



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



KLEBER RENATO DA PAIXÃO ATAÍDE

**DETERMINAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL
COM PRODUTOS DO SENSOR MODIS TERRA E AQUA**

CAMPINA GRANDE - PB

Fevereiro/2006

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A862d Ataíde, Kleber Renato da Paixão
2006 Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos do sensor modis terra e aqua /Kleber Renato da Paixão Ataíde. — Campina Grande, 2006.
78fs. il.

Referências.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientadores: Enilson Palmeira Cavalcanti e Bernardo Barbosa da Silva.

1— Saldo de radiação 2— Sensoriamento 3— Radiação solar I— Título

CDU 504.32:528.8

KLEBER RENATO DA PAIXÃO ATAÍDE

DETERMINAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR
GLOBAL COM PRODUTOS MODIS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/02/2006

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. TANTRAVAHU VENKATA RAMANA RAO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO
Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
Instituto de Pesquisas Espaciais

KLEBER RENATO DA PAIXÃO ATAÍDE

**DETERMINAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL
COM PRODUTOS DO SENSOR MODIS TERRA E AQUA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós –
Graduação em Meteorologia da
Universidade Federal de Campina Grande,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Mestre em
Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia

Sub-área: Radiação Solar e Sensoriamento Remoto

Orientadores: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

CAMPINA GRANDE - PB

Fevereiro/2006

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À UFCG, pela minha seleção ao Curso de Pós-Graduação em Meteorologia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio concedido através da bolsa.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), durante o cumprimento das disciplinas do curso.

Aos meus orientadores e amigos prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti e prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pela atenção e dedicação durante a elaboração desta pesquisa.

À FUNCEME pela pronta atenção prestada no fornecimento dos dados.

Pelo amor, apoio, compreensão e carinho da minha família.

Aos meus amigos paraenses (Leidiane, Wallace, Zilurdes, Daniel, Rafael e Ronaldo) que sempre me deram apoio familiar e especialmente à Ana Cleide, pela companhia, apoio e compreensão durante o curso.

Às amigas construídas durante o curso.

E a todos que de alguma maneira, contribuíram para o término desta dissertação.

“Minha vida é andar por esse país

Pra ver se um dia descanso feliz

Guardando as recordações

Das terras onde passei

Andando pelos sertões

E dos amigos que lá deixei

Chuva e sol

Poeira e carvão

Longe de casa

Sigo o roteiro, mais uma estação

E alegria no coração...”

Vida de viajante (Luiz Gonzaga)

Com muito amor e carinho aos
meus Pais Luiz Ataíde e Maria

Pag.

José e aos meus irmãos Kleyver
Lenno e Walber Ney, DEDICO.

SUMÁRIO

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Lista de quadros	xii
Listas de símbolos	xiii
Listas de abreviaturas e siglas	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBILOGRÁFICA	4
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Satélites Terra e Aqua	10
3.2 Sensor MODIS	12
3.2.1 Características gerais do sensor MODIS	13
3.3 Descrição dos produtos MODIS (Terra e Aqua)	15
3.3.1 Temperatura e emissividades de superfície (Produto MODIS MOD11A1 e MYD11A1).....	18
3.3.2 Albedo da superfície (Produto MODIS MCD43B3)	20
3.3.3 Perfil da atmosfera (Produto MODIS MOD07 e MYD07)	21
3.3.4 Seleção das imagens e dos dias de estudo	24
3.4 Área de estudo	25
3.4.1 Localização	25
3.4.2 Clima do Ceará	26
3.4.3 Relevo e vegetação do Ceará	27
3.5 Dados das estações	29
3.6 Metodologia	30

3.6.1	Estimativa do saldo de radiação	32
3.6.2	Estimativa do ciclo diurno do saldo de radiação	35
3.6.3	Estimativa do saldo de radiação médio diário.....	35
3.6.4	Estimativa do ciclo diurno da radiação global.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Radiação global instantânea	38
4.2	Ciclo diurno da radiação global	44
4.3	Saldo de radiação instantâneo	56
4.4	Ciclo diurno do saldo de radiação	60
4.5	Saldo de radiação médio diário	66
4.6	Equação senoidal modificada	67
5	CONCLUSÃO	71
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	- Esquema do sensor MODIS	15
Figura 2	- Organização dos produtos de superfície MODIS (Aqua e Terra).....	16
Figura 3	- Distribuição espacial do produto de perfil atmosférico MOD07_L2	18
Figura 4	- Exemplo da imagem do produto de perfil atmosférico (MOD07_L2) com todas suas camadas de dados.....	23
Figura 5	- Climatologia da precipitação média mensal nas estações em estudo.....	25
Figura 6	- Precipitação mensal durante o ano de 2005 nas estações.....	25
Figura 7	- Localização do Estado do Ceará.....	26
Figura 8	- Localização do Município de Quixeré e da Fazenda Frutacor.....	28
Figura 9	- Localização espacial das estações do Estado do Ceará.....	31
Figura 10	- Ciclo diurno do saldo de radiação observado na estação Frutacor	37
Figura 11	- Radiação global estimada e observada para 10 de setembro de 2005.....	40
Figura 12	- Radiação global estimada e observada para 10 de outubro de 2005	41
Figura 13	- Radiação global estimada e observada para 14 de outubro de 2005	41
Figura 14	- Radiação global estimada e observada para 25 de outubro de 2005	42
Figura 15	- Imagens de radiação solar global obtida pelo sensor MODIS/Terra: a) 10/09/2005, b)10/10/2005, c) 14/10/2005, d) 25/10/2005.....	43
Figura 16	- Imagens de radiação solar global obtida pelo sensor MODIS/Aqua: a) 10/09/2005, b)10/10/2005, c) 14/10/2005, d) 25/10/2005	44
Figura 17	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Araçoiaba.....	46
Figura 18	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Assaré	46
Figura 19	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Beberibe	47
Figura 20	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Lavras Mangabeira	47
Figura 21	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Quixeramobim	48

Figura 22	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Quixeré	48
Figura 23	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Santa Quitéria	49
Figura 24	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Sobral	49
Figura 25	- Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Ubajara	50
Figura 26	- Gráfico de dispersão entre os valores horários estimados e observados para o ciclo diurno de radiação global: a) MODIS/Terra, b) MODIS/Aqua e c) MODIS/ (Terra e Aqua).....	51
Figura 27	- Percentual absoluto da RG estimada para Araçoiaba	52
Figura 28	- Percentual absoluto da RG estimada para Assaré	52
Figura 29	- Percentual absoluto da RG estimada para Beberibe	53
Figura 30	- Percentual absoluto da RG estimada para Lavras Mangabeira	53
Figura 31	- Percentual absoluto da RG estimada para Quixeramobim	54
Figura 32	- Percentual absoluto da RG estimada para Quixeré	54
Figura 33	- Percentual absoluto da RG estimada para Santa Quitéria	55
Figura 34	- Percentual absoluto da RG para Sobral	55
Figura 35	- Percentual absoluto da RG estimada para Ubajara	56
Figura 36	-Valores de saldo de radiação observados e estimados pelo MODIS/Terra	58
Figura 37	-Valores de saldo de radiação observados e estimados pelo MODIS/Aqua	58
Figura 38	- Cartas de saldo de radiação durante a passagem do MODIS/Terra para Quixeré-CE: a) 10/09/05, b)10/10/05, c)14/10/05, d)25/10/05.....	59
Figura 39	- Cartas de saldo de radiação durante a passagem do MODIS/Aqua para Quixeré-CE: a) 10/09/05, b)10/10/05, c)14/10/05, d)25/10/05.....	59
Figura 40	- Dispersão entre os valores horários do Rn estimados e observados: a)MODIS/Terra, b)MODIS/Aqua e c)MODIS/ (Terra e Aqua) na fazenda Frutacor, Quixeré-CE.....	61
Figura 41	- Ciclo diurno do saldo de radiação ($W m^{-2}$) estimado e observado em Quixeré.....	63

Figura 42	- Dispersão entre os valores horários estimados e observados do Rn ($W m^{-2}$) corrigidos em Quixeré-CE.....	64
Figura 43	- Comportamento diurno do saldo de radiação ($W m^{-2}$) estimado por satélite e observações corrigidas pelo modelo senoidal em Quixeré-CE..	65
Figura 44	- Porcentagem absoluta entre valores observados e estimados para o saldo de radiação médio diário em Quixeré-CE.....	66
Figura 45	- Ciclo Diurno do Saldo de Radiação ($W m^{-2}$) estimado com a equação senoidal modificada e observado em Quixeré – CE.....	68
Figura 46	- Ciclo Diurno do Saldo de Radiação ($W m^{-2}$) estimado com a equação senoidal modificada e dados observados corrigidos em Quixeré-CE.....	69
Figura 47	- Dispersão do saldo de radiação horário (MODIS/Terra) obtido com a equação senoidal modificada e os valores observados sem correção para Quixeré-CE.....	70
Figura 48	- Dispersão do saldo de radiação horário (MODIS/Aqua) obtido com a equação senoidal modificada e os valores observados corrigidos para Quixeré-CE.....	70

LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 1 - Coeficientes de conversão do albedo espectral para albedo (Fonte: Liang <i>et al.</i> , 1999).....	21
TABELA 2 - Porcentagem absoluta entre valores instantâneos estimados e observados de radiação global	39
TABELA 3 - Valores estimados, diferenças em $W\ m^{-2}$ e porcentagem absoluta entre valores estimados e observados na Fazenda Frutacor em Quixeré	57
TABELA 4 - Porcentagem absoluta de aproximação dos valores estimados para o CDRn.....	62
TABELA 5 - Valores médios diurnos do saldo de radiação observados e estimados	66
TABELA 6 - Comparação entre os valores médios diários de R_n e os valores observados	67

LISTA DE QUADROS

	Pág.
QUADRO 1 - Função de cada sensor a bordo do satélite Terra (Fonte: site MODIS Atmosphere).....	11
QUADRO 2 - Características dos sensores a bordo do satélite Aqua (Fonte: <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>).....	12
QUADRO 3 - Características radiométricas do sensor MODIS e suas aplicações.	14
QUADRO 4 - Produtos MODIS utilizados no cálculo do saldo de radiação.....	17
QUADRO 5 - Características dos dados dos produtos MODIS (TERRA e AQUA).....	19
QUADRO 6 - Canais MODIS utilizados para inferência de perfis atmosféricos (Fonte: Souza, 2001)	23
QUADRO 7 Localização das estações meteorológicas.....	30
QUADRO 8 - Características do albedo (%) para diferentes tipos de superfície (Fonte: Oliveira <i>et al.</i> , 2001).....	33
QUADRO 9 - Horário de passagem dos satélites (UTC) em décimos de hora.....	45

LISTA DE SIMBOLOS

t_{passagem}	- Hora de passagem do satélite
α	- Refletância da superfície terrestre
h	- Hora
t	- Tempo
K	- Kelvin
R_C^\downarrow	- Radiação de onda curta incidente
R_C^\uparrow	- Radiação de onda curta refletida
R_L^\downarrow	- Radiação de onda longa incidente
R_L^\uparrow	- Radiação de onda longa emitida
R_n	- Saldo de radiação
%	- Porcentagem
τ_{SW}	- Transmissividade de onda curta da atmosfera
S_0	- Constante solar
θ	- Ângulo zenital solar
e_0	- Pressão parcial do vapor d'água
d	- Espessura ótica da camada
hPa	- Hectopascal
L_v	- Calor latente de vaporização da água
R_v	- Constante de vapor de água
ϵ_a	- Emissividade do ar
ϵ_s	- Emissividade da superfície
T_a	- Temperatura do ar
T_s	- Temperatura da superfície
σ	- Constante de Steffan-Boltzmann
$R_{n_{\text{max}}}$	- Valor máximo de R_n
t_{nasc}	- Horário do nascer do sol
$t_{\text{pôr}}$	- Horário do ocaso do sol
R_{ni}	- Saldo de radiação instantâneo
R_{nMD}	- Saldo de radiação médio diário

N	- Fotoperíodo
δ	- Declinação do Sol
F	- Fração angular
DA	- Dia do ano

LISTA DE ABEVIATURAS E SIGLAS

AIRS	- Atmospheric Infrared Sounder
AMSR-E	- Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSU	- Advanced Microwave Sounding Unit
ASTER	- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	- Advanced High Resolution Radiometer
a_1	- Coeficiente de Regressão
b_1	- Coeficiente de Regressão
BRDF	- Bidirectional Reflectance Distribution Function
CE	- Ceará
CERES	- Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DAS	- Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DNOCS	- Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
EMQ	- Erro Médio Quadrático
EOS	- Earth Observing System
ESAM	- Escola Superior de Agricultura de Mossoró
ESE	- Earth Science Enterprise
ET	- Evapotranspiração
ETR	- Equação de Transferência Radiativa
EVI	- Enhanced Vegetation Index
FUNCEME	- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
G	- Fluxo de calor no solo
GDAAC	- Goddard Distributed Active Archive Center
GHz	- Gigahertz
GOES	- Geostationary Operational Environmental Satellite
H	- Calor sensível
HDF	- Hierarchical Data Format
HSB	- Humidity Sounder for Brazil
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVDN	- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

K	- Índice K
LE	- Calor latente
LI	- Índice de levantamento
LPDAAC	- Land Processes Distributed Active Archive Center
MISR	- Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MODIS	- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	- Measurements of Pollution in the Troposphere
MSS	- Multi-Spectral Scanner
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NBAR	- Nadir BRDF - Adjusted Reflectances
NEB	- Nordeste do Brasil
NIR	- Near Infrared
PI	- Piauí
R ²	- Coeficiente de Determinação
RG _{max}	- Radiação Global Máxima
RG	- Radiação Global
RN	- Rio Grande do Norte
R _n	- Saldo de Radiação
R _{ni}	- Saldo de Radiação Instantâneo
R _{nMD}	- Saldo de Radiação Médio Diário
SEBAL	- Surface Energy Balance Algorithm for Land
SSEC	- Space Science and Engineering Center
SWIR	- Shortwave Infrared
TIR	- Thermal Infrared
TM	- Thematic Mapper
TSV	- Tempo Solar Verdadeiro
UTC	- Universal Time Coordinate

DETERMINAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL COM PRODUTOS DO SENSOR MODIS TERRA E AQUA

RESUMO

A energia proveniente do Sol é a componente mais importante no desenvolvimento dos processos físicos que influenciam as condições de tempo e clima na Terra. O saldo de radiação é um dado indispensável à estimativa da evapotranspiração e ainda é responsável pelo aquecimento do solo e do ar. O objetivo deste trabalho é utilizar uma metodologia proposta por Bisht *et al.* (2005) para estimar, não somente o saldo de radiação e a radiação global em superfície no instante da passagem do satélite, mas também a distribuição temporal e espacial sobre grandes áreas heterogêneas em dias de céu claro. O estudo foi aplicado ao Estado do Ceará para cinco dias de céu claro, utilizando um total de nove imagens (4 MODIS/Aqua e 5 MODIS/Terra) e validado com dados observados em 9 estações apresentando resultados satisfatórios uma vez que se utilizaram somente produtos gerados por interpretação das imagens de satélite. A radiação global instantânea foi superestimada, mas apresentou precisão de 83,4% e 86,9% pelo MODIS/Terra e pelo MODIS/Aqua respectivamente. Quanto ao ciclo diurno da radiação global, os valores obtidos para os coeficientes de determinação foram 0,931 e 0,925 para o MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente. Os valores máximos de aproximação em porcentagem absoluta foram 98,1% e 96,4% para o MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente. O saldo de radiação instantâneo, calculado no instante da passagem MODIS/Terra (Fazenda Frutacor localizada em Quixeré), variou entre 719 W m⁻² e 822 W m⁻² e pelo MODIS/Aqua variou entre 601,5 W m⁻² e 707,1 W m⁻². O ciclo diurno do saldo de radiação estimado pelos dois satélites apresentou coeficiente de determinação igual a 0,79 quando comparado com dados observados (sem nenhuma correção de nuvens), mas quando o saldo de radiação horário observado foi corrigido pelo modelo senoidal, o coeficiente de determinação aumentou para 0,85. Os valores do saldo de radiação médio diurno variaram entre 74,5% (103,7 W m⁻²) e 98,8% (5,6 W m⁻²) de precisão. A metodologia aplicada foi capaz de estimar a radiação solar global e o saldo de radiação, por imagens de satélite, apresentando resultados instantâneos aceitáveis durante o período de estiagem, na maioria das estações. Este estudo conseguiu reduzir de cinco para três o número de produtos MODIS que Bisht *et al.* (2005) utilizaram para estimar saldo de radiação em superfície, conseguindo dessa forma, diminuir o tempo de aquisição das imagens e o espaço para armazenamento das mesmas em disco, tornando o processo mais operacional.

Palavras-chave: Saldo de radiação, Sensoriamento remoto, Radiação solar

DETERMINATION OF THE NET RADIATION AND GLOBAL SOLAR RADIATION WITH IMAGES OF PRODUCTS MODIS TERRA AND AQUA

ABSTRACT

The energy from the Sun is the most important component in the development of the physical processes that influence the conditions of weather and climate in the Earth. The net radiation - R_n is indispensable for assessment of evapotranspiration and is responsible for heating the soil and the lower portions of the atmosphere. The objective of this work is the determination of R_n according to a methodology proposed by Bisht et al. (2005), using satellite images. The R_n is estimated for the satellite overpass and for the daily period, under heterogeneous areas for clear sky days. The study was applied to Ceará State for five days with clear sky, using a total of 9 images (4 MODIS/Aqua and 5 MODIS/Terra). The results were validated with data collected in 9 weather stations, distributed spatially, and presented good agreement with the methodology proposed. The instantaneous solar global radiation was overestimated for the methodology with MODIS/Terra and MODIS/Aqua images, but presented precision of 83,4% and 86,9%, respectively. With relationship to the diurnal cycle of the global radiation, the values obtained for the determination coefficients by MODIS/Terra and MODIS/Aqua they were 0,931 and 0,925, respectively. The maximum values of approach in absolute percentage were 98,1% and 96,4% for MODIS/Terra and MODIS/Aqua, respectively. The instantaneous radiation balance calculated in the instant of the passage MODIS/Terra (Farm Frutacor located in Quixeré) it varied among 719 W m^{-2} (85,7%) and 822 W m^{-2} (99,4%), meaning differences of $96,7 \text{ W m}^{-2}$ and $4,1 \text{ W m}^{-2}$, respectively and for MODIS/Aqua it varied between $601,5 \text{ W m}^{-2}$ and $707,1 \text{ W m}^{-2}$, values those that were satisfactory. The cycle of the day of the clear net radiation for the two satellites presented same correlation coefficient to 0,79 when it was compared with the observed data (without any correction of clouds), but when the data of net radiation observed schedules were corrected, for the model senoidal, the determination coefficient increased for 0,85. To the net radiation average daily the values varied among 74,5% ($103,7 \text{ W m}^{-2}$) and 98,8% ($5,6 \text{ W m}^{-2}$) of precision. The applied methodology was capable to estimate the global solar radiation and the radiation balance, for satellite images, presenting acceptable instantaneous results during the drought period, in most of the stations. This study got to reduce, of five for three, the number of products MODIS that Bisht et al, (2005) they used to estimate the net radiation in surface, getting in that way, to reduce the necessary time to acquire the images and the necessary space in disk for storage of the same ones, turning most operational the process.

Key-words: Net radiation, Remote sensing, solar radiation

1 INTRODUÇÃO

A energia proveniente do sol é o fator mais importante no desenvolvimento dos processos físicos que influenciam as condições de tempo e clima na Terra. Assim, pode-se afirmar que de forma geral todos os fenômenos físico, químicos, físico-químicos e biológicos ocorridos no solo estão direta ou indiretamente relacionados com a quantidade de radiação solar incidente sobre a sua superfície (Pezzopane, 2003; Leitão *et al.*, 2000). O saldo de radiação é um dado fundamental à estimativa da evapotranspiração, pois é a principal fonte de energia a ser repartida no aquecimento do solo, do ar e na evapotranspiração.

O saldo de radiação (R_n) representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre sendo definido como o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície (Klein *et al.*, 1977; Weligepolage, 2005) o qual é um componente fundamental para a estimativa do balanço de energia na superfície, previsão do tempo e aplicação na agricultura.

Ao longo do dia, nas horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, pois os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores às frações refletidas e emitidas. Por outro lado, durante a noite, é comum que esses valores sejam negativos, pois o fluxo incidente passa a ser apenas atmosférico e a energia emitida pela superfície é superior a este, resultando em um saldo de radiação negativo (Geiger, 1961; Monteith e Unsworth, 1990; Pezzopane *et al.*, 1995; Kustas *et al.*, 1990).

Vários artigos descrevem como se determinam as necessidades hídricas de cultivos, principalmente em regiões áridas e semi-áridas, onde a água é fator limitante para a produção agrícola. Esses estudos resultaram na formulação de diversas equações, métodos e modelos que estimam a evapotranspiração, os quais produzem resultados com precisão variável e que dependem do saldo de radiação (Doorembos e Pruitt, 1977; Sharma, 1985; Moran *et al.*, 1996; Allen *et al.*, 1998, Bastiaassen *et al.*, 1996; Granger *et al.*, 2000; Jackson *et al.*, 1977; Seguin *et al.*, 1989 entre outros).

O sensoriamento remoto por satélites é uma das ferramentas mais promissoras para estimativas de vários parâmetros à superfície, tais como temperatura da superfície, albedo, saldo de radiação, evapotranspiração entre outros (Diak e Gautier, 1983; Gautier *et al.*, 1980; Jacobs *et al.*, 2000; Ma *et al.*, 2002), porém ainda necessitam de observações feitas em superfície para incremento nos modelos, por exemplo, o modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) criado por Bastiaansen *et al.* (1998).

O saldo de radiação combinado com os fluxos de calor no solo é capaz de estimar a evapotranspiração onde Bastiaansen *et al.* (1996), Jackson *et al.* (1977) e Seguin *et al.* (1989) elaboraram vários modelos para estimar a evapotranspiração baseados em observações de superfície, em que vários dos recentes modelos de evapotranspiração (ET) usam dados de sensoriamento remoto para sua estimativa (Jiang e Islam, 2001; Nishida *et al.*, 2003; Norman *et al.*, 2003). Contudo, todos estes modelos de ET requerem estimativas de saldo de radiação.

Bisht *et al.* (2005) propuseram um modelo senoidal para estimar o saldo de radiação para grandes áreas heterogêneas em dias de céu claro (ausência de nebulosidade) para todo período diurno a partir de produtos de dados gerados apenas com uma observação do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo do satélite Terra, utilizando um total de cinco produtos de dados do MODIS e nenhuma observação feita em superfície.

Tendo em vista a importância do conhecimento da radiação solar disponível, do saldo de radiação em superfície e sua média diária, principalmente para estimativas de evapotranspiração em regiões áridas e semi-áridas. Este trabalho utilizou a metodologia proposta por Bisht *et al.* (2005) usando os produtos dos sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) que estão a bordo dos satélites Terra e Aqua para estimar o saldo de radiação e radiação solar incidente na superfície não somente no instante da passagem dos satélites, mas também suas distribuições temporal e espacial

sobre o estado do Ceará, o qual é um dos Estados que possui características de clima árido e semi-árido no Brasil, validando com dados medidos em superfície os quais foram cedidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e obtidos pelo experimento de campo na fazenda Frutacor, em Quixeré-CE. Além disso, propôs reduzir a quantidade de produtos MODIS necessários e dessa forma reduziu o tempo de aquisição das imagens e o espaço em disco para armazenamento das mesmas, tornando o método mais operacional.

A partir desse método, as áreas com produções agrícolas poderão se beneficiar, de forma operacional, das informações necessárias de energia disponível e até evapotranspiração de cultura e assim aperfeiçoar o gerenciamento de seus recursos hídricos durante o processo irrigação e produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em princípio, pode-se definir sensoriamento remoto como sendo a técnica que permite a aquisição de informação sobre a natureza de objetos sem contato físico com os mesmos (Swain e Davis, 1978). No entanto, esta definição é muito ampla. Assim, adota-se, geralmente o conceito de que, sensoriamento remoto é restrito aos métodos que utilizam energia eletromagnética, na detecção e medidas dos elementos que compõem a superfície terrestre e a atmosfera, visto que o conhecimento de dados a respeito da disponibilidade de alimentos, água e condições ambientais é extremamente importante ao mundo atual (Mendes e Cirilo, 2001).

As imagens obtidas por sensores remotos podem ser consideradas dados brutos, que, para serem transformados em informações, necessitam ser analisados e interpretados. Essa interpretação consiste em identificação de objetos e atribuição de significado, onde na maioria das vezes o resultado dessa interpretação é apresentado em forma de mapas (Florenzano, 2002).

O sensoriamento remoto, com graus variados de precisão, tem gerado informações do uso da terra, estimativa de área irrigada, tipo de cobertura vegetal, estimativa de biomassa, produção agrícola, exigência hídrica de culturas, salinidade e outras variáveis físico-ambientais. Dentro desse contexto, tem trazido informações extremamente úteis aos legisladores, planejadores, formuladores de políticas públicas e a sociedade em geral (Bastiaanssen, 2000). A tarefa de proporcionar informação confiável e precisa com medidas feitas em pequenas áreas (pequenas fazendas, por exemplo) e generalizar para uma bacia hidrográfica completa, abrangendo milhões de hectares de terra irrigada, ainda é difícil, porém, a capacidade do sensoriamento remoto de identificar e

monitorar o crescimento vegetativo e outros parâmetros biofísicos relacionados tem experimentado um grande avanço nos últimos 20 anos, em que compreensivas revisões sobre aplicações do sensoriamento remoto no manejo de água na agricultura e hidrologia são apresentadas por Choudhury *et al.* (1994); Vidal e Sagardoy (1995); Kustas e Norman (1996), Rango e Shalaby (1998); Bastiaanssen (1998); Stewart *et al.* (1999); Ray e Dadhwal (2001).

As imagens obtidas através de sensoriamento remoto passaram a representar uma das formas mais viáveis de monitoramento ambiental em escalas local e global, devido à rapidez, eficiência, periodicidade e visão sinótica que as caracterizam. Nos últimos anos a estimativa da evapotranspiração em perímetros irrigados (escala regional), com base em imagens de satélite e algoritmos que estimam componentes do balanço de energia tal como saldo de radiação tem permitido a conversão de medidas instantâneas em informações do ciclo diurno e conseqüentemente em totais diários (Kustas *et al.*(1990); Bastiaanssen *et al.* (1998); Bastiaanssen, 2000; Rimóczi-Paál *et al.* (2005); Pinker *et al.* (1985) e Granger, 2000). Esses métodos têm usado observações feitas pelo Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário (GOES), pelo Radiômetro Avançado de Resolução Muito Alta (AVHRR) e outros. O presente estudo usa dados do Espectrômetro Imageador de Resolução Moderada (MODIS).

Pinker *et al.* (1985) derivaram o saldo de radiação diário no topo da atmosfera usando observações do GOES e correlacionaram com o saldo de radiação na superfície no Canadá e encontraram alta correlação entre os dois em dias de céu claro.

Muitas aplicações na agricultura e modelos de estimativa de ET precisam do saldo de radiação médio diário (RnMD) ou ciclos diurnos de saldo de radiação (CDRn). Jacobs *et al.* (2000) recuperaram ciclos diurnos de Rn usando observações de 30 em 30 minutos do GOES e Bisht *et al.* (2005) propuseram um modelo simples para estimar o saldo de radiação instantâneo sobre grandes áreas heterogêneas em dias de céu claro usando somente produtos de observações de sensoriamento remoto e conseguiu eliminar a necessidade de dados observados em superfície. Para isso, foram utilizados vários dados disponíveis dos produtos MODIS/Terra os quais contém informações de temperatura da superfície e emissividades das bandas 31e 32 (MOD11A1), perfil atmosférico (MOD07), albedo da superfície (MOD43B3), presença de aerossóis (MOD04) e informações de ângulo zenital e elevação da superfície (MOD03). Além disso, estimou o ciclo diurno e a média diurna do saldo de radiação com um modelo senoidal semelhante ao de Lagouarde e

Brunet (1983), criado para estimar temperatura de superfície, pelo qual o saldo de radiação médio diário foi estimado posteriormente, em que os resultados preliminares obtidos para grandes áreas foram coerentes com as observações feitas em superfície. O modelo senoidal teve a vantagem de exigir somente uma observação de satélite para reconstruir o ciclo diurno para dias de céu claro.

O sensor MODIS foi desenvolvido herdando toda experiência do AVHRR e do Landsat TM para fornecer conjuntos de dados globais diários de alta qualidade radiométrica e geométrica e trouxe grandes avanços na observação da Terra em resolução espacial de 250 m, 500 m e 1000 m, propiciando novas oportunidades para o sensoriamento remoto. A NASA tem investido no desenvolvimento de algoritmos mais eficazes para o MODIS, o qual pode prover novos conjuntos de dados para pesquisas das mudanças globais (Vermote *et al.*, 2002).

Os espectros na banda do visível e do infravermelho médio são fundamentais para compreensão da biosfera e sua dinâmica pelo uso do sensoriamento remoto. Desde 1980, as bandas no visível e no infravermelho próximo medidos pelo AVHRR e dados na faixa do visível e do infravermelho médio pelo *Thematic Mapper* (TM) e pelo *Multi-Spectral Scanner* (MSS) na série Landsat foram usadas para várias aplicações no estudo da vegetação, tipo de cobertura da superfície e uso da terra (Tucker, Gatlin e Schneider, 1984, citados em Vermote *et al.*, 2002).

Os métodos mais utilizados para se obter a distribuição geográfica da radiação solar envolvem basicamente medidas feitas por uma rede relativamente densa de estações meteorológicas, uso de fórmulas e constantes físicas ou sensoriamento remoto; porém, muitas constantes físicas somente podem ser avaliadas por um número muito pequeno de instituições especializadas, ao passo que medidas radiométricas de densidade de fluxo de radiação solar global são inexistentes em muitas regiões onde são necessárias, já o uso do sensoriamento remoto tem a vantagem de provê essa informação sem a necessidade de dados observados à superfície. Vários pesquisadores (Cervellini *et al.*, 1966; Ometto, 1968; Foster e Santos, 1985; Foster *et al.*, 1985; Laperuta Filho *et al.*, 1997), nos estados de Minas Gerais (Alves, 1981); Rio Grande do Norte (Espínola Sobrinho e Izídio, 1993); Santa Catarina (Braga *et al.*, 1987); Pará (Cardon e Maltez, 1987), além de outros estados (Tubelis e Nascimento, 1980), citados em Dantas *et al.*, 2003 têm feito uso da metodologia clássica de Angström para caracterizar o regime de distribuição de energia solar em suas regiões de estudo (Robinson, 1966; citado em Pereira *et al.*, 2002).

Zillman (1972) e Prata (1996) usaram esquemas de parametrização para estimar o fluxo de ondas curtas incidentes, emissividade atmosférica e radiação de ondas longas incidentes usando pressão do vapor da água, temperatura do ar, ângulo zenital solar e espessura ótica da camada, os quais encontraram resultados precisos comparados a outros esquemas de parametrização; Yang *et al.* (2001) desenvolveram e validaram um modelo para estimar a radiação global média diária e mensal utilizando como base o fotoperíodo; Kumar e Umanand (2005) desenvolveram um modelo teórico para calcular a radiação solar global em uma superfície horizontal utilizando como parâmetros de entrada a latitude e a coluna total de água precipitável do local, obtendo um erro de 20% quando utilizaram um intervalo de latitudes cobrindo muitas áreas da Índia, todos parâmetros utilizados nesses esquemas podem ser obtidos nos dados dos produtos MODIS e utilizados para estimativa da radiação global por produtos de satélite.

Leitão *et al.* (2000) desenvolveram um método experimental da Escola Superior de Agricultura de Mossoró (ESAM), em Mossoró, no Rio Grande do Norte, durante o ano e analisaram o comportamento do balanço de radiação solar na superfície de solo descoberto, em períodos representativos das quatro estações do ano. Observaram então que durante a primavera os componentes do saldo de radiação foram maiores em relação às outras estações, com exceção da radiação atmosférica, a qual foi máxima no outono. Nos períodos de inverno, verão e outono, a média da radiação global incidente à superfície do solo, comparada a da primavera, apresentou redução de 14%, 10% e 16%, respectivamente. Analisando o saldo de radiação, verificaram que ele se manteve no outono praticamente igual ao da primavera, apenas 0,8% menor, ao passo que no inverno e no verão sofreu redução de 6% e 33%, respectivamente. Já o albedo médio diário apresentou-se máximo no verão (21,7%) e mínimo no outono (16,6%).

Azevedo *et al.* (1993) determinaram relações entre a radiação solar global, saldo de radiação e fluxo de calor no solo caracterizando a partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente em videira conduzida em espaldeira em um dia característico do período seco, o calor latente (LE) representou 44% do Rn e o calor sensível (H), 48%. Em um dia chuvoso, o LE representou 86% do Rn e o H, 21%. Em um dia ensolarado, após um período de chuvas, LE e H foram, respectivamente, 68% e 29% do Rn. O fluxo de calor no solo (G) foi, em média, 5,7% e 1,3% do Rn para as ruas mantidas capinadas e com forro, respectivamente.

Li *et al.* (1993) utilizaram uma parametrização que relacionou o fluxo solar refletido no topo da atmosfera com o saldo de radiação solar na superfície utilizando dados de água precipitável e ângulo zenital solar e comparou com valores medidos em superfície, para céu claro ou nublado, o qual apresentou diferenças médias em cerca de 2 W m^{-2} e erro padrão para médias horárias variando entre 7% e 50% com um valor mediano maior que 20%, e concluiu que o modelo e a metodologia usada são válidas para qualquer região do mundo.

Souza *et al.* (1999) destacaram a importância das medidas de saldo de radiação em ambientes vegetados para caracterizar as disponibilidades térmicas e hídricas, fundamentais no entendimento das reações genótipo-ambiente, que determinam a produção e a produtividade da vegetação.

Estudos relacionados ao uso e manejo racional do sistema solo-água-planta-atmosfera, têm se intensificado nestas duas últimas décadas, onde vários pesquisadores nessa área (Azevedo, 1993, 2003; Allen *et al.*, 1998, 2002; Silva, 2000; Bastiaanssen, 2000 e Moura, 2001), têm realizado pesquisas direcionadas para a necessidade hídrica dos cultivos ou evapotranspiração. Deste modo, a estimativa dos componentes da evapotranspiração, tais como o balanço de energia e o saldo de radiação na superfície, é essencial em estudos que envolvam programação de irrigação, planejamento e manejo de recursos hídricos para uso agrícola, industrial e urbano, valorização ambiental, perda de água em reservatórios e escoamento superficial em estudos meteorológicos, climatológicos entre outros.

A quantificação das perdas de água de superfícies cultivadas para a atmosfera é um elemento muito valioso no planejamento de atividades agrícolas e no gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Para que se possa determinar esse importante elemento do ciclo hidrológico foram desenvolvidos diversos métodos, como o balanço de energia baseado na razão de Bowen, método das correlações turbulentas e outros, destinados à estimativa da evapotranspiração (ET) em pequena escala para os quais o conhecimento do saldo de radiação em superfície é fundamental. Desde 1960, dispõe-se de algoritmos que a partir da estimativa do R_n possibilitam a quantificação de ET em escala regional utilizando técnicas de sensoriamento remoto e imagens de satélite (Landsat - TM, NOAA - AVHRR, MODIS – Terra e outros) (Silva e Bezerra, 2005).

Nagler *et al.* (2005) utilizaram um modelo com dados de índice de vegetação dos produtos MODIS/Terra para estimar a evapotranspiração na vegetação ao longo do Middle Rio Grande no Novo México e também medidas de dados em estações na superfície para complemento dos cálculos e observou que o índice de vegetação melhorado, do inglês, *Enhanced Vegetation Index* (EVI), apresentou melhor relação do que o índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN), em que a equação de regressão multivariada para prever a evapotranspiração a partir o EVI e da temperatura do ar teve coeficiente de determinação igual a 0,82 para diversos locais, espécies e anos de estudo.

O algoritmo SEBAL é um esquema de parametrização de fluxos de calor na superfície baseado em medidas espectrais de satélite e tem sido utilizado para derivar os componentes do balanço de energia a partir de imagens do AVHRR sobre áreas irrigadas em várias regiões, sendo capaz de estimar o saldo de radiação e a evapotranspiração (Mohamed *et al.*, 2004). Segundo Savenije, 1997 podem ser usados três métodos para estimar a evaporação em escala regional os quais podem ser por interpolação, por sensoriamento remoto e por modelos hidrológicos, citado em Mohamed *et al.*, 2004.

O processo de evapotranspiração é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água e sabendo-se que radiação solar é a maior fonte de energia é de fundamental importância o conhecimento da distribuição do saldo de radiação em grandes áreas (Oliveira *et al.*, 2001), onde ao avaliar o efeito da radiação solar na evapotranspiração, deve-se considerar que a energia é dividida também para aquecer a atmosfera e o solo (Allen *et al.*, 1998).

A estimativa da variação espacial do saldo de radiação e conseqüentemente a evapotranspiração é fundamental para muitas aplicações em recursos hídricos e modelagem climática. A evaporação é uma variável chave não somente em determinações do balanço hídrico, mas também para estimar as interações entre solo, planta e atmosfera (Sellers *et al.*, 1996; citado em Mohamed *et al.*, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SATÉLITES TERRA E AQUA

Os satélites Terra e Aqua operam em órbita polar heliosíncrona, com inclinação de aproximadamente $98,2^\circ$, período orbital de 98,88 min e cruzamento equatorial aproximadamente às 10h30min e 13h30min, respectivamente. A altitude orbital média é de 705 km e a sua velocidade em relação ao solo é $6,7 \text{ km s}^{-1}$. A distância entre órbitas adjacentes é de 172 km e o ciclo de re-ocorrência é de 16 dias no equador (Fonte: MODIS Website).

O satélite Terra foi lançado em 1999, iniciando uma nova era do monitoramento da atmosfera, dos oceanos e dos continentes do globo terrestre, fornecendo observações globais e esclarecimentos científicos da mudança da cobertura do solo, produtividade global, variação e mudança do clima, riscos naturais e o ozônio da atmosfera através de observações feitas por cinco instrumentos a bordo.

Os instrumentos do satélite Terra têm como objetivo, fornecer medidas globais do sistema terrestre durante todo o ano, incluindo produtividade biológica continental e marítima, neve e gelo, temperatura da superfície, nuvens, vapor de água e cobertura do solo, além de tornar possível detectar, identificar e prever impactos humanos nesse sistema e mudanças climáticas. Esses instrumentos propiciam o desenvolvimento de tecnologias para a prevenção de diversos desastres naturais.

Os cinco sensores a bordo do satélite Terra são: ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), CERES (*Clouds and the*

Earth's Radiant Energy System Network), MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*), MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*) e MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) os quais têm suas funções descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Função de cada sensor a bordo do satélite Terra (Fonte: site MODIS Atmosphere)

Disciplina	Medidas	Instrumentos TERRA
Atmosfera	Propriedades das nuvens	MODIS, MISR, ASTER
	Fluxo de energia e radiação	CERES, MODIS, MISR
	Precipitação	-
	Química da troposfera	MOPITT
	Química da estratosfera	-
	Propriedades dos aerossóis	MISR, MODIS
	Temperatura da atmosfera	MODIS
	Umidade da atmosfera	MODIS
	Relâmpago	-
Solo	Cobertura e uso da terra	MODIS, MISR, ASTER
	Dinâmica da vegetação	MODIS, MISR, ASTER
	Temperatura da superfície	MODIS, ASTER
	Ocorrência de incêndios	MODIS, ASTER
	Umidade da superfície	-
Oceano	Temperatura da superfície	MODIS
	Fito plancto e material orgânico dissolvido	MODIS, MISR
	Ventos (na superfície)	-
	Topografia da superfície do oceano	-
Criosfera	Mudança do gelo na terra	ASTER
	Gelo do mar	MODIS, ASTER
	Cobertura de neve	MODIS, ASTER

O satélite Aqua foi lançado em 04 de maio de 2002 e faz parte do projeto *Earth Science Enterprise* (ESE) da NASA que se propõe a coletar e interpretar dados, buscando compreender a dinâmica terrestre e as mudanças globais causadas pela atuação humana ou pela própria natureza. O Aqua segue uma recente tendência em satélites de monitoramento, que é a de incluir vários sensores a bordo da mesma plataforma espacial, como AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*), MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*), AMSU (*Advanced Microwave Sounding Unit*), AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), HSB (*Humidity Sounder for Brazil*) e CERES (*Clouds*

and the Earth's Radiant Energy System), desenvolvidos por vários países e com distintas aplicações (Fonte: Embrapa).

O Quadro 2 contém informações das principais características dos sensores a bordo do satélite Aqua.

Quadro 2 - Características dos sensores a bordo do satélite Aqua (Fonte: *Japan Aerospace Exploration Agency*)

SENSOR	PROPRIEDADES	FAIXAS DE MEDIDA
AMSR-E	Vapor de água, precipitação, nuvens, temperatura da superfície do mar, vento em superfície do oceano, superfície de gelo, fluxo de energia radiativa, etc.	Visualiza em 12 canais em seis frequências diferentes no intervalo de 6,9 a 89 GHz.
AIRS	Umidade e temperatura da atmosfera, temperatura das superfícies do oceano e do continente, fluxo de energia radiativa das nuvens.	Mede simultaneamente em mais de 2.300 canais espectrais no intervalo de 0,4 a 15,4 μm , adquirindo vários parâmetros meteorológicos.
AMSU	Umidade e temperatura da atmosfera	Utiliza 15 canais diferentes no intervalo de 50 a 90 GHz
CERES	Fluxo de energia radiativa	Sensor de duas propriedades, um escaneamento na passagem do satélite aliado com um escaneamento azimutal.
HSB	Umidade da atmosfera	Medidas em 5 canais diferentes com intervalo entre 150 e 183 MHz
MODIS	Nuvens, fluxo de energia radiativa, aerossol, mapa de uso e de cobertura da superfície, dinâmica da vegetação, temperatura da superfície do solo, cor do oceano, cobertura de neve e gelo, perfil de umidade e temperatura da atmosfera, gelo do mar.	Visualiza em 36 bandas espectrais de 0,4 a 14 μ

3.2 SENSOR MODIS

O sensor MODIS é o principal instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua e realiza observações de toda a superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, em 36 bandas espectrais, que se situam entre 0,4 e 14,4 μm , distribuídos em diferentes grupos de resolução espacial, os quais podem ser observados no Quadro 3. Estes dados contribuem para melhorar nossa compreensão da dinâmica global e os processos que ocorrem na superfície, nos oceanos e na atmosfera mais baixa.

3.2.1 - Características Gerais do Sensor MODIS

(a) O tamanho do pixel em terra varia de 250 a 1000 m (no nadir do satélite) para as distintas bandas.

(b) A largura da área observada é de 2.330 km e a quantidade de pixel (pontos) na imagem varia para as distintas bandas.

(c) O comprimento da área observada depende dos instantes de início e fim do imageamento. Como consequência da variação do tamanho do pixel com a banda, o número de linhas varia para as distintas bandas.

(d) A resolução temporal é de 1 a 2 dias para imagear todo o globo terrestre.

(e) A câmara MODIS conta com 36 bandas espectrais.

(f) Os valores da radiância do sensor para cada uma das bandas estão no Quadro 3. Estes valores podem mudar lentamente com o tempo, devido à degradação própria dos sistemas de captação e pela exposição à radiação.

No Quadro 3 as bandas foram ordenadas de acordo com os comprimentos de onda. As bandas 1-19 e 26 formam o conjunto de bandas refletivas. As bandas 20-25, 27-36 formam o conjunto de bandas emissivas.

O formato para distribuição dos produtos MODIS é o HDF (*Hierarchical Data Format*). O formato HDF é um formato que independe da plataforma utilizada e sua estrutura lógica o converte em um dado auto-descritivo, permitindo a inclusão de uma grande quantidade de dados de diferentes tipos e origens em um mesmo arquivo. Um arquivo HDF contém, além das imagens propriamente ditas, dados de calibração, navegação, informações a respeito da missão, características do sensor, indicadores de qualidade, tipo e lugar do processamento, estação receptora, tempo de início e fim da tomada da imagem e referências geográficas, entre outros (Engesat-Modis).

Quadro 3 - Características radiométricas do sensor MODIS e suas aplicações

Banda N°	Amplitude de onda (nm)	Radiância Espectral (W/m ² .µm.sr)	Principais usos	Resolução espacial (m)	Píxeis na imagem	Número de linhas da imagem
1	620 - 670	21,8	Limites de Terra, Nuvens Aerossóis	250	5416	> 20000
2	841 - 876	24,7				
3	459 - 479	35,3	Propriedades da Terra, Nuvens, Aerossóis	500	2708	> 10000
4	545 - 565	29,0				
5	1230 - 1250	5,4				
6	1628 - 1652	7,3				
7	2105 - 2155	1,0				
8	405 - 420	44,9	Biogeoquímica Cor do Oceano, Fitoplâncton	1000	1354	> 5000
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				
16	862 - 877	6,2	Vapor de Água Atmosférico	1000	1354	> 5000
17	890 - 920	10,0				
18	931 - 941	3,6				
19	915 - 965	15,0	Temperatura de Superfície e Nuvens	1000	1354	> 5000
20	3660 - 3840	0,45 (300K)				
21	3929 - 3989	2,38 (335K)				
22	3929 - 3989	0,67 (300K)				
23	4020 - 4080	0,79 (300K)	Temperatura Atmosférica	1000	1354	> 5000
24	4433 - 4498	0,17 (250K)				
25	4482 - 4549	0,59 (275K)				
26	1360 - 1390	6,0	Vapor de Água Nuvens Cirrus	1000	1354	> 5000
27	6535 - 6895	1,16 (240K)				
28	7175 - 7475	2,18 (250K)	Propriedades das Nuvens	1000	1354	> 5000
29	8400 - 8700	9,58 (300K)				
30	9580 - 9880	3,69 (250K)	Ozônio	1000	1354	> 5000
31	10780 - 11280	9,55 (300K)	Temperatura de Superfície, Nuvens			
32	11770 - 12270	8,94 (300K)		Altitude Máxima das Nuvens	1000	1354
33	13185 - 13485	4,52 (260K)				
34	13485 - 13785	3,76 (250K)				
35	13785 - 14085	3,11 (240K)				
36	14085 - 14385	2,08 (220K)		1000	1354	> 5000

As medições nas classes visível, infravermelho médio e infravermelho próximo são realizadas somente durante o dia e as radiâncias para o campo do infravermelho termal são realizadas de forma contínua.

Os produtos MODIS georreferenciados contêm coordenadas geodésicas, elevações do terreno, ângulo zenital solar e do satélite e ângulo azimutal para cada amostra de imagens MODIS com resolução de 1 km. Estes dados são fornecidos juntamente com o conjunto de dados das radiâncias calibradas do nível 1B para se chegar ao processamento de níveis mais altos (Envi – MODIS).

O sensor MODIS possui três sistemas de calibração a bordo: um difusor solar, juntamente com um monitor de estabilidade do difusor solar; um corpo negro e um sistema de calibração espectrorradiométrica. Na Figura 1 observa-se o esquema do sensor.

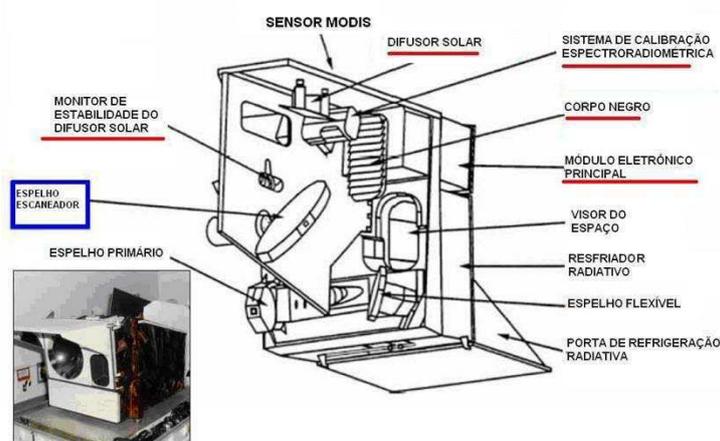


Figura 1- Esquema do sensor MODIS (Fonte: NASA)

3.3 DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS MODIS (TERRA E AQUA)

Dentre os vários produtos MODIS, os índices de vegetação como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) e o índice de área foliar, por exemplo, produtos de perfil da atmosfera, albedo da superfície, produtos de geolocalização, temperatura da superfície e emissividade podem ser utilizados para cálculos de estimativa dos componentes do balanço de radiação e, conseqüentemente, do balanço de energia à superfície (MODIS Website).

Neste estudo, foram utilizados produtos do sensor MODIS que serviram como parâmetros, ou como dados de entrada para estimar outros parâmetros, utilizados para o cálculo da radiação solar global e saldo de radiação na superfície. Para obtenção da radiação solar global, assim como do saldo de radiação em superfície, são necessárias

informações de parâmetros meteorológicos da superfície e da atmosfera terrestre. Esses dados são cedidos como produtos obtidos a partir de imagens de satélite em formato hdf pelo LPDAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) da NASA, através do site <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>. Todos os produtos MODIS recebem uma denominação específica. Como exemplo, o MOD11, MOD07, MOD09GHK, MOD43B3 e MOD05. Para identificar as informações de cada imagem é necessário interpretar as informações contidas em cada grupo de dados que integram o cabeçalho de cada imagem. Considere-se a nomenclatura do seguinte arquivo:

MOD11A1.A2005283.h14v09.004.2005285031124.hdf

O primeiro grupo representa o nome do produto = MOD11A1; o segundo identifica o ano e dia de ordem do ano de obtenção da imagem: 2005283; o seguinte indica a localização = h14v09; o quarto indica versão do produto = 004; o quinto representa a data de preparação dos dados = 2005285 (ano e dia); o próximo grupo é um código indicativo de tempo; e por último o formato da imagem= .hdf.

Para os produtos do satélite Aqua, substitui-se na nomenclatura a palavra MOD por MYD. Esses produtos são organizados em mosaicos denominados “*tiles*”, e variam de 0 a 35 na horizontal e de 0 a 17 na vertical, conforme se pode ver na Figura 2.

É importante observar que os produtos MODIS utilizados neste estudo são todos calibrados e corrigidos atmosféricamente antes de serem cedidos aos centros de distribuição (MODIS Website). Todos esses produtos são validados com observações feitas em superfície nos mais diversos ambientes. Para tornar o processo mais operacional a presente metodologia utilizou esses produtos pré-processados a fim de economizar tempo de processamento.

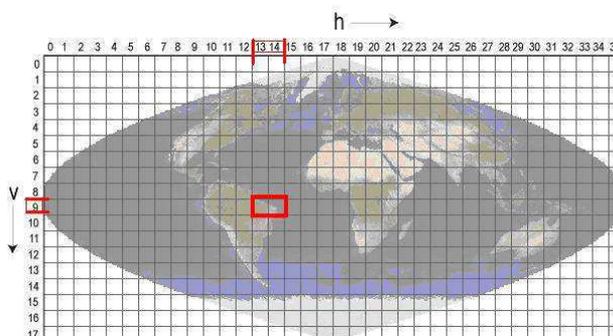


Figura 2 - Organização dos produtos de superfície MODIS (Aqua e Terra) (Fonte: NASA)

Para o processamento dos produtos MODIS podem ser utilizados softwares de processamento de imagens, tais como o ENVI, ERDAS, o PCI Geomatics dentre outros, os quais podem ler diretamente o formato hdf. Outras ferramentas livres para leitura e conversão do formato hdf estão disponíveis no site da USGS <http://edc.usgs.gov/programs/sddm/shtml>. Uma breve descrição dos produtos utilizados é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Produtos MODIS utilizados no cálculo do saldo de radiação

AQUA	TERRA	Produto	Resolução
MYD11A1_L3 MYD11B1_L3	MOD11A1_L3 MOD11B1_L3	*Temperatura da superfície e emissividade das bandas 29, 31 e 32. Hora de passagem do satélite.	1 km x 1 km (espacial) Diariamente
MYD07_L2	MOD07_L2	**Temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e ângulo zenital.	5 km x 5 km (espacial) Diariamente
MCD43B3_L3	MCD43B3_L3	*Albedo TERRA+AQUA	1 km x 1 km (espacial) Média de 16 dias (temporal)

*Produto MODIS/ superfície

**Produto MODIS/ atmosfera

Os produtos de superfície MOD11A1_L3, MYD11B1_L3 e MCD43B3_L3, são fornecidos em projeção senoidal, com esferóide WGS 84 e datum WGS 84.

A região de estudo está inserida nos “tiles” v09_h13 e v09_h14, onde cobre todo o estado do Ceará e outros estados do Nordeste brasileiro, total e parcialmente.

Os produtos da atmosfera MOD07_L2 e MYD07_L2 são fornecidos numa versão menos processada, no que se refere à organização das imagens no espaço, ou seja, esse produto é distribuído sem estar em “tiles” pré-definidos, e sim na forma em que o satélite captura a imagem na hora de sua passagem. A área abrangida por cada imagem desse produto possui resolução espacial de 5 km por 5 km para cada pixel da imagem (Figura 3). Esse produto é distribuído em projeção geográfica (lat/lon), esferóide WGS 84 e datum WGS 84. Mais detalhes sobre os sistemas de coordenadas geográficas é encontrado no site da Geodetic Datum Overview.

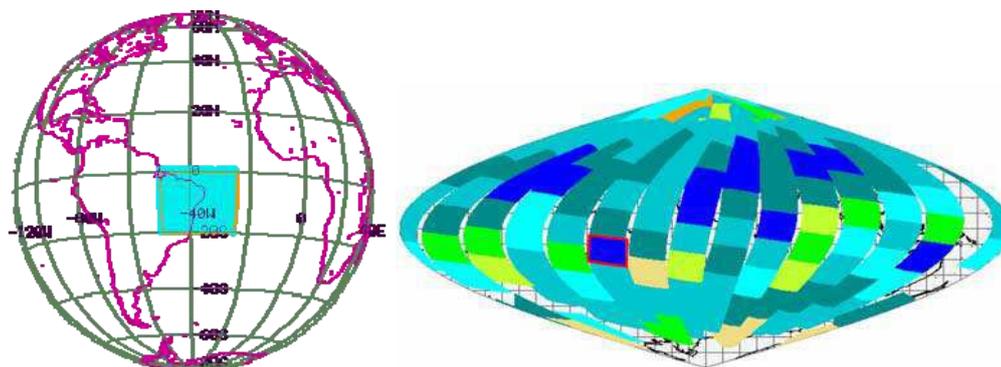


Figura 3 - Distribuição espacial do produto de perfil atmosférico MOD07_L2 (Fonte: NASA)

Todas as imagens foram re-projetadas geograficamente e tiveram o tamanho de seus pixels redimensionados para 1 km² através da ferramenta “*data preparation>reproject images*” presente no programa de tratamento de imagens de satélite ERDAS IMAGINE.

3.3.1-Temperatura e emissividades de superfície (Produto MODIS MOD11A1 e MYD11A1)

Os produtos MOD11A1 e MYD11A1 contêm informações de temperatura da superfície e de emissividade para as bandas 31 e 32 em resolução espacial de 1 km e 5 km, respectivamente, para regiões sem cobertura de nuvens. O *split-window* generalizado é usado para calcular a temperatura da superfície para esse pixels, com as emissividades das bandas 31 e 32 (Wan *et al.* 2002). Isso é uma extensão do *split-window* proposto por Becker e Li (1990) para o AVHRR e para ângulo de visada de até 46° do nadir, levando em consideração a dependência da estimativa de temperatura de superfície com o ângulo de visada. Os fundamentos físicos usados no algoritmo para obtenção da temperatura diurna e noturna são usados para estimar, simultaneamente, bandas de emissividade e temperatura com um par de observações matinais e noturnas do MODIS, nas bandas 20, 22, 23, 29, 31 e 32 (Wan *et al.*, 2002).

Segundo Wan *et al.* (2002) a média das bandas de emissividade 31 e 32 pode levar a uma superestimativa da emissividade da superfície terrestre, especialmente em regiões áridas e semi-áridas. Nesse sentido, foi utilizada a emissividade média das bandas 29, 30 e 31.

Foram usados, ainda, dados dos produtos MOD11A1 e MYD11A1 (carta da hora de passagem do satélite, temperatura da superfície e emissividade 31 e 32, em uma resolução de 1 km) e MOD11B1 e MYD11B1 (emissividade na banda 29 com resolução de 5 km) em um nível de processamento 3 e versão 4, fornecido em projeção senoidal diariamente (incluindo dia e noite), embora tenha sido utilizado somente o produto na hora da passagem diurna do satélite. Com o produto MOD11A1, também acompanham vários tipos de dados, tais como temperatura da superfície em suas passagens diurna e noturna, controle de qualidade para a temperatura e emissividade diurna e noturna, hora de passagem do satélite em cada pixel, ângulo zenital do sensor na hora do imageamento, cobertura do céu, emissividades nas bandas 31 e 32. O produto MOD11B1_L3 inclui, além disso, a emissividade nas bandas 20, 22, 23, 29, 31 e 32, as quais são fornecidas com resolução espacial de 5 km.

Para obter uma imagem com os valores apropriados de cada parâmetro, é necessário realizar um pré-processamento dos produtos e gerar uma imagem final conforme a fórmula dada a seguir:

$$\text{Imagem final} = (\text{Produto MODIS} * \text{Fator multiplicativo}) + \text{Fator adicional} \quad (1)$$

As características dos dados dos produtos utilizados para a estimativa do saldo de radiação estão listadas no Quadro 5, tais como suas unidades de medida, tipo de transmissão dos dados e fatores (multiplicativo e adicional) de conversão.

Quadro 5 – Características dos dados dos produtos MODIS (TERRA e AQUA)

Dados MOD11B1 e MYD11B1	Dados MOD11A1 e MYD11A1	Unidades	Grupo de dados	Fator multiplicativo	Fator adicional
Temperatura diária da superfície	Temperatura da superfície	Kelvin (K)	Inteiro_16 bits	0,020	-
-	Hora de observação	Horas (h)	Inteiro_16 bits	0,100	-
Emissividade na banda 29 (5 km)	Emissividade na banda 31	-	Inteiro_8 bits	0,002	0,490
-	Emissividade na banda 32	-	Inteiro_8 bits	0,002	0,490

3.3.2 - Albedo da superfície (Produto MODIS MCD43B3)

Os produtos MODIS MCD43B3 são armazenados em resolução de 1 km e são computados com base nas sete primeiras bandas espectrais desse sensor (bandas 1 a 7) de onde são produzidos albedos compreendendo diferentes faixas espectrais, quais sejam: 0,47 a 2,1 μm , 0,3 a 0,7 μm , 0,3 a 5,0 μm e 0,7 a 5,0 μm .

O produto com dados de albedo fornecido pelo MODIS (Terra e Aqua) e os dados de Função de Distribuição da Refletância Bidirecional (BRDF) é chamado MCD43B, e é um produto MODIS disponibilizado a partir do ano 2000, logo após o lançamento do satélite Terra. Esse produto é produzido a cada 16 dias em resolução espacial de 1 km e arquivado em mosaico de áreas iguais de 1.200 x 1.200 pixels em projeção senoidal e senoidal integrado. Atualmente, três produtos de albedo são disponíveis, como modelo de parâmetros BRDF (MCD43B1), albedo global (MCD43B3) e função de distribuição bidirecional da refletância ajustada no nadir (MCD43B4) (Schaaf *et al.*, 2002).

Neste estudo, foram utilizados os dados do produto MCD43B3, o qual consiste de refletância direcional hemisférica e a refletância bihemisférica. Para as sete bandas espectrais (bandas de 1 a 7) e três bandas largas 8, 9 e 10 (0,30 a 0,7; 0,7 a 3,0 e 0,3 a 5,0 μm), em que a refletância direcional hemisférica e a refletância bihemisférica marcam os casos extremos de iluminação direta e difusa (Schaaf *et al.*, 2002).

Este produto vem com duas camadas de informações, onde a primeira contém informações do albedo diurno (bandas de 1_1 a 10_1) e noturno (1_2 a 10_2) e a segunda camada descreve os pontos da imagem que possuem maior precisão das estimativas do albedo.

Para calcular o albedo foi levada em consideração uma combinação linear de sete bandas espectrais do MODIS. Os coeficientes (Tabela 1) foram obtidos de Liang *et al.* (1999) e têm sido utilizados para estimar o albedo.

Schaaf *et al.* (2002) demonstraram que a adição de observações dos sensores dos dois satélites melhora a precisão das medidas do albedo da superfície apresentando melhores resultados quando comparados com os obtidos por medidas feitas somente pelo MODIS/Terra (MOD43B3) ou MODIS/Aqua (MYD43B3) e por este motivo utilizou-se o produto MCD43B3 o qual utiliza uma média de dezesseis dias dos dados dos

sensores MODIS a bordo dos dois satélites, dada a praticidade de se substituir dois produtos por um que satisfaça as exigências.

Tabela 1 - Coeficientes de conversão do albedo espectral para albedo

(Fonte: Liang *et al.*, 1999)

Bandas	Coefficiente de conversão
1	0,3973
2	0,2382
3	0,3489
4	-0,2655
5	0,1604
6	-0,0138
7	0,0682
Interceptação	0,0036

3.3.3 - Perfil da atmosfera (Produto MODIS MOD07 e MYD07)

O produto de perfil atmosférico do MODIS consiste de diversos parâmetros obtidos vários por algoritmos descritos com detalhes em Menzel *et al.* (2002), tais como: total de ozônio, estabilidade atmosférica e perfis de temperatura e umidade. Todos estes parâmetros são produzidos para o período diurno e noturno em resolução espacial de 5 km por 5 km. A nomenclatura dos produtos de perfil atmosférico do MODIS/Terra e MODIS/Aqua é MOD07_L2 e MYD07_L2, respectivamente (MODIS Website).

Uma das versões do algoritmo que utiliza informações do MODIS para fazer a inferência de perfis atmosféricos é híbrida, isto é, um modelo de regressão estatística, combinado com um modelo físico, que se baseia na solução da Equação de Transferência Radiativa (ETR), ainda em fase de desenvolvimento. A versão operacional utiliza apenas a regressão estatística e encontra-se instalada na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (DSA/CPTEC, <http://satellite.cptec.inpe.br>) e no “Goddard Distributed Active Archive Center” (GDAAC/NASA, <http://daac.gsfc.nasa.gov/MODIS>). Os perfis são inferidos a

partir de radiâncias de céu claro para cada conjunto de 5 por 5 píxeis do MODIS, com resolução de 5 km.

O método baseia-se nos trabalhos de Li *et al.* (2000) e Smith e Woolf (1976). O algoritmo atmosférico do perfil (MOD07), desenvolvido no “*Space Science and Engineering Center - SSEC*” na universidade de Wisconsin-Madison, executa estimativas estatísticas da temperatura atmosférica, umidade, coluna total do ozônio, água precipitável e diversos índices atmosféricos de estabilidade usando 12 canais espectrais infravermelhos com os comprimentos de onda entre 4,465 e 14,235 μm .

Uma clara vantagem de inferir perfis atmosféricos com o MODIS é a possibilidade de combinar informações de canais espectrais localizados na região do visível e do infravermelho, que possuem alta resolução horizontal (1 km no nadir), comparada a outros sondadores orbitais com resolução superior a 10 km. Por outro lado, a resolução vertical deixa a desejar, quando comparada com as dos sensores hiperspectrais. Conseqüentemente, a maior vantagem dos perfis MODIS (produto MOD07 e MYD07) encontra-se na definição de gradientes horizontais e na distribuição de variáveis integradas verticalmente na coluna atmosférica.

O procedimento de inferência de perfis atmosféricos envolve a linearização da ETR. Para obter os coeficientes da regressão estatística são utilizadas as radiâncias dos canais MODIS calculadas a partir de um conjunto de radiossondagens, gerando-se um banco de dados de radiâncias MODIS associadas com perfis atmosféricos observados. Maiores detalhes sobre o modelo de transferência radiativa utilizado para calcular estas radiâncias pode ser encontrado em Hammond *et al.* (1996) e Eyre e Woolf (1988).

O Quadro 6 lista os canais utilizados, sua respectiva banda espectral e valores típicos de temperatura e umidade para inferência de perfis atmosféricos em vinte níveis de pressão de 5 a 1000 hPa. Outros parâmetros atmosféricos, como por exemplo, o conteúdo total de vapor de água, de ozônio (integrados na coluna atmosférica) e índices de estabilidade atmosférica, podem ser calculados a partir das informações dos perfis inferidos pelo modelo estatístico (Souza, 2001).

Os índices de estabilidade são computados usando a temperatura e os dados do perfil de umidade derivados também do infravermelho. Os perfis da temperatura e da umidade de MODIS são produzidos em 20 níveis verticais (Seemann *et al.*, 2003). O produto atmosférico do vapor de água do MODIS é uma estimativa do vapor de água total na coluna troposférica a partir dos perfis atmosféricos da umidade em cenas desobstruídas.

Quadro 6 - Canais MODIS utilizados para inferência de perfis atmosféricos
(Fonte:Souza, 2001)

Aplicação Atmosférica	Canal	Banda Espectral (μm)	Valores Típicos Temperatura (K)	Valores Típicos Radiância ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m sr}$)
Perfil de Temperatura	24	4,433 – 4,498	250	0,17
	25	4,482 – 4,549	275	0,59
Perfil de Umidade	27	6,535 – 6,895	240	1,16
	28	7,175 – 7,475	250	2,18
	29	8,400 – 8,700	300	9,58
Ozônio	30	9,580 – 9,880	250	3,69
Temperatura da Superfície	31	10,780 – 11,280	300	9,55
	32	11,770 – 12,270	300	8,94
Perfil de Temperatura	33	13,185 – 13,485	260	4,52
	34	13,485 – 13,785	250	3,76
	35	13,785 – 14,085	240	3,11
	36	14,085 – 14,385	220	2,08

A Figura 4 representa a aparência da imagem do produto de perfil atmosférico, com suas várias camadas de diferentes informações empilhadas, sobre parte da América do Sul no dia 14 de outubro de 2005, por volta das 10h e 30 min em UTC, na qual se destaca o mapa do estado do Ceará.

É importante lembrar que a inferência das variáveis atmosféricas dos produtos MOD07 e MYD07 são efetuadas apenas sobre áreas livres de nuvem (céu claro), com resolução horizontal de aproximadamente 5 km.



Figura 4 – Exemplo da imagem do produto de perfil atmosférico (MOD07_L2) com todas suas camadas de dados

Os dados dos produtos MOD07 e MYD07 são também fornecidos pelo LPDAAC na seção MODIS atmosfera. Esses produtos vêm com 131 camadas empilhadas, contendo vários dados, como: hora do início do imageamento; ângulos zenital e azimutal do Sol; doze níveis de temperatura de brilho; máscara de nuvens; temperatura da superfície; pressão e elevação da superfície; altura da tropopausa; vinte níveis de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho e seus vinte níveis de altura; camada total de ozônio; índices de estabilidade e água precipitável.

3.3.4 - Seleção das imagens e dos dias de estudo

O critério adotado para seleção das imagens foi através da observação do produto MOD11A1 (temperatura e emissividade da superfície), o qual é um bom referencial, pois esse produto é disponível apenas para situação de céu claro.

Durante o processo de encomenda de imagens, existe a informação de cobertura de nuvens, porém nem sempre é satisfatório se orientar por esta informação, pois ainda existe a possibilidade de que o pouco de nebulosidade existente na imagem cubra a área de estudo.

Então, a escolha dos dias do estudo foi baseada principalmente nas imagens e nos dias em que as estações utilizadas para validação dos resultados apresentaram céu claro durante maior parte do dia.

O período da seleção das imagens foi entre os dias 01/09/2005 a 31/10/2005, no qual apresentaram melhores condições de céu claro. Dentro deste período foram selecionados os dias 10 e 25 de setembro e 10, 14 e 25 de outubro de 2005, dos quais o dia 10 de outubro apresentou céu claro para todas as estações.

Climatologicamente este é o período que possui menor ocorrência de precipitação (Figura 5) no Ceará, propiciando condições de céu claro ideais para este trabalho. É óbvio que a ausência de precipitação não significa que não ocorra nebulosidade, mas é menos provável que tenham tantas nuvens quanto num período chuvoso, e de fato, ocorreram nebulosidades parciais durante o dia, mas não foram registradas precipitações durante os dias escolhidos conforme se pode observar o comportamento da precipitação mensal de 2005 (Figura 6).

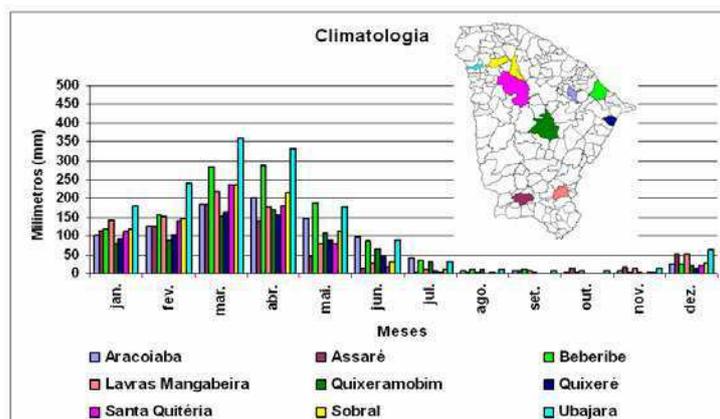


Figura 5 – Climatologia da precipitação média mensal nas estações em estudo

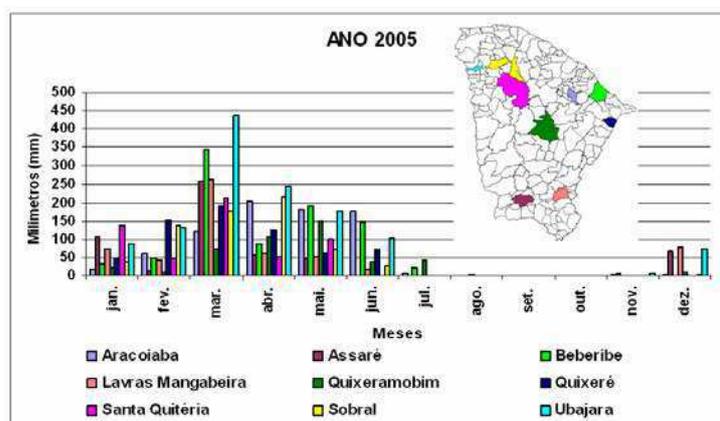


Figura 6 - Precipitação mensal durante o ano de 2005 nas estações

Os dados de precipitação foram obtidos junto à FUNCEME, através do site <http://www.funceme.br/DEPAM/index.htm>, o qual disponibiliza dados de séries climatológicas de precipitação das várias estações do estado do Ceará.

3.4 ÁREA DE ESTUDO

3.4.1 Localização

O estado do Ceará (Figura 7) está localizado na região Nordeste do Brasil (NEB), quase totalmente inserido no "Polígono das Secas". Localizado ao sul da linha do Equador, o Ceará limita-se a oeste com o Estado do Piauí, a sul com Pernambuco, a leste

com o Rio Grande do Norte e Paraíba, e a norte com o Oceano Atlântico, com uma extensão litorânea de aproximadamente 573 km.

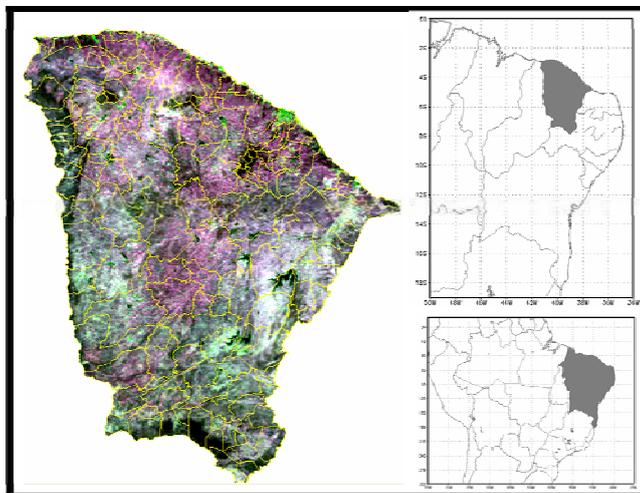


Figura 7 – Localização do Estado do Ceará

3.4.2 - Clima do Ceará

Os aspectos climáticos predominantes no Estado do Ceará são (Souza, 1987): (a) concentração das chuvas num curto período anual (de 3 a 5 meses), com uma média de precipitação de 775 mm e um coeficiente de variação de 30%; (b) médias térmicas elevadas, variando de 23°C a 27°C durante o ano; (c) forte insolação, numa média de 2.800 h/ano; (d) umidade relativa do ar com 82% no litoral e inferior a 70% no sertão.

Quanto ao clima no espaço estadual, constata-se que a presença de fatores como a altitude (que chega até 1.100m) e a proximidade do mar criam as condições climáticas mais favoráveis, com temperatura amena e regime pluviométrico mais regular. Assim, as temperaturas médias observadas são as seguintes: (a) Litoral, com clima quente e úmido, suas médias térmicas são de 26°C a 27°C, com máximas de 30°C e mínimas de 19°C; (b) Serras, com clima frio e úmido, têm médias térmicas em torno de 22°C, com máximas de 27° e mínimas de 17°C; (c) Sertão, de clima semi-árido e médias térmicas não definidas com média das máximas entre 32°C e 33°C e média das mínimas de 23°C (Souza, 1987).

3.4.3 - Relevo e Vegetação do Ceará

a) Topografia

Na configuração do relevo do Ceará, a progressão topográfica evolui de 0 (zero) a um pouco mais que 1.100 m de altitude, em que se podem distinguir nitidamente as planícies litorâneas, as depressões sertanejas de altitudes inferiores a 200m, os pés-de-serra que ficam entre 200 e 400m, e as serras, serrotes e planaltos, que chegam a alcançar uma altitude de 400 a 1.000 m acima do nível médio do mar (Souza, 1987). O ponto culminante do Ceará é o Pico do Oeste, com 1.145m de altura, localizado na Serra das Matas, no limite Santa Quitéria/Mosenhor Tabosa. Seguido dele, vem o Pico Alto, situado em Guaramiranga, com 1.114m.

b) Geologia

De um modo geral, a geologia do Ceará pode ser dividida em duas grandes unidades distintas: o cristalino (embasamento), composto por rochas antigas e que ocupam cerca de 74% do seu território, e o sedimentar (Souza, 1987)

c) Vegetação

A cobertura vegetal do Estado do Ceará compõe-se predominantemente das seguintes formações:

Caatinga: do tupi, mata branca, espalha-se por todo o espaço ocupando cerca de 70% de sua área. Suas características são de porte arbustivos, troncos retorcidos, folhas pequenas e caducifólias, xerófila (adaptada à escassez de água) e raízes profundas.

A caatinga hipoxerófila, que tem maior porte e densidade, aparece nas faixas de menos rigor climático, tais como a baixada litorânea e o sopé da Ibiapaba, (Souza, 1987). A caatinga hiperxerófila é a vegetação das regiões mais áridas, apresentando-se mais baixa e rala, bem como maior quantidade de espécies espinhosas;

Tem, ainda, como algumas de suas espécies principais: algaroba, mulungu, aroeira, marmeleiro, juazeiro, pau-branco, sabiá e pedreiro. As espécies cactáceas são: xique-xique, palma, facheiro e mandacaru.

Formações Florestais: em meio à aridez predominante, destacam-se as manchas verdes das florestas que cobrem as serras e os vales úmidos;

Vegetação de dunas, mangues e tabuleiros: ocupam espaços pouco representativos na área total do Estado.

- A vegetação de dunas é caracterizada pela predominância de coqueiros nas praias e pelas espécies como murici, salsa-de-praia, capim-da-praia, grama-da-areia, etc.
- Os tabuleiros são planaltos pouco elevados, arenosos e de vegetação rala.
- A vegetação de mangue é encontrada em áreas sob influência das marés, tendo como características porte arbóreo/arbustivo, pobre em variedade (mangue preto, mangue branco e mangue vermelho), higrófila (adaptada à umidade), halófila (adaptada à salinidade) e raízes suspensas.

Vegetação ciliar ou mata de galeria: ocorre como ocorrência dispersa em todo o Estado, ocupando os vales úmidos dos rios e riachos, formando densos povoamentos, nos quais a carnaúba, a oiticica, o juazeiro e o mulungu são espécies dominantes (Souza, 1987).

A área de estudo compreende o Estado do Ceará, onde serão feitas as estimativas da radiação solar global e comparadas com medidas feitas em nove estações distribuídas no Estado.

A estimativa do saldo de radiação para fins de comparação com medidas feitas em superfície foi feita somente para uma dessas estações, a qual é a única dentre elas que possui dados dos componentes do saldo de radiação e compreende os diversos projetos de irrigação, localizados na região do Baixo Jaguaribe, mais precisamente no município de Quixeré (Figura 6).

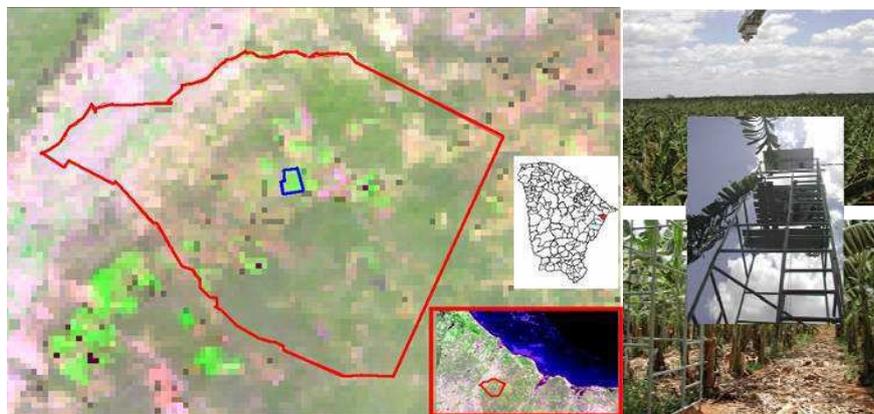


Figura 8 – Localização do Município de Quixeré e da Fazenda Frutacor

Segundo informações do DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca), o clima de Quixeré é do tipo BSw'h' de acordo com a classificação climática de Köppen. A temperatura média anual é de 28,5°C, com mínima de 22° C e máxima de 35°C. A precipitação média anual é em torno de 772 mm, com distribuição de chuvas muito irregular, através dos anos. A umidade relativa média anual é de 62%, a velocidade média dos ventos é de 7,5 m s⁻¹ e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm. A região tem uma insolação de 3.030 horas ano⁻¹. Os tipos de solos encontrados são o cambisol, o podzólico, e o litólico eutrófico. O relevo é plano com declividade dominante inferior a 2%, observando-se apenas pequenas áreas ligeiramente deprimidas com variação nas condições da morfologia geral da área. Ainda de acordo com informações do DNOCS, o suprimento hídrico do perímetro irrigado é assegurado pelo Rio Jaguaribe, perenizado pelo Açude Público Federal de Orós, com capacidade de 2.100.000.000 m³.

3.5 DADOS DAS ESTAÇÕES

Os dados de superfície usados para validação referem-se a um conjunto de dados médios obtidos a intervalos de 10 minutos, das componentes do balanço de radiação: radiação de onda curta incidente (R_C^\downarrow), radiação de onda curta refletida (R_C^\uparrow), radiação de onda longa incidente (R_L^\downarrow) e radiação de onda longa emitida (R_L^\uparrow), medidos pelo saldo radiômetro CNR e armazenados em Datalogger CR23X (Campbell Scientific, Inc, Logan, USA).

Foram, também, comparados dados horários de radiação solar global, coletados nas estações de Araçoiaba, Assaré, Beberibe, Lavras Mangabeira, Quixeramobim, Quixeré, Santa Quitéria, Sobral e Ubajara, com a radiação global estimada pelos sensores dos dois satélites, não apenas no instante da passagem do satélite, mas também para cada hora do período diurno no estado do Ceará durante dias de céu claro, coletados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

As estimativas de radiação global e saldo de radiação para as horas do período diurno foram calculadas pela equação senoidal proposta por Bisht *et al.* (2005).

3.6 METODOLOGIA

Foram comparados dados de saldo de radiação medidos na torre meteorológica, durante o experimento de campo no período de estiagem com o saldo de radiação estimado, somente a partir de dados dos produtos MODIS (Terra e Aqua) para a fazenda Frutacor (5° 04' 35,38" S e 37° 51' 55,03" W), localizada no município de Quixeré, no estado do Ceará no instante da passagem dos satélites e para cada hora do período diurno para os dias 10/09 (dia 253), 25/09 (dia 268), 10/10 (dia 283), 14/10 (dia 287) e 25/10/2005 (dia 298).

Da mesma forma foram comparados os valores de radiação global estimados com dados dos produtos obtidos pelo sensor MODIS/Terra e MODIS/Aqua com dados de radiação global medidos na superfície em várias estações meteorológicas distribuídas no estado do Ceará (Figura 7), onde suas coordenadas geográficas em graus decimais estão descritas no Quadro 7 e são melhor representadas na Figura 7.

Quadro 7 – Localização das estações meteorológicas

Estações	Latitude	Longitude
Araçoiaba	-4,4358	-38,7558
Assaré	-6,8542	-39,8653
Beberibe	-4,2414	-38,2014
Lavras Mangabeira	-6,8889	-39,0850
Quixeramobim	-5,1233	-39,1822
Santa Quitéria	-4,3097	-40,1767
Sobral	-3,7281	-40,3878
Ubajara	-3,8625	-41,1175
Quixeré	-5,0777	-37,8667

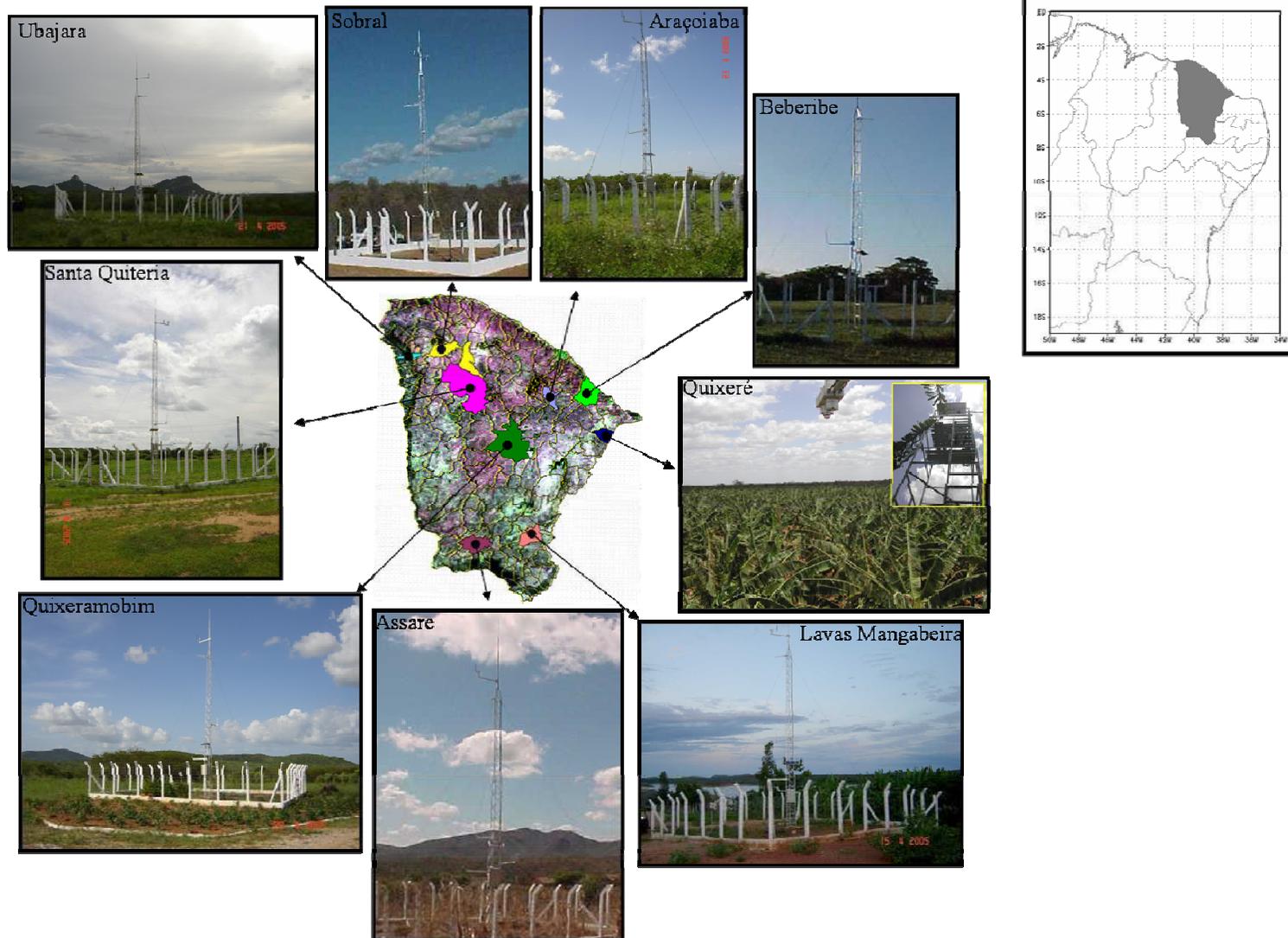


Figura 9 – Localização espacial das estações do Estado do Ceará

3.6.1 - Estimativa do saldo de radiação

O saldo de radiação (R_n) na superfície pode ser expresso em termos de seus componentes como:

$$R_n = R_C^\downarrow - R_C^\uparrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (2)$$

em que: R_C^\downarrow e R_C^\uparrow são as densidades do fluxo de radiação de onda curta incidente na superfície e emitida ($W\ m^{-2}$), respectivamente, e R_L^\downarrow e R_L^\uparrow as densidades de fluxo de radiação de onda longa incidente e emitida ($W\ m^{-2}$), respectivamente.

As radiações de onda curta podem ser expressas como:

$$R_C^\downarrow - R_C^\uparrow = (1 - \alpha) R_C^\downarrow \quad (3)$$

em que: α é o albedo da superfície terrestre (refletividade no domínio 0,3 - 4,0 μm) que representa a razão entre a radiação solar refletida e a radiação global incidente.

O Quadro 8 contém medidas de albedo dadas em porcentagem (%) para diferentes tipos de cobertura de superfície.

Várias parametrizações para a radiação de onda curta incidente têm sido apresentadas na literatura. Em essência, radiação de onda curta incidente pode ser expressa como:

$$R_C^\downarrow = S_0 \tau_{sw} \cos\theta \quad (4)$$

em que τ_{sw} é a transmissividade de onda curta da atmosfera, S_0 é a constante solar ($1367\ W\ m^{-2}$) e θ é o ângulo zenital solar.

Quadro 8 - Características do albedo (%) para diferentes tipos de superfície (Fonte: Oliveira *et al.*, 2001)

Superfície	Albedo (%)
Superfície de água	6 – 8
Solo descoberto	
Dunas de areia, secas	35 – 45
Dunas de areia, molhadas	20 – 30
Solo escuro	5 -15
Solo argila, seca	20 – 35
Solo arenoso, seco	25 – 45
Concreto, seco	17 – 27
Estradas, asfalto	5 – 10
Superfícies naturais	
Deserto	25 – 30
Savana, estação seca	25 – 30
Savana, estação chuvosa	15 – 20
Pastagens verdes	10 – 20
Florestas	5 – 15

Neste estudo foi utilizado o esquema de parametrização desenvolvido por Zillman (1972), que utiliza a pressão parcial do vapor d'água e ângulo zenital solar, dado pela:

$$R_C^\downarrow = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{d} \quad (5)$$

$$\text{com } d = 1,085 \cos \theta + e_0 (2,7 + \cos \theta) \times 10^{-3} + 0,1 \quad (6)$$

em que d é a espessura ótica da camada e e_0 é a pressão parcial do vapor de água (hPa).

Os dados dos produtos MOD07_L2 e MYD07_L2 (Terra e Aqua, respectivamente) utilizados neste estudo são extraídos das camadas 2, 83 e 103, e correspondem ao ângulo zenital do sol, temperaturas do ar e do ponto de orvalho, respectivamente, no nível de pressão de 1000 hPa. Essas temperaturas substituíram as médias de temperaturas necessárias do nível de altura de 2 m da superfície.

As temperaturas foram consideradas homogêneas sobre uma grade de 5 km x 5 km, conforme é distribuído nos produtos do satélite. A temperatura do ponto de

orvalho é usada para calcular a pressão do vapor de água, e_0 (hpa), pelo uso da equação de Clausius-Clapeyron, como:

$$e_0 = 6,11 \exp \left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (7)$$

em que L_v é o calor latente de vaporização da água ($2,5 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$), R_v é a constante de vapor de água, $461,50 \text{ Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e $T_0 = 273 \text{ K}$ (Vianello e Alves, 1987).

O balanço de radiação de onda longa representa o cômputo dos ganhos e perdas entre a radiação de onda longa emitida pela superfície do solo e a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície e pode ser expressa pela equação de Steffan-Boltzmann:

$$R_L^\downarrow - R_L^\uparrow = \sigma \varepsilon_a T_a^4 - \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (8)$$

em que ε_a é a emissividade do ar, ε_s a emissividade da superfície, T_a a temperatura do ar (K) no nível de 1000mb, T_s a temperatura da superfície (K) e σ ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) é a constante de Steffan-Boltzmann.

Prata (1996) desenvolveu uma parametrização para estimativa da emissividade atmosférica usando a pressão de vapor da água e temperatura do ar, que foi usada para simplificar o método, qual seja:

$$\varepsilon_a = [1 - (1 + \xi) \times \exp\{-(1,2 + 3 \xi)^{1/2}\}] \quad (9)$$

em que $\xi = 46,5 e_0 / T_a$. Outros parâmetros são obtidos usando dados dos produtos de superfície do MODIS (temperatura da superfície terrestre, emissividade para bandas 31, 32 e 29, e refletância direcional hemisférica, refletância bi hemisférica e hora de passagem dos satélites) e também dados dos produtos atmosféricos do MODIS (Ângulo zenital solar, temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho).

3.6.2 - Estimativa do Ciclo Diurno do Saldo de Radiação (CDRn)

Mapas de Rn diários, certamente, têm mais aplicações que mapas de saldo de radiação instantâneo, especialmente para modelos que tentam calcular a evapotranspiração (Jiang e Islam, 2001; Nishida *et al.*, 2003; Norman *et al.*, 2003). Usando uma aproximação similar com a metodologia de Lagourade e Brunet (1983), foi proposto um modelo senoidal para estimar o ciclo diurno do Rn para dias de céu claro, qual seja:

$$Rn(t) = Rn_{\max} \text{sen} \left[\left(\frac{t - t_{nasc}}{t_{pôr} - t_{nasc}} \right) \pi \right] \quad (10)$$

em que Rn_{\max} é o valor máximo de Rn observado durante o dia, e t_{nasc} e $t_{pôr}$ o tempo local no qual o valor do saldo de radiação se torna positivo e negativo, respectivamente.

O saldo de radiação máximo (Rn_{\max}) pode ser dado por:

$$Rn_{\max} = \frac{Rni}{\text{sen} \left[\left(\frac{t_{passagem} - t_{nasc}}{t_{pôr} - t_{nasc}} \right) \pi \right]} \quad (11)$$

em que Rni é o Saldo de Radiação Instantâneo e $t_{passagem}$ é a hora de passagem do satélite em UTC (*Universal Time Coordinate*).

3.6.3 - Estimativa do Saldo de Radiação Médio Diário (RnMD)

$$RnMD = \frac{2Rni}{\pi \text{sen} \left[\left(\frac{t_{passagem} - t_{nasc}}{t_{por} - t_{nasc}} \right) \pi \right]} \quad (12)$$

Para a obtenção das horas do nascer e do pôr do sol local foi determinado o fotoperíodo (N), ou duração efetiva do dia, é definido como o intervalo de tempo

transcorrido entre o nascimento e o ocaso do sol, em determinado local e data. O fotoperíodo foi abordado sob o ponto de vista estritamente geométrico, onde o nascimento e o ocaso do Sol ocorrem quando o centro do disco solar aparentemente coincide com o plano do horizonte local (List, 1971), e foi calculado pela seguinte expressão.

$$N = 2H/15 = \left[\frac{2}{15} \right] \text{arc.cos}(-tg\varphi \text{tg}\delta) \quad (13)$$

em que o H ($^{\circ}$) traduz o valor assumido pelo ângulo horário entre nascer e por do Sol, φ é a latitude e δ é a declinação solar, obtida por (Won, 1977; Robertson, 1998):

$$\delta = 0,3964 + 3,631x \text{sen}(F) - 22,97x \text{cos}(F) + 0,03838x \text{sen}(2F) - 0,3885x \text{cos}(2F) + 0,07659x \text{sen}(3F) - 0,1587x \text{cos}(3F) - 0,01021x \text{cos}(4F) \quad (14)$$

em que F (em graus) é a fração angular do ano correspondente à data escolhida dado por:

$$F = \frac{360^{\circ} x Dj}{365} \quad (15)$$

e Dj é o dia “Juliano”, o qual indica o número de ordem do dia considerado ($Dj = 1$ em primeiro de janeiro, e assim por diante, Varejão-Silva, 2001).

Para maior precisão no cálculo do fotoperíodo foram elaboradas cartas de latitude e de longitude em formato *raster*, quadriculado (*.img), com resolução de 230 m e interpolado pelo método de reamostragem *Nearest Neighbor*, com as ferramentas do software Imagine ERDAS (*Utilities*→*Convert ASCII to Pixels e Convert Pixels to ASCII*) e (*Data Preparation*→*Reproject Images*). Assim, foi possível obter resultados diferenciados e mais precisos para cada ponto de grade em grandes áreas de estudo que variam em função da latitude e longitude, ao contrário de outros métodos que utilizam valores fixos de latitude e longitude do centro da imagem da área.

Na Figura 10 é apresentado comportamento do ciclo diurno do saldo de radiação, com dados observados na fazenda Frutacor.

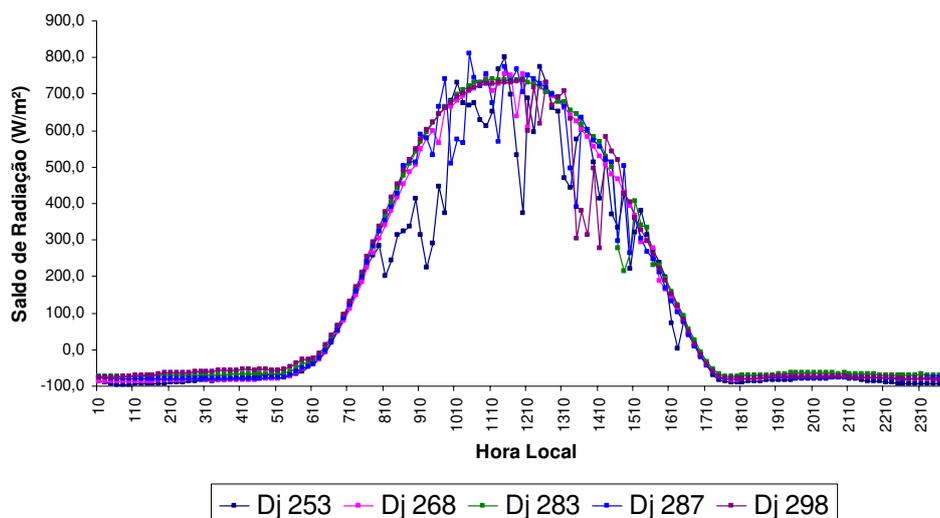


Figura 10 – Ciclo diurno do saldo de radiação observado na estação Frutacor

Devido a ausência de medições do saldo de radiação nas estações meteorológicas estudadas, comparam-se somente dados de radiação global medidos com dados de radiação global estimados pelos satélites MODIS/Aqua e MODIS/Terra.

3.6.4 - Estimativa do ciclo diurno da radiação global (RG)

A metodologia aqui utilizada é uma adaptação dos métodos de estimativa de radiação de onda curta parametrizado por Zillman (1972) e o esquema de distribuição temporal proposta por Bisht *et al.* (2005). As equações utilizadas são basicamente as equações (5), (6), (10), (11), (13), (14) e (15) devidamente modificadas, onde substitui-se na equação (10) $R_n(t)$ por $RG(t)$, sendo $RG(t)$ a radiação global em função de um tempo t . Substituiu-se, também, $R_{n_{max}}$ por RG_{max} , em que RG_{max} é definida como radiação global máxima e determinada pela equação (11) também devidamente modificada, onde R_{ni} é substituída por RG .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RADIAÇÃO GLOBAL INSTANTÂNEA

Os valores de radiação global instantânea, obtidos por intermédio do sensor MODIS dos satélites Terra e Aqua, apresentaram, em sua maioria, valores superiores aos observados à superfície, situação semelhante à de Niemelä *et al.* (2001), que usaram esquema de Zilman (1972).

A Tabela 2 contém os valores percentuais absolutos de aproximação entre os valores estimados na hora da passagem dos satélites e os dados observados em superfície.

Como se pode observar na Tabela 2, os valores estimados pelo MODIS/Terra se aproximaram de 64,8% (Araçoiaba) e 95,7% (Quixeré). Pelo MODIS/Aqua os valores em 10 de setembro se situaram entre 71% (Lavras Mangabeira) e 96,8% (Quixeré).

Para o dia 10 de outubro os valores estimados ficaram entre 74,9% (Beberibe) e 96,4% (Quixeré) e entre 90,2% (Assaré) e 98,4% (Quixeré) pelo MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente.

Em 14 de outubro observaram-se valores variando entre 53% (Beberibe) e 96,5% (Quixeré) pelo MODIS/Terra e entre 82,6% (Araçoiaba) e 96,5% (Quixeré) pelo MODIS/Aqua.

TABELA 2 – Porcentagem absoluta entre valores instantâneos estimados e observados de radiação global

Radiação Global	MODIS / Terra (%)				MODIS / Aqua (%)			
	Estações	10/set	10/out	14/out	25/out	10/set	10/out	14/out
Araçoiaba	64,8	92,8	79,1	87,9	87,2	92,7	82,6	75,6
Assaré	79,7	92,5	84,8	90,2	87,3	90,2	86,2	81,4
Beberibe	67,6	74,9	53,0	83,3	91,2	96,7	88,3	84,8
Lavras_mangabeira	69,2	89,8	81,0	86,4	71,0	90,7	86,6	67,6
Quixeramobim	80,7	93,3	85,6	90,9	88,0	94,8	84,5	80,4
Santa_Quitéria	79,9	90,3	84,8	91,0	88,2	93,4	88,0	83,3
Sobral	73,6	78,9	78,2	83,9	85,4	91,6	82,7	78,2
Ubajara	80,7	90,5	84,2	88,2	90,3	93,6	88,4	67,3
Quixeré	95,7	96,4	96,5	98,5	96,8	98,4	96,5	97,7

Em 25 de outubro, o MODIS/Terra proporcionou estimativas entre 83,3% (Beberibe) e 98,5% (Quixeré) e o MODIS/Aqua estimou valores entre 67,3% (Ubajara) e 97,7% (Quixeré) em relação à Rg medida à superfície.

Durante todos os dias de estudo, os valores estimados apresentaram maior aproximação para a estação experimental instalada na fazenda Frutacor em Quixeré. Isso, provavelmente, ocorreu pelo fato dos valores medidos em Quixeré corresponderem aos da hora da passagem do satélite, pois seus dados foram medidos em intervalos de dez minutos, enquanto os valores das demais estações foram interpolados linearmente com dados horários.

Para elaboração do gráfico foi comparada a média aritmética dos valores observados no horário da passagem dos satélites com o valor estimado instantaneamente, ou seja, por exemplo, calculou-se a média aritmética entre os valores observados em 10h e 11h e comparou-se com o valor estimado por satélite às 10h 30 min. Logo, podemos observar que esse tipo de comparação gera dispersão entre os valores medidos e observados para a maioria das estações, as quais tinham apenas medidas horárias, enquanto que para Quixeré, os dados observados foram medidos a cada dez minutos e comparados com os valores estimados por satélite nas respectivas horas de suas passagens, a qual apresentou melhores resultados.

O intervalo dos valores de radiação global estimados pelo MODIS/Terra ficou entre $935,3 \text{ W m}^{-2}$ e $1.039,4 \text{ W m}^{-2}$. Os dados observados variaram entre $687,3 \text{ W m}^{-2}$ e 970 W m^{-2} , para todos os dias em todas as estações. Os valores de radiação global obtidos com o MODIS/Aqua situaram-se entre 874 W m^{-2} e $1.039,4 \text{ W m}^{-2}$, enquanto os

valores observados variaram entre $735,7 \text{ W m}^{-2}$ e $970,0 \text{ W m}^{-2}$, para todos os dias em todas as estações.

De forma geral, todos os valores de radiação global foram superestimados pelas imagens dos satélites; porém, o MODIS/Aqua promoveu estimativas mais próximas aos valores medidos em superfície. Observando a Figura 11 pode-se notar a proximidade entre os valores estimados e os observados para todas as estações no dia 10 de setembro, onde as maiores diferenças ocorreram nas estações de Araçoiaba (erro de $266,2 \text{ W m}^{-2}$) com MODIS/Terra e em Lavras Mangabeira (erro de $213,3 \text{ W m}^{-2}$), com MODIS/Aqua. Os resultados mais aproximados ocorreram em Quixeré (erro de $41,4 \text{ W m}^{-2}$ e $31,3 \text{ W m}^{-2}$, para o MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente) devido principalmente a interpolação utilizada, onde os dados observados nas demais estações meteorológicas são medidos a cada hora e os valores estimados instantaneamente são em frações de horas e não em horas cheias, como já mencionado.

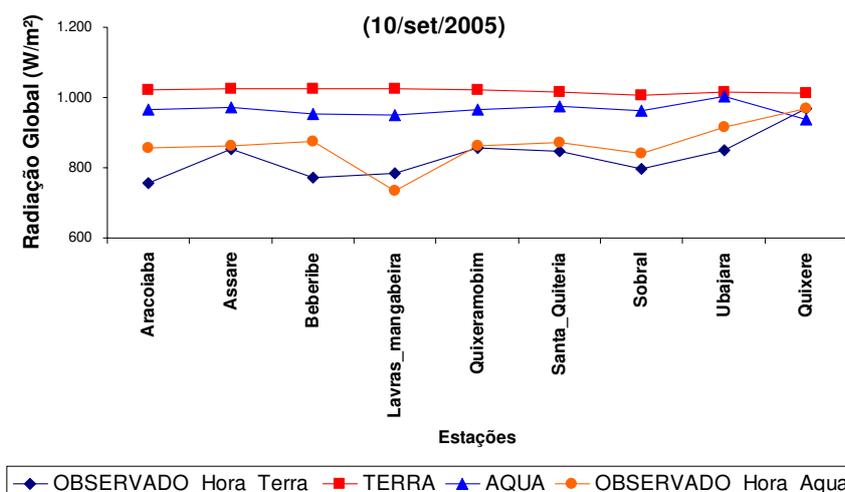


Figura 11 - Radiação global estimada e observada para 10 de setembro de 2005

Através da Figura 12 pode-se observar a proximidade entre os valores estimados e os observados para todas as estações no dia 10 de outubro, em que as maiores diferenças aconteceram nas estações do Beberibe (diferença absoluta de $202,7 \text{ W m}^{-2}$) com MODIS/Terra e de $81,8 \text{ W m}^{-2}$ em Assaré com MODIS/Aqua e os valores mais aproximados ocorreram em Quixeré, com diferenças absolutas de $34,4 \text{ W m}^{-2}$ e $14,0 \text{ W m}^{-2}$, para o MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente.

Na Figura 13 são apresentados os valores estimados e os observados, no dia 14 de outubro, para todas as estações e, como se verifica, as maiores diferenças entre essas medidas ocorreram nas estações de Beberibe, com diferença absoluta de $323,0 \text{ W m}^{-2}$ com MODIS/Terra, provavelmente devido a alguma falha na coleta dos dados e em Sobral essa diferença foi $143,5 \text{ W m}^{-2}$ com o MODIS/Aqua. Os valores mais aproximados ocorreram em Quixeré, com diferenças absolutas de $34,3 \text{ W m}^{-2}$ e $33,7 \text{ W m}^{-2}$, para o MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente.

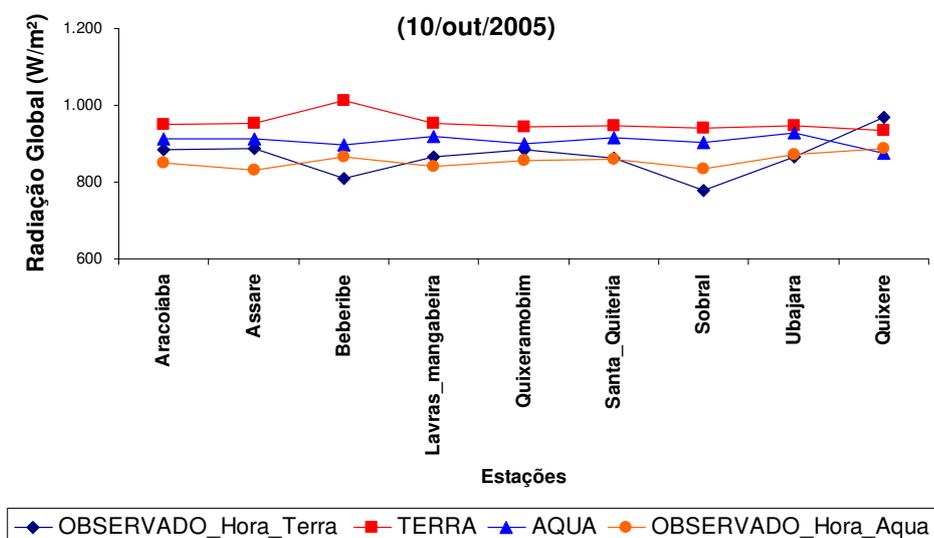


Figura 12 - Radiação global estimada e observada para 10 de outubro de 2005

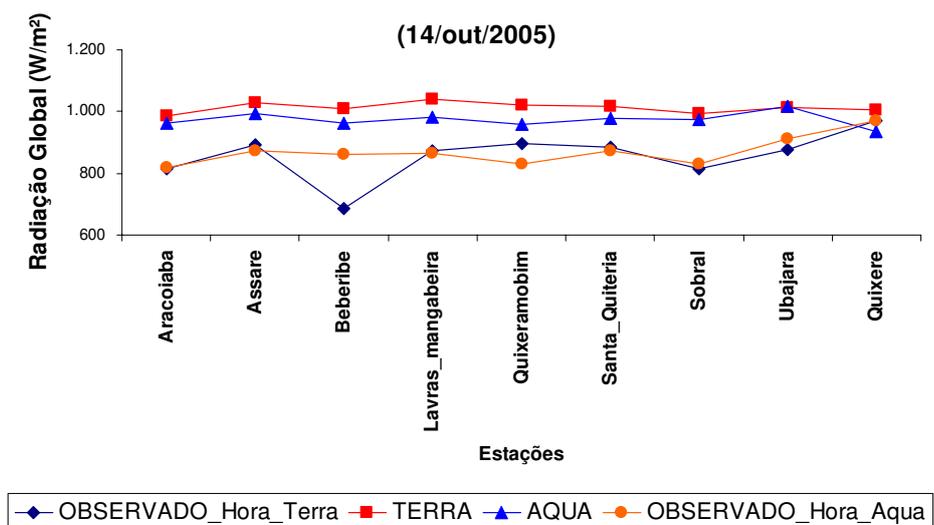


Figura 13 - Radiação global estimada e observada para 14 de outubro de 2005

Na Figura 14 pode-se observar que em 25 de outubro, as maiores diferenças entre essas medidas ocorreram nas estações de Beberibe (erro de $139,9 \text{ W m}^{-2}$) com MODIS/Terra e em Lavras Mangabeira (erro de $249,8 \text{ W m}^{-2}$) com MODIS/Aqua. Para esse dia, as melhores estimativas com satélite ocorreram novamente em Quixeré, com erros de $14,5 \text{ W m}^{-2}$ e $22,5 \text{ W m}^{-2}$, para o MODIS/Terra e MODIS/Aqua, respectivamente.

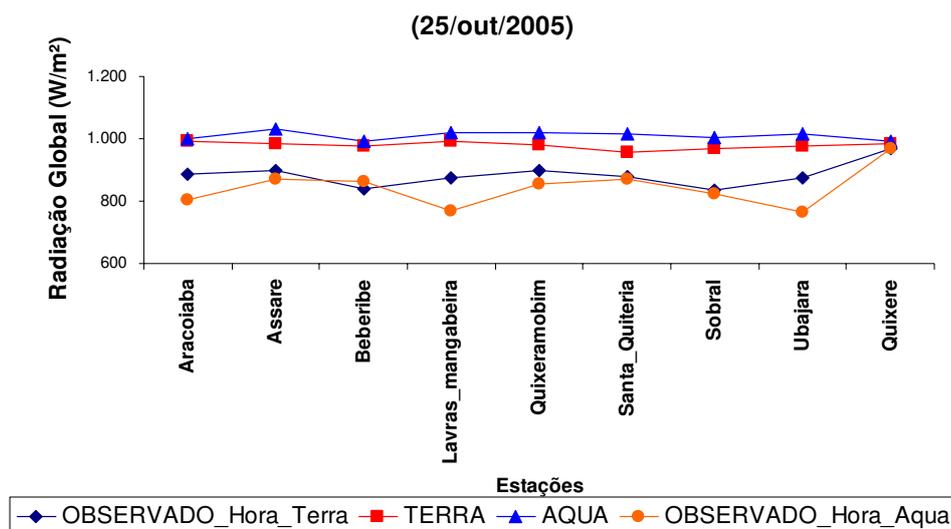


Figura 14 - Radiação global estimada e observada para 25 de outubro de 2005

Nas Figuras 15 e 16 (a – d) estão representadas as cartas instantâneas de radiação global, obtidas pelos produtos MODIS dos satélites Terra e Aqua, nas horas de suas respectivas passagens. Durante os dias de estudo notou-se para todas as estações do Ceará que, de forma geral, os maiores valores concentraram-se nas áreas com maiores elevações topográficas do Estado, em que os pixels brancos são locais em que ocorrem falhas na imagem (presença de nuvens) e não são valores significativos. Essas imagens foram geradas a partir dos dados de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão de vapor de água e ângulo zenital, todos em resolução espacial de 5 km por 5 km, obtidos do conjunto de dados MODIS de perfil atmosférico com a parametrização de Zillman (1972).

Observou-se que a estimativa da radiação solar incidente na superfície pelo MODIS/Terra durante os dias de estudo foi em torno de 935 W m^{-2} e 1076 W m^{-2} e pelo MODIS/Aqua foi entre 870 W m^{-2} e 1046 W m^{-2} nas diferentes localidades do Ceará.

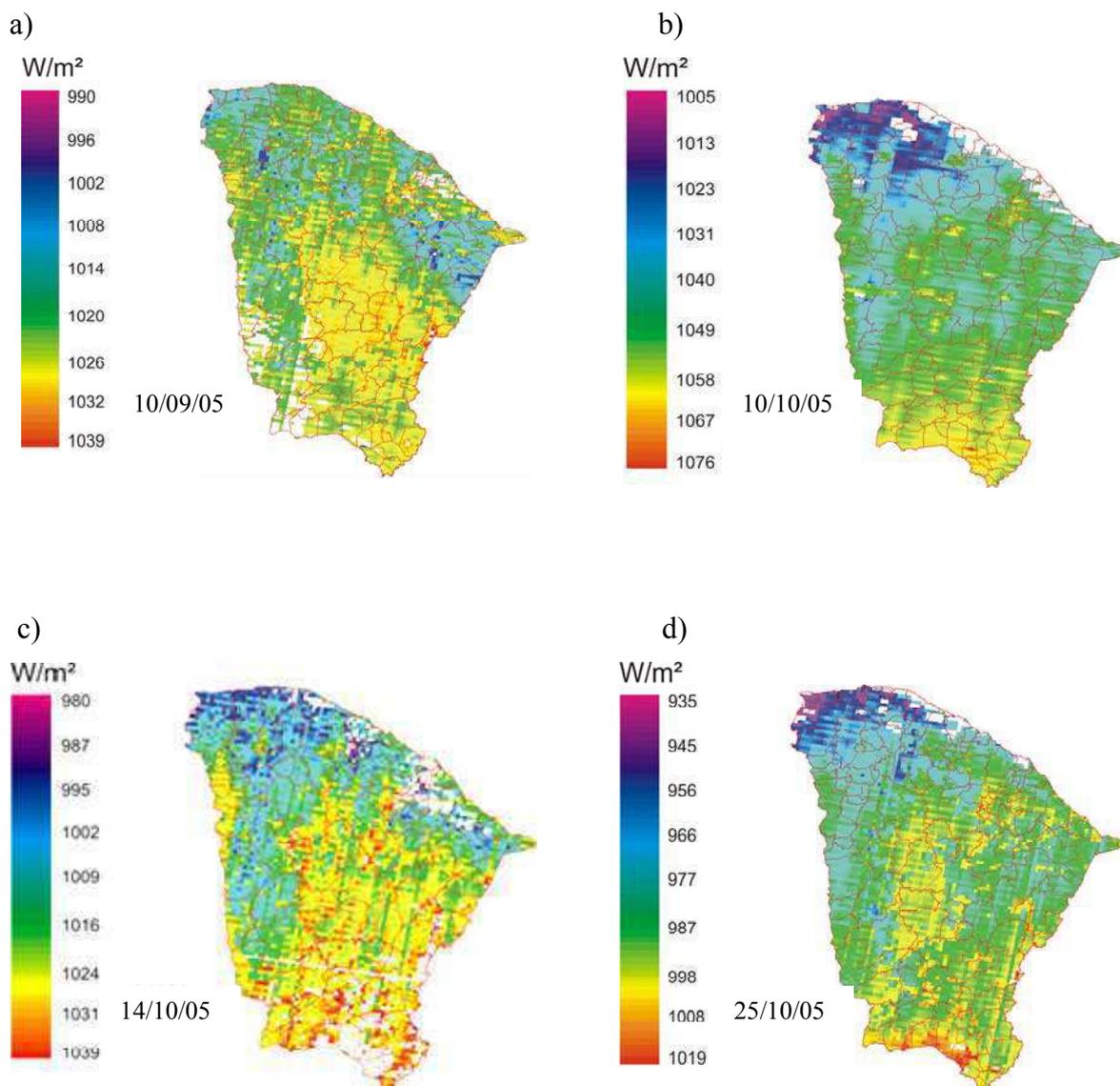


Figura 15 – Imagens de radiação solar global obtida pelo sensor MODIS/Terra:

a) 10/09/2005, b)10/10/2005, c) 14/10/2005, d) 25/10/2005

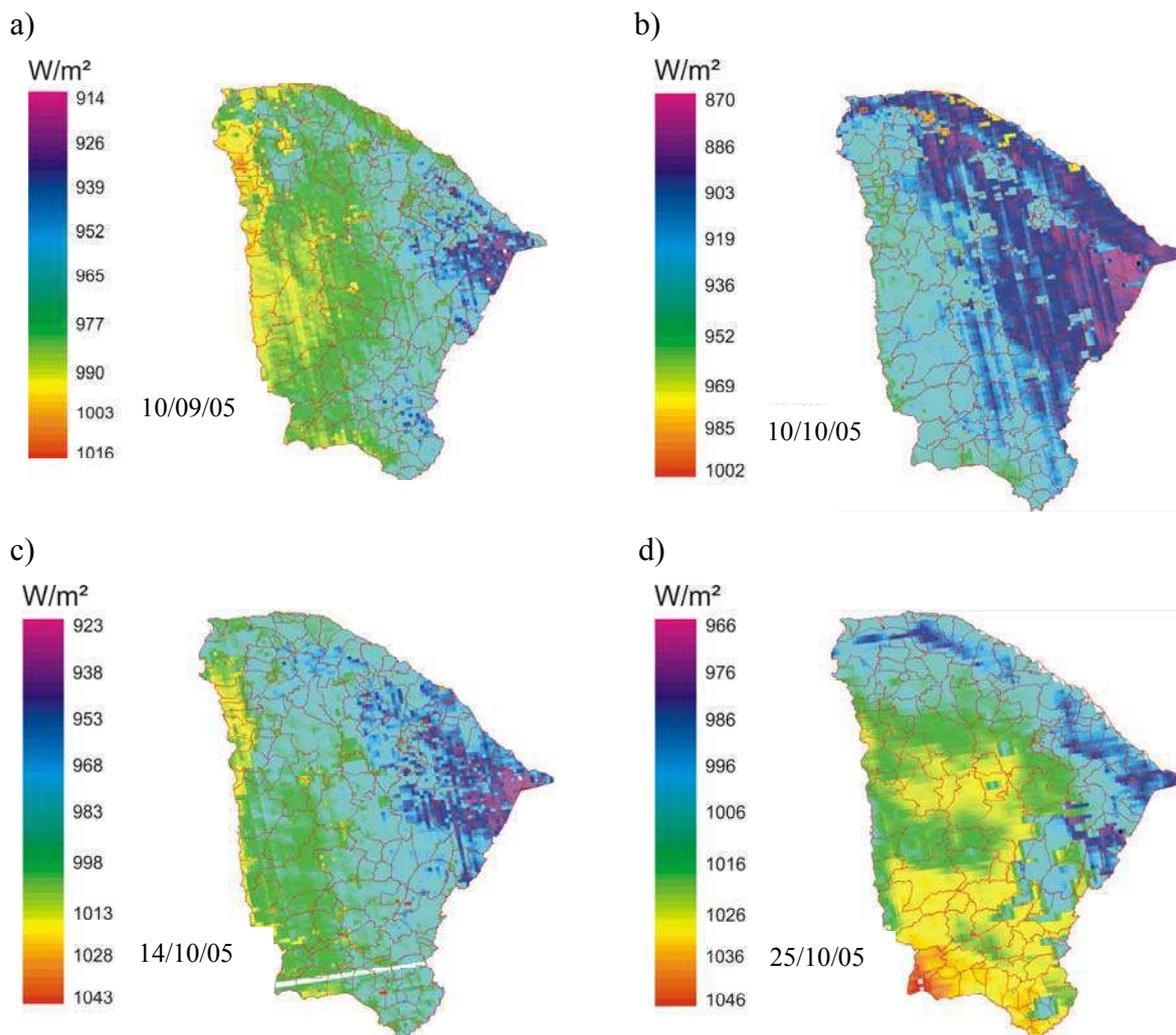


Figura 16 – Imagens de radiação solar global obtida pelo sensor MODIS/Aqua:

a) 10/09/2005, b) 10/10/2005, c) 14/10/2005, d) 25/10/2005

4.2 - CICLO DIURNO DA RADIAÇÃO GLOBAL

Como mencionado no capítulo anterior, o dia 10 de outubro de 2005 apresentou céu claro (ausência de nuvens) em todas as estações durante o dia e conseqüentemente foi o dia que apresentou as melhores estimativas de radiação global, tanto no instante da passagem dos satélites Terra e Aqua, assim como para os demais horários estimados através da equação senoidal, apresentando resultados com precisão

entre 74,9% e 96,4% pelo MODIS/Terra e resultados entre 92,7% e 98,4% pelo MODIS/Aqua.

A ocorrência de nebulosidade durante outras horas do dia afetou os resultados da comparação entre o ciclo diurno da radiação global estimado e os valores horários observados nas estações.

Os valores de radiação global foram estimados para cada hora do dia a partir uma estimativa instantânea nos horários (UTC) de passagem dos satélites Terra e Aqua, conforme se pode observar no Quadro 9.

QUADRO 9 - Horário de passagem dos satélites (UTC) em décimos de hora

10/set		10/out		14/out		25/out	
Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua
10,7	13,7	10,9	13,8	10,5	13,4	10,2	13,1
10,7	13,6	10,9	13,7	10,5	13,3	10,2	13,0
10,8	13,7	10,8	13,8	10,6	13,4	10,3	13,1
10,7	10,0	10,9	13,8	10,5	13,3	10,2	13,0
10,7	13,7	10,9	13,8	10,5	13,3	10,2	13,0
10,6	13,6	10,8	13,7	10,4	13,3	10,1	13,0
10,6	13,6	10,8	13,7	10,4	13,3	10,1	13,0
10,6	13,5	10,8	13,6	10,4	13,2	10,1	12,9
10,8	13,7	11,0	13,8	10,6	13,4	10,3	13,1

Pode-se observar nas Figuras 17 a 25 o comportamento da radiação solar global durante os dias de estudo em todas as estações onde vemos que, em sua grande maioria, existem variações devido a presença de nuvens ou de outros fatores que prejudicam a validação deste modelo, pois o mesmo é exclusivo para dias de céu claro. Todavia, é possível observar que a equação senoidal propicia um gráfico com comportamento semelhante ao gerado pelos dados observados em superfície, em que os valores estimados se aproximam dos valores medidos em sua maioria acima de 75%, quando não existe cobertura de nuvens e/ou falha nos dados observados.

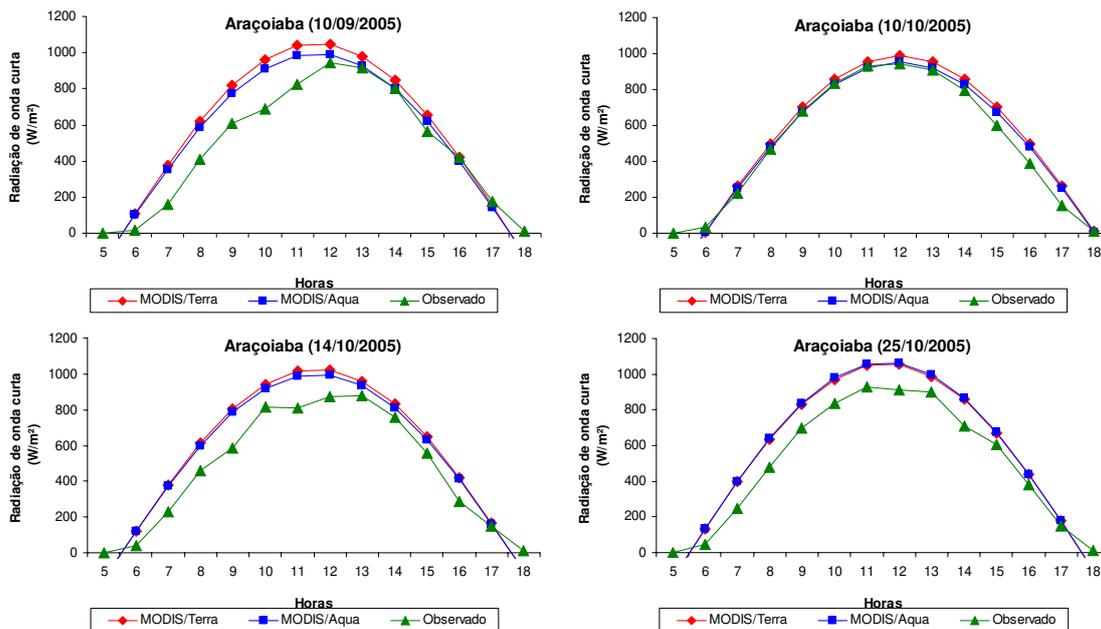


Figura 17 - Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Araçoiaba

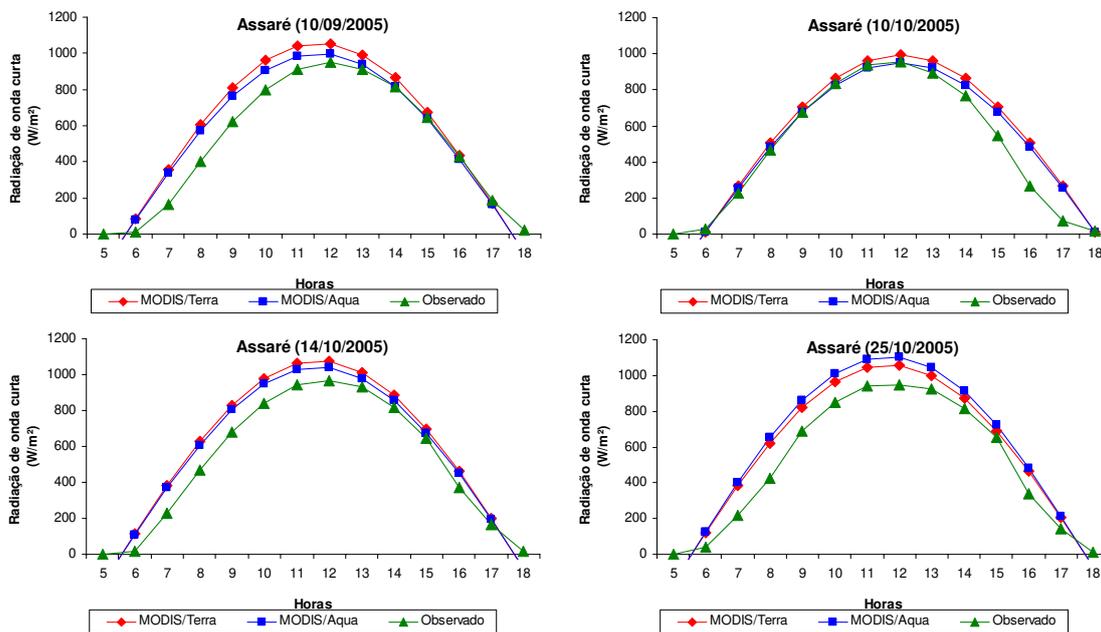


Figura 18 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Assaré

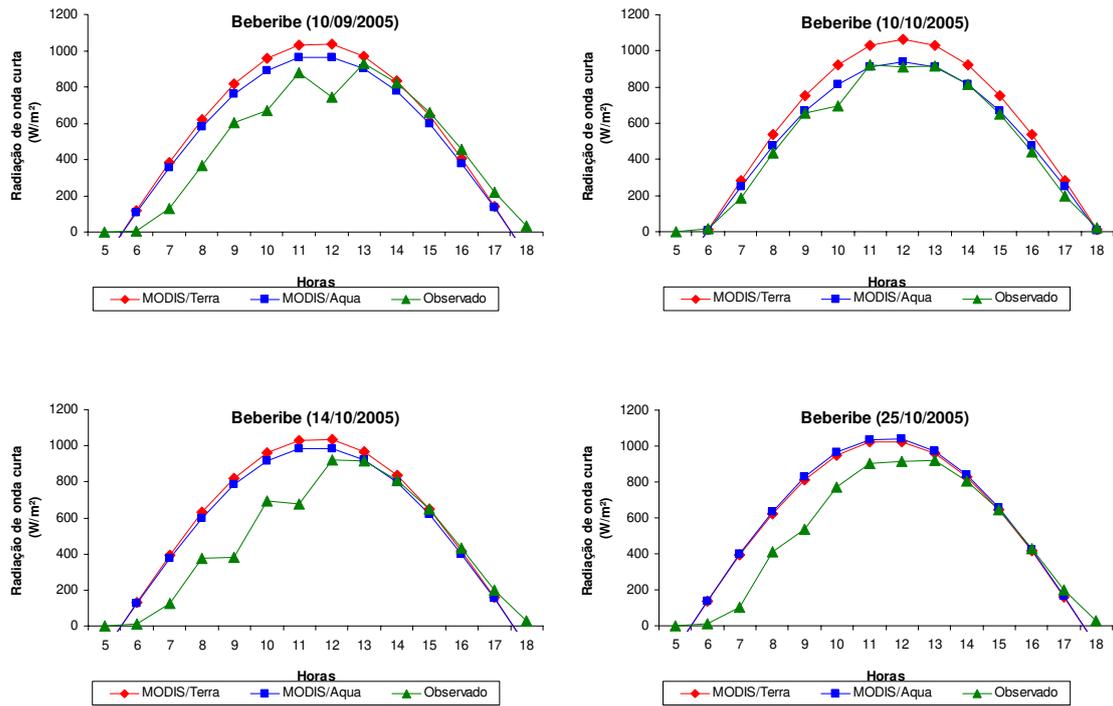


Figura 19 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Beberibe

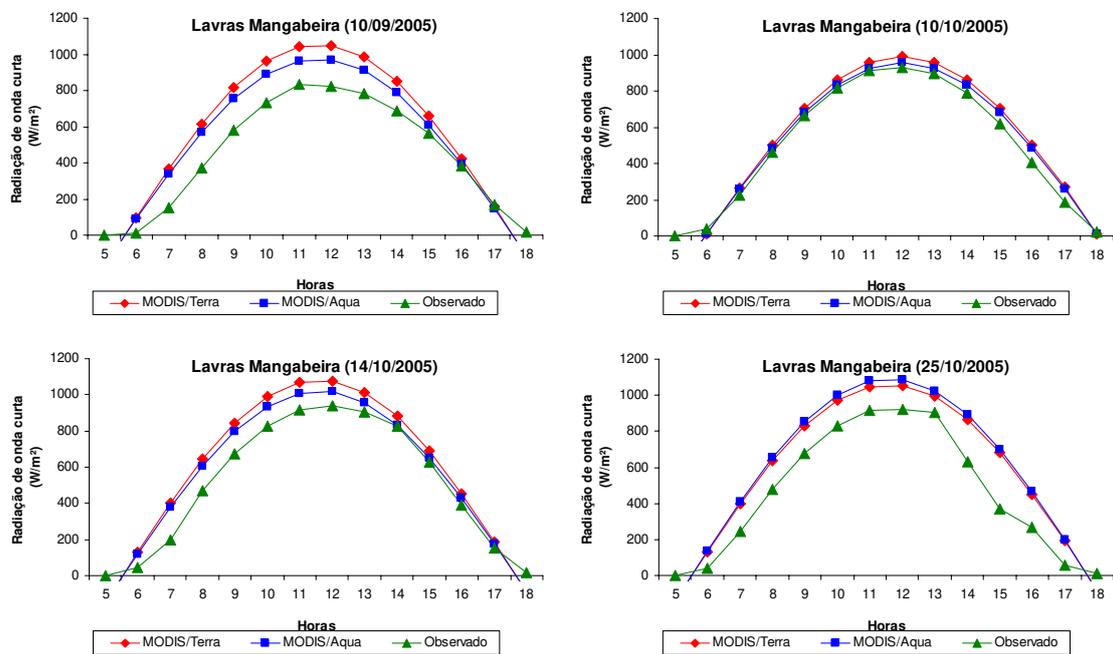


Figura 20 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Lavras Mangabeira

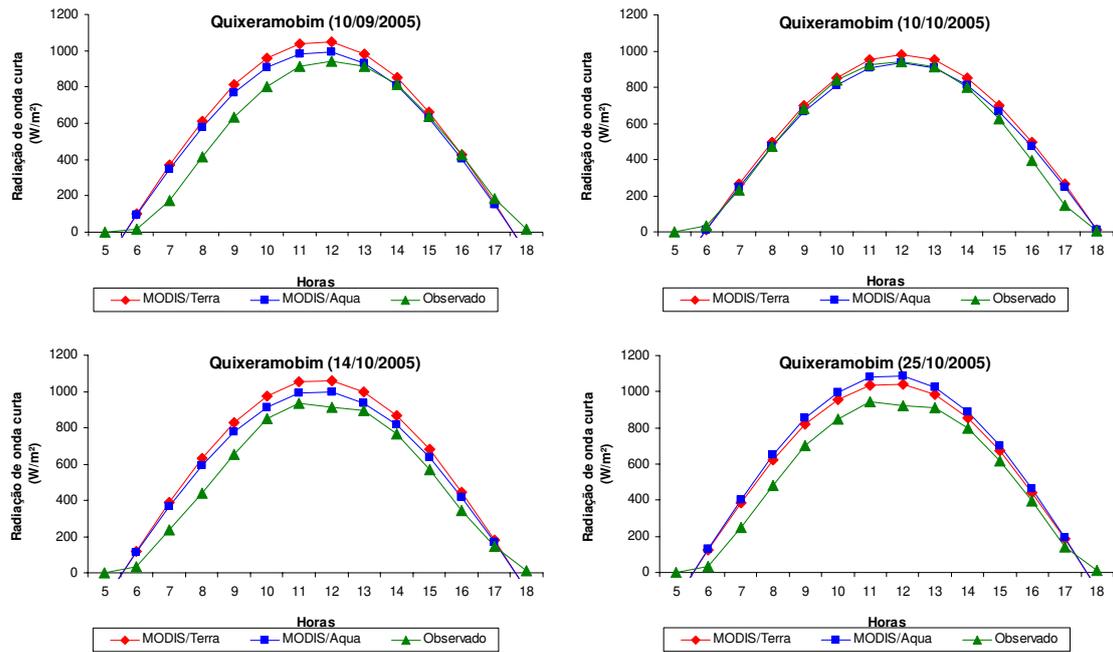


Figura 21 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Quixeramobim

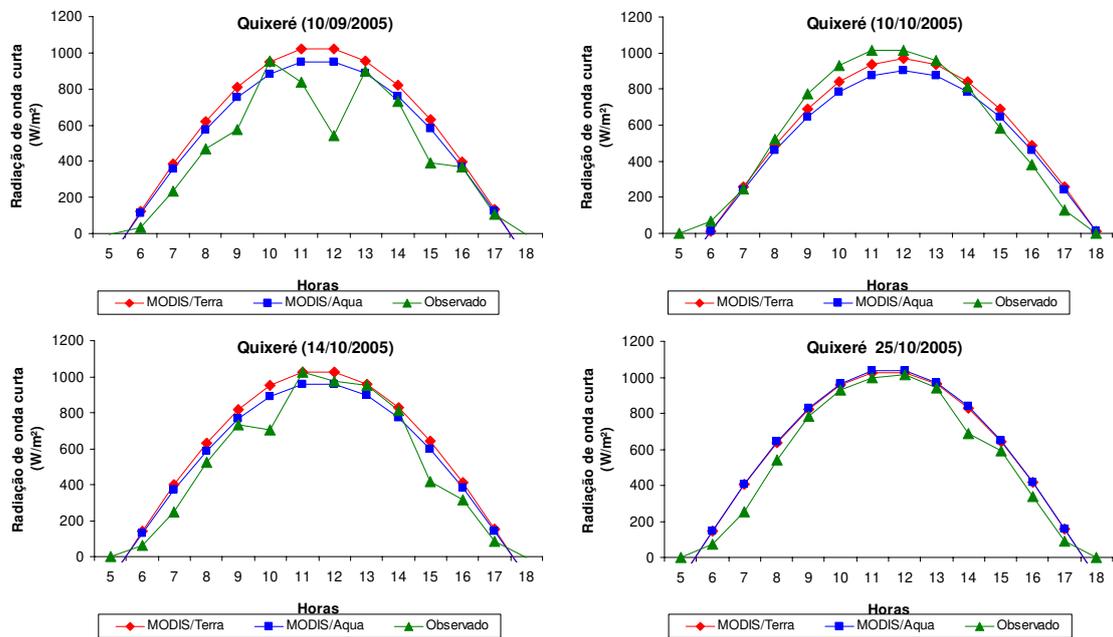


Figura 22 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Quixeré

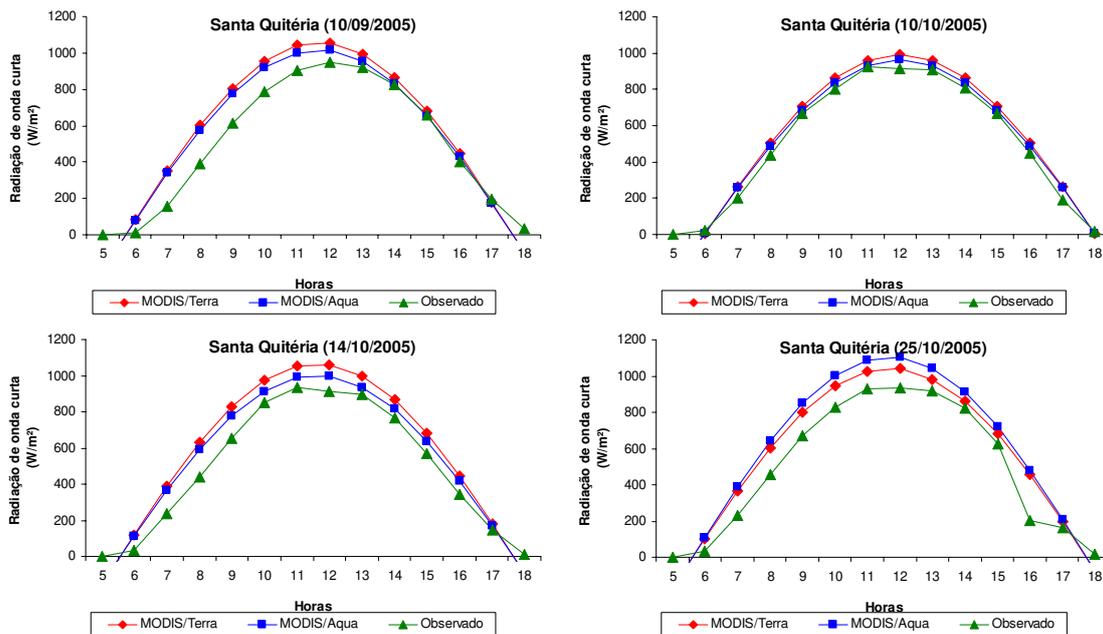


Figura 23 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Santa Quitéria

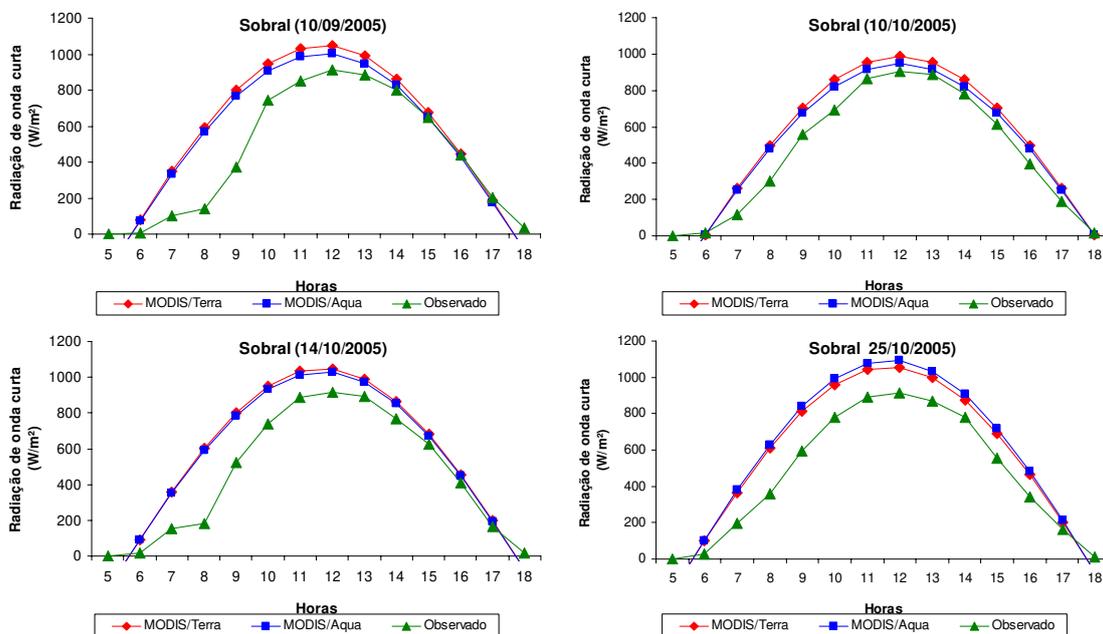


Figura 24 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Sobral

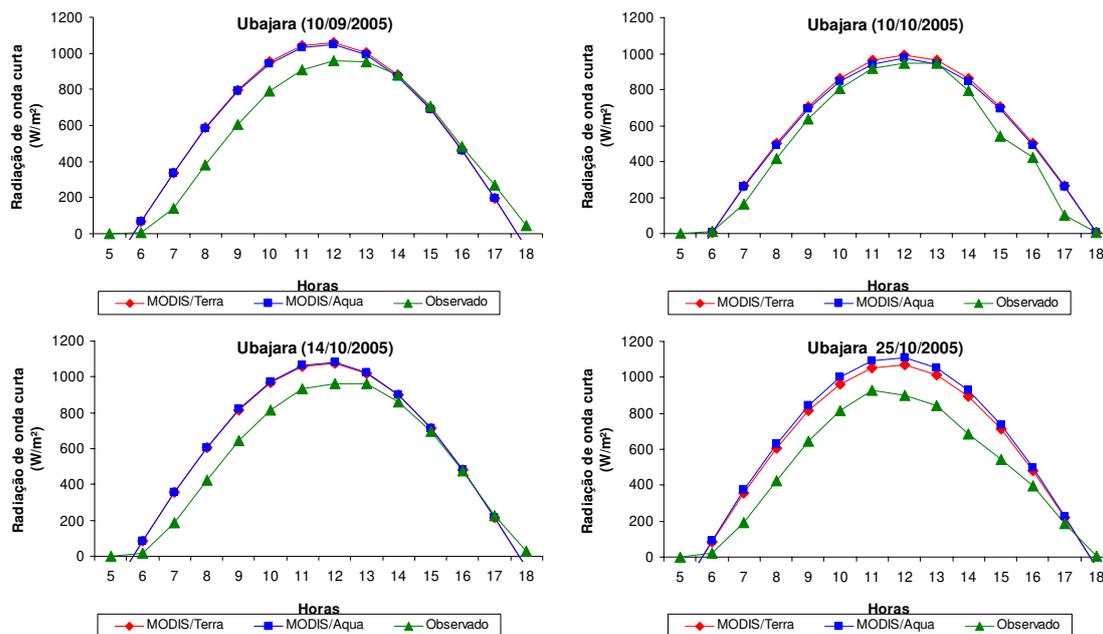


Figura 25 – Comportamento da radiação global horária estimada e observada em Ubajara

Os valores de radiação solar global estimados pelos MODIS/Terra e MODIS/Aqua apresentaram coeficientes de determinação de 0,931 e 0,925, respectivamente (Figura 26a e 26b). A média dos resultados estimados pelos dois satélites apresentou coeficiente de determinação de 0,93, para os horários entre 6h e 17h e todo período de estudo (Figura 26c). As aproximações percentuais absolutas variaram entre 70,2% (Quixeramobim às 8h do dia 25/out) e 99,9% (Ubajara às 14h do dia 10/set) estimadas pelo MODIS/Terra e entre 65,1% (Quixeramobim às 8h do dia 25/out) e 99,2% (Beberibe às 16h do dia 10/out) para o MODIS/Aqua.

Em média, as melhores aproximações em porcentagem absoluta, para todas as áreas de estudo, foram 98,1%; 95,6%; 93,9% e 93,0% (MODIS/Terra) para os dias 10/set, 10/out, 14/out e 25/out, respectivamente. Já o MODIS/Aqua proporcionou estimativas de aproximadamente 96,4%; 94,9%; 92,8% e 90,9%, respectivamente, para os mesmos dias.

As Figuras (27 a 35) contêm os gráficos de porcentagem absoluta entre valores estimados e medidos a cada hora para cada estação durante os dias do estudo. Através dessas figuras é possível observar o comportamento dos valores estimados para cada hora do dia nas diversas estações, representando a aplicabilidade do modelo para grandes áreas, onde se observa aproximações em geral acima de 75% para todas estações durante todos os dias, exceto para antes da 9h e depois de 16h.

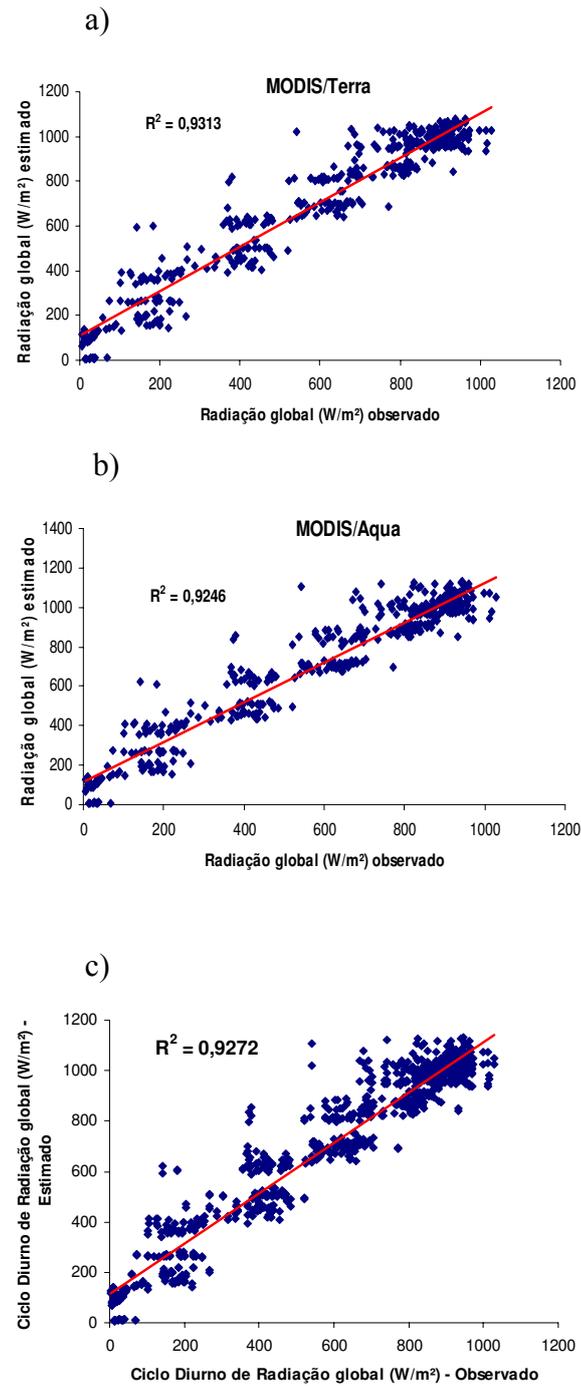


Figura 26 - Dispersão entre os valores horários estimados e observados de Radiação global, a) MODIS/Terra, b) MODIS/Aqua e c) MODIS/ (Terra e Aqua)

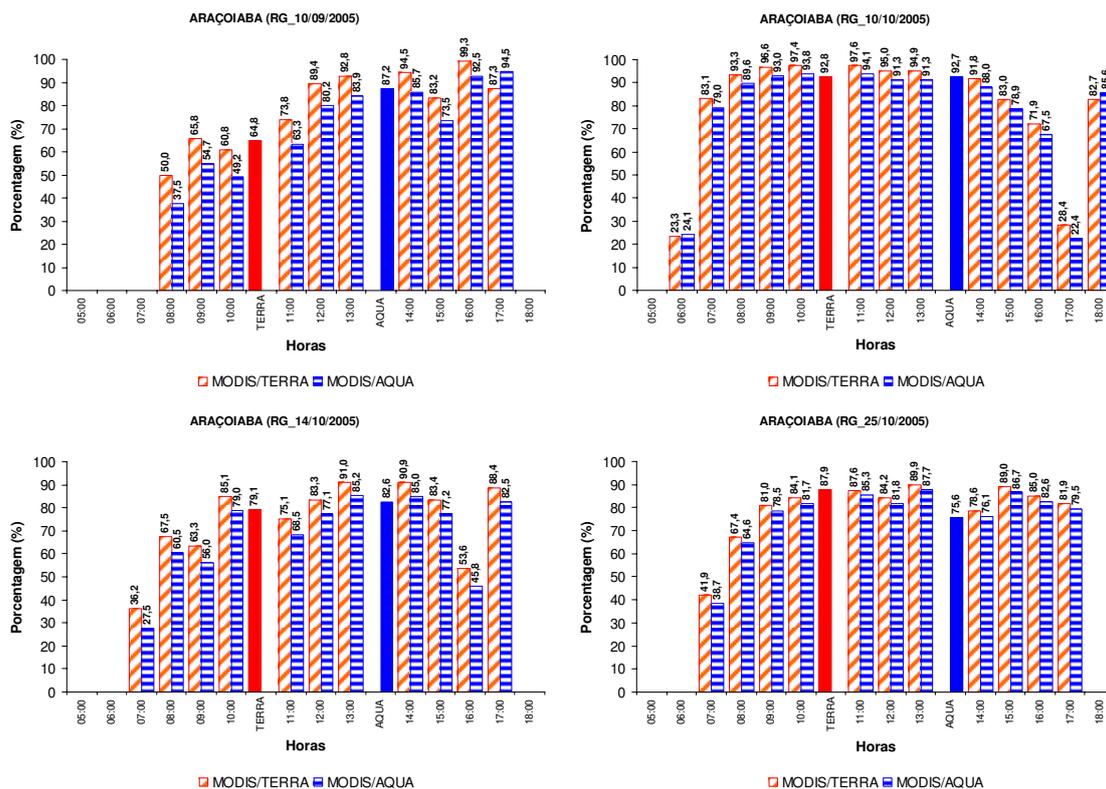


Figura 27 – Percentual absoluto da RG estimada para Araçoiaba

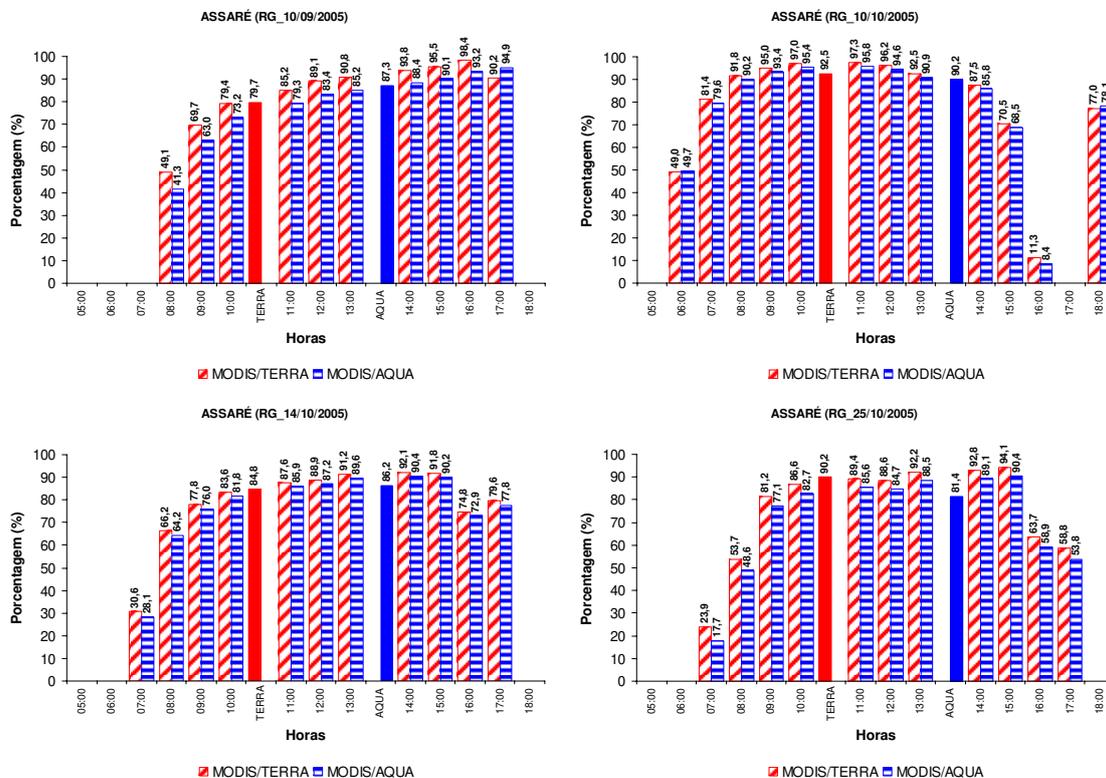


Figura 28 – Percentual absoluto da RG estimada para Assaré

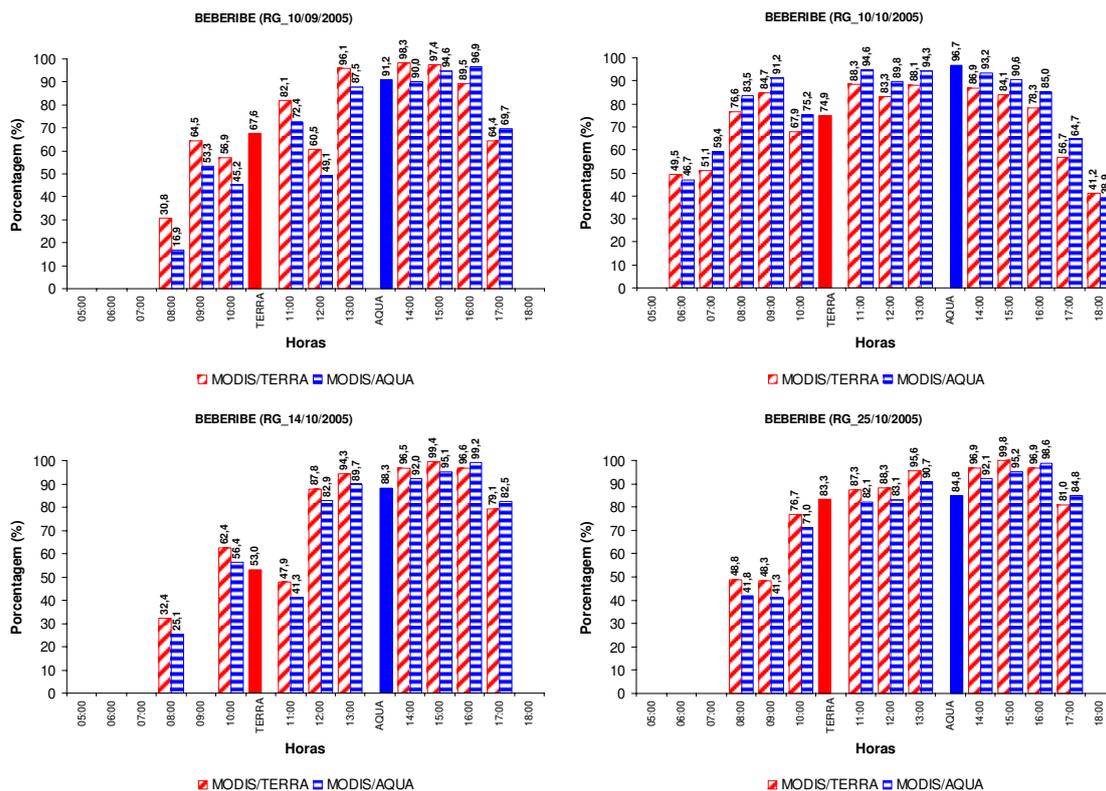


Figura 29 – Percentual absoluto da RG estimada para Beberibe

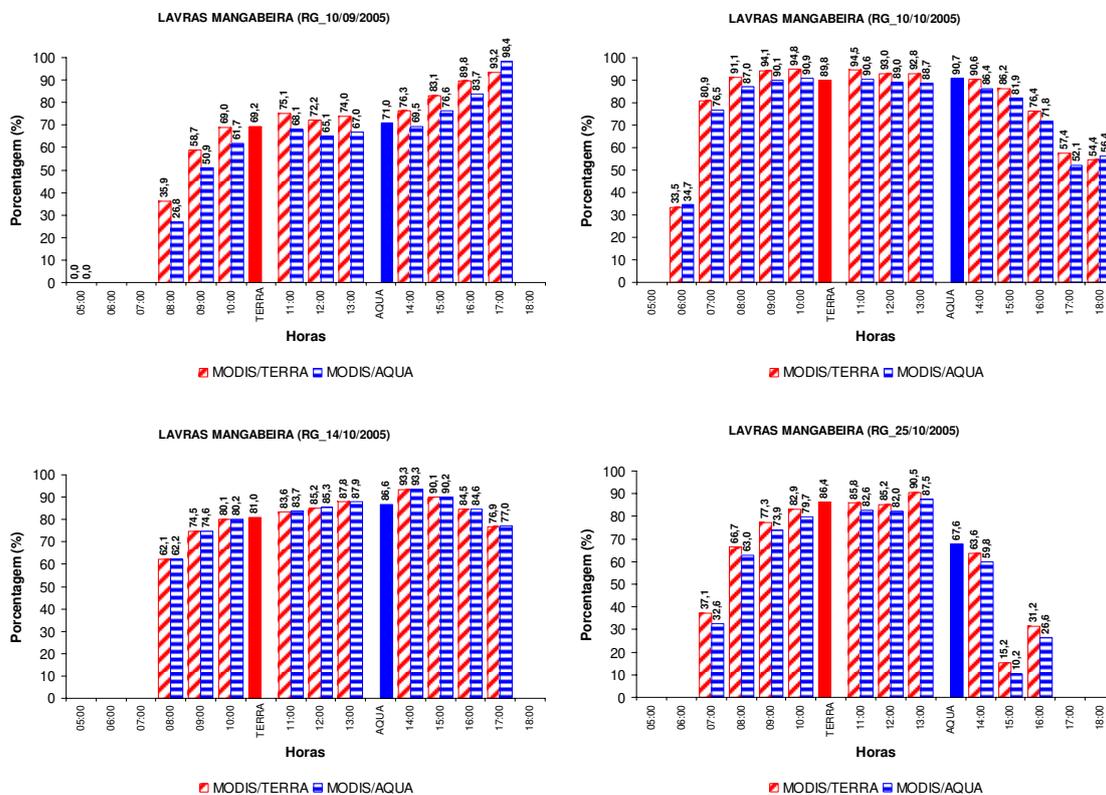


Figura 30 – Percentual absoluto da RG estimada para Lavras Mangabeira

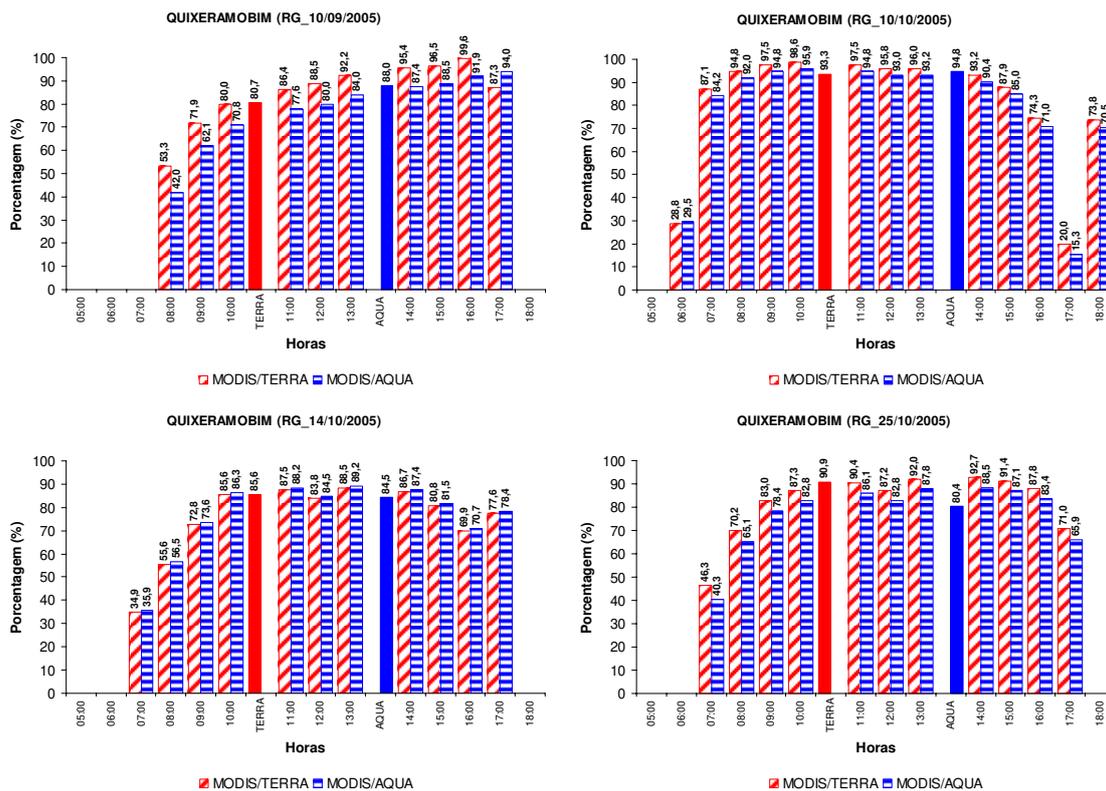


Figura 31 – Percentual absoluto da RG estimada para Quixeramobim

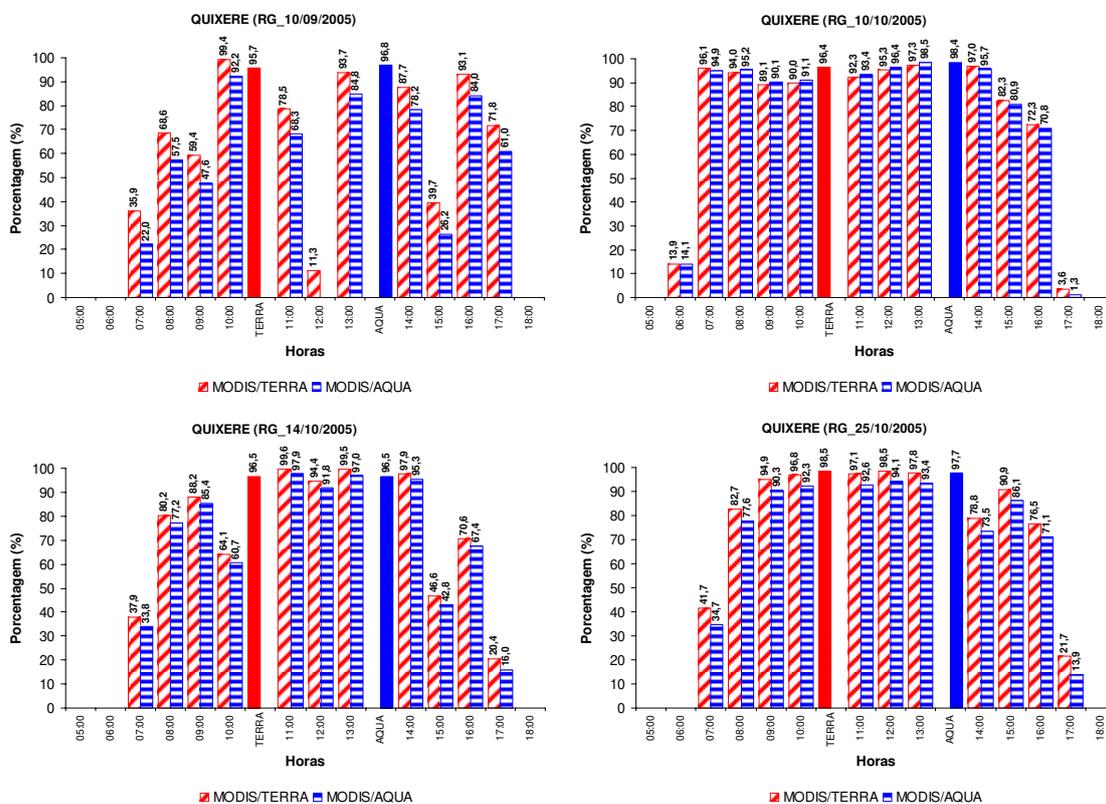


Figura 32 – Percentual absoluto da RG estimada para Quixeré

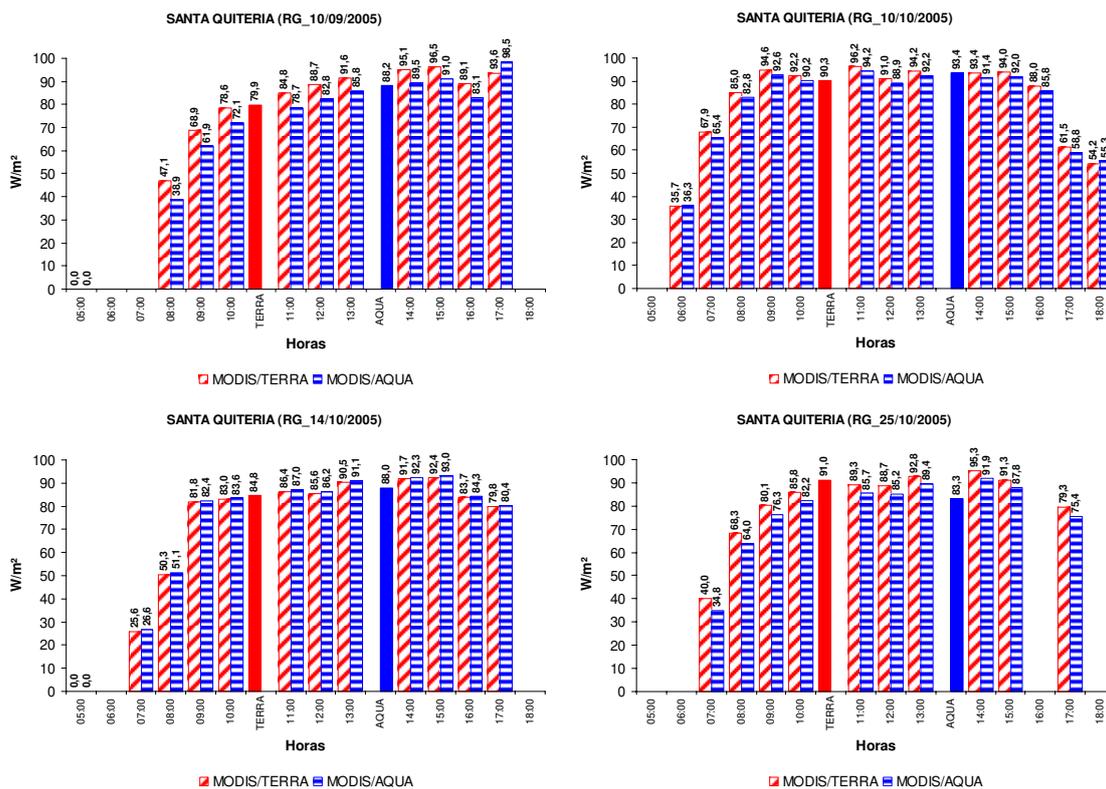


Figura 33 – Percentual absoluto da RG estimada para Santa Quitéria

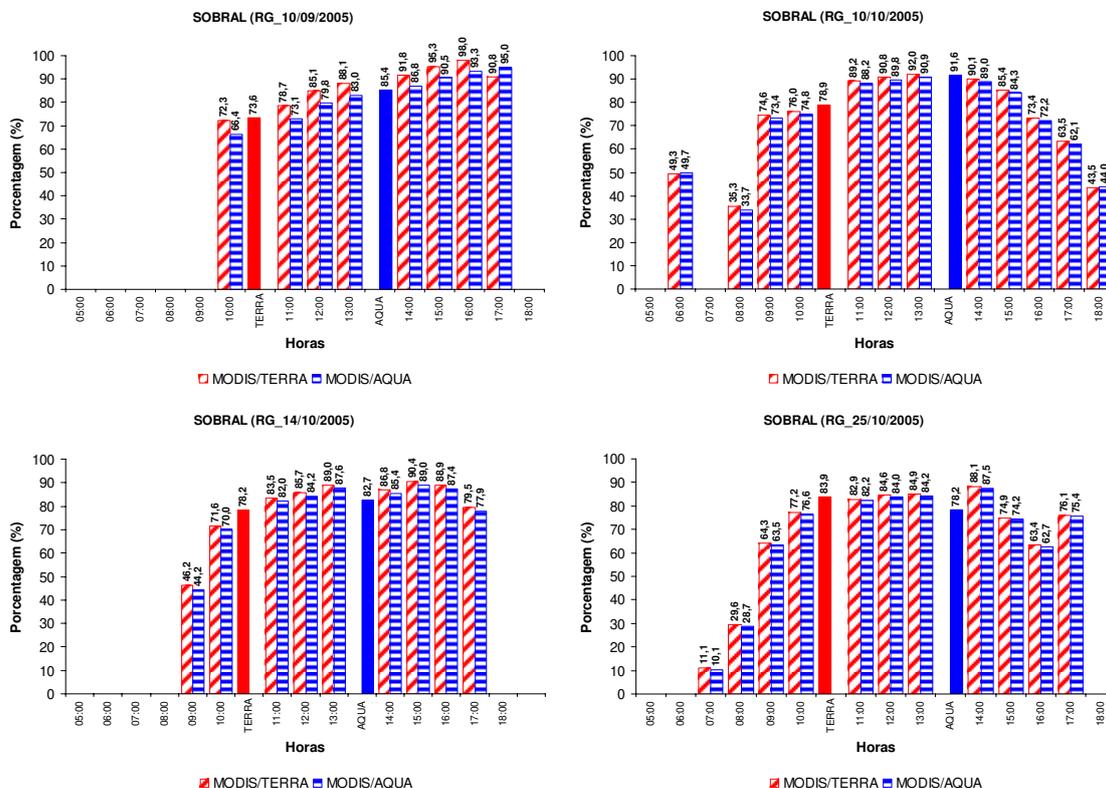


Figura 34 – Percentual absoluto da RG para Sobral

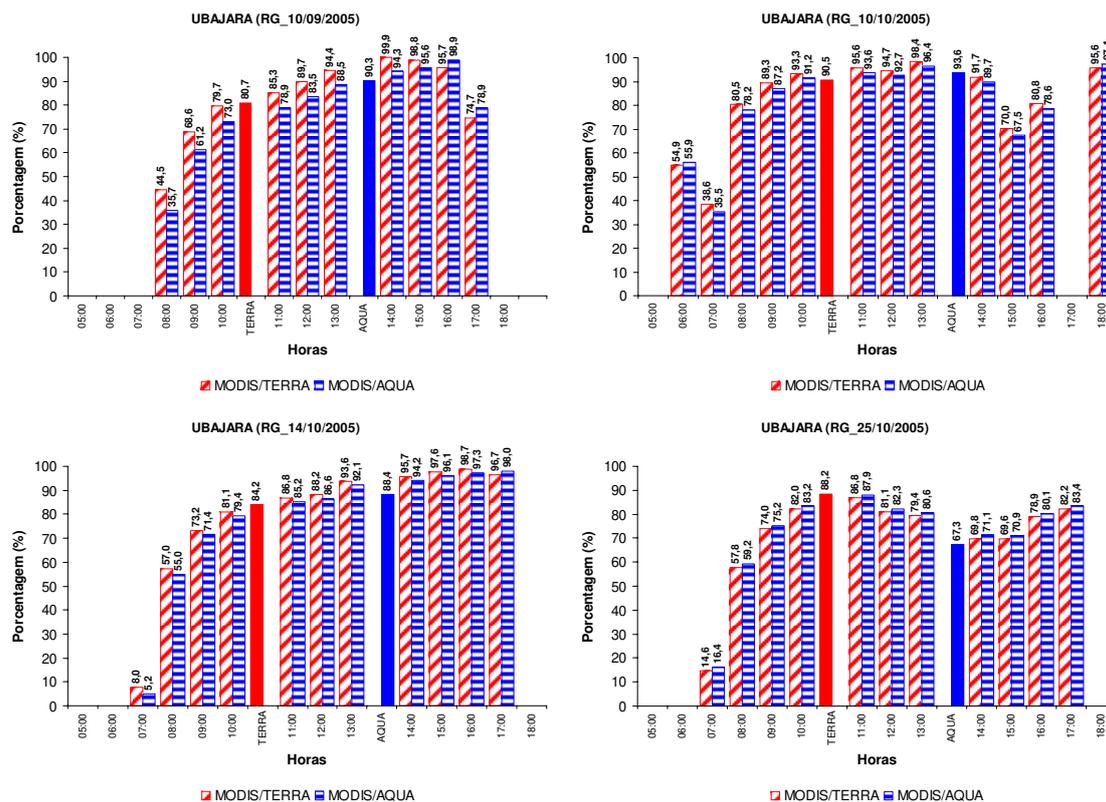


Figura 35 – Percentual absoluto da RG estimada para Ubajara

4.3 - SALDO DE RADIAÇÃO INSTANTÂNEO (R_{ni})

Os valores de R_n calculados pelo MODIS/Terra no instante de sua passagem para a Fazenda Frutacor, localizada em Quixeré no Estado do Ceará, variaram entre $719,1 \text{ W m}^{-2}$ e $822,1 \text{ W m}^{-2}$, apresentando resultados satisfatórios com porcentagem absoluta entre 85,7% (10/set) e 99,4%(25/set), significando diferenças de $96,7 \text{ W m}^{-2}$ e $4,1 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. Os resultados obtidos pelo MODIS/Aqua para o R_n foram entre $601,5$ e $707,1 \text{ W m}^{-2}$, com porcentagem absoluta entre 88,4% (10/set) e 99,7% (10, 14 e 25/out), significando diferenças de $69,6 \text{ W m}^{-2}$ e $1,7 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente.

Em estudo similar com imagens GOES, Jacobs *et al.* (2000) encontraram uma diferença de $73,5 \text{ W m}^{-2}$ e coeficiente de determinação de 0,75 para o saldo de radiação instantâneo quando comparou com dados medidos em um piranômetro. Também encontraram erro na ordem de 14%, enquanto Bisht *et al.* (2005) encontraram diferença nos resultados, erro médio quadrado e R^2 para o saldo de radiação instantâneo, de 59 W m^{-2} , 74 W m^{-2} e 0,89, respectivamente.

Ma *et al.* (2002) encontraram uma diferença percentual absoluta média de 7,5%, ao usar o modelo de transferência radiativa MODTRAN, e Norman *et al.* (2003) encontraram diferença de 50 W m^{-2} entre o saldo de radiação estimado e medido.

As representações gráficas do comportamento do R_n estimado pelos satélites Terra e Aqua e o observado na fazenda Frutacor, em Quixeré, estão nas Figuras 36 e 37, respectivamente, nas quais se observa as proximidades entre medidas e estimativas e os valores em W m^{-2} indicados sobre cada barra do gráfico.

De forma geral, os resultados gerados pelo MODIS/Terra e pelo MODIS/Aqua superestimaram o saldo de radiação em superfície, mas, contudo, a metodologia utilizada neste estudo apresentou resultados satisfatórios de saldo de radiação instantâneo para a fazenda Frutacor durante os dias de estudo, tanto para o MODIS/Terra quanto para o MODIS/Aqua, mostrando ser capaz de estimar com boa precisão para grandes áreas heterogêneas sem necessidade de dados coletados em superfície para entrada no modelo.

Os resultados do saldo de radiação instantâneo calculados com o MODIS/Aqua foram melhores que os obtidos pelo MODIS/Terra; porém, apresentaram pequena diferença entre si.

Na Tabela 3 estão representados os valores de saldo de radiação instantâneo, da diferença absoluta em W m^{-2} e a percentagem absoluta de acerto.

TABELA 3 – Valores estimados, diferenças em W m^{-2} e percentagem absoluta entre valores estimados e observados na Fazenda Frutacor em Quixeré

Saldo de Radiação Instantâneo (W.m^{-2})									
MODIS / Terra					MODIS / Aqua				
10/set	25/set	10/out	14/out	25/out	10/set	10/out	14/out	25/out	
772,8	719,1	822,1	755,1	739,8	670,6	601,5	638,5	707,1	
diferenças absolutas (W.m^{-2})									
MODIS / Terra					MODIS / Aqua				
10/set	25/set	10/out	14/out	25/out	10/set	10/out	14/out	25/out	
96,7	4,07	81,1	9,36	37,4	69,6	1,7	2,16	2,4	
Percentagem absoluta (%)									
10/set	25/set	10/out	14/out	25/out	10/set	10/out	14/out	25/out	
85,7	99,4	89,1	98,7	94,7	88,4	99,7	99,7	99,7	

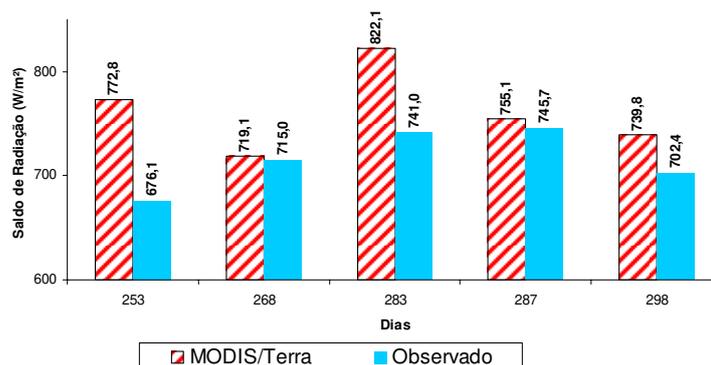


Figura 36 – Valores de saldo de radiação observados e estimados pelo MODIS/Terra

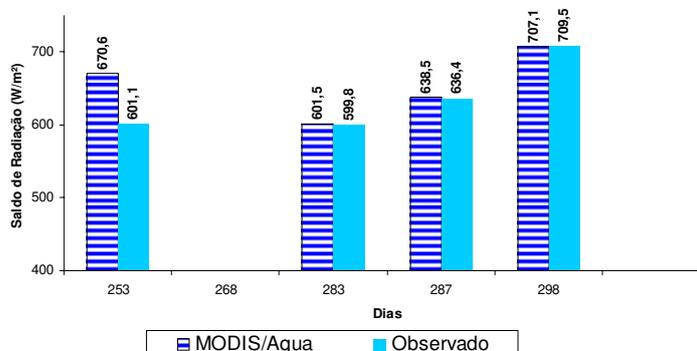


Figura 37 - Valores de saldo de radiação observados e estimados pelo MODIS/Aqua

Foram obtidas cartas de saldo de radiação após o processamento dos produtos MODIS/Terra e MODIS/Aqua, as quais resultaram da interação de imagens com resoluções espaciais de 1 km por 1 km e de 5 km por 5 km, tendo assim, a identificação dos alvos em superfície prejudicada, como por exemplo, a própria Fazenda Frutacor, a qual é coberta por poucos pixels na imagem.

Então, o que se observa é um valor médio para áreas homogêneas de 1 km², em que os valores médios dessas áreas maiores representam os valores observados em superfície com boa aproximação.

A distribuição espacial do saldo de radiação (W m⁻²), obtida para o município de Quixeré com imagens do MODIS/Terra (Figura 38) e MODIS/Aqua (Figura 39), é apresentada a seguir para cada dia estudado, identificadas pelo seu dia de ordem do ano, em que os valores podem ser observados na barra de escala à esquerda e as áreas brancas significam cobertura de nuvens.

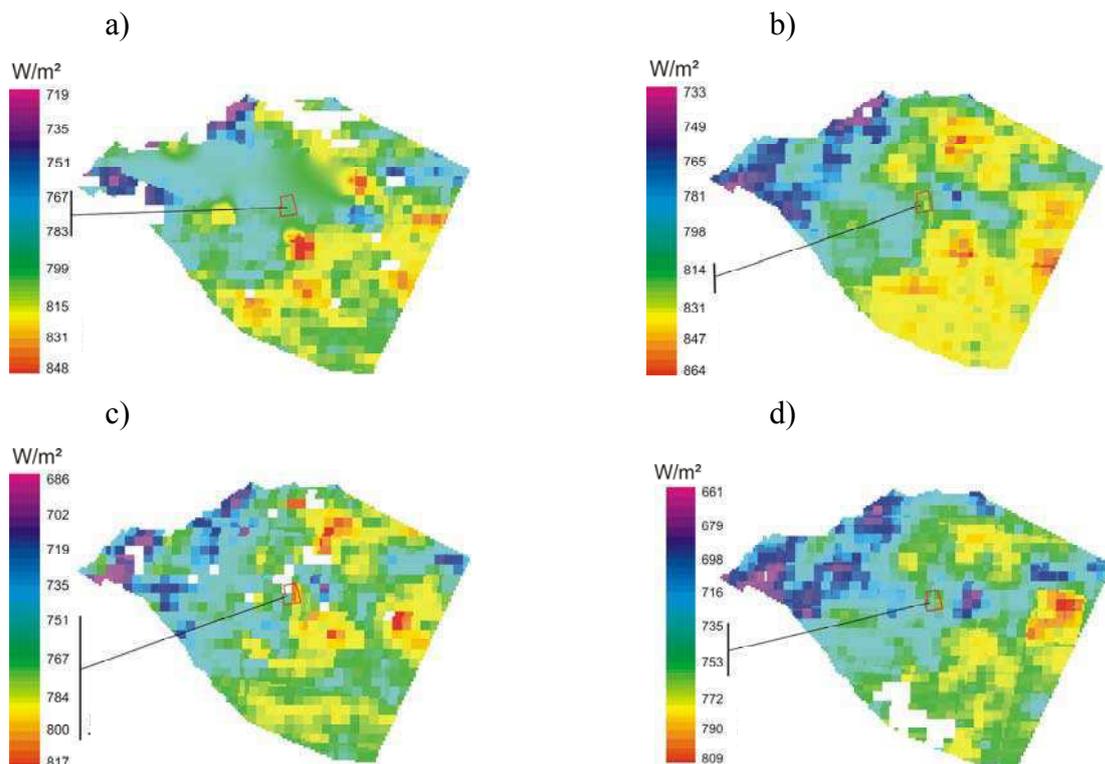


Figura 38 – Cartas de saldo de radiação durante a passagem do MODIS/Terra para Quixeré-CE: a) 10/09/05, b)10/10/05, c)14/10/05, d)25/10/05

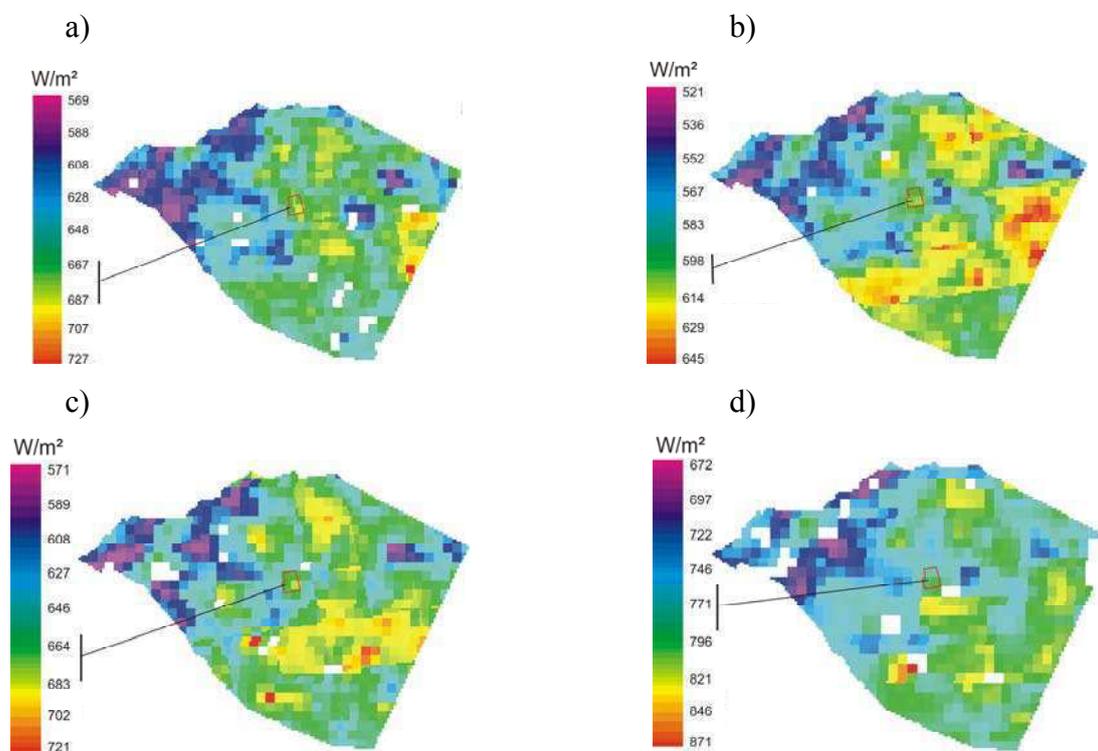


Figura 39 - Cartas de saldo de radiação durante a passagem do MODIS/Aqua para Quixeré-CE: a) 10/09/05, b)10/10/05, c)14/10/05, d)25/10/05

A área em destaque nos mapas representa os limites da fazenda Frutacor, onde foram coletados os componentes do balanço de radiação para validar os resultados obtidos pelos satélites Terra e Aqua.

A técnica aplicada conseguiu estimar valores coerentes para a fazenda Frutacor. Com imagens dos produtos MODIS (Terra e Aqua) é possível supor que as estimativas feitas para todo o município e até mesmo para grandes áreas heterogêneas tenham resultados satisfatórios.

A partir das imagens de R_n em áreas de céu claro, é possível estimar este parâmetro, por interpolação, para as áreas próximas que possuem cobertura de nuvens ou até mesmo falhas de imagem no momento da passagem do satélite, apresentando resultados mais próximos do que os obtidos por técnicas de interpolação baseada em apenas alguns pontos de observação dispersos na superfície ou por equações empíricas.

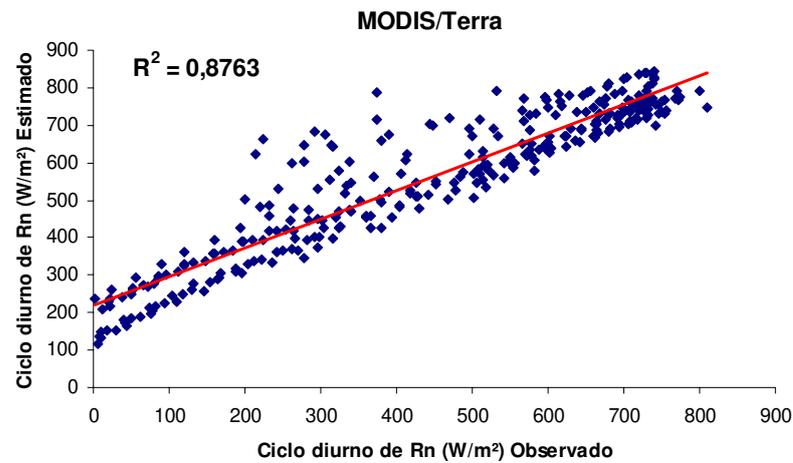
4.4 CICLO DIURNO DO SALDO DE RADIAÇÃO (CDR_n)

Devido a aplicabilidade restrita do saldo de radiação instantâneo comparado com o valor diário ou ciclo diurno de saldo de radiação, é de grande valor a utilização do modelo senoidal para estimativa do CDR_n , assim como da radiação de onda curta que possui comportamento diurno semelhante.

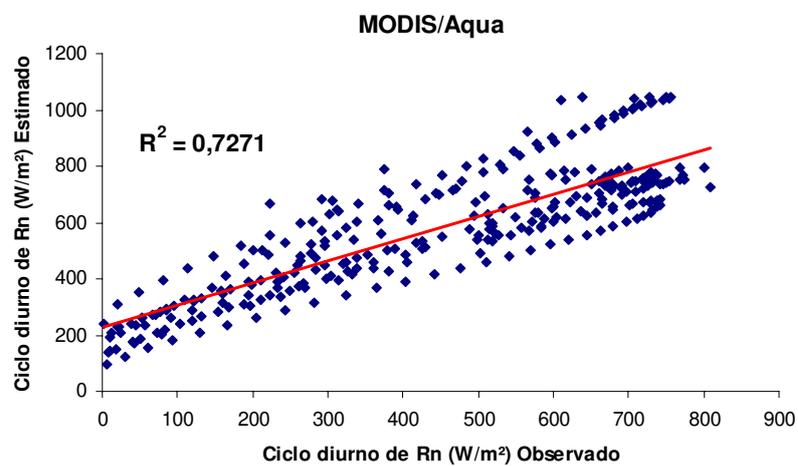
O ciclo diurno do saldo de radiação estimado pelo modelo senoidal apresentou resultados com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,79 (Figura 40) para a fazenda Frutacor em Quixeré. Porém, deve-se considerar que ocorreu presença de nebulosidade durante algumas horas dos dias estudados (Figura 41), gerando dispersão entre os valores estimados e observados.

Para o dia 25 de setembro, compararam-se apenas as estimativas feitas com imagens MODIS/Terra com as medidas saldo de radiação durante o dia. Nesse dia o MODIS/Aqua apresentou falhas nos píxeis que cobriam a região de estudo e, portanto, não foi possível realizar a análise do saldo de radiação estimado nesse dia pelo sensor do Aqua.

a)



b)



c)

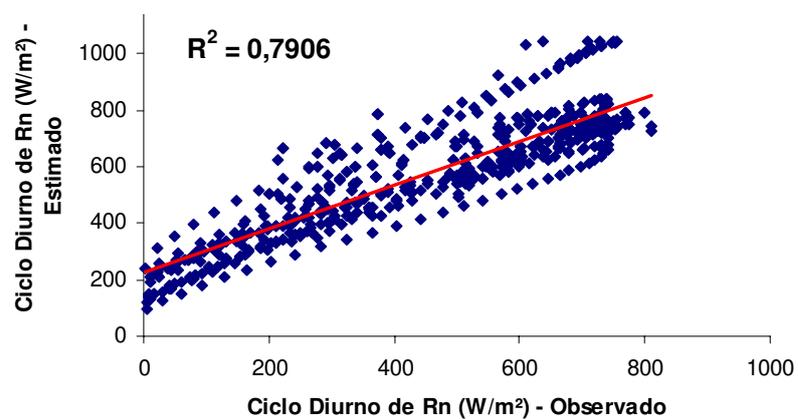


Figura 40 - Dispersão entre os valores horários do Rn estimados e observados: a)MODIS/Terra, b)MODIS/Aqua e c)MODIS/ (Terra e Aqua) na fazenda Frutacor, Quixeré-CE

Para todos os dias estudados, embora o método estime valores desde o nascer do sol até seu ocaso, os valores horários foram melhor estimados para os horários de 9h até 16h devido, principalmente, ao atraso na resposta do saldo de radiação no tempo do nascer e por do sol, sendo possível observar o comportamento do saldo de radiação estimado pelo MODIS/Terra e MODIS/Aqua em relação às medidas de superfície na Figura 41.

A Tabela 4 contém os valores horários estimados de saldo de radiação para cada dia do estudo, em porcentagem absoluta, apresentando os valores médios de aproximação obtidos por cada satélite e também uma média geral das estimativas feitas pelos dois satélites para os horários entre 9h e 16h.

TABELA 4 – Porcentagem absoluta de aproximação dos valores estimados para o CDRn

Data	Sensor MODIS	Porcentagem absoluta de aproximação (%)									
		09:00	10:00	Terra	11:00	12:00	13:00	Aqua	14:00	15:00	16:00
10/09/2005	Terra	53,3	95,0	91,8	98,8	84,9	84,0	-	69,6	73,8	6,9
	Aqua	51,4	94,5	-	99,5	87,3	88,9	82,1	79,1	89,0	85,0
10/10/2005	Terra	79,8	88,5	87,0	89,7	90,0	88,0	-	87,5	7,0	70,8
	Aqua	88,9	86,5	-	88,7	91,4	96,3	93,6	99,4	17,0	-
14/10/2005	Terra	80,6	92,0	92,9	98,4	91,1	96,2	-	91,5	18,4	94,0
	Aqua	84,0	95,1	-	98,7	94,2	99,2	94,8	94,6	23,6	97,0
25/10/2005	Terra	88,7	94,7	96,1	94,9	96,2	96,6	-	75,2	81,3	99,5
	Aqua	81,0	87,5	-	87,7	89,1	89,5	87,1	66,6	73,2	93,6
MÉDIA	(Terra)	75,6	92,6	92,0	95,5	90,5	91,2	-	81,0	45,1	67,8
	(Aqua)	76,3	90,9	-	93,7	90,5	93,5	89,4	84,9	50,7	66,6
	(Geral)	76,0	91,7	92,0	94,6	90,5	92,3	89,4	82,9	47,9	67,2

Para melhor comparar os valores estimados com os observados, aplicou-se o modelo senoidal aos valores observados em Quixeré, de modo a estimar o saldo de radiação nos horários que as medidas feitas em superfície demonstraram ter presença de nuvens e/ou falhas nas medidas, tendo em vista que o modelo é somente para dias sem nebulosidade. O procedimento adotado teve como objetivo principal mostrar graficamente o comportamento entre valores observados e estimados para um dia de céu claro.

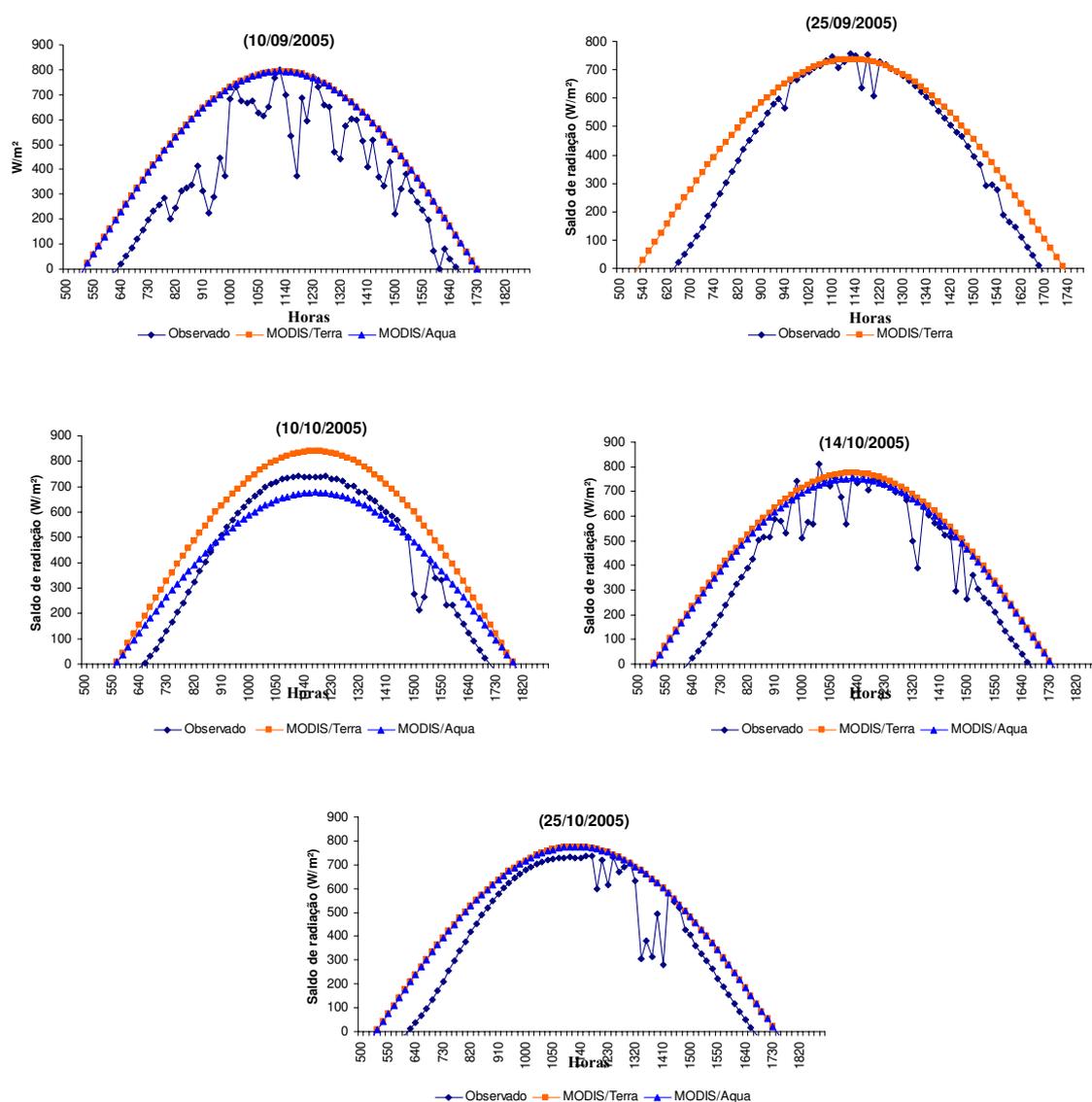


Figura 41 – Ciclo diurno do saldo de radiação (W m^{-2}) estimado e observado em Quixeré

Para correção dos dados observados substituíram-se nas equações (10) e (11) t_{\max} , t_{nasc} , t_{por} e t_{passagem} por $Rn_{\text{máxima}}$, $t_{Rn \text{ positiva}}$, $t_{Rn \text{ negativa}}$ e $t_{Rn \text{ passagem}}$, em que: $Rn_{\text{máxima}}$ foi o saldo de radiação máximo observado, $t_{Rn \text{ positiva}}$ foi o primeiro valor do saldo de radiação positivo e $t_{Rn \text{ negativa}}$ o último valor positivo de Rn observado a cada dia e $t_{Rn \text{ passagem}}$ foi o saldo de radiação observado em superfície na hora da passagem do satélite.

O coeficiente de determinação aumentou, como esperado, para 0,85 após a correção dos valores observados conforme se vê na Figura 42.

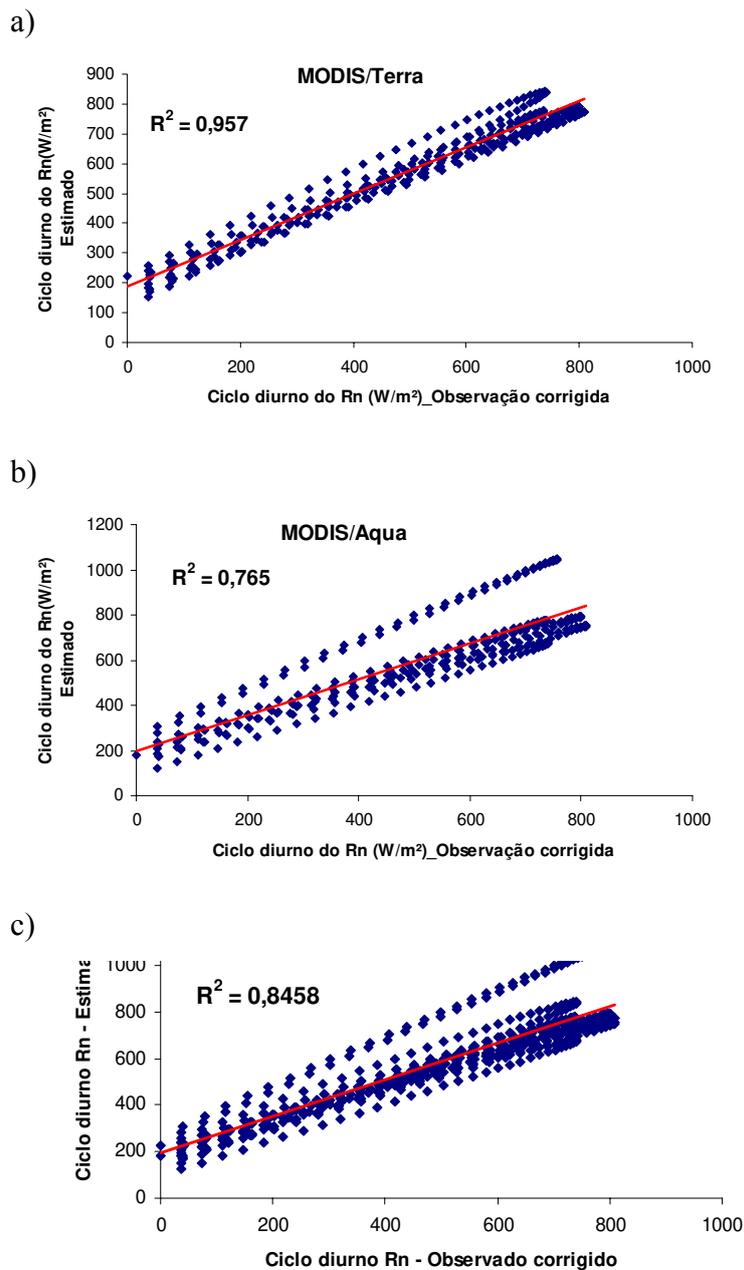


Figura 42 - Dispersão entre os valores horários estimados e observados do Rn ($W\ m^{-2}$) corrigidos em Quixeré-CE

O comportamento do ciclo diurno do saldo de radiação das observações corrigidas e do saldo de radiação estimado pelos satélites, pode ser visualizado na Figura 43. Após a correção aplicada aos valores observados em superfície, podem-se observar maiores proximidades entre os valores medidos e estimados; porém, em todos os casos o saldo de radiação passou a ter medidas positivas, aproximadamente 55 minutos após o

nascer do sol, e apresentaram valores negativos, aproximadamente 40 minutos antes do pôr do sol.

Bisht *et al.* (2005) encontraram diferença de 45 min após o nascer do sol e igual período antes do pôr do sol para a resposta do saldo de radiação; porém, as medidas feitas em superfície para validação foram em intervalos de 15 min, enquanto neste estudo as medidas foram obtidas a cada 10 min.

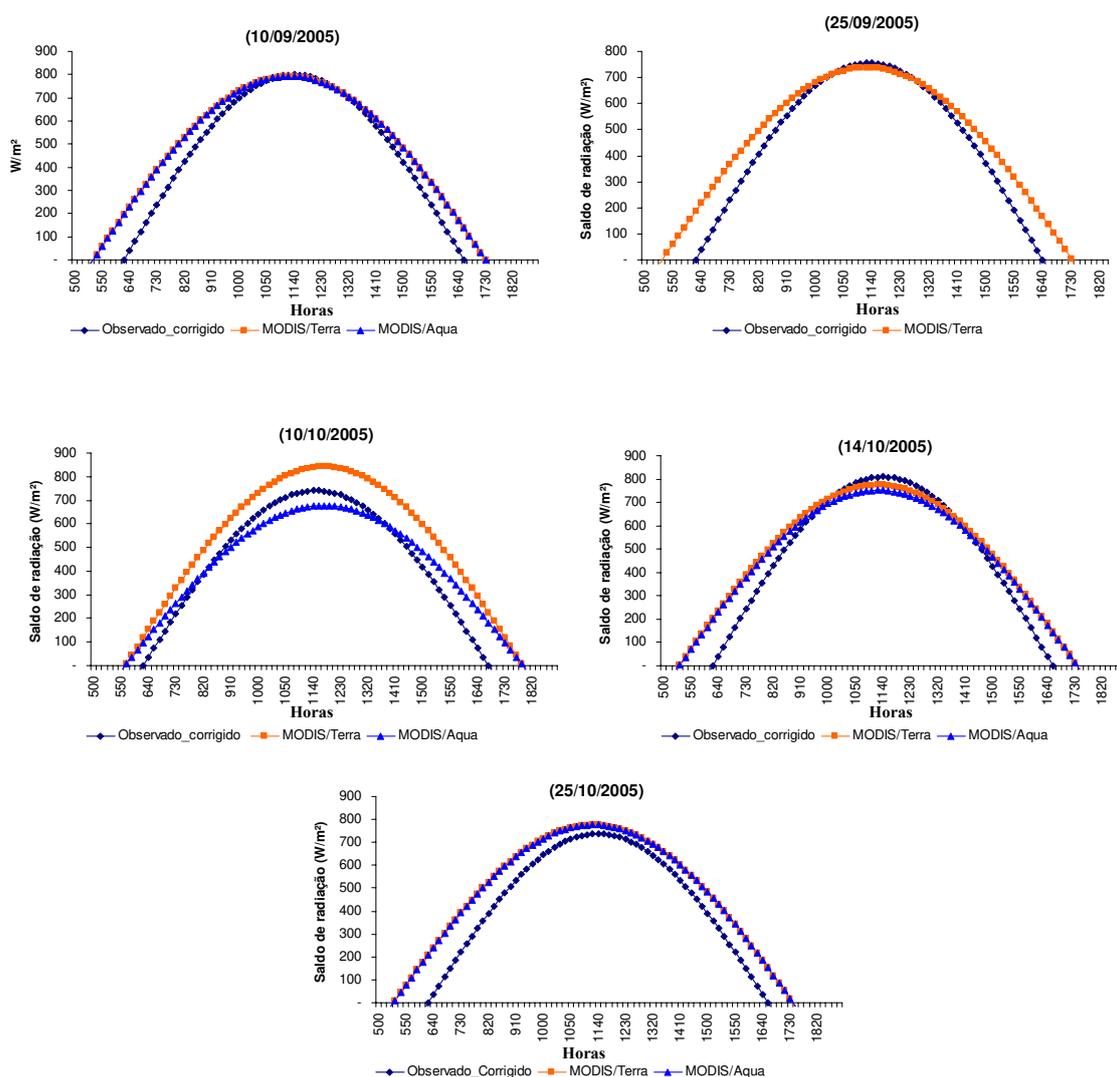


Figura 43 – Comportamento diurno do saldo de radiação ($W m^{-2}$) estimado por satélite e observações corrigidas pelo modelo senoidal em Quixeré-CE

4.5 SALDO DE RADIAÇÃO MÉDIO DIÁRIO (RnMD)

O saldo de radiação médio diário (Tabela 5) foi estimado pelo modelo senoidal, a partir de dados instantâneos do saldo de radiação estimados pelo MODIS a bordo dos dois satélites utilizados, apresentando resultados com aproximações, em porcentagem absoluta, entre 74,2% (10/set) e 98,8% (25/set) (Figura 44), o que correspondeu a uma diferença de $103,7 \text{ W m}^{-2}$ e $5,6 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente.

Em estudo conduzido por Bisht *et al* (2005) com quinze dias de dados, encontrou-se erro médio quadrado, diferença absoluta e coeficiente de determinação de 50 W m^{-2} , 60 W m^{-2} e 0,85, respectivamente, entre o saldo de radiação médio diário observado e estimado.

Tabela 5 – Valores médios diurnos do saldo de radiação observados e estimados

Dia	10/setembro	25/setembro	10/outubro	14/outubro	25/outubro
Observado	401,5	464,0	466,7	459,1	453,3
Terra	504,8	469,6	535,9	492,9	494,2
Aqua	505,2	-	431,0	478,8	494,2

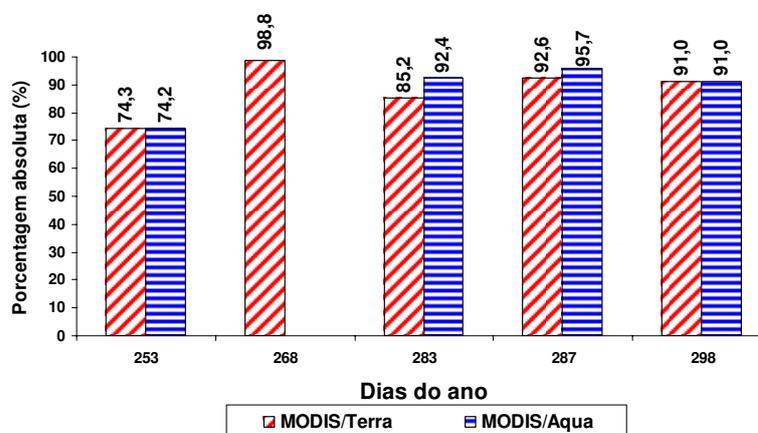


Figura 44 – Porcentagem absoluta entre valores observados e estimados para o saldo de radiação médio diário em Quixeré-CE

Como este estudo utilizou apenas cinco dias, não seria válido um estudo estatístico que utilizassem médias para comparação de resultados, então se utilizaram métodos de comparação baseados em aproximações percentuais absolutas e diferenças absolutas entre os dados observados e medidos (Tabela 6).

Tabela 6 – Comparação entre os valores médios diários de Rn e os valores observados

Dia	MODIS	10/set.	25/set.	10/out.	14/out.	25/out.
Porcentagem absoluta (%)	Terra	74,3	98,8	85,2	92,6	91,0
	Aqua	74,2	-	92,4	95,7	91,0
Diferença absoluta (W m ⁻²)	Terra	103,2	5,6	69,2	33,8	40,9
	Aqua	103,7	-	35,6	19,7	40,8

A equação senoidal proporcionou estimativa de saldo de radiação médio diário acima de 74% de precisão para todos os dias e maior diferença absoluta foi de 103 W m⁻².

De forma geral, os resultados obtidos com produtos MODIS e os estimados pela equação senoidal a partir de valores instantâneos encontrados na hora da passagem do satélite, foram satisfatórios.

4.6 EQUAÇÃO SENOIDAL MODIFICADA

Devido à diferença no tempo de resposta entre o aumento do saldo de radiação e o nascer do sol e a antecipação no decréscimo do saldo de radiação em relação ao pôr do sol foi proposta uma modificação da equação senoidal.

A modificação da equação senoidal foi baseada apenas nas observações feitas durante os dias de estudo, e assim sendo, foram acrescidos 55 minutos à hora do nascer do sol e subtraídos 40 minutos da hora do por do sol nas Equações 10, 11 e 12, resultando nas seguintes equações:

$$Rn(t) = Rn_{\max} \cdot \text{sen} \left[\left(\frac{t - (t_{\text{nasc}} + 0,917)}{(t_{\text{pôr}} - 0,667) - (t_{\text{nasc}} + 0,917)} \right) \pi \right] \quad (16)$$

$$Rn_{\max} = \frac{Rni}{\text{sen} \left[\left(\frac{t_{\text{passagem}} - (t_{\text{nasc}} + 0,917)}{(t_{\text{pôr}} - 0,667) - (t_{\text{nasc}} + 0,917)} \right) \pi \right]} \quad (17)$$

$$RnMD = \frac{2Rni}{\pi \text{sen} \left[\left(\frac{t_{\text{passagem}} - (t_{\text{nasc}} + 0,917)}{(t_{\text{pôr}} - 0,667) - (t_{\text{nasc}} + 0,917)} \right) \pi \right]} \quad (18)$$

Os resultados são mostrados na Figura 45, na qual se observa o ciclo diurno do saldo de radiação obtido com a equação senoidal modificada e os dados observados na estação micrometeorológica localizada na fazenda Frutacor em Quixeré - CE, onde os valores medidos na hora do nascer e do pôr do sol, assim como nas outras horas do dia foram melhor ajustados aos dados estimados.

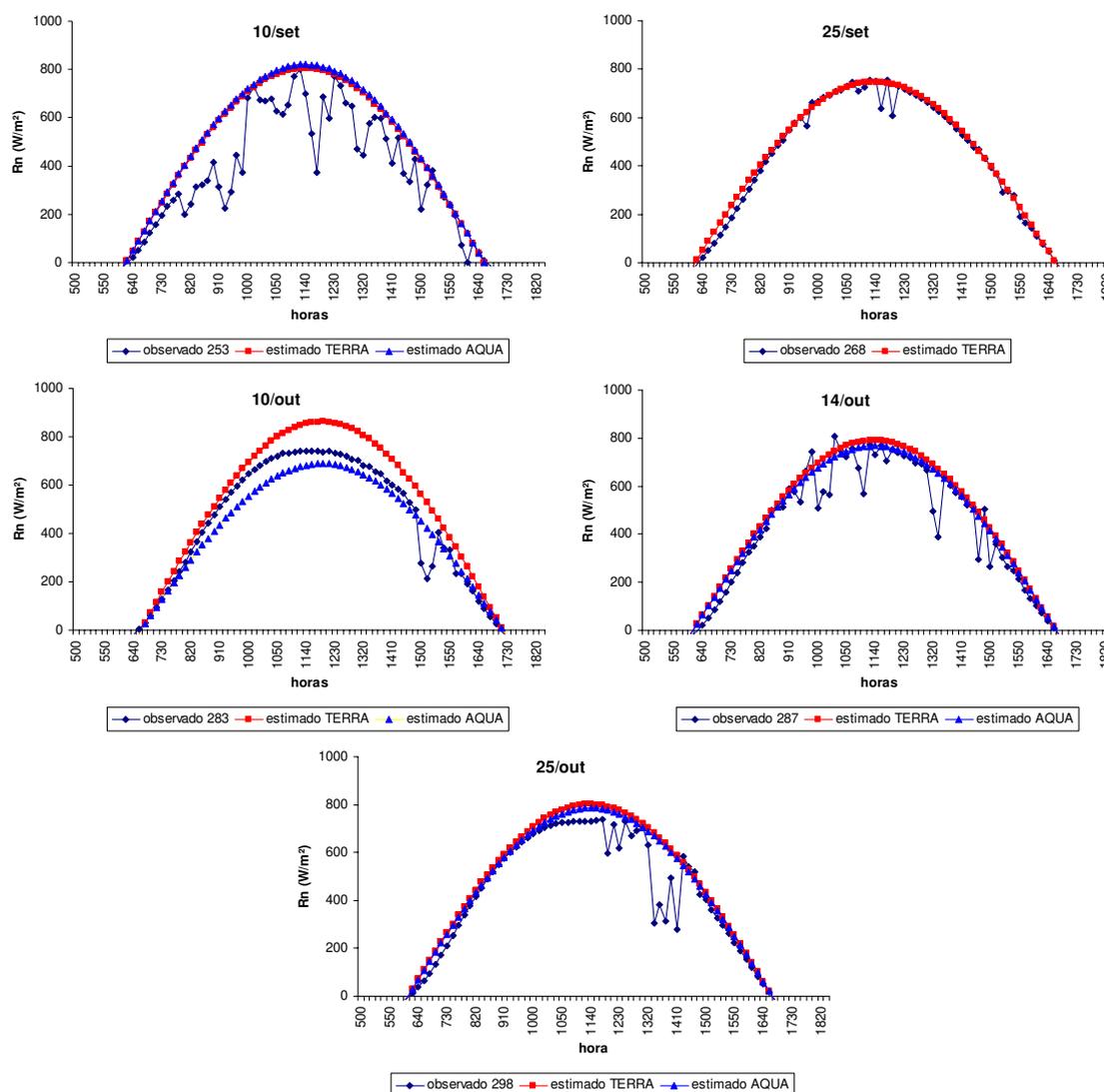


Figura 45 – Ciclo Diurno do Saldo de Radiação ($W m^{-2}$) estimado com a equação senoidal modificada e observado em Quixeré - CE

Para melhor comparação entre os valores estimados pelo modelo senoidal modificado e os valores medidos em um dia de céu claro, foi aplicado o mesmo procedimento de correção dos valores medidos nos horários em que houve cobertura de nuvens ou erros nas medidas desses dados.

O comportamento entre valores estimados e observados corrigidos pode ser observado na Figura 46, válido para dias de céu claro. Os dias 10/set, 25/set, 14/out e 25/out apresentaram os melhores resultados após a correção dos dados observados.

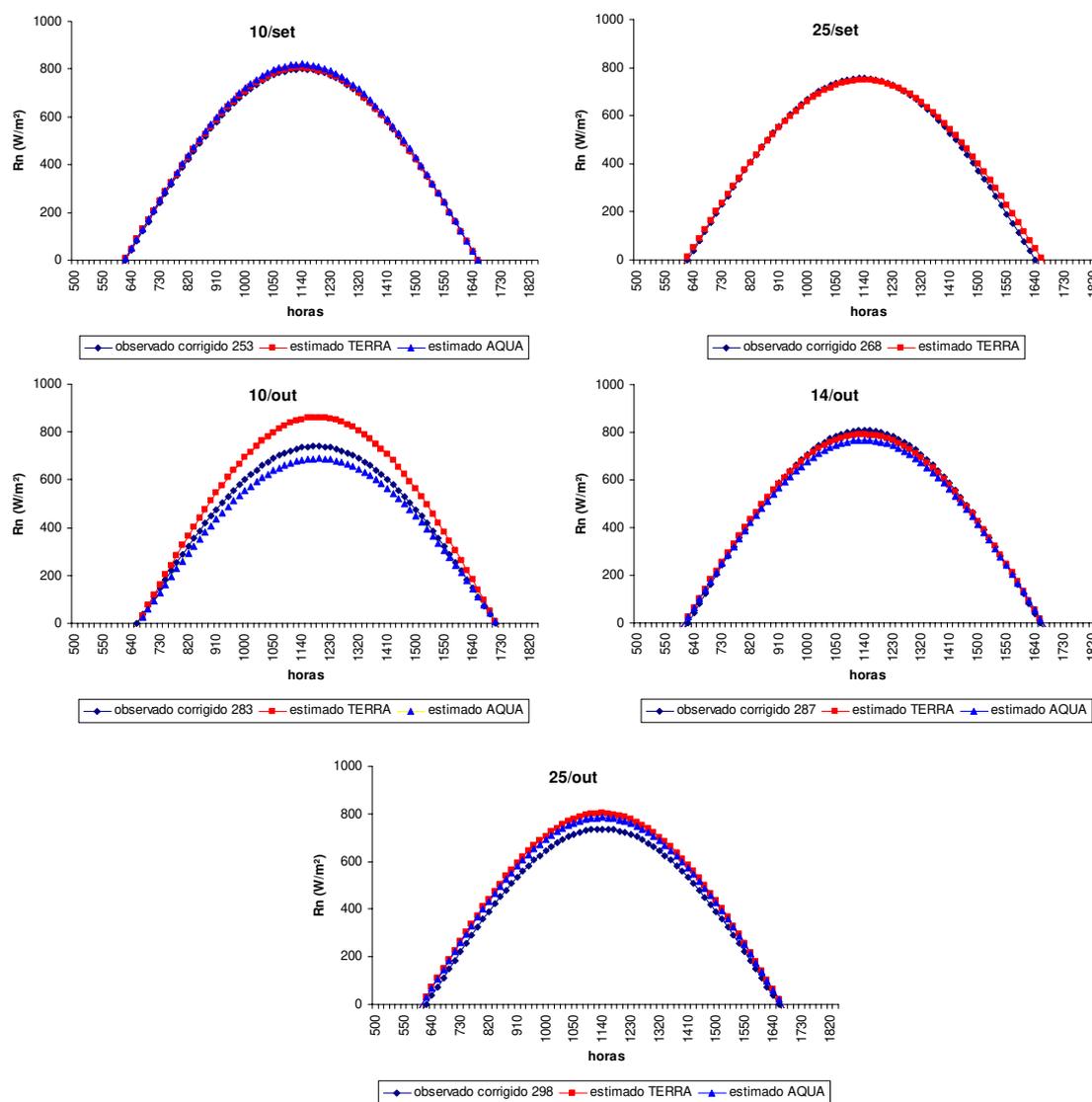


Figura 46 – Ciclo Diurno do Saldo de Radiação ($W m^{-2}$) estimado com a equação senoidal modificada e dados observados corrigidos em Quixeré-CE

Após o incremento das frações de tempo na equação senoidal foram gerados gráficos de dispersão dos valores obtidos pela equação senoidal modificada com os dados observados com e sem correção. O coeficiente de determinação aumentou de 0,93 para 0,99, com os valores obtidos pelo MODIS/Terra.

Por sua vez, o coeficiente de determinação aumentou de 0,90 para 0,99 com as correções promovidas e estimativas do MODIS/Aqua.

Através das Figuras 47 e 48 é melhor de se observar a aproximação dos valores medidos e estimados após a modificação da equação senoidal.

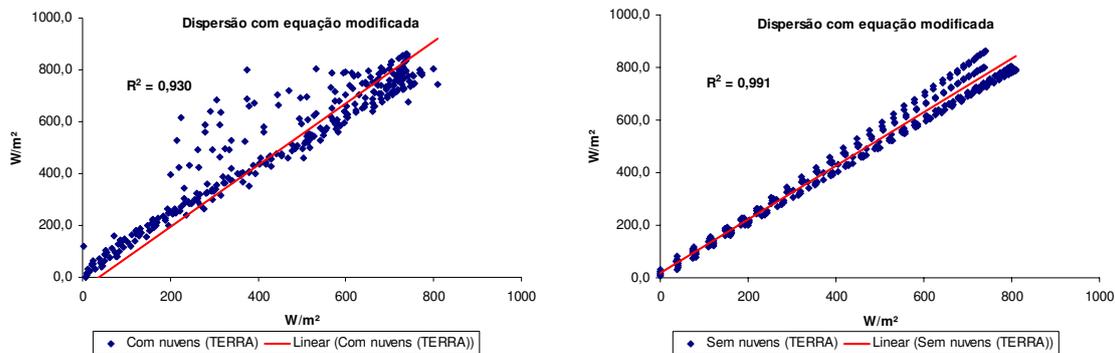


Figura 47 - Dispersão do saldo de radiação horário (MODIS/Terra) obtido com a equação senoidal modificada e os valores observados sem correção para Quixeré-CE

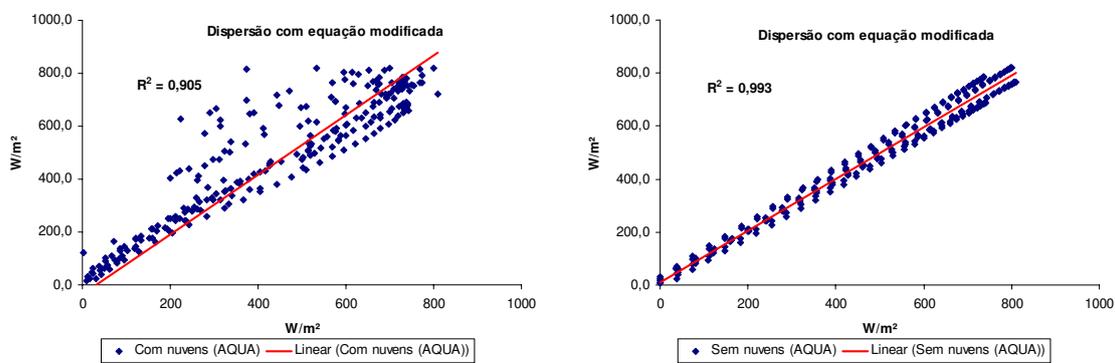


Figura 48 - Dispersão do saldo de radiação horário (MODIS/Aqua) obtido com a equação senoidal modificada e os valores observados corrigidos para Quixeré-CE

5 CONCLUSÃO

A metodologia apresentou resultados satisfatórios para os ciclos diurnos da radiação solar global e saldo de radiação, assim como para a média diurna para o estado do Ceará. Também foi possível reduzir o número de produtos MODIS de cinco para três. Portanto, a pesquisa demonstrou ser capaz de se tornar operacional, pois permite economia de tempo para *download*, economia de espaço em disco para armazenamento dos produtos e economia financeira, pois os produtos são gratuitos e dessa forma torna-se viável para aplicação em áreas de produção agrícola que precisam de tais informações.

A grande vantagem do método empregado é a sua simplicidade e a necessidade de apenas uma medida instantânea do saldo de radiação ou radiação global para se obter valores para as outras horas do período diurno e também sua aplicabilidade para estimativas em grandes áreas heterogêneas. Após o incremento das frações de tempo no nascer e no pôr do sol os coeficientes de determinação foram aproximadamente 99% nas estimativas do saldo de radiação para dias de céu claro demonstrando que o modelo é útil somente para dias de céu claro, o qual não pode obter valores para horários em que o céu apresenta-se nublado.

O estudo apresentado é de grande importância para as regiões com clima árido e sem-árido, nas quais, a água é um fator limitante para produção agrícola, onde a sua evaporação e a evapotranspiração dos seres vivos está diretamente relacionada à energia disponível em superfície. Para estudos posteriores é interessante que sejam aplicados estudos que estimem a evapotranspiração em grandes áreas utilizando somente produtos MODIS e também imagens compostas de médias de oito dias para comparar os resultados com estimativas feitas com produtos diários a fim de identificar as diferenças nos resultados obtidos entre os dois.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSSEN, W. Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL). Advanced Training and users Manual, Kimberly, Idaho, v.1, p. 97, 2002.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. **Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome, Italy. United Nations FAO, p.300, 1998.

AZEVEDO, P. V.; RAMANA RAO, T. V.; AMORIM NETO, M. S.; PEREIRA, J. R. C.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. MACIEL, G. F. Necessidades hídricas da cultura do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.28, n.7, p.863-870, 1993.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B da.; SILVA, V. P. R. 2003. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agric. Water Manage.* v.58, p.241-254, 2003.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M., A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Validation. **Journal of Hydrology**, p.213-229, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H., MENENTI, M.; FEDDES, R. A., Estimation of surface resistance and Priestley–Taylor a-parameter at different scales, In J. Stewart, E. Engman, R. Feddes, & Y. Kerr (Eds.), **Scaling up in hydrology using remote sensing**. New York: Wiley, p.93-111, 1996.

BECKER, F.; LI, Z. L. Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, v.11, n.3, p.369-393, 1990.

BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S., JIANG, LE, Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days, **Remote Sensing of Environment**, v.97, p.52-67, 2005.

CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSON, S. B.; REGINATO, R. J.; DAUGHTRY, C. S. T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v.50, p.1-17, 1994.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Cienci. Agrotec., Lavras**. v.27, p.1260-1263, 2003.

DIK, G. R.; GAUTIER, C. Improvements to a simple physical model for estimating insolation from GOES data. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.22, 505-508, 1983.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Irrigation water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, United Nations, New York, 1977.

ENGESAT - MODIS, disponível em <http://www.engesat.com.br/satelites/modis.htm>, acessado em janeiro 2006.

Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária- EMBRAPA, disponível em <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/satelite/aqua.html>, acessado em janeiro 2006.

Envi - MODIS, disponível em <http://www.envi.com.br/sensor/satelites/terra/modis/modis.html>, acessado em janeiro 2006.

EYRE, J. R.; WOOLF, H. M. Transmittance of atmospheric gases in the microwave region: a fast model. **Applied Optics**, v.27, p. 3244-3249, 1988.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**, São Paulo, Oficina de textos, 2002.

GAUTIER, C.; DIK, G.; MASSE, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. **Journal of Applied Meteorology**, v.19, p.1005-1012, 1980.

GEODETTIC DATUM OVERVIEW, disponível em <http://www.colorado.edu/geograph/gcraft/mnotes/datum/datum.html>, acessado em janeiro 2006.

GEIGER, R. **Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo**, 3.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, p.556, 1961.

GRANGER, R. J. Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 70-76, 2000.

HAMMOND, T. O.; VERBYLA, D. L. Optimistic bias in classification accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p.1261-1266, 1996.

JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSON, S. B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, v.13, p.651-656, 1977.

JACOBS, J. M.; MYERS, D. A.; ANDERSON, M. C.; DIAK, G. R. GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v.266, p.53-65, 2000.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY, disponível em http://www.eoc.jaxa.jp/satellite/satdata/eos-pm1_e.html, acessado em janeiro 2006.

JIANG, L.; ISLAM, S. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. **Water Resources Research**, v.37, n.2, p.329-340, 2001.

KLEIN, S. A. Calculation of Monthly Average Insolation on titled surfaces. **Solar energy**, v.9, p.325-329, 1977.

KUMAR, R.; UMANAND, L. Estimation of global radiation using clearness index model for sizing photovoltaic system. **Renewable Energy**, v.30, p. 2221-2233, 2005.

KUSTAS, W. P; MORAN. S. M; JACKSON, R. D; GAY, L. W; DUELL, L. F. W; KUNKEL, K. E; MATTHIAS, A. D. Instantaneous and Daily Values of the Surface Energy Balance over Agricultural Fields Using Remote Sensing and a Reference Field in an Arid Environment. *Remote Sensing of Environment*. v.32, p.125-141, 1990.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surface. *IAHS Hydrol. Science. Journal*. v.4, n.41, p.495-516, 1996.

LAGOUARDE, J. P.; e BRUNET, Y. A simple model for estimating the daily upward longwave surface radiation flux from NOAA–AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, n.5, p.907-925, 1983.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; MOURA, M. S. B.; SALDANHA, T. R. F. C.; SOBRINHO, J. E.; OLIVEIRA, G.. M. Balanço de Radiação Sobre um Solo Descoberto para quatro Períodos do Ano Radiation Balance at the Surface of a Bare Soil For Four Periods of the Year. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.15, p.59-66, Jun. 2000.

LI, J.; WOLF, W.; MENZEL, W. P.; ZHANG, W.; HUANG, H.-L.; ACHTOR, T. H. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation. **Journal of Applied Meteorology**, v.39, p.1248-1268, 2000.

LI, Z.; LEIGHTON, H. G.; CESS, R. D. Surface Net Solar Radiation Estimated from Satellite Measurements: Comparisons with Tower Observations. **Journal of Climate**, v.6, p.1764-1772, 1993.

LIANG, S.; STRAHLER, A. H.; e WALTHALL, C. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study. **Journal of Applied Meteorology**, v.38, n.6, p.712-72, 1999.

LIST, R. J. **Smithsonian Meteorological Tables**. Smithsonian Institution, Washington, 1971.

MA, Y.; SU, Z.; LI, Z.; KOIKE, T.; MENENTI, M. Determination of regional net radiation and soil heat flux over a heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau. **Hydrological Processes**, v.16, p.2963–2971, 2002.

MENDES, C. A. B; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. **ABRH**, 1ª Ed., v.1, p.536, 2001.

MENZEL, W. P.; SEEMANN, S. W.; LI, J.; GUMLEY, L. E. MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document, Version 6, Reference Number: ATBD-MOD-07, 2002. Disponível em: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod07.pdf. Acessado em 20 Out. 2005.

MOHAMED, Y. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; SAVENIJE, H.H.G. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. **Journal of Hydrology**, v.289,p. 145-164, 2004.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**, 2.ed. London: Edward Arnold, p.291, 1990.

MORAN, M. S; RAHMAN, A. F; WASHBURNE, J. C; GOODRICH, D. C; WELTZ, M. A; KUSTAS, W.P. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.80, p.87-109, 1996.

MOURA, M. S. B. de. Fenologia e consumo hídrico da goiabeira (*Psidium guajava L.*) irrigada. 2001. 124p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

MODIS Website, disponível em <http://www.modis.gsfc.nasa.gov>, acessado em janeiro 2006.

NAGLER, A. P. L.; CLEVERLYB, J.; GLENNA, E.; LAMPKINC, D.; HUETEC, A.; WAN, Z. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. **Remote Sensing of Environment**, v.94, p.17-30, 2005.

NASA - MODIS Atmosphere, disponível em <http://www.modis-atmos.gsfc.nasa.gov>, acessado em janeiro 2006.

NIEMELÄ, S.; RAISANEN, P.; SAVIJARVI, H. Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part II. Shortwave radiation, **Atmospheric Research**, v.58, p.141-154, 2001.

NISHIDA, K., NEMANI, R. R., RUNNING, S. W., & GLASSY, J. M., An operational remote sensing algorithm of land evaporation. **Journal of Geophysical Research**, 108(D9), p. 42-70, 2003.

NORMAN, J. M.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P.; FRENCH, A. N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R., ET AL.; Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. **Water Resources Research**, v.39, n.8, p.12-21, 2003.

OLIVEIRA, Lucimar L; VIANELLO, Rubens, L.; FERREIRA, Nelson J.; **Meteorologia Fundamental**, Erechim/RS: EdiFAPES, p.432, 2001.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.2, p.211-216, abr/jun. 2002.

PEZZOPANE, J. R. M.; JÚNIOR, M. J. P. Balanço de Energia em Vinhedo de 'Niagara Rosada'. **Bragantia, Campinas**, v.62, n.1, 155-161, 2003.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; MEYER, N. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.3, p.1-4, 1995.

PINKER, R. T.; EDWING, J. A.; TARPLEY, J. D. The relationship between the planetary and surface net radiation. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.24, p.1262-1268, 1985.

PRATA, A. J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.122, 1127-1151, 1996.

RANGO, A.; SHALABY, A. Operational applications of remote sensing in hydrology success prospects and problems. **IAHS Hydrol. Sci. J.**, v.6, n.46, p.947-968, 1998.

RAY, S. S.; DADHWAL, V. K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. **Agriculture Water Management**, v.49, p.239-249, 2001.

RIMÓCZI-PAÁL, A. Mapping of radiation balance components for region of Hungary using satellite information. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.30, p.151-158, 2005.

ROBERTSON, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v.65, p.267-279, 1998.

SCHAAF, C. B.; GAO, F. et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p.135-148, 2002.

SEEMANN, S. W.; LI, J.; MENZEL, W. P.; GUMLEY, L. E. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. **Journal of Applied Meteorology**, v.42, p.1072-1091, 2003.

SEGUIN, B.; ASSAD, E.; FREAUD, J. P.; IMBERNON, J. P.; KERR, Y.; LAGOUARDE, J. P. Use of meteorological satellite for rainfall and evaporation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, v.10, p.1001-1017, 1989.

SHARMA, M. L. Estimating evapotranspiration. In: D. Hillel (ed.) *Advances in Irrigation*. Academic Press, Inc., New York, p.127-152, 1985.

SILVA, B. B. da; SLACK, D. C.; KILBY, M. W.; HLA, A. K. Water requirements of table grapes in arid site. In: 24th, Conference on Agricultural and Forest Meteorology, Davis, California. Proceedings, American Meteorological Society, p.20-21. 2000.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos componentes do balanço de energia à superfície com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, INPE, p.3325-3332, abril 2005.

SMITH, W. L.; WOOLF, H. M. The Use of Eigenvectors of Statistical Covariances Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations. **Journal of Atmospheric Science**, v.33, n.5, p. 1127-1140, 1976.

SOUZA, R. A. F. **Inferência de perfis atmosféricos** disponível em http://satelite.cptec.inpe.br/pesquisa/fulltexts/Cap_21_Inferncia_de_perfis_atmosfericos_1.1.pdf, acessado em janeiro 2006, p.21, 2001.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F. e TORNERO, M. T. T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo, *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.34, n.10, p.1763-1774, 1999.

SOUZA, M. J. N. A Cartografia Temática dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente do Estado do Ceará - In: *Anais do I Encontro de Cartografia do Nordeste – Recife*, SUDENE, 1987.

STEWART, J. B.; WATTS, C.J.; RODRIGUEZ, J.C.; BRUIN, H.R.; VAN de BERG, A.R.; GARATUZA-PAYAN, J. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for northwest Mexico. **Agric. Wat. Manage**, v.38, p.181-193, 1999.

SWAIN, P. H.; E DAVIS, S. N. **Remote Sensing: the quantitative approach McGraw-Hill**, New York, p.457, 1978.

VAREJÃO-SILVA, Mário A. **Meteorologia e climatologia**. Ministério da Agricultura e Abastecimento, Instituto Nacional de Meteorologia, 2ª Ed., p.515, 2001.

VERMOTE, E. F.; EL SALEOUS, N. Z.; JUSTICE, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.97-111, 2002.

VIANELLO, Rubens L.; ALVES, Adilson R. **Meteorologia básica e aplicação**. Universidade Federal de Viçosa, p.449, 1987.

VIDAL, A.; SAGARDOY, J. A. Use of Remote Sensing Techniques in Irrigation and Drainage. *Water Reports 4*, FAO, Rome, Italy: p.202, 1995.

WAN, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, Z. Validation of the landsurface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.163-180, 2002.

WELEGEPOLAGE, K. Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherlands, p.114, 2005.

WON, T. K. The Simulation of Hourly Global Radiation from Hourly Reported Meteorological Parameters – Canadian Prairie Area. University of Alberta, Edmonton, 1977.

YANG, K.; HUANG, G. W.; TAMAI, N. A Hybrid Model for Estimating Global Solar Radiation. **Solar Energy**, v.70, n.1, p.13–22, 2001.

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.