,4	25,1	74,00
283	14,4	23,9	65,67
288	15,2	25,8	69,76
297	14,9	23,4	57,11
298	15,5	14,5	6,50
303	15,1	16	5,87
EMP (%)			25,25

Tabela 4 – Albedo medido (α) (%), Albedo estimado (α_T) (%), erro relativo percentual e médio para o satélite Terra.

DSA	α	α_T	EP (%)
245	16,5	19,5	17,83
248	16,0	15	6,26
255	16,4	15,1	8,03
261	16,2	19,7	21,90
273	16,3	15,9	2,22
275	16,3	22,3	37,07
276	15,2	13,9	8,45
283	15,3	13,8	9,62
286	17,1	20,6	20,43
289	16,3	18,2	11,87
293	17,0	20,8	22,21
296	16,3	16,6	1,54
298	16,2	21,6	33,19
299	15,4	14,2	7,79
300	17,0	22	29,17
303	16,1	15,3	4,72
305	18,0	21,1	17,55
307	18,5	28,8	55,95
311	17,5	21,8	24,55
312	16,2	16,2	0,13
321	16,4	18	9,95
344	15,9	16,3	2,65
EMP (%)			16,05

4.2. Mapas temáticos do NDVI

As cenas a seguir mostram variabilidade espacial do NDVI para os dias 05/ setembro, 10 e 26/ outubro e 17/ novembro de 2005, obtidas do sensor MODIS, a bordo do satélite Terra (Figura 9). O recorte da cena estudada constitui uma área bastante heterogênea, formada principalmente pelas fazendas e do DIJA, com áreas de agricultura irrigada, e áreas

de vegetação nativa, conforme é mostrado na Figura 6. As cores em tons de verde (claro, médio e escuro) áreas de cultivo apresentam NDVI mais elevados variando entre 0,45 a 0,90, enquanto que as em tons de marrom correspondem as áreas de vegetação caatinga e solo exposto onde os NDVI são inferiores a 0,45.

De acordo com a literatura uma vegetação verde sadia apresenta um evidente contraste entre a região do visível e do infravermelho próximo, além de absorver menor quantidade da luz verde – quando comparada com a luz azul e a luz vermelha – o que faz com que as folhas verdes sadias pareçam verdes aos nossos olhos e apresentem NDVI elevados. Já a cobertura vegetal com estresse hídrico tende a absorver menos radiação solar, aumentando sua refletância no espectro visível e absorver mais no infravermelho, diminuindo os valores do NDVI (Ponzoni & Shimabukuro, 2010; Jensen, 2011).

Nos mapas da Figura 9, as cores em tons de verde (médio e escuro) representam áreas de cultivo, enquanto que as em tons de marrom estão relacionadas com áreas de menores valores de NDVI, sendo representativas de caatinga e solo exposto.

O mapa temático do dia 05/09/2005 (Figura 9a) apresenta NDVI mais elevado, principalmente nas áreas irrigadas e nordeste da região, variando entre 0,60 - 0,90 (verde oliva e escuro), enquanto que nas demais áreas os índices são, em sua maior parte, inferiores a 0,45. Pouco mais de um mês depois (Figura 9b), observa-se que o NDVI apresentou um decréscimo no DIJA e em praticamente toda a cena. Esse mesmo comportamento é observado ao longo dos outros dois dias analisados.

Em novembro (Figura 9d) a vegetação se encontra mais seca, inclusive nas áreas irrigadas apresentam um decréscimo nos valores em torno de 0,20, especialmente no DIJA, quando comparados aos demais dias analisados. Valores negativos e próximos de zero são observados no sudoeste da área, denotando solos expostos e corpos d'água. O NDVI médio para 10 de outubro e 17 de novembro foi de 0,32 e de 0,38 para o dia 05 de setembro. Os valores máximos da ordem de 0,90 ocorreram em 05 de setembro e de 0,76 em 26 de outubro, já os mínimos de -0,39 e -0,04, observaram-se em 10 e 26 de outubro, respectivamente. O desvio padrão oscilou entre 0,07 – 0,08.

Em síntese observa-se que no início do mês de setembro (Figura 9a) o índice está mais elevado em toda região, e isso pode ser explicado porque mesmo no período de estiagem a vegetação nativa e caatinga ainda não secou totalmente e nas áreas com a irrigação o NDVI continuou mais elevado.

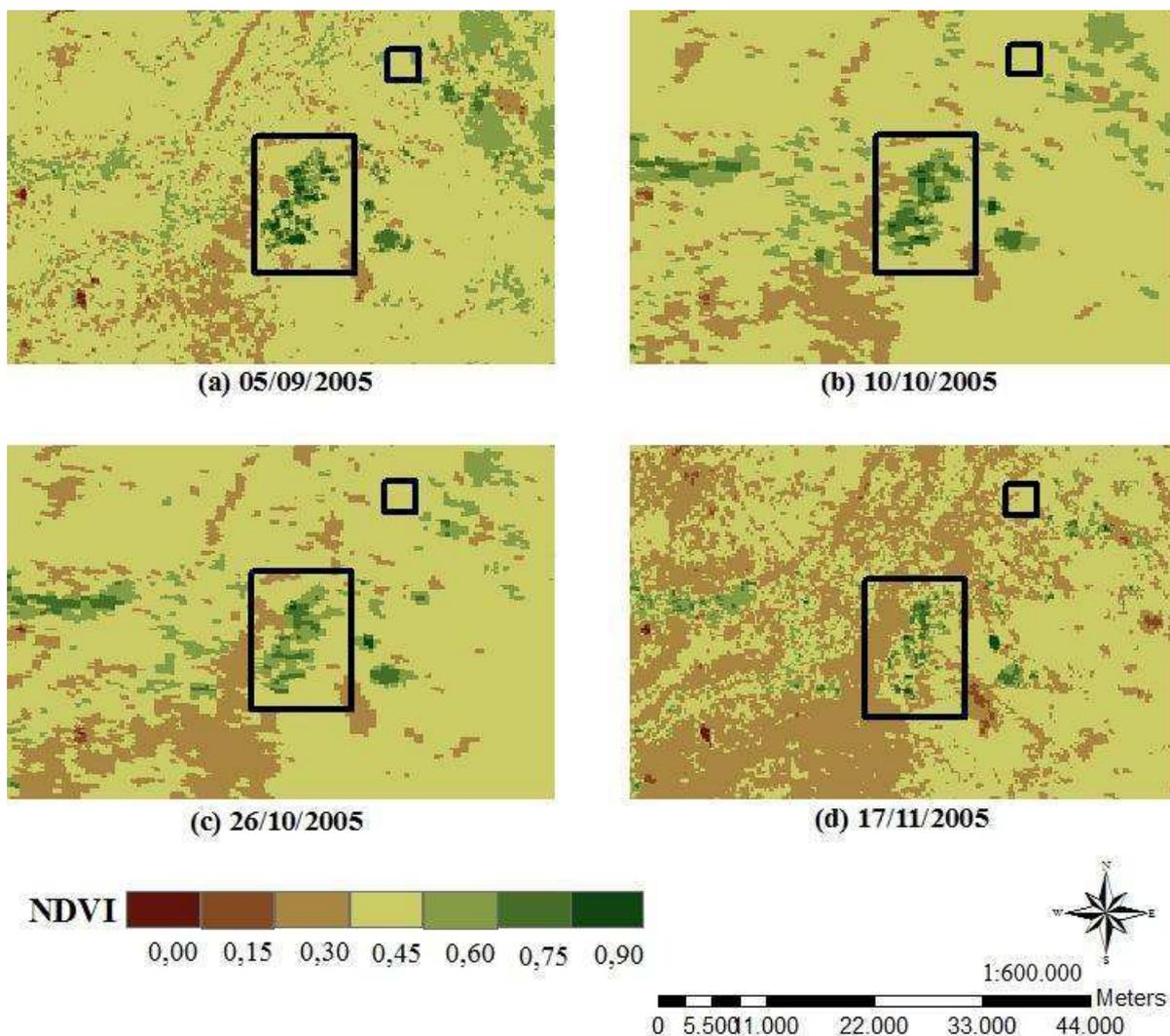


Figura 9 – Distribuição espacial do NDVI (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.

Os resultados encontrados concordam com os obtidos por Cruz et al. (2001) quando estudaram a sub-bacia do rio Japaratuba-Mirim (SE), na qual havia uma predominância de pastagens e culturas agrícolas (62%), além de matas (16%) e solos descobertos (20%). Os autores encontraram valores médios do NDVI de 0,57, com máximos de 0,94 e mínimos de -0,47.

Andrade (2008) estudou a cultura de cana-de-açúcar em Conquista (MG) e obteve com o sensor TM do Landsat 5 valores de -1,0 a 0,87, sendo a média de 0,445. Giongo (2008) encontrou para o município de Santa Rita do Passa Quatro (SP) na área de plantação de cana-de-açúcar o mínimo de -0,97 e o máximo de 0,93, com média entre 0,52 e 0,65, que também corroboram com os resultados encontrados nesta pesquisa.

4.3. Mapas temáticos da temperatura da superfície

Na Figura 10 tem-se a variabilidade espacial da temperatura da superfície (Ts) na área de estudo. Observa-se que a amplitude para o dia 05 de setembro (10a) é de 12 °C, sendo os menores valores (tons de azul) encontrados nas áreas de cultivo e onde a predominância é de vegetação nativa esses valores variam de 43 – 47 °C (azul mais claro e tons de bege). No mês de outubro (10b) nota-se uma diminuição dos valores da Ts em toda a cena, havendo apenas na parte centro-sul valores mais altos (classe 43 – 45 °C). No final do mês de outubro (10c) a parte centro-sul continua com a temperatura bastante elevada e em quase toda a cena houve o aumento dessa variável; e quando comparada com a distribuição do início de setembro (10a) houve um aumento em torno de 2 °C em praticamente toda a cena. Esse aumento estende-se com maior intensidade no mês de novembro (10d), porém nas áreas irrigadas não ocorreu um aumento tão brusco. O aumento gradativo observado ao longo do período estudado é atribuído à estação seca. Comparando esses mapas com o NDVI é possível observar que as áreas mais frias estão relacionadas às áreas com maior cobertura vegetal, especialmente aquelas de cultura irrigada. E os campos mais secos coincidem com cobertura vegetal seca (vegetação nativa) e solo exposto, como era esperado.

Os histogramas de frequência (Figura 11) trazem as médias para os quatro dias analisados, as quais estão representadas por linhas verticais vermelhas. As maiores e menores médias foram verificadas nos dias 10 de outubro e 17 de novembro sendo 41,2 °C e 46,0 °C, respectivamente. Na cena do mês de setembro predomina a classe de 41 a 43 °C (representando 43% dos pixels da área), assim como também para o dia 26 de outubro, na qual representa 39% dos pixels da área. A classe predominante do dia 10 de outubro está entre 41 a 43 °C (33%). Para o dia representante de novembro o maior número de pixels (45%) situa-se entre 45 e 47 °C. Esses padrões evidenciam a sazonalidade da Ts, a qual é influenciada pela radiação solar, a temperatura do ar, a umidade relativa, entre outros.

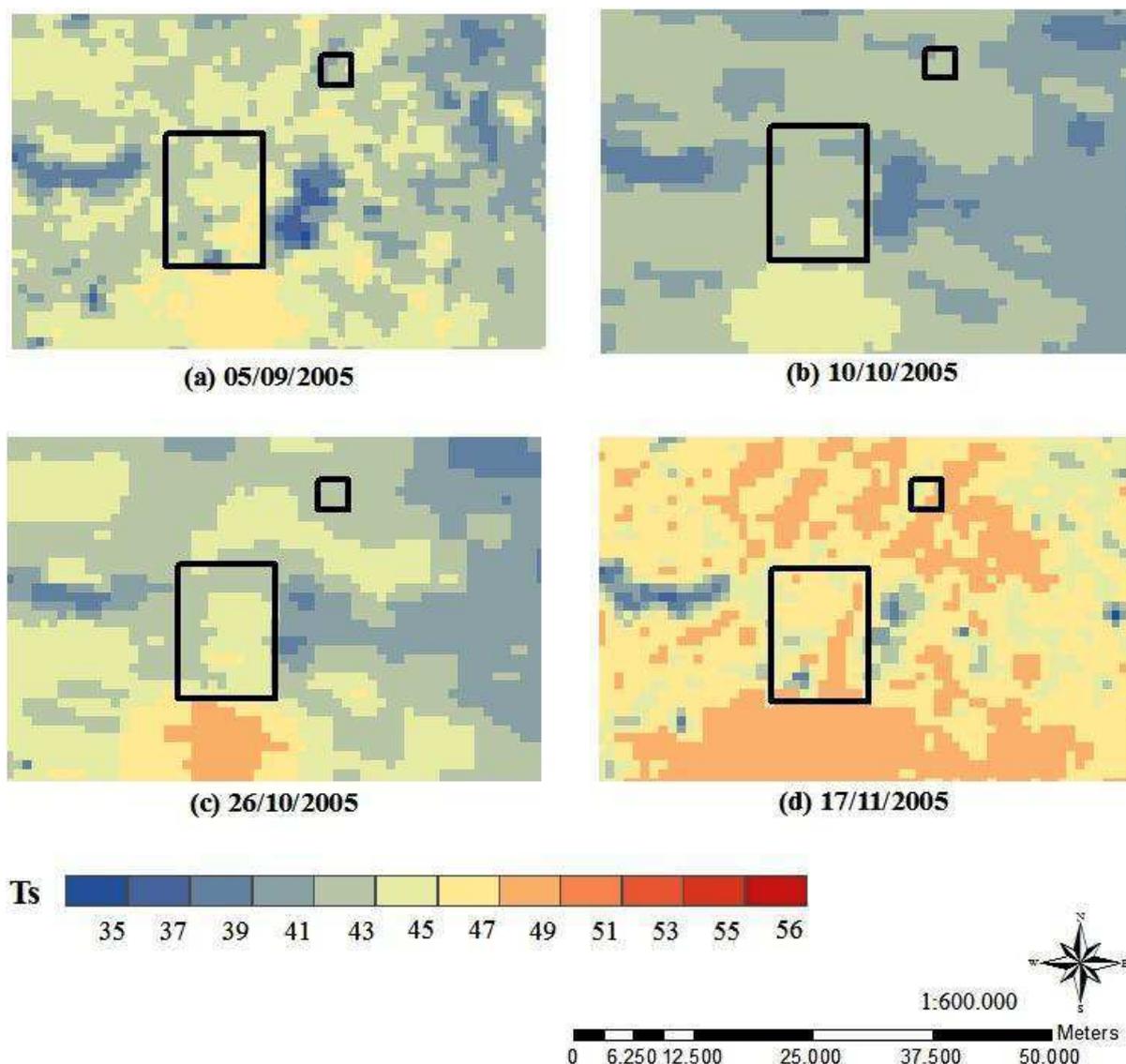


Figura 10 – Distribuição espacial da temperatura da superfície (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.

Ainda se pode comparar a temperatura do ar obtida através dos dados do experimento (Tabelas 1 e 2) e a temperatura da superfície MODIS (T_s) para o pixel em que se encontra a torre instalada, daí obtém-se o coeficiente de correlação para o satélite Aqua (Figura 12) e Terra (Figura 13). Analisando os gráficos verifica-se que os valores da T_s estão bem maiores que os da T_a , sendo a diferença média igual a $10,7\text{ }^\circ\text{C}$ (Aqua) e $11,5\text{ }^\circ\text{C}$ (Terra). Conseqüentemente os coeficientes de correlação encontrados foram baixos: $r = 0,46$ para o satélite Aqua e $r = 0,52$ para o satélite Terra. Esses resultados evidenciam que a temperatura obtida pelo produto MODIS de 1 km é superestimada.

Diferentemente dos resultados encontrados aqui, Kawashima et al. (2000) – em estudos na parte central do Japão – obtiveram altos coeficientes de correlação entre a temperatura do ar e a da superfície obtida do TM/ LANDSAT 5, os quais variaram entre 0,87 e 0,92. Além disso, para os quatro dias estudados as temperaturas da superfície foram menores do que as temperaturas do ar.

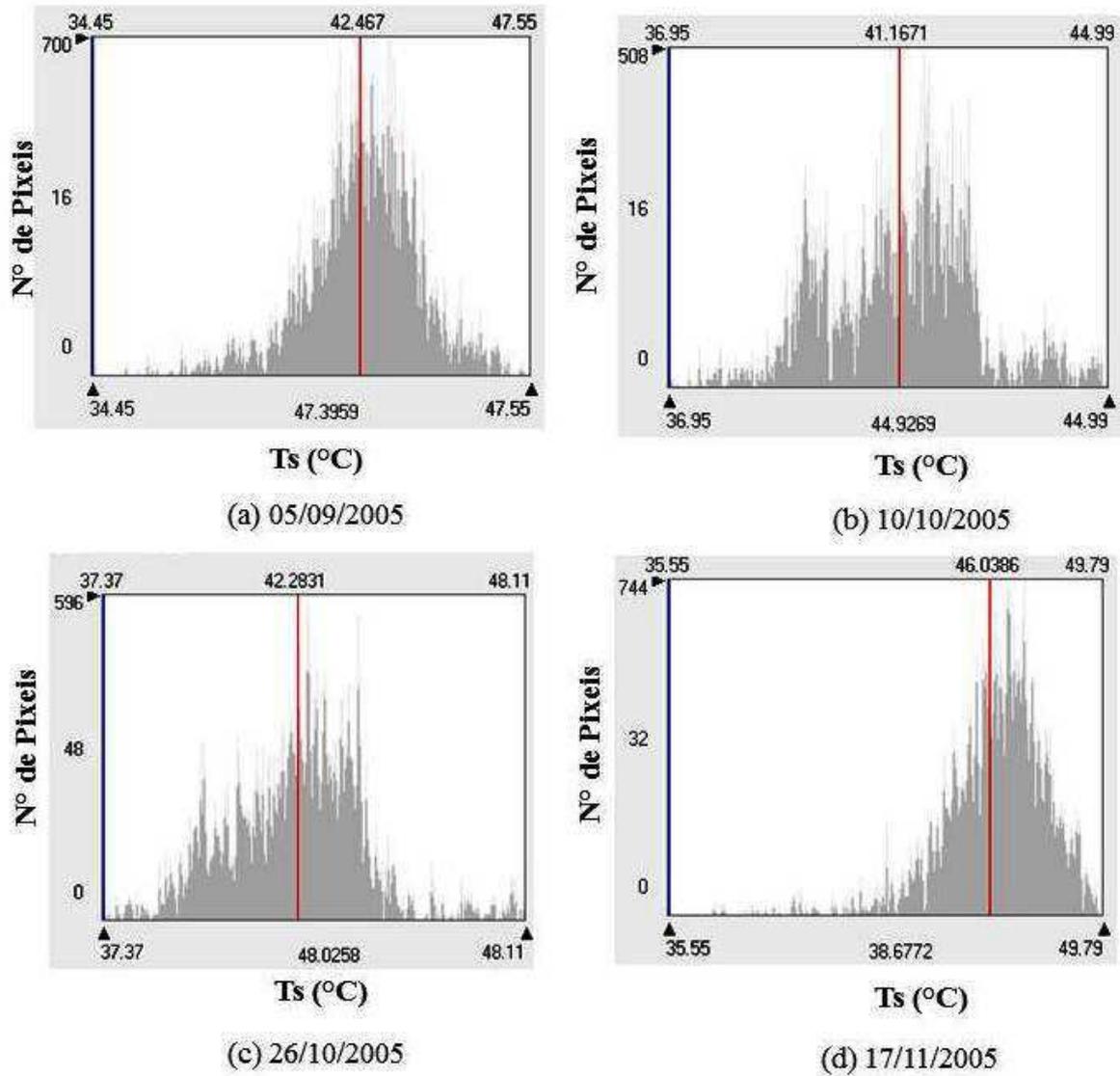


Figura 11 – Histogramas da temperatura da superfície (°C) (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.

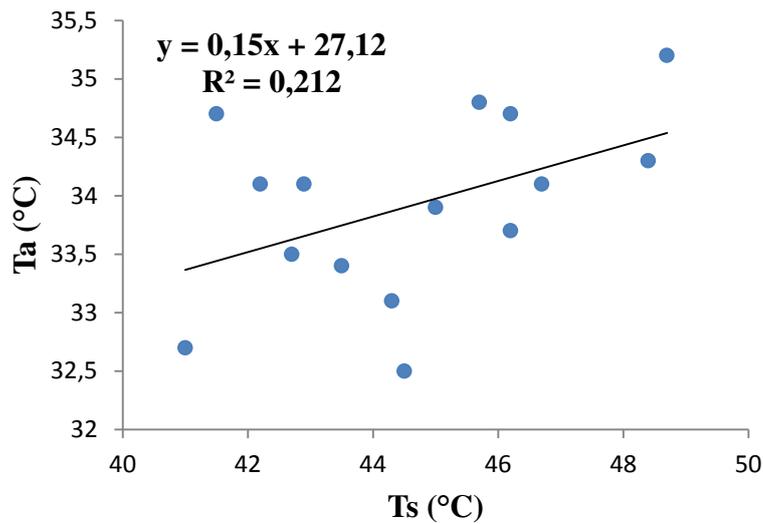


Figura 12 – A relação entre a temperatura do ar (Ta) obtida no experimento de campo e da temperatura de superfície (Ts) derivada da imagem térmica do sensor MODIS para os dias estudados do satélite Aqua.

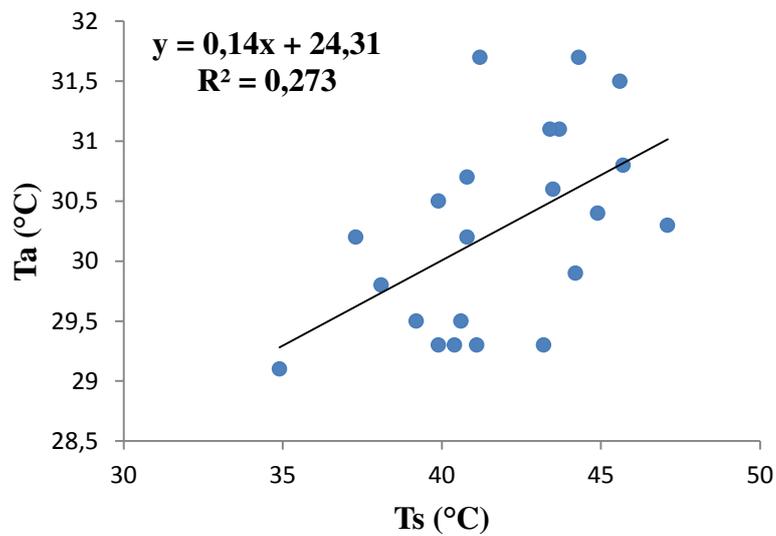


Figura 13 – A relação entre a temperatura do ar (Ta) obtida no experimento de campo e da temperatura de superfície (Ts) derivada da imagem térmica do sensor MODIS para os dias estudados do satélite Terra.

4.4. Radiação de onda curta incidente

Os valores da radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$), medidos e estimados pela metodologia proposta por Zillman (1972), com seus respectivos erros relativos percentuais e médios encontram-se nas Tabelas 5 e 6. Apesar dessa variável não depender dos dados de satélite, ainda serão utilizadas duas Tabelas com os valores correspondentes aos dias estudados para o satélite Aqua e o Terra com o intuito de saber qual o horário que aquela medida foi encontrada e também para não haver confusão com os dias, uma vez que alguns deles foram os mesmos para os dois satélites.

Para o satélite Terra a metodologia empregada apresentou um erro médio um pouco maior que o satélite Aqua. Nos dias 288 (Aqua) e 307 (Terra) os dados observados estão bem menores quando comparados com aqueles registrados nos demais dias, isto pode ser atribuído à passagem de nuvens no momento de verificação desta medida no experimento de campo. Essas duas medidas proporcionaram os maiores erros relativos 31,30% e 87,46% para os satélites Aqua e Terra, respectivamente. Os erros médios obtidos para os dias analisados foram de 8,37 % para o Aqua e 10,52% para o Terra. Ainda analisando as Tabelas 5 e 6 pode-se observar que a metodologia proposta tende a subestimar a $R_{s\downarrow}$ no horário em que foi calculada para os dias estudados do satélite Aqua, enquanto que para os horários em que foi computada para o satélite Terra a tendência foi superestimar.

Outro fator que contribui para as discrepâncias encontradas é a diferença no horário da passagem dos satélites e das medidas obtidas no experimento, as quais foram obtidas em intervalos de 10 minutos. Utilizou-se uma interpolação temporal para minimizar esse problema, mas ainda pode haver interferência nas estimativas.

Bisht et al. (2005) obtiveram um erro de 6% e EMA de 41 W m^{-2} para a $R_{s\downarrow}$, utilizando o satélite Terra, nas Grandes Planícies do Sul, as quais cobrem o estado de Oklahoma e o sul do Kansas, nos Estados Unidos. Liberato & Cardoso (2011) encontraram em dias de céu claro – para a região Amazônica – máximos da radiação de onda curta, na estação seca, para área de pastagem valores de 813 W m^{-2} e para floresta 814 W m^{-2} , enquanto na estação chuvosa os valores encontrados foram de 987 e 903 W m^{-2} , respectivamente. Para os dias de céu nublado, na estação chuvosa, os autores obtiveram máximos de 441 e 658 W m^{-2} para floresta e pastagem, respectivamente. Estes valores corroboram com os encontrados nesta pesquisa para áreas irrigadas no pomar de bananeiras.

Tabela 5 – Radiação de onda curta incidente medida ($R_{s\downarrow}$) ($W m^{-2}$), Radiação de onda curta incidente estimada ($R_{s\downarrow Z}$) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua.

DSA	$R_{s\downarrow}$	$R_{s\downarrow Z}$	EP (%)
248	943,0	910,9	3,40
253	674,5	876,5	29,95
255	932,6	904	3,07
257	806,5	942,1	16,81
259	970,7	961,9	0,91
264	959,7	930,4	3,05
275	990,0	957,1	3,32
276	922,0	860,9	6,63
283	915,0	845,6	7,58
288	596,8	783,6	31,30
297	871,5	792,9	9,02
298	948,5	920,5	2,95
303	953,5	881,3	7,57
EMP (%)			8,37

Na Tabela 7 estão representados os erros absolutos relativos obtidos entre os dados estimados por Zillman (1972) e medidos experimentalmente. Para o satélite Aqua o erro médio absoluto foi de $74,3 W m^{-2}$, sendo o máximo igual a $202,0 W m^{-2}$ e o mínimo de $8,8 W m^{-2}$. Para o satélite Terra a média foi de $73,3 W m^{-2}$, com valor máximo de $423,4 W m^{-2}$ e mínimo $5,4 W m^{-2}$. É importante enfatizar que este máximo encontrado para o satélite Terra é do dia 307, cujo problema foi discutido anteriormente. Já o erro máximo absoluto do outro satélite não foi observado para o dia que tem o mesmo problema, mas este dia apresentou o erro absoluto alto também ($186 W m^{-2}$).

Bisht et al. (2005) encontraram erro da ordem de 6% para esta variável, enquanto Araújo (2010) obteve erros médios percentuais e absolutos para os métodos da FAO de 7,26% e $58,86 W m^{-2}$, respectivamente, para mesma região deste estudo, e ao empregar o METRIC esses erros foram iguais a 4,33% e $34,13 W m^{-2}$.

Para o cerrado, Santos (2011) encontrou erro absoluto médio de 65,06, 41,55 e $30,74 W m^{-2}$ utilizando as metodologias SEBAL, METRIC e Bisht et al. (2005), respectivamente. Para a cana-de-açúcar a autora obteve valores de 80,93, 64,81 e $61,04 W m^{-2}$ para as mesmas metodologias descritas anteriormente. Também foram encontrados, para o

cerrado, os erros relativos médios de 8,78 %, 5,63% e 3,94%, sendo o menor deles da metodologia Bisht e o maior do SEBAL. Para a cana-de-açúcar esse comportamento se repetiu, sendo o erro pelo método Bisht et al. (2005) de 7,60% e o SEBAL de 10,97%. Os valores obtidos nesta pesquisa estão de acordo com aqueles obtidos pela autora, levando-se em consideração que a metodologia proposta por Bisht et al. (2005) só deve ser empregada para dias de céu claro.

Tabela 6 – Radiação de onda curta incidente medida ($R_{s\downarrow}$) ($W\ m^{-2}$), Radiação de onda curta incidente estimada ($R_{s\downarrow Z}$) ($W\ m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra.

DSA	$R_{s\downarrow}$	$R_{s\downarrow Z}$	EP (%)
245	794,0	829,2	4,43
248	838,0	904,2	7,90
255	902,0	929,3	3,03
261	814,0	863,1	6,03
273	837,0	933,0	11,47
275	863,0	910,5	5,50
276	973,5	982,1	0,88
283	959,5	981,6	2,30
286	775,2	876,1	13,02
289	887,0	940,0	5,98
293	822,0	870,5	5,90
296	890,0	948,1	6,53
298	879,0	906,1	3,08
299	950,0	969,4	2,04
300	847,8	901,0	6,28
303	804,0	952,5	18,47
305	761,0	952,5	25,16
307	484,1	907,5	87,46
311	797,0	850,9	6,76
312	905,0	910,4	0,60
321	890,0	842,6	5,33
344	918,2	888,2	3,27
EMP (%)			10,52

Tabela 7 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para a radiação de onda curta incidente dos satélites Aqua e Terra.

Aqua		Terra	
DSA	EA	DSA	EA
248	32,10	245	35,20
253	202,00	248	66,20
255	28,60	255	27,30
257	135,60	261	49,10
259	8,80	273	96,00
264	29,30	275	47,50
275	32,90	276	8,60
276	61,10	283	22,10
283	69,40	286	100,90
288	186,80	289	53,00
297	78,60	293	48,50
298	28,00	296	58,10
303	72,20	298	27,10
		299	19,40
		300	53,20
		303	148,50
		305	191,50
		307	423,40
		311	53,90
		312	5,40
		321	47,40
		344	30,00
EAM	74,26	EAM	73,29

4.5. Radiação de onda longa

A radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$) estimada pela equação proposta por Santos et al. (2011) medida e seus erros relativo e percentuais são mostrados nas Tabelas 8 e 9. Observa-se que os valores modelados superestimaram os medidos em todos os dias estudados, o que resultou em erro médio percentual para o satélite Terra de 8,62% e para o Aqua 8,78%.

Santos et al. (2011) encontraram, para a mesma área deste estudo, um erro médio percentual de 0,6% quando utilizaram dados de entrada relativos a observações no intervalo de 10 minutos o que resultou em erro médio absoluto de $2,5 \text{ W m}^{-2}$. Os erros encontrados pelos autores são bem inferiores aos apresentados aqui. Essa diferença pode ser atribuída à equação usada para ajustar os dados, que os autores consideraram apenas condições de céu claro.

Na Tabela 10 estão representados os erros absolutos relativos às estimativas de Santos et al. (2011) e aos valores medidos em campo. Para o satélite Aqua o erro médio absoluto foi de $39,6 \text{ W m}^{-2}$, com o máximo de $51,3 \text{ W m}^{-2}$ e mínimo de $20,5 \text{ W m}^{-2}$. Para o satélite Terra esses valores foram menores, com média de $33,3 \text{ W m}^{-2}$, máximo de $46,2 \text{ W m}^{-2}$ e mínimo de $12,7 \text{ W m}^{-2}$. Observa-se que os valores estimados foram maiores nas estimativas do Aqua em cinco (255, 275, 276, 283 e 303) dos oito dias coincidentes nos dois satélites.

A Figura 14 apresenta a variabilidade espacial radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$) obtida pela lei de Stefan-Boltzmann, com a temperatura da superfície obtida pelo produto MOD/MYD11A1. Para o dia 05 de setembro (Figura 14a) a predominância em toda a área corresponde à classe com valores de $R_{L\uparrow}$ que oscila entre 530 a 550 W m^{-2} . Valores da ordem de 570 W m^{-2} são encontrados no centro-sul da área estudada, local que apresentou os maiores valores de temperatura (Figura 10a). No início de outubro (Figura 14b) a $R_{L\uparrow}$ diminuiu em toda a área, sendo o dia em que concentrou a maior quantidade de pixels (76%) na classe com valores mais baixos ($510\text{-}530 \text{ W m}^{-2}$), quando comparados com a porcentagem de pixels dominantes nas outras imagens; porém na região centro-sul ainda há predominância da categoria com maiores valores ($530 \text{ a } 550 \text{ W m}^{-2}$). Próximo ao final do mês (Figura 14c) as estimativas desta variável novamente aumentaram, principalmente no lado oeste da cena. Na imagem de novembro (Figura 14d) novamente aumentaram os valores para todo o campo estudado, dessa forma a grande área representativa (55% dos pixels) esteve na faixa de $550 \text{ a } 570 \text{ W m}^{-2}$. Em geral, nas áreas irrigadas a $R_{L\uparrow}$ é menor que nas áreas de vegetação nativa, porque os valores de temperatura são bem menores nestas áreas, uma vez

que parte da energia absorvida é usada para a evapotranspiração. As médias das estimativas variaram entre 522 e 550 W m⁻² para os dias 10 e 26 de outubro, respectivamente.

Os valores corroboram com os encontrados por outros estudos. Giongo (2008) obteve, em Santa Rita do Passa Quatro, valores máximos entre 411 e 539 W m⁻² para os dias 29 de maio e 22 de fevereiro de 2005, respectivamente. Por sua vez, os mínimos oscilaram entre 381 e 418 W m⁻² para os mesmos dias, respectivamente. E, por fim, as médias variaram entre 402 e 445 W m⁻² as quais são referentes aos mesmos dias citados acima. Novas (2008) em estudo realizado na bacia do rio Pratagy (AL), encontrou médias da R_{L↓} entre 420 W m⁻² em 11 de junho de 1990 e em 21 de setembro de 1998 a média dessa variável teve um aumento chegando a 439 W m⁻². Moreira et al. (2011) estudaram a cidade do Recife e encontraram valores principalmente entre 465 e 480 W m⁻² para o dia 26 de agosto de 2006 e para o dia 06 de setembro de 2010 a maior parte da área teve valores entre 430 e 450 W m⁻².

Tabela 8 – Radiação de onda longa incidente medida (R_{L↓}) (W m⁻²), Radiação de onda longa incidente estimada (R_{L↓ S}) (W m⁻²), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua.

DSA	R_{L↓}	R_{L↓ S}	EP (%)
248	398,7	435,2	9,15
253	381,9	424,1	11,05
255	382,1	423,9	10,94
257	391,9	428,7	9,39
259	371,0	422,3	13,83
264	392,0	432,0	10,20
275	387,3	433,5	11,93
276	390,7	436,8	11,80
283	395,0	439,7	11,32
288	408,0	428,5	5,02
297	397,4	437,2	10,02
298	403,8	433,3	7,31
303	404,6	443,9	9,71
EMP (%)			8,78

Tabela 9 – Radiação de onda longa incidente medida ($R_{L\downarrow}$) ($W m^{-2}$), Radiação de onda longa incidente estimada ($R_{L\downarrow S}$) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra.

DSA	$R_{L\downarrow}$	$R_{L\downarrow S}$	EP (%)
245	370,8	417,0	12,46
248	380,8	423,5	11,21
255	376,5	412,9	9,67
261	379,3	420,0	10,73
273	392,6	432,6	10,19
275	376,6	415,5	10,33
276	391,1	420,6	7,54
283	390,7	415,9	6,45
286	374,1	417,8	11,68
289	388,0	420,7	8,43
293	378,9	415,8	9,74
296	386,3	417,9	8,18
298	381,3	419,2	9,94
299	397,7	430,9	8,35
300	386,1	417,6	8,16
303	397,5	435,5	9,56
305	406,6	420,3	3,37
307	407,8	420,5	3,11
311	391,2	417,0	6,60
312	396,3	425,7	7,42
321	395,1	428,2	8,38
344	396,6	428,7	8,09
EMP (%)			8,62

Tabela 10 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para a radiação de onda longa incidente dos satélites Aqua e Terra.

Aqua		Terra	
DSA	EA	DSA	EA
248	36,50	245	46,20
253	42,20	248	42,70
255	41,80	255	36,40
257	36,80	261	40,70
259	51,30	273	40,00
264	40,00	275	38,90
275	46,20	276	29,50
276	46,10	283	25,20
283	44,70	286	43,70
288	20,50	289	32,70
297	39,80	293	36,90
298	29,50	296	31,60
303	39,30	298	37,90
		299	33,20
		300	31,50
		303	38,00
		305	13,70
		307	12,70
		311	25,80
		312	29,40
		321	33,10
		344	32,10
EAM	39,59	EAM	33,27

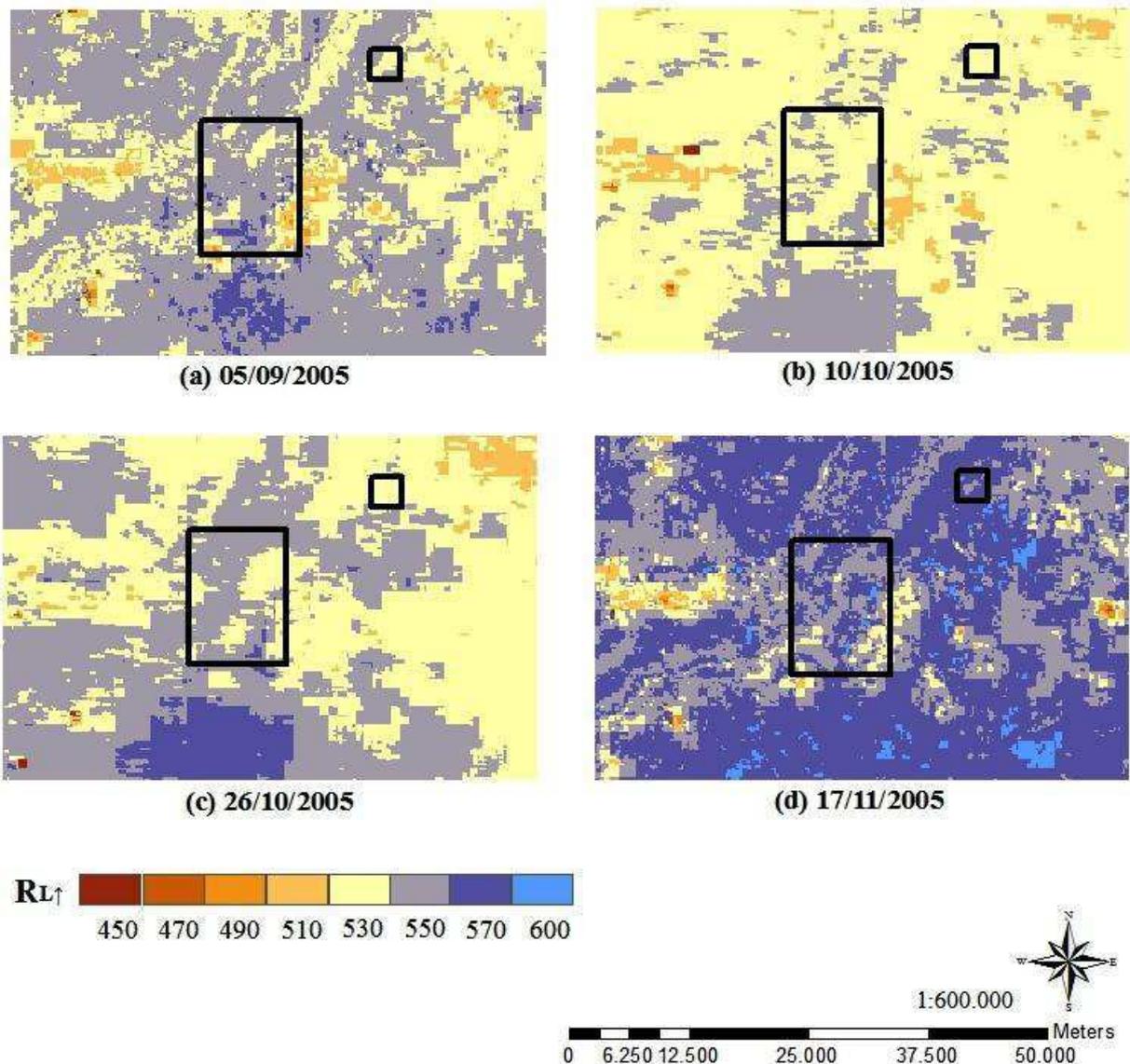


Figura 14 – Distribuição espacial da radiação de onda longa emitida pela superfície (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.

4.6. Saldo de radiação instantâneo

Os mapas temáticos do saldo de radiação (R_n) podem ser visualizados na Figura 15. Nota-se uma semelhança na espacialização dessa variável para os dias 05 de setembro e 17 de novembro (Figura 15a, d), assim como também para os dias 10 e 26 de outubro (Figura 15b, c). Em setembro (Figura 15a) a classe com maior número de pixels tem valores entre 630 e 660 $W m^{-2}$. Nos dias do mês de outubro há um aumento dessa variável, predominando R_n entre 720 e 780 $W m^{-2}$, com valores menores no centro sul da área. A maior média espacial foi obtida no dia 26 de outubro, sendo igual a 703 $W m^{-2}$. Esses valores médios estão

relacionados aos valores encontrados para a $R_{L\uparrow}$, pois o dia que apresentou a menor média teve maiores valores desta variável e no que foi observada a maior média teve menores valores. Até mesmo a parte da imagem da Figura 15c que teve os valores mais baixos (marrom escuro e mostarda) quando comparados aos demais, foi justamente a área que teve os maiores valores da $R_{L\uparrow}$ (Figura 14c). Além disso, tanto o dia 10 de outubro como o dia 26 de outubro tiveram albedos menores que os outros dois dias anterior e como a $R_{s\downarrow}$ também foi maior, a junção das duas variáveis proporcionou altos valores do R_n . As menores estimativas do R_n estiveram entre 423 e 639 $W m^{-2}$ nos dias 17 de novembro e 10 de outubro, respectivamente. Por sua vez, os máximos variaram de 749 a 780 $W m^{-2}$ para 05 de setembro e 10 de outubro, respectivamente. Estes máximos foram encontrados em áreas irrigadas.

Resultados semelhantes foram encontrados por outros pesquisadores. Bastiaanssen et al. (1998b) encontraram valores próximos a 650 $W m^{-2}$ em áreas com oásis e de 400 $W m^{-2}$ para desertos, na bacia hidrográfica do rio Heihe – localizado na China (39°N; 100°E). Giongo (2008) obteve valores médios de 383 a 733 $W m^{-2}$ para os dias respectivos 29 de maio e 21 de novembro de 2005. Novas (2008) mostrou resultados com mínimo de 414 $W m^{-2}$ e máximo de 742 $W m^{-2}$ para 03 de setembro de 2003 e 21 de setembro de 1998, enquanto as médias variaram de 505 $W m^{-2}$ (11 de junho de 1990) a 635 $W m^{-2}$ (21 de setembro de 1998).

Silva (2009) obteve com o satélite Landsat 5 TM, na mesma área desta pesquisa, para o dia 24 de outubro de 2005 médias de 620,57 e 629,85 $W m^{-2}$, para a Fazenda Frutacor e solo exposto, respectivamente, através do METRIC. Oliveira & Galvêncio (2009) em estudos para o rio Moxotó, situado no semiárido nordestino entre os estados de Pernambuco e Alagoas, obtiveram R_n variando entre 400 e 500 $W m^{-2}$ no ano de 1992, sendo mais intenso em 2003. Os referidos autores ainda encontraram valores médios de 721 $W m^{-2}$ para o dia 27 de setembro de 1992 e 753 $W m^{-2}$ em 12 de outubro de 2003.

Moreira et al. (2011) encontraram valores maiores para 06 de setembro de 2010 do que para 26 de agosto de 2006. Sendo que os menores valores, para ambos os dias, estavam em áreas urbanas – menores que 632 $W m^{-2}$ (em 2006) e de 632 a 730 $W m^{-2}$ (em 2010) – e os maiores para nas áreas com vegetação e corpos hídricos, chegando a 757 $W m^{-2}$ para 2010.

Liberato et al. (2011) as variações de R_n para área de floresta situaram-se entre 507 a 646 $W m^{-2}$ e em pastagem esses valores foram menores (386 – 507 $W m^{-2}$), para imagens TM - Landsat 5 nos dias 13 de julho de 2005 e 13 de maio, 30 de junho e 16 de julho de 2006.

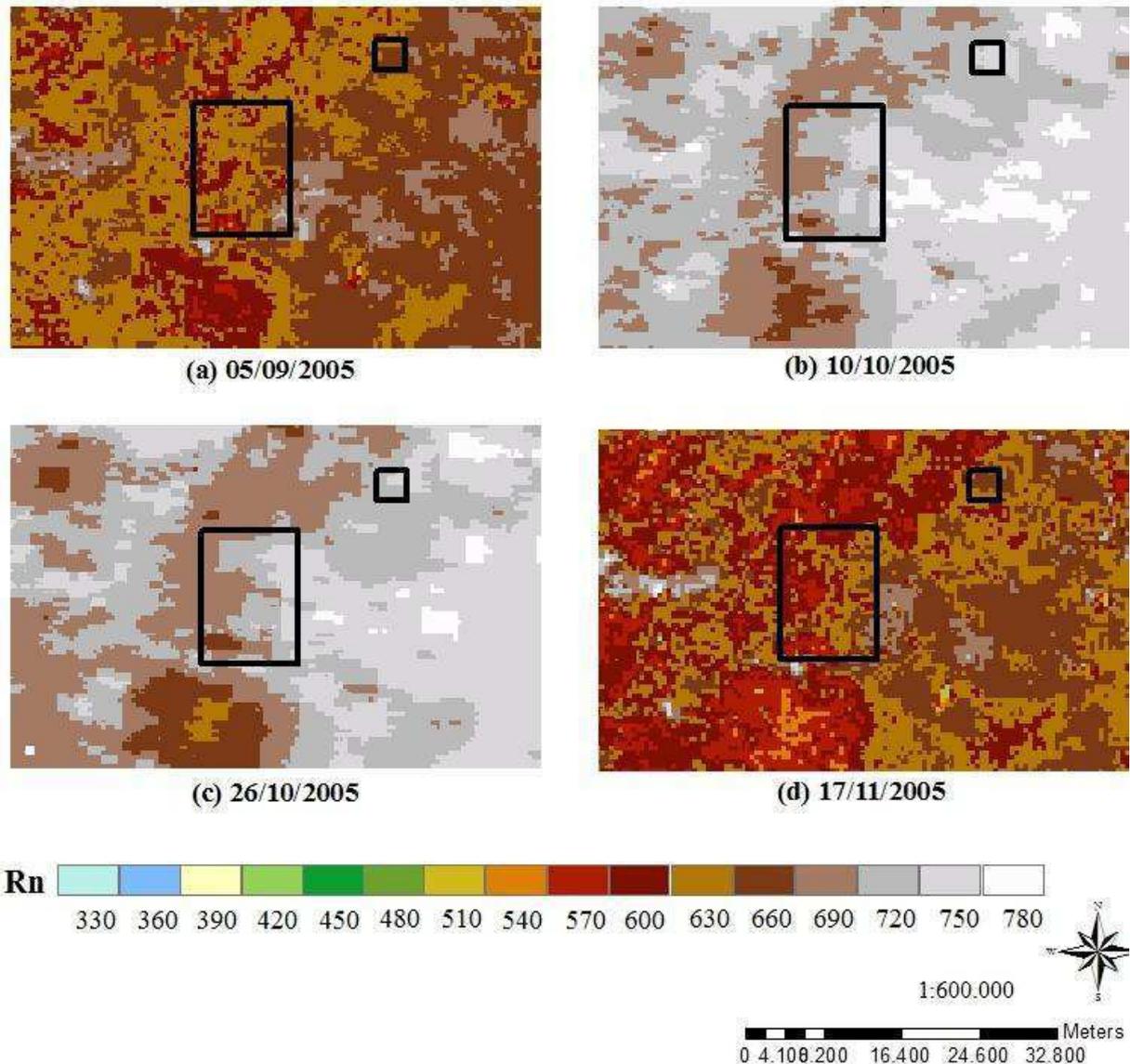


Figura 15 – Distribuição espacial do saldo de radiação (MODIS/Terra) na região de Quixeré – CE para alguns dias estudados no ano de 2005.

Nas Tabelas 11 e 12 estão os valores do Rn medido e estimado, com seus respectivos erros relativos percentuais e médios. Análise dos resultados mostraram que a metodologia empregada no estudo subestima a maioria dos valores de Rn encontrados para o satélite Aqua. Já para o satélite Terra esse comportamento foi observado em apenas nove das vinte e duas imagens estudadas. Os erros relativos percentuais mínimos e máximos foram de 2,63 a 30,40%, para o satélite Aqua, e de 0,02 a 52,44% para o Terra. É importante lembrar que este alto valor obtido no satélite que passa mais cedo se deu no dia 307, aquele em que possivelmente houve presença de nuvens na hora do registro das informações coletadas na estação meteorológica. Tratando-se dos erros médios o satélite Terra também apresentou

valor mais baixo (7,40%) que o do Aqua (15,61%). Esses resultados evidenciam que o desempenho da metodologia aplicada é melhor para o satélite Terra.

Os erros absolutos relativos entre os valores estimados e medidos do saldo de radiação são mostrados na Tabela 13. O satélite Aqua apresentou valores mais elevados, com erro médio absoluto de $97,57 \text{ W m}^{-2}$, sendo o máximo igual a $195,0 \text{ W m}^{-2}$ e o mínimo de $18,6 \text{ W m}^{-2}$. Já para o satélite Terra a média foi de $39,0 \text{ W m}^{-2}$, com valor máximo de $178,1 \text{ W m}^{-2}$ e mínimo $0,1 \text{ W m}^{-2}$. E, ainda foi calculado o REQM sendo o valor do satélite Aqua de 113 W m^{-2} , enquanto que para o Terra esse valor foi reduzido a $56,71 \text{ W m}^{-2}$.

Tabela 11 – Saldo de radiação medido (R_n) (W m^{-2}), Saldo de radiação estimado (R_n estim) (W m^{-2}), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua.

DSA	R_n	R_n estim	EP (%)
248	709,9	645,3	9,10
253	470,4	613,4	30,40
255	680,8	597	12,31
257	579,9	677	16,74
259	706,6	688	2,63
264	713	657	7,85
275	721,3	671,9	6,85
276	677	482	28,80
283	672,6	480,2	28,61
288	409,8	453	10,54
297	631,13	464	26,48
298	688,8	644	6,50
303	704,9	591,5	16,09
EMP (%)			15,61

Tabela 12 – Saldo de radiação medido (R_n) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação estimado (R_n estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra.

DSA	R_n	R_n estim	EP (%)
245	560,6	560,7	0,02
248	606,8	650,5	7,20
255	653,7	660,5	1,04
261	588,4	583,2	0,88
273	610,7	645,7	5,73
275	621,1	553	10,96
276	725,4	718,5	0,95
283	701,9	714,5	1,80
286	543,4	576,9	6,16
289	640,5	613,5	4,22
293	583,2	560	3,98
296	641	642,8	0,28
298	633,9	539	14,97
299	698,2	712,7	2,08
300	610,2	577	5,44
303	585,8	674,6	15,16
305	553,3	610,2	10,28
307	339,6	517,7	52,44
311	575,3	574	0,23
312	660,8	607,8	8,02
321	641,5	633	1,33
344	672,8	738,1	9,71
EMP (%)			7,40

Outros resultados encontrados na literatura estão em concordância com os mostrados aqui. Bisht et al. (2005) obtiveram um erro de aproximadamente 14% para o saldo de radiação instantâneo. Tang & Li (2008) encontraram, para os Estados Unidos, erro médio de $-20,3 W m^{-2}$. Santos (2009) utilizando a metodologia SEBAL e imagem do sensor ASTER em área de cultivo de arroz, no município de Paraíso do Sul (RS), obteve um erro de 23% na estimativa do R_n . Bisht & Bras (2010) em estudos realizados nas Grandes Planícies do Sul (EUA) encontraram erro médio de $10,46 W m^{-2}$, utilizando o satélite Terra.

Os erros encontrados no presente estudo e em outros encontrados na literatura podem estar associados aos valores de temperatura da superfície estimados pelas imagens MODIS, uma vez que o produto utilizado tem uma resolução espacial de 1 Km, resultando em uma superestimativa em torno de 10°C.

Tabela 13 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para o saldo de radiação dos satélites Aqua e Terra.

Aqua		Terra	
DSA	EA	DSA	EA
248	64,60	245	0,10
253	143,00	248	43,70
255	83,80	255	6,80
257	97,10	261	5,20
259	18,60	273	35,00
264	56,00	275	68,10
275	49,40	276	6,90
276	195,00	283	12,60
283	192,40	286	33,50
288	43,20	289	27,00
297	167,13	293	23,20
298	44,80	296	1,80
303	113,40	298	94,90
		299	14,50
		300	33,20
		303	88,80
		305	56,90
		307	178,10
		311	1,30
		312	53,00
		321	8,50
		344	65,30
EAM	97,57	EAM	39,02

4.7. Saldo de radiação diário

O saldo de radiação diário ($R_{n,24h}$) tem os valores estimados e medidos apresentados nas Tabelas 14 e 15. Percebe-se que quase metade das imagens do satélite Aqua foram superestimadas, enquanto que para o satélite Terra cinco valores foram superestimados. O erro médio percentual do satélite Aqua foi maior que o obtido com o Terra, confirmando mais uma vez que a metodologia é mais aplicável aos produtos deste último. Também o erro quadrático médio (REQM) reforça esse resultado, com valores iguais a 13,9 e 16,3 $W m^{-2}$, para os satélites Terra e Aqua, respectivamente. Analisando a Tabela 16 observa-se que o menor e maior erro absoluto para o satélite Aqua foi de 0,70 e 28,10 $W m^{-2}$. Para o satélite Terra esses valores diminuíram para 0,36 e 33,01 $W m^{-2}$, respectivamente. E, mais uma vez, o erro absoluto médio do Aqua foi maior que o do Terra.

Tabela 14 – Saldo de radiação diário medido ($R_{n,24h}$) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação diário estimado ($R_{n,24h}$ estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Aqua.

DSA	$R_{n,24h}$	$R_{n,24h}$ estim	EP (%)
248	145,5	152,6	4,91
253	127,1	144,0	13,30
255	152,0	152,7	0,46
257	146,1	159,7	9,31
259	162,6	173,4	6,64
264	161,9	162,6	0,43
275	167,5	173,8	3,76
276	165,8	142,0	14,35
283	167,5	142,0	15,22
288	159,2	134,5	15,52
297	170,2	142,1	16,51
298	160,7	163,8	1,93
303	172,4	160,0	7,19
EMP (%)			8,43

Tabela 15 – Saldo de radiação diário medido ($R_{n,24h}$) ($W m^{-2}$), Saldo de radiação diário estimado ($R_{n,24h}$ estim) ($W m^{-2}$), erro relativo percentual e erro médio para o satélite Terra.

DSA	$R_{n,24h}$	$R_{n,24h}$ estim	EP (%)
245	144,0	144,8	0,53
248	145,5	153,1	5,25
255	152,0	160,1	5,32
261	137,0	130,7	4,61
273	151,6	152,1	0,32
275	167,5	148,4	11,41
276	167,5	172,6	3,06
283	167,5	171,8	2,57
286	161,3	148,0	8,22
289	161,5	155,0	4,02
293	162,7	150,3	7,64
296	158,9	158,5	0,23
298	160,7	143,0	11,01
299	156,2	160,0	2,46
300	159,0	138,0	13,20
303	172,4	162,0	6,03
305	168,4	140,0	16,87
307	141,0	108,0	23,41
311	158,2	138,7	12,30
312	160,2	156,0	2,65
321	152,7	147,0	3,74
344	163,7	152,0	7,14
EMP (%)			6,91

Os resultados expostos estão de acordo com aqueles encontrados por outros autores que também utilizaram o sensor MODIS. Bisht et al. (2005) encontraram a REQM de $60 W m^{-2}$, enquanto Bisht & Bras (2010) obtiveram o valor de $38,7 W m^{-2}$. Santos (2011) obteve um erro percentual médio de 6,9% na área de cerrado e de 4,7% na área de cana-de-açúcar, utilizando a correção para o modelo senoidal (Bisht et al., 2005) que foi proposta por Araújo (2010). Este último encontrou erro médio percentual e médio absoluto de 9,60% e $14,6 W m^{-2}$

utilizando os dados obtidos pela metodologia Bisht et al. (2005), mas ao utilizar o fator de correção, proposto por ele, os erros foram desprezíveis.

Tabela 16 – Erro absoluto e absoluto médio ($W m^{-2}$) para o saldo de radiação diário dos satélites Aqua e Terra.

Aqua		Terra	
DSA	EA	DSA	EA
248	7,14	245	0,53
253	16,90	248	5,25
255	0,70	255	5,32
257	13,60	261	4,61
259	10,80	273	0,32
264	0,70	275	11,41
275	6,30	276	3,06
276	23,80	283	2,57
283	25,50	286	8,22
288	24,70	289	4,02
297	28,10	293	7,64
298	3,10	296	0,23
303	12,40	298	11,01
		299	2,46
		300	13,20
		303	6,03
		305	16,87
		307	23,41
		311	12,30
		312	2,65
		321	3,74
		344	7,14
EAM	13,36	EAM	10,90

5. CONCLUSÕES

Em consonância com o que foi exposto conclui-se que:

- Os mapas do NDVI apresentam diferenças consideráveis quando se trata das áreas com culturas irrigadas e das áreas com vegetação nativa, principalmente porque os dias do estudo encontram-se na estação seca;
- Os mapas do albedo, em geral, apresentaram valores mais baixos nas áreas de cultivo, indicando uma maior quantidade de energia absorvida por essas superfícies;
- As variações da temperatura da superfície evidenciam a sua relação com a própria superfície, com o horário em que a variável foi analisada e ainda, com a época do ano, ficando nítido o seu aumento com o passar dos meses;
- A radiação de onda curta incidente – estimada por Zillman (1972) – e a radiação de onda longa incidente – calculada por Santos et al. (2011) – apresentaram erros aceitáveis para os dois satélites, o que indica que não há problema em usar essas parametrizações em nenhum dos casos;
- Os resultados do saldo de radiação instantâneo e diário evidenciaram a aplicabilidade da metodologia proposta, especialmente para o satélite Terra;
- Os erros encontrados podem ser atribuídos a fatores como a resolução do sensor utilizado que é grosseira, assim os valores da temperatura da superfície se apresentam superestimados nos produtos do sensor MODIS; também as superestimativas obtidas por meio da equação que determinou o albedo.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Calibrar uma equação para região de estudo que minimize as diferenças encontradas para o albedo da superfície;
- Obter a temperatura da superfície através de uma regressão que utiliza o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) com resolução espacial de 250 m;
- Instalação de um maior número de torres micrometeorológicas dentro da área de análise dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems*, v.19, p.251-268, 2005a.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. Satellite-based evapotranspiration by energy balance for western states water management. In: *Impacts of Global Climate Change Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, 2005. Nova York: American Society of Civil Engineers, p.556, 2005b.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.133, p.380-394, 2007.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. *Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL). Advanced Training and user's Manual*, Kimberly, Idaho, v.1, p.97, 2002.
- ANDERSON, L. O; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E., CARVALHO JÚNIOR, O. A. *Sensor MODIS: Uma abordagem geral*, São José dos Campos: INPE, 2003.
- ANDRADE, R. G. *Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar*. Viçosa, 2008. 135p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa.
- ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, V. da S.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 2: Balanço de energia e parâmetros derivados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.4, p.535-542, 2010.
- ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; PILAU, F. G.; RIGHI, E. Z.; FAVARIN, J. L. Radiation balance of coffee hedgerows. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.12, n.3, p.274–281, 2008.

- ARAÚJO, A. L. Calibração do balanço de radiação diário através de dados de superfície e de sensores orbitais. Campina Grande, 2010. 114p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- ATAÍDE, K. R. P. Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos do sensor MODIS Terra e Aqua. Campina Grande, 2006. 72p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- AZEVEDO, P. V.; Leitão, M. M. V. B. R.; Sousa, I. F.; Maciel, G. F. Balanço de radiação sobre culturas irrigadas no semiárido do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.5, n.1, p.403-410, 1990.
- BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands. 272p. 1995.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212-213, p.198-212, 1998a.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.212-213, p.213-229, 1998b.
- BEZERRA, B. G. Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL. Campina Grande, 2006. 127p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, v.114, n.7, p.1522-1534, 2010.
- BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear-sky days. *Remote Sensing of Environment*, v.97, n.1, p.52-67, 2005.

- BLONQUIST JR, J. M.; TANNER, B. D.; BUGBEE, B. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, p.1709-1721, 2009.
- CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (CCRS). Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing. 2007. Disponível em:
<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf>.
Acesso em: abr. 2011.
- CEBALLOS, J. C. Estimativa de radiação solar a superfície com céu claro: um modelo simplificado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.15, n. 1, p.113-122, 2000.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Evapotranspiração. In: _____. *Introduzindo Hidrologia*. 6 ed. Porto Alegre: 2008. cap. 8, p.75.
- COLWELL, R. N. *Manual of Remote Sensing*. Falls Church: ASP&RS, 1983.
- COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J. M.; HONG, S.; FRIESEN, J.; VAN DE GIESEN, N. C.; RODGERS, C.; SZARZYNSKI, J.; VLEK, P. L. G. Evaporation Mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.33,p.127-140, 2008.
- CRUZ, M. A. S.; SOUZA, A. M. B; JESUS, J. S. de. Avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na bacia do rio Japarutuba-Mirim em Sergipe. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 15, 2011. Curitiba. Anais... SP: INPE, 2011. p.1357-1365.
- CUNHA, J. E. de B. L. Estimativa do balanço de energia e evapotranspiração: aplicações no semiárido utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Campina Grande, 2011. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande.
- DANTAS, F. R. da C.; BRAGA, C. C.; SOUZA, E. P., SILVA, S. T. A. Determinação do Albedo da Superfície a partir de dados AVHRR/NOAA e TM/LANDSAT 5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.1.p.25-31, 2010.

- DE BRUIN, H. A. R. From Penman to Makkink. In: Hooghart, J. C. (Ed.), Proceedings and information: TNO Committee on Hydrological. Gravenhage, The Netherlands, v.39, p.5-31, 1987.
- DE BRUIN, H. A. R., STRICKER, J. N. M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques, v.45, p.391-406, 2000.
- DI MAIO, A. C.; SAUSEN, T. M. Sensoriamento Remoto. Formação Continuada de Professores, Brasília, DF, p.47-57, 2008.
- DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, p.385-392, 2008.
- EIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.31, p.445-454, 1996.
- FOLHES, M. T. Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos. São José dos Campos, 2007. 186p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- FORMIGONI, M. H. Análise Multi-temporal da vegetação na região Nordeste do Brasil através do EVI do sensor MODIS. Alegre, 2008. 81p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo.
- FRANCO, R. A. M.; HAGA, K. I.; HERNANDEZ, F. B. T. Evaporação do solo mais transpiração vegetal igual a evapotranspiração. Unesp, São Paulo, 2007.
- FREITAS, E. D. de. Notas de aula da Disciplina ACA-0429 Agrometeorologia. USP, São Paulo, 2005.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). Disponível em: <www.funceme.br>. Acesso em: fev.2011.
- GIACOMONI, H. M. Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no estado

- do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 172p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GIONGO, P. R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. Recife, 2008. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- GOMES, H. F. Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais. Campina Grande, 2009. 119p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- GUSMÃO, A. C. V. e L. Obtenção do saldo de radiação através de imagens de satélite para a ilha do bananal – TO. Campina Grande, 2011. 56p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- HEITOR, A.; BIGA, A.; ROSA, R. Thermal Radiation Components of the Energy Balance at the Ground. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 54, p. 29-48, 1991.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v.83, p.195-213, 2002.
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VANLEEuwEN, W. J. D. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v.59, n.3, p.440–451, 1997.
- HUETE, A.; JUSTINE, C.; LIU, H. Development of Vegetation and Soil Indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, v.49, n.3, p.224-234, 1994.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. *Library of Congress Cataloging in Publication Data: Academic Press Canada*, 408p, 1983.
- JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução: José Carlos N. Epiphanyo (coordenador)... [et al.]. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2011. Tradução de: *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, 2nd. ed.

- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D. P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, v.83, n.1-2, p.244-26, 2002.
- KAWASHIMA, S.; ISHIDA, T.; MINOMURA, M.; MIWA, T. Relations between surface temperature and air temperature on a local scale during winter nights, *Journal of Applied Meteorology*, v. 39, p.1570–1579, 2000.
- LEITÃO, M. de M. V. B. R.; SANTOS, J. M. DOS; OLIVEIRA, G. M. de. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. *Revista brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental [online]*. 2002, vol.6, n.2, pp. 256-261. ISSN 1807-1929.
- LEIVAS, J.; FONTANA, D.; BERLATO, M.; CARDOSO, L. Variação diária do albedo sobre uma superfície vegetada e sobre um lago na estação experimental da UFRGS–RS. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15, 2007. Aracaju. Anais... SP: SBA, 2007. p.1-5.
- LIBERATO, A. M.; SILVA, B. B. da; CARDOSO, F. L. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa de saldo de radiação em Rondônia. *Revista Pesquisa & Criação*. v. 10, n.2, p.153-164, 2011.
- LIBERATO, A.; CARDOSO, F. Análises da radiação de onda curta e onda longa na Amazônia. *Revista de Geografia, Recife*, 2722 02 2011.
- LOHMANN, S.; SCHILLINGS, C.; MAYER, B.; MEYER, R. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. *Solar Energy*, v.80, n.11, p.1390-1401, 2006.
- MELLO, J. L. P.; SILVA, L. D. B. da. Irrigação. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, abr. 2007. 180p.
- MENEZES NETO, O. L. de; COSTA, A. A.; RAMALHO, F. P. Estimativa de radiação solar via modelagem atmosférica de mesoescala aplicada à região nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*. [online], vol.24, n.3 ISSN 0102-7786, 2009.
- MODIS Website. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: abr. 2011.

- MOREIRA, E. B. M.; NOBREGA, R. S.; SILVA, B. B. da. Estimativa do saldo de radiação instantâneo na cidade do Recife, através de imagens do satélite Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.4, p.589–601, 2011.
- MOREIRA, M. A. Sensoriamento Remoto. Formação Continuada de Professores, Brasília, DF, p.17-32, 2008.
- NAGLER, P.; CLEVERLY, J.; LAMPKIN, D.; GLENN, E.; HUETE, A.; WAN, Z. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, v.94, p.17–30, 2005.
- NIEMELÄ, S.; RÄISÄNEN, P.; SAVIJÄRVI, H. Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part II. Shortwave radiation. *Atmospheric Research*, v.58, p.141–154, 2001.
- NISHIDA, K.; NEMANI, R., GLASSY, J.; RUNNING, S. Development of an evapotranspiration index from aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.41, p.493-501, 2003.
- NOVAS, M. F. B. Mapeamento das estimativas do saldo de radiação e índices de vegetação em área do estado de Alagoas com base em sensores remotos. Maceió, 2008. 158p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia: Processos da Superfície Terrestre). Universidade Federal de Alagoas.
- OLIVEIRA, T.; GALVINCIO, J. Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Moxotó – PE usando sensoriamento remoto termal. *Revista Brasileira de Geografia Física, América do Norte*, 112 05 2009.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; STUHLMANN, R.; COLLE, S. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. *Solar Energy*, v. 68 (1), p. 91-107, 2000.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2010.
- PORTAL SÃO FRANCISCO. 2002. Disponível em:
< <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/regiao-nordeste-do-brasil/regiao-nordeste-do-brasil.php>>. Acesso em: out. 2011.

- RIZZI, R. Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul. São José dos Campos, 2004. 214p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- ROSENDO, J. S.; ROSA, R. A utilização de índices de vegetação em uma tentativa de mapear o uso da terra e a cobertura vegetal. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009. Natal. Anais... SP: INPE, 2009. p.6141-6148.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, v. 1, p.309-317. 1973.
- SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, B. B. da; RAMANA ROA, T. V.; SATYAMURTY, P.; MANZI, A. O. Downward longwave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast Brazil. Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.3, p.443-450, 2011.
- SANTOS, F. A. C. Alterações no balanço radiativo e impactos climáticos decorrentes do uso da terra no estado de São Paulo. Campina Grande, 2011. 70p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- SANTOS, T. V. dos. Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais. Porto Alegre, 2009. 84p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL (org). Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2. Salvador: ReCESA, 2008. 139p.
- SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. Meteorologia Agrícola: Definições e Conceitos (Aula 2). ESALQ/USP: 2009. Disponível em:
<<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula2.pdf>>. Acesso em: jun. 2011.
- SILVA, B. B. da; MENDONÇA, R. R. O.; SILVA, S. T. A.; FERREIRA, R. C. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM Landsat 5. Revista de Geografia, v.25, n.2, 2008.

- SILVA, B. B. da; SILVA, S. T. A.; GOMES, H. B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. *Mercator*, v. 9, n. especial (1), p. 91-106, 2010a.
- SILVA, M. T. Zoneamento de risco climático para a cultura do amendoim no estado do Rio Grande do Norte. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.7, n.2, 2007.
- SILVA, R. A.; SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.14, n.5, p.501-509, 2010b.
- SILVA, S. T. A. Mapeamento da Evapotranspiração na bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe usando técnicas de sensoriamento remoto. Campina Grande, 2009. 107p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande.
- SOUZA, A. P. de; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Annual evolution of global, direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces. *Engenharia Agrícola* [online], vol.32, n.2, pp. 247-260. ISSN 0100-6916, 2012.
- SRIVASTANA, S. K.; JAYRAMAN, V.; NAGESWARA RAO, P.P.; MANIKIAM, B.; CHANDRASEKHAR, M.G. Interlinkages of NOAA/AVHRR derived integrated NDVI to seasonal precipitation and transpiration in dryland tropics. *International Journal of Remote Sensing*, v.18, n.14, p.2831-2952, 1997.
- TANAKA, H; HIYAMA, T.; KOBAYASHI, N.; YABUKI, H.; ISHII, Y.; DESYATKIN, R. V.; MAXIMOV, T. C.; OHTA, T. Energy balance and its closure over a Young larch forest in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 1954-1967, 2008.
- TANG, B.; LI, Z. L. Estimation of instantaneous net surface longwave radiation from MODIS cloud free data. *Remote Sensing of Environment*, v.112, p. 3482–3492, 2008.
- TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.13, p.51-63, 2008.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. 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*, v.149, p.477-490, 2009.
- TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. de M. C. *Gestão da água no Brasil*. Brasília : UNESCO, 2001. 156p.
- UNIVERSIDADE DA ÁGUA. 1992. Disponível em: <<http://www.uniagua.org.br/>>. Acesso em: nov. 2011.
- VAN DER GRIEND, A.A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, p.1119-1131, 1993.
- WAN, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, Z. L. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, v.83, p.163–180, 2002.
- WANG, K. C.; LIANG, S. L. Estimation of high-spatial resolution clear-sky longwave downward and net radiation over land surfaces from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v.113, p.745–754, 2009.
- WESSEL, K. J.; PRINCE, S. D.; FROST, P. E.; VAN ZYL, D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, v.91, p.47–67, 2004.
- WILKS, D. S. Theoretical probability distributions. In: *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego: Academic Press, 2006.
- ZILLMAN, J. W. A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere oceans, *Meteorology Study 26*, Bur. of Meteorology Canberra, Australia Dept. of the Inter, 1972.