

MOACIR DE LIMA PEREIRA NETO

**Avaliação do saldo energético à superfície estimado por  
sensoriamento remoto em Pernambuco**

Recife

2012

MOACIR DE LIMA PEREIRA NETO

**Avaliação do saldo energético à superfície estimado por  
sensoriamento remoto em Pernambuco**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo.**

**Orientador: Prof. Dr. Geber Barbosa de A. Moura**

Recife

2012

Ficha catalográfica

P455a Pereira Neto, Moacir de Lima  
Avaliação do saldo energético à superfície estimado por  
sensoriamento remoto em Pernambuco / Moacir de Lima  
Pereira Neto – Recife, 2012.  
57 f. : il.

Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco Departamento de  
Tecnologia Rural, Recife, 2012.  
Referências.

1. Sensoriamento remoto 2. Balanço de radiação  
3. SEBAL I. Moura, Geber Barbosa de Albuquerque,  
orientador II. Título

CDD 621.3678

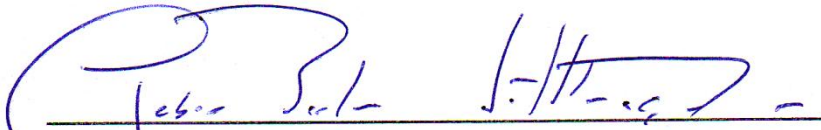
MOACIR DE LIMA PEREIRA NETO

## **Avaliação do saldo energético à superfície estimado por sensoriamento remoto em Pernambuco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo.

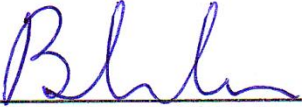
**Aprovado em 30 de abril de 2012**

BANCA EXAMINADORA



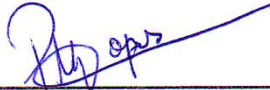
---

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura  
Universidade Federal Rural de Pernambuco



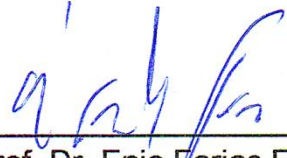
---

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva  
Universidade Federal de Pernambuco



---

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes  
Universidade Federal Rural de Pernambuco



---

Prof. Dr. Enio Farias França e Silva  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

*Aos meus pais Mário e Marta Basto,  
pelo apoio e dedicação irrestrito.  
Sem os quais nada disso poderia ter se  
realizado.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que é o princípio, meio e fim de tudo que faço.

À minha família, principalmente a minha futura esposa, Taciana Leite, pela paciência, compreensão, pelo amor, pelo apoio e estímulos constantes.

Ao meu orientador e amigo prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura, por procurar sempre me oferecer todos os meios e estruturas necessárias no desenvolvimento desse trabalho, pela valiosa orientação e também pelos ensinamentos durante essa caminhada.

Ao prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, por ser um exemplo de pessoa e de profissional, por compartilhar comigo sua experiência durante o curso e por me abrir o universo do SEBAL.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, especialmente ao Departamento de Tecnologia Rural e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do mestrado em Engenharia Agrícola.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelos ensinamentos e amizade concedidos.

Ao Conselho de Aperfeiçoamento e Capacitação de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) por ter cedido os dados das Plataformas de Coleta de dados meteorológicos.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) por disponibilizar as imagens.

E a todos que direta e/ou indiretamente colaboraram na condução e realização do presente trabalho.

## RESUMO

O manejo dos recursos naturais, como a água doce, tem se tornado um dos maiores desafios da sociedade moderna. A gestão inteligente e sustentável de recursos hídricos exige o entendimento dos processos de dissipação, dentro de uma região, nas diferentes superfícies terrestres. O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) tem se tornado uma ferramenta muito útil na estimativa do Saldo de Radiação à Superfície ( $R_n$ ) em termos regionais e/ou para áreas onde existe escassez de informações meteorológicas. Neste trabalho foram obtidos dados de radiação líquida através de rotinas do modelo SEBAL e realizadas comparações destas com saldo de radiação estimado a partir de dados de Radiação Solar Global ( $R_g$ ), medidas à superfície. A irradiância global foi obtida de Plataformas de Coleta de Dados automáticas – PCD's, no Sertão e Agreste de Pernambuco, imageadas em dias de céu claro, em períodos secos e chuvosos, durante os anos de 2007 e 2008. O  $R_n$  instantâneo, computados através do SEBAL, variaram de 473,3 a 708,5  $Wm^{-2}$ , nos pixels onde as estações localizavam-se. Os desvios encontrados entre os  $R_n$  instantâneos, computados através do SEBAL, e os estimados, a partir das medições de  $R_g$  das PCD's, diminuíram em média, de 8,7% para 3,3%, com a calibração mais localizada dos parâmetros internos do SEBAL. A correlação entre os saldos de radiação computados com o SEBAL regionalizado para o Vale do Submédio São Francisco e os estimados a partir das medições de  $R_g$  das PCD's, obteve coeficiente de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,84, com raiz do desvio quadrado médio (RDQM) igual a 26,8  $Wm^{-2}$ . Após o recorte por período pluviométrico anual para as cidades de Floresta, Arcoverde, Ibimirim, Serra Talhada e Caruaru, o resultado do coeficiente de correlação foi de 0,98, com o RDQM = 14,3  $Wm^{-2}$ , para o período chuvoso, e de 0,42, com o RDQM = 35,2  $Wm^{-2}$ , para o período seco. Diante dos resultados, indica-se a realização de calibração dos parâmetros de entrada do SEBAL, para o estado de Pernambuco, procurando determiná-los para a sazonalidade da radiação solar e distribuição intra-anual das precipitações pluviais mensais ao longo do Estado.

Palavras chaves: sensoriamento remoto, SEBAL, balanço de radiação, semiárido.

## ABSTRACT

The management of natural resources such as fresh water has become one of the greatest challenges of the modern society. The smart and sustainable management of water resources requires the understanding of processes of dissipation, within a specific region, in different land surfaces. The SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) has become a very useful tool to estimate the surface net radiation ( $R_n$ ) in terms of regional and/or to areas where there is shortage of weather information. In this work were obtained data for net radiation with this algorithm and compared them with net radiation estimated from Global Solar Radiation ( $R_g$ ), measures the surface. The global irradiance was obtained from Data Collection Platforms (DCP) automatic in the semiarid of Pernambuco, imaged on a clear day, in dry and rainy periods during the years 2007 and 2008. The  $R_n$  instantaneous computed by SEBAL, ranged from 473.3 to 708.8  $Wm^{-2}$ , at pixels where the stations are located. The deviations found between  $R_n$  instantaneous computed by SEBAL and estimated from the data of  $R_g$  from DCP decreasing, on average, from 8.7% to 3.3%, with more regional calibration of the internal parameters of the SEBAL. The correlation between the net radiation counted, with the SEBAL, regionalized to the low-middle São Francisco River basin and those estimated from measurements of  $R_g$  of PCD, got a  $R^2 = 0.84$  with a root mean square deviation - RDQM = 26.8  $Wm^{-2}$ . After cropping a period of rainfall for the year in the cities Floresta, Arcoverde, Ibimirim, Serra Talhada and Caruaru, the correlation coefficient was 0.98 with a RDQM = 14.3  $Wm^{-2}$  for the rainy season and 0.42 with a RDQM = 35.2  $Wm^{-2}$  for the dry period. From the results, we propose perform calibration of the SEBAL input parameters for the State of Pernambuco, seeking them to determine the seasonality of solar radiation and intra-annual distribution of monthly rainfall throughout the state.

Keywords: remote sensing, SEBAL, radiation balance, semiarid.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização das áreas dos recortes de imagens TM-LANDSAT 5 utilizadas no cálculo do saldo de radiação com o SEBAL.....	27
Figura 2	Gráfico dos percentuais dos Desvios encontrados entre o Rn instantâneo e o $Rn_{PCD}$ a partir dos dados das PCD's.....	41
Figura 3	Relação entre o saldo de radiação instantâneo ( $Rn_{A e B}$ ), computados por sensoriamento remoto e o $Rn_{PCD}$ estimado a partir do $Rg$ medidos nas estações meteorológicas automáticas, para todos os períodos estudados.....	43
Figura 4	Relação entre os saldos de radiação ( $Rn_B$ ), computados com os parâmetros do Critério B, após recorte por período pluviométrico do ano e o $Rn_{PCD}$ estimado a partir do $Rg$ medidos nas estações meteorológicas automáticas.....	44
Figura 5	Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Floresta de 05/04/2007.....	45
Figura 6	Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Caruaru de 07/04/2007.....	46
Figura 7	Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Arcoverde de 19/07/2007.....	46
Figura 8	Relação Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Ibimirim de 19/07/2007.....	47
Figura 9	Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Serra Talhada de 26/07/2007.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros da superfície extraídos das imagens TM-LANDSAT 5.....	24
Tabela 2	Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do LANDSAT 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – “a” e máxima – “b”) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (IETAtm).....	26
Tabela 3	Identificação e localização das Plataformas de Coleta de Dados.....	29
Tabela 4	Datas, Órbitas e Ponto das imagens utilizadas.....	31
Tabela 5	Resultado do cômputo do $Rn_A$ instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) com o Critério A, computado por sensoriamento remoto e Desvios relativos encontrados entre o $Rn_A$ instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) e o $Rn_{PCD}$ ( $Wm^{-2}$ ).....	39
Tabela 6	Resultado do cômputo do $Rn_B$ instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) utilizando a calibração para o Submédio São Francisco, computado por sensoriamento remoto e Desvios percentuais encontrados entre o $Rn_B$ instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) e o $Rn_{PCD}$ ( $Wm^{-2}$ ).....	40

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Albedo da superfície ou corrigido
$\alpha_{toa}$	Albedo no topo da atmosfera ou planetário
$h$	Altura média da vegetação
$Z$	Ângulo zenital
$L$	Comprimento de Monin-Obukhov
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman
$K$	Constante de von Karman
$r_0$	Distância média Terra-Sol
$r$	Distância real Terra-sol
$\epsilon_a$	Emissividade atmosférica
$\epsilon_0$	Emissividade da superfície
$\epsilon_{NB}$	Emissividade infravermelha da superfície ou Emissividade termal
$dr$	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol
$R_s \downarrow$	Radiação de onda curta incidente
$R_{ol,atm}$	Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície
$R_{ol,emi}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície
$R_g$	Radiação global medido por instrumento nas Plataformas de Coleta de Dados, estimada para o instante do imageamento do satélite
$L\lambda$	Radiância espectral para a banda $\lambda$
$\rho_\lambda$	Reflectividade da banda $\lambda$
$Rn_{PCD}$	Saldo de radiação calculado a partir do $R_g$
$Rn_A$	Saldo de radiação computado pelo Critério A
$Rn_B$	Saldo de radiação computado pelo Critério B
$T_s$	Temperatura da superfície
$T_a$	Temperatura do ar próximo a superfícies
$\tau_{sw}$	Transmissividade do ar

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
3.1	BALANÇO DE RADIAÇÃO À SUPERFÍCIE.....	15
3.1.1	<b>Balanço de radiação de onda curta</b> .....	18
3.1.2	<b>Balanço de radiação de onda longa</b> .....	18
3.2	SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND (SEBAL).....	19
3.3	SALDO ENERGÉTICO A SUPERFÍCIE ESTIMADO POR SENSORIAMENTO REMOTO.....	21
4	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS.....	27
4.2	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DAS PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS.....	29
4.3	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE.....	30
4.3.1	<b>Calibração radiométrica</b> .....	32
4.3.2	<b>Reflectância monocromática</b> .....	32
4.3.3	<b>Albedo planetário ou albedo no topo da atmosfera</b> .....	33
4.3.4	<b>Albedo da superfície</b> .....	34
4.3.5	<b>Índices de vegetação</b> .....	34
4.3.6	<b>Emissividade da superfície</b> .....	35
4.3.7	<b>Temperatura da superfície a partir das imagens</b> .....	36
4.3.8	<b>Radiação de onda curta incidente</b> .....	37
4.3.9	<b>Radiação de onda longa incidente</b> .....	37
4.4	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS USADOS.....	37
4.4.1	<b>Diferença</b> .....	37
4.4.2	<b>Desvio relativo</b> .....	38
4.4.3	<b>Raiz do desvio quadrado médio</b> .....	38
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	48
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade vem tomando conhecimento de que a água potável está se tornando cada vez mais escassa e, conseqüentemente, mais onerosa, determinando uma importância crescente ao estudo das perdas hídricas. Esta importância é ainda maior para regiões áridas e semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é fator limitante na produção agropecuária, e em muitos casos, chegando a colocar em risco a sobrevivência e permanência das pessoas nestas regiões. Como também em regiões industriais adensadas, onde a demanda por água a partir de mananciais e grandes reservatórios torna-se comumente exaustiva.

A implantação de extensos projetos de irrigação, principalmente em regiões áridas e semiáridas, determina um imenso consumo de recursos hídricos e, por conseqüência, exige uma eficácia maior no uso da água para evitar a sua escassez, em alguma parte da área cultivada e/ou do ciclo das culturas, e também o desperdício em outras. Nestas regiões, o controle adequado e eficiente das reais necessidades hídricas agroindustriais, através do conhecimento das taxas de evapotranspiração (ET), torna-se econômica e tecnicamente incompatível com a utilização de métodos convencionais de determinação da evapotranspiração.

O sensoriamento remoto orbital possibilita detectar alterações que ocorrem à superfície do nosso planeta, resultantes de ações antropogênicas e/ou naturais. Muitos satélites ambientais e/ou meteorológicos têm produzido imagens em diversas regiões do espectro eletromagnético, em particular no infravermelho (próximo, médio, distante e termal). Com essas imagens tem sido possível o monitoramento global e/ou regional de índices de vegetação, albedo e temperatura da superfície, apenas para registrar aqueles que ocorrem à superfície do planeta.

As trocas de energia e de massa que ocorrem na chamada baixa atmosfera, região denominada de Camada Limite Planetária, podem ser conhecidas sobre grandes extensões com o emprego de algoritmos que usam intensamente a resposta radioativa da superfície em diferentes regiões espectrais. Em vários destes algoritmos o saldo de radiação constitui uma das principais variáveis, particularmente naqueles destinados ao cômputo da evapotranspiração.

Em estudos voltados na detecção de mudanças no uso do solo, o saldo de radiação constitui elemento chave. Neste sentido, Allen et al (2007) expressaram que o uso de técnicas de sensoriamento remoto baseado em imagens de satélites, ou de outras plataformas, apresenta-se como uma alternativa com grande potencial

e já vem sendo usada em escala operacional em alguns países. Para Andrade (2008), devido à escassez de dados meteorológicos sobre determinadas localidades, essas técnicas podem ser utilizadas para obter informações de parâmetros de superfície e da atmosfera, que são importantes para o monitoramento de fluxos de energia e de outros parâmetros associados, cujo nível de detalhamento espacial é determinado pela resolução espacial dos sensores utilizados.

Alguns modelos numéricos computacionais têm sido desenvolvidos com estes propósitos já faz algum tempo. Entre eles temos o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), desenvolvido na Holanda por Bastiaanssen (1995), modelo de processamento de imagem de satélites, que define o balanço de energia à superfície, pixel a pixel, para o momento do imageamento, utilizando poucas relações e suposições empíricas, e empregando poucos dados de campo.

O que não pode ser esquecido é que, mesmo tendo sido desenvolvido para ser utilizado em qualquer região do planeta Terra, deve-se preocupar com os resultados alcançados com os algoritmos computacionais, se são representativos, comparando-os com os resultados de técnicas mais acessíveis às pessoas interessadas ou necessitadas destas informações, no seu dia-a-dia.

O primeiro, na sequência do manual do SEBAL, e determinante parâmetro, no processo de estimativa do resultado do balanço de energia à superfície e da ETc, estimado por este algoritmo é o saldo de radiação a superfície ( $R_n$ ). Silva et al. (2005) afirmam que o  $R_n$  exerce um papel fundamental nos processos de troca de calor e de massa na baixa troposfera, uma vez que se constitui no principal responsável pelo aquecimento do solo, do ar e, principalmente, pela evapotranspiração da vegetação nativa e das culturas. Desta forma, ratifica ser também utilizado em estudos de mudanças climáticas, agrometeorológicos, hidrológicos, de processos de desertificação, monitoramento de queimadas e estudos de meio ambiente em geral.

Neste contexto, o presente trabalho propôs-se a avaliar os resultados do  $R_n$  obtido em dois diferentes Critérios, por meio do uso de imagens de satélite, comparando-os com os  $R_{n_{PCD}}$  calculado a partir da Radiação Global ( $R_g$ ) medida em Plataformas de Coleta de Dados (PCD) automáticas, nas cidades de Floresta, Serra Talhada, Ibimirim, Arcoverde e Caruaru, em Pernambuco, imageadas pelo Mapeador Temático do *Land Remote Sensing Satellite* – LANDSAT 5, em diversos dias de céu claro nos anos de 2007 e 2008..

---

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar a importância da calibração regional dos parâmetros internos (albedo da superfície, temperatura da superfície, emissividade aparente da atmosfera, emissividade do infravermelho termal) do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) nas regiões de estudo em Pernambuco.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os resultados dos saldos energéticos computados, utilizando imagens de satélite, com os resultados de estimativas de saldos energéticos a partir da energia global medida no radiômetro das estações meteorológicas localizados no agreste e do sertão pernambucano.
- Correlacionar os saldos de radiação computados no agreste e no sertão de Pernambuco com o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* regionalizado para o Vale do Submédio São Francisco.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta revisão de literatura buscou-se enfatizar: a importância do saldo de radiação à superfície, sendo este parâmetro inicial na estimativa da Evapotranspiração utilizando o SEBAL e a partir do qual se pode aumentar a precisão dos resultados computados; a universalização do emprego do SEBAL e a busca por parametrizações de entrada do balanço de radiação, mais regionalizadas.

#### 3.1 BALANÇO DE RADIAÇÃO À SUPERFÍCIE

Segundo Alves et al. (1998), a energia utilizada nos processos de aquecimento e resfriamento do ar e do solo, de transferência de água na forma de vapor da superfície para a atmosfera e do metabolismo das plantas e animais é proveniente da radiação solar. Portanto, o conhecimento da partição dos componentes do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ), principalmente a radiação solar incidente e refletida, é de grande importância para estudos, por exemplo, das perdas d'água da superfície para a atmosfera. Além disso, tem sido mais frequente a determinação do  $R_n$  em estudos destinados a obtenção das componentes do balanço de energia (AZEVEDO et al., 2003 e 2007; SILVA e BEZERRA, 2006; ZHANG et al., 2008).

Podemos considerar o Balanço de Radiação à superfície como um processo em que se computa todos os componentes resultantes da interação das radiações que chegam e que sai de uma determinada área, e o  $R_n$  como a síntese do mesmo.

O  $R_n$  representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia radiativa com a superfície e determina a quantidade de fluxo de energia disponível para a evaporação da água e para a variação na temperatura da superfície. Portanto, mais complexo que no topo da atmosfera, pois considera os fluxos de energia e de umidade por condução e por convecção no movimento dos fluidos à superfície (ARYA, 1988). Estes movimentos, por sua vez, dependem basicamente da insolação e características da superfície, tais como umidade, cobertura vegetal, albedo, e do estado da atmosfera próximo à superfície (GOMES et al., 2009).

Além de representar o fluxo de massa e energia entre a superfície e a atmosfera, o  $R_n$  constitui uma fonte extraordinária de energia a diversos fenômenos meteorológicos, como as correntes de ar e precipitações. Uma tonelada de água que evapora da superfície transporta consigo cerca de 2,45 bilhões de Joules e por esta razão desempenha um papel importante no transporte de energia entre as diferentes



regiões do planeta, atuando como moderador das condições de tempo e clima no nosso planeta (VAREJÃO-SILVA, 2000).

O  $R_n$  é obtido diretamente por meio de saldorradiômetros, que raramente são empregados em estações meteorológicas, mas tão somente em campanhas experimentais, devido ao elevado custo e medições válidas para áreas com pequena dimensão (GOMES et al., 2009). Este parâmetro, constituído da soma algébrica dos balanços de ondas curtas e longas, incidentes e ascendentes, é a radiação que fica disponível do resultado da interação das radiações que chegam e que saem de uma determinada área. A integração dessa radiação no período diurno em geral é positivo e sua integração diária na maioria dos casos resulta em um  $R_n$  diário também positivo (SENTELHAS e NASCIMENTO, 2003).

Ademais, a determinação do saldo de radiação pode ser realizada por meio de medidas com sensores automáticos ou por estimativas com emprego de modelos, sendo de grande importância no balanço de energia, monitoramento do clima, previsão de tempo, modelagem hidrológica e meteorologia agrícola (BISHT et al., 2005). Aplicações na agricultura e modelos de estimativa de ET (evapotranspiração) precisam de informações referentes ao saldo de radiação e seus componentes, quer sejam em valores médios diários ou de ciclos diurnos (ATAÍDE, 2006).

A medição do  $R_n$  por instrumento é problemática, devido a dificuldade em se manter os saldorradiômetros calibrados, existindo uma boa possibilidade de erros sistemáticos. Geralmente, e com boa precisão, o  $R_n$  é medido em função dos valores observados da radiação de onda curta (solar), pressão de vapor e temperatura do ar (ASCE-EWRI, 2005). O saldorradiômetro é constituído de duas placas sensores com pares termoelétricos, uma voltada para cima e outra para baixo, captando as energias de ondas curta direcionadas para dentro e longa direcionadas para fora da superfície. Apesar da disponibilidade deste tipo de sensor, a medida direta do saldo de radiação ( $R_n$ ) é pouco comum, tanto em estações meteorológicas convencionais como nas automáticas (PEREIRA et al., 2002).

A determinação do  $R_n$  com o uso de modelos de estimativa, tem se mostrado como a alternativa mais viável para a utilização de seu valor em estudos que o necessitem como variável de entrada, por exemplo, na determinação da ET e da duração do período de molhamento (DPM). Lembrando que no caso da estimativa

da DPM, há a necessidade de dados horários de  $R_n$  (MONTONE e SENTELHAS, 2010).

Iziomon et al. (2000) propuseram um modelo no qual  $R_n$  é dado em função da temperatura média horária e da irradiância solar global média horária. Para fins práticos, o  $R_n$  de uma superfície também pode ser estimado em função da radiação solar global ( $R_g$ ), visto que há estreita relação entre elas (PEREIRA et al., 1997). Entre si, os modelos diferem quanto à complexidade de suas variáveis de entrada. Alguns exigem dados de cobertura e altura de nuvens, limitando sua aplicação. No entanto, quando a nebulosidade não é considerada, ocorre subestimativa do  $R_n$ , pois a presença de nuvens dificulta a emissão de ondas longas da superfície para a atmosfera, tornando, principalmente, o  $R_n$  menos negativo no período noturno (SENTELHAS e GILLESPIE, 2008).

Silva et al. (2011) mencionam que o  $R_n$  depende muito da natureza da superfície e, por conseguinte, sofre grande influência do albedo ( $\alpha$ ) e temperatura da superfície ( $T_{sat}$ ), e que portanto, não é usualmente medido em estações meteorológicas. E ainda ressaltam que os intercâmbios entre os componentes do  $R_n$  possibilitam identificar alterações naturais ou antrópicas decorrentes de mudanças no uso do solo. Tais mudanças são capazes, em diversos projetos irrigados no planeta, de comprometer a fertilidade do solo pela salinização, o que resulta em aumento no  $\alpha$  e  $T_{sat}$  e possibilitam alterações climáticas locais.

Com relação à topografia do terreno, o  $R_n$  sobre uma área plana, horizontal e situada próximo à superfície terrestre, é a soma do Balanço de Onda Curta (BOC) com o Balanço de Onda Longa (BOL), que consiste no cômputo dos ganhos (fluxos descendentes) e perdas (fluxos ascendentes) radiativas (ALLEN et al., 1998). Os ganhos correspondem à radiação de onda curta ou solar incidente ( $R_{s\downarrow}$ ) e à radiação de onda longa incidente ( $R_{ol,atm}$ ); as perdas envolvem a radiação solar refletida pela superfície ( $R_{ref}$ ), a radiação termal emitida pela superfície ( $R_{ol,emi}$ ) e a radiação termal atmosférica refletida pela superfície ( $R_{atm,ref}$ ), conforme a seguinte:

$$R_n = (R_s - R_{ref}) + (R_{ol,atm} - R_{ol,emi} - R_{atm,ref}) \quad (\text{Eq.01})$$

As desvantagens, na estimativa das componentes do balanço de radiação por sensoriamento remoto, estão na necessidade de dados de sensoriamento remoto em condições de céu sem nuvens e sua utilização seria apropriada apenas para superfícies planas (BASTIAANSEN, 1995).

### 3.1.1 Balanço de radiação de onda curta

Quase todo o fluxo de energia solar está compreendido entre os comprimentos de onda que vão de 0,15 a 4,00  $\mu\text{m}$ . A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, interage com esta fazendo com que parte seja refletida, absorvida e transmitida. Na prática, as medidas de onda curta na superfície são representadas por medidas de radiação global que compreendem, em grande parte, a radiação direta do Sol, enquanto outras partes vêm nas formas de radiação refletidas na superfície e nuvens e de radiação dispersa de partículas ou aerossóis atmosféricos, a radiação difusa (ARYA, 1988; LIBERATO e CARDOSO, 2010).

O balanço de radiação de onda curta na superfície é determinado pela diferença entre os  $R_{s\downarrow}$  e  $R_{\text{ref}}$ , com abrangência espectral de 0,3 a 3,0  $\mu\text{m}$ , variando em função da sensibilidade do instrumento de medida de  $R_{s\downarrow}$  e são, portanto, dependentes da radiação solar global e do albedo da superfície ( $\alpha_{\text{sup}}$ ). Portanto, num dado instante e período, o balanço de radiação de onda curta é dado por (BASTIAANSSEN, 1995):

$$(R_s - R_{\text{ref}}) = (1 - \alpha)R_s \quad (\text{Eq.02})$$

### 3.1.2 Balanço de radiação de onda longa

O Balanço de Onda Longa é um dos parâmetros de grande importância em diversos estudos meteorológicos, a exemplo da previsão de variações diurnas de temperatura, geadas e nevoeiros noturnos, bem como em avaliações do resfriamento radiativo noturno de construções (JIMENEZ et al., 1987).

O balanço de onda longa à superfície compreende três componentes: a radiação atmosférica incidente ( $R_{\text{ol,atm}}$ ), a radiação emitida ( $R_{\text{ol,emi}}$ ) e a radiação atmosférica refletida pela superfície ( $R_{\text{atm,ref}}$ ). A primeira é função, basicamente, da temperatura do ar, da quantidade de vapor d'água presente na atmosfera e da cobertura de nuvens. A segunda, por sua vez, depende da temperatura e emissividade da superfície, enquanto a radiação termal atmosférica refletida ( $R_{\text{atm,ref}}$ ) depende da magnitude da radiação de onda longa incidente e da emissividade da superfície ( $\varepsilon_0$ ).

Os métodos mais precisos para calcular a radiação de onda longa da atmosfera, em dias de céu claro, são baseados em dados do perfil de umidade e de temperatura do ar próximo à superfície (LEITÃO, 1994). Como estes dados

raramente estão disponíveis, o modelo mais utilizado para estimativa do BOL está baseado na lei de Stefan-Boltzmann:

$$R_{ol} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{Eq.03})$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a  $5,6697 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ,  $\varepsilon$  é a emissividade e  $T$  a temperatura (medida em Kelvin - K), do objeto ou elemento emissor de radiação de ondas longas.

A maioria da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 3 a 100  $\mu\text{m}$  e é denominada radiação de onda longa ( $R_{ol}$ ) ou radiação termal. O vapor de água, as nuvens, o dióxido de carbono e a poeira são absorventes e emissores de radiação de onda longa. As taxas de  $R_{ol,emi}$  e  $R_{ol,atm}$  são proporcionais às suas temperaturas absolutas elevada à quarta potência. Esta relação é expressa quantitativamente pela lei de Stefan-Boltzmann, que depende da temperatura da superfície ou da temperatura do ar e de suas emissividades, respectivamente (ARYA, 1988; ALLEN et al., 1998). Na prática, quando não se dispõe de aparelhos de medida, uma alternativa seria o uso de equações empíricas para a estimativa do balanço de onda longa (VIANELLO e ALVES, 1991).

Uma das principais razões para que o BOL seja um dos componentes do  $R_n$  mais difíceis de ser medido é o fato de que os instrumentos usados para este propósito também emitem radiação em comprimentos de onda e intensidade comparáveis àqueles que devem ser medidos pelo instrumento (SILVA, 2006).

### 3.2 SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND (SEBAL)

O modelo SEBAL baseia-se no balanço de radiação à superfície, o qual se divide entre o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor latente e o fluxo do calor do solo e pode ser utilizado com imagens digitais coletadas por qualquer satélite orbital que registre a radiação nos comprimentos de onda do infravermelho termal, visível e infravermelho próximo (ALLEN et al. 2002).

A base teórica e computacional do SEBAL é descrita em Bastiaanssen et al. (1998), Bastiaanssen (2000) e Bastiaanssen et al. (2005). No SEBAL, a evapotranspiração (ET) é obtida com a conversão do valor instantâneo do fluxo de calor latente (LE), medido em Watts por metro quadrado ( $\text{W m}^{-2}$ ), para o período de um dia. O LE é obtido como resíduo da equação do balanço de energia à superfície, qual seja,  $R_n = LE + H + G$ , onde  $H$  é a densidade de fluxo de calor sensível e  $G$  é a densidade de fluxo de calor no solo, todos em  $\text{W m}^{-2}$ . Os dados de entrada

acionadores para o SEBAL são a radiância espectral na banda do visível, do infravermelho próximo e da banda infravermelha térmica, do espectro da Radiação Eletromagnética (BASTIAANSSEN et al., 1998).

Os preceitos físicos envolvidos no algoritmo do modelo SEBAL permitem o cálculo dos fluxos de massas em superfície para uma ampla gama de uso do solo e calcula o  $R_n$  e o balanço de energia para cada pixel de uma imagem (BASTIAANSSEN e ALI, 2003) sem a necessidade de extensivas e onerosas medidas de campo, ou seja, com um número reduzido de dados meteorológicos, facilmente obtidos (TIMMERMANS e MEIJERINK, 1999). O SEBAL é constituído, praticamente, por parametrizações físicas bem estabelecidas e pouco complexas, sendo que do total de passos existentes, poucos são aqueles que envolvem parametrizações empíricas. Para a determinação do  $R_n$  as parametrizações empíricas são a emissividade, a temperatura da superfície e a emissividade da atmosfera (PAIVA, 2005).

A emissividade depende da característica do corpo, mas que pode variar com a temperatura e o comprimento de onda e é dada pela razão entre a emitância radiante do corpo, a temperatura e o comprimento de onda determinados, pela emitância do corpo negro na mesma temperatura e comprimento de onda. Uma vez que os elementos encontrados em cada pixel de uma imagem da superfície da Terra não se constituem em um corpo negro, há necessidade de se estimar as suas emissividades (FLORES, 2007).

O SEBAL tem sido amplamente aplicado em diferentes áreas do globo, incluindo as aplicações nos Estados Unidos, França, China, Turquia, Egito e outros países africano, europeu e asiático (BASTIAANSSEN et al., 2005), alcançando resultados muito consistentes e importantes no gerenciamento e monitoramento de recursos naturais (GIONGO, 2008). Em estudos que visam determinar principalmente o consumo diário hídrico de culturas, passando pelo cálculo do  $R_n$ , o SEBAL já foi aplicado em diversos locais, a exemplo de Botsuana (TIMMERMANS e MEIJERINK, 1999), Filipinas (HAFEEZ et al., 2002), Sri Lanka (BASTIAANSSEN e CHANDRAPALA, 2003; HEMAKUMARA et al., 2003; SAMARASINGHE, 2003), Estados Unidos (AHMAD e BASTIAANSSEN, 2003; ALLEN et al., 2005; TASUMI et al., 2005; TASUMI e ALLEN, 2007) e Uzbequistão (CHEMIN et al., 2004). No Brasil, foram feitas aplicações no Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, localizado nos sertões dos estados da Bahia e Pernambuco, às margens do Rio São Francisco

(BASTIAANSSEN et al. 2001; LOPES, 2003; BEZERRA, 2004; DI PACE, 2004; FEITOSA, 2005; SILVA e BEZERRA, 2006), na Chapada do Araripe - CE (BEZERRA, 2006; MENDONÇA, 2007 e FOLHES, 2007), em Dourados - SP (PAIVA, 2005) e Rio Verde - GO (SANTOS, 2010).

Embora o SEBAL tenha sido projetado para calcular o balanço de energia em escala regional, através de um mínimo de dados de campo, a parametrização local, de quaisquer equações utilizadas em sensoriamento remoto, pode melhorar a precisão do modelo (DUCHEMIN et al., 2006).

Teixeira et al. (2009) reuniram dados de satélite, medições de campo da radiação de superfície e de balanços de energia e dados de estações agrometeorológicas para rever as várias etapas do SEBAL, afim de adaptar equações relevantes para o semiárido da bacia do Vale do Submédio São Francisco. Neste trabalho, o albedo da superfície, a temperatura da superfície e a emissividade atmosférica aparente, que são elementos de entrada para o cálculo do  $R_n$ , foram alguns dos parâmetros calibrados localmente.

### 3.3 SALDO ENERGÉTICO A SUPERFÍCIE ESTIMADO POR SENSORIAMENTO REMOTO

O termo sensoriamento se refere à obtenção dos dados, estímulos e registros, e remoto porque estes dados são captados, registrados à distância, sem que haja contato físico entre o sistema sensor e o objeto ou área sensoriada. Isto só é possível devido ao efeito da radiação eletromagnética (REM) sobre os sensores. A definição da radiação eletromagnética é complexa em sua origem, por admiti-la como sendo uma forma de energia que se move em ondas ou partículas eletromagnéticas, mas que o faz à velocidade da luz e que não necessita de um meio material para se propagar. Sendo assim, o seu fluxo pode ser refletido, absorvido e ou emitido por qualquer elemento da natureza. No Sistema Solar, a principal fonte natural de REM é o Sol (LILLESAND et al., 2004).

Os sistemas sensores captam a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos, seres vivos e constituintes da atmosfera, integralizada em uma determinada área da superfície da Terra. Cada elemento (objetos, solo, água, plantas, atmosfera) da superfície reflete, absorve e transmite a REM em magnitudes que podem variar em função das suas características moleculares. Cada alvo na superfície da Terra tem um comportamento espectral distinto, o qual é apurado

quando sua energia refletida resultante é medida ao longo do espectro eletromagnético. E assim, os sensores remotos captam e registram a energia refletida ou emitida pelos alvos na superfície da Terra (LILLESAND et al., 2004).

Vários autores (CEBALLOS e MOURA, 1997; MEDINA et al., 1998; BASTIAANSSEN e BOS, 1999; BOEGH et al., 2002; HAFEEZ et al., 2002; MOHAMED et al., 2004; WANG et al., 2005; FEITOSA, 2005; SILVA et al., 2005) têm investigado a possibilidade do uso dos recursos radiométricos de imagens de satélites geoestacionários e de órbita polar para estimar balanço de radiação, pixel a pixel, em diversos ambientes e em várias localidades da Terra.

A bordo de um satélite há sensores remotos eletrônicos que fazem este tipo de tarefa e convertem os estímulos em um sinal elétrico passível de ser registrado e transmitido para estações de recepção na Terra. Este sinal então é processado eletronicamente para gerar produtos digitais compatíveis à análise em *softwares* de Critério de imagens ou produtos fotográficos susceptíveis à análise visual (SCHOWENGERDT, 1997).

A REM proveniente da superfície terrestre pode ser captada pelos sensores imageadores que estão a bordo de satélites e geram imagens com diferentes resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas. A resolução espacial se refere ao pixel do produto digital de um sensor, que seria o menor elemento ou superfície que pode ser distinguido por um sistema sensor. Este tipo de resolução é importantíssimo na interpretação das imagens porque determina o nível de detalhe das informações adquiridas pelo sensor. A resolução temporal depende das características da órbita do satélite uma vez que esta define o intervalo de tempo em dias ou horas, que o sistema sensor demora em obter duas imagens consecutivas da mesma região sobre a Terra, sendo conhecida como tempo de revisita (NOVO, 1992).

A determinação experimental da evapotranspiração (ET) pode ser feita por métodos como lisímetros, correlações turbulentas, balanço de energia baseado na Razão de Bowen, aerodinâmico, balanço hídrico no solo, dentre outros métodos. No entanto, estas determinações são válidas para áreas homogêneas: quanto à umidade do solo e estágio de desenvolvimento da cultura, dentre outras variáveis. A utilização destas técnicas é inviabilizada quando o interesse é a determinação da ET em escala regional, ou com cobertura sobre uma grande área (ALLEN et al., 2002).

Nos últimos anos, o sensoriamento remoto tem permitido a obtenção e a estimativa, com elevado grau de precisão, do albedo da superfície, de índices de vegetação, da temperatura da superfície, da emissividade, dos balanços de radiação e de energia à superfície e da evapotranspiração. Sendo assim, é capaz de proporcionar subsídios sobre área irrigada, tipo de cultura, desenvolvimento de biomassa, produtividade das culturas, necessidade de água das culturas, salinidade e perdas de água (SILVA et al., 2010).

Os sensores imageadores constituem um sistema de varredura capazes de captar dados em diferentes faixas espectrais, tais como o sensor *Multispectral Thematic Mapper* - TM dos satélites da série LANDSAT ou como a câmara imageadora de alta resolução - CCD do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres – CBERS (*China-Brasil Earth Resources Satellite*), que obtém dados na região do visível e do infravermelho (próximo, médio e distante). Estes sensores necessitam de uma fonte externa de energia, no caso o Sol, para poder operar, por este motivo é chamado de sensores passivos (MOREIRA, 2001).

A radiância espectral dos alvos captada ao nível do TM é armazenada na forma de níveis de cinza (intensidade do pixel ou número digital - ND), cuja resolução radiométrica de 8 bits (256 diferentes níveis de cinza), tendo uma resolução espacial de 30m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e de 120m na banda 6 (banda termal que possibilita obter a temperatura aparente da superfície). O produto final disponibilizado para uso, deste tipo de sensor, está na forma de uma imagem digital, composta por milhares de pixels ordenados em linhas e colunas (LILLESAND et al., 2004). Por exemplo: uma imagem TM-LANDSAT 5, nas bandas espectral de 1 a 5 e na 7 do sistema sensor, tem aproximadamente 6.500 linhas, 7.500 colunas, totalizando 48.750.000 pixels.

Uma imagem digital é um arranjo de elementos (pixels) sob a forma de malha ou matriz, na qual cada pixel tem sua localização definida em um sistema de coordenadas (X,Y) e representam a intensidade dos materiais da área correspondente ao pixel por meio de níveis de cinza ou números digitais (CROSTA, 1992).

Segundo Diak et al. (2004), um dos principais objetivos dos satélites meteorológicos e ambientais tem sido a estimativa do Rn do sistema terra-atmosfera. O Rn varia temporal e espacialmente, dependendo das características ópticas da superfície analisada, conforme o albedo, a irradiância solar global e as



condições de temperatura e umidade da superfície e do ar próximo a superfície (GIONGO, 2008). Neste sentido, Silva et al. (2005) obtiveram Rn em áreas do semiárido brasileiro, enquanto Di Pace et al. (2008) avaliaram o impacto da topografia no cômputo do Rn. Já Gomes et al. (2009) investigaram que alterações a substituição da vegetação nativa por culturas agrícolas e floresta, de crescimento rápido, provoca nos balanços de radiação e de energia.

Bisht et al. (2005) propuseram um modelo senoidal para estimar o Rn para regiões heterogêneas em dias de céu claro (ausência de nebulosidade) para todo período diurno a partir de produtos de dados gerados apenas com o 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. Wang e Liang (2009), a exemplo de Tang e Li (2008), também empregaram unicamente imagens no cômputo da radiação atmosférica e saldo de onda longa instantânea, e demonstram ser possível obter com boa precisão de Rn instantâneo, apenas com imagens orbitais

Segundo Medina et al. (1998), as imagens do satélite LANDSAT têm uma boa resolução espacial para ser usado em escalas relativamente grandes. Entretanto, a resolução temporal destas imagens (16 dias) não permite seu uso para fins de manejo de irrigação. Os produtos de sensoriamento remoto, oriundos do imageamento dos satélites, são usados por profissionais de inúmeras áreas. Para o cômputo do Rn com imagens TM-LANDSAT 5, alguns parâmetros podem ser estimados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros da superfície extraídos das imagens TM-LANDSAT 5

<i>Parâmetros</i>	<i>Bandas</i>	<i>Resolução espacial (m)</i>
Radiância	1 a 7	30 (bandas 1 a 5 e 7), 120 (banda 6)
Reflectância	1 a 5 e 7	30
Albedo	1 a 5 e 7	30
NDVI*	3 e 4	30
Temperatura	6	120

Fonte: Bastiaanssen et al. (1998)

\* Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

A efetivação do balanço de energia pode ser realizada com imagens obtidas pelo TM-LANDSAT 5 ou outro satélite, que disponha de imagens nas bandas reflectivas e termal, a exemplo do AVHRR - NOAA, MODIS – Terra / Aqua, ASTER – Terra (BASTIAANSSEN, 2000). Na estimativa do  $R_n$  por sensoriamento remoto, com o uso de imagens do TM-LANDSAT 5, a primeira etapa computacional é a conversão do número digital (ND) de cada pixel e banda ( $b$ ), em radiância espectral ( $L_{\lambda,b}$ ). Estas radiâncias representam a energia solar refletida nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, registradas ao plano orbital do satélite LANDSAT 5 ( $\pm 705$  Km de altitude) e, na banda 6, esta radiância representa a energia emitida representativa de cada pixel (MARKHAM e BAKER, 1987). Essa convenção é chamada de calibração radiométrica.

Chander e Markham (2003) relatam que depois de mais de 22 anos de serviço, o sensor TM-LANDSAT 5 continua operando bem. Entretanto, o método de calibração foi degradado com o tempo e estes pesquisadores apresentaram novos coeficientes de calibração. Além disso, possibilitaram aos usuários dos dados do TM-LANDSAT 5, métodos e parâmetros para converter os números digitais (DNs) dos dados da imagem para informações úteis como: radiância espectral ( $L_{\lambda,b}$ ), reflectância monocromática de cada banda ( $\rho_{\lambda,b}$ ), que representa a porção da radiação solar de cada banda que é refletida por cada pixel da imagem e a estimativa da temperatura da superfície ( $T_{sat}$ ).

Na Tabela 2 encontramos os valores dos coeficientes de calibração e das irradiâncias espectrais, incidente sobre uma superfície normal à direção dos raios solares, no topo da atmosfera terrestre e a uma distância de uma Unidade Astronômica - 1 UA (149,5 milhões de Km do Sol), utilizados para a calibração radiométrica, sugeridos por CHANDER e MARKHAM (2003), válidos para imagens do TM-LANDSAT 5 a partir de 2003.

Tabela 2 Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do LANDSAT 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – “a” e máxima – “b”) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (IETAtm).

<i>Bandas</i>	<i>Comprimento de Onda (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Coefficientes de Calibração (<math>\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}</math>)</i>		<i>Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera (<math>\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}</math>)</i>
		<i>a</i>	<i>b</i>	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,5200	193,000	1957,00
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,8400	365,000	1826,00
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,1700	264,000	1554,00
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,5100	221,000	1036,00
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,3700	30,200	0215,00
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,1500	16,500	0080,67

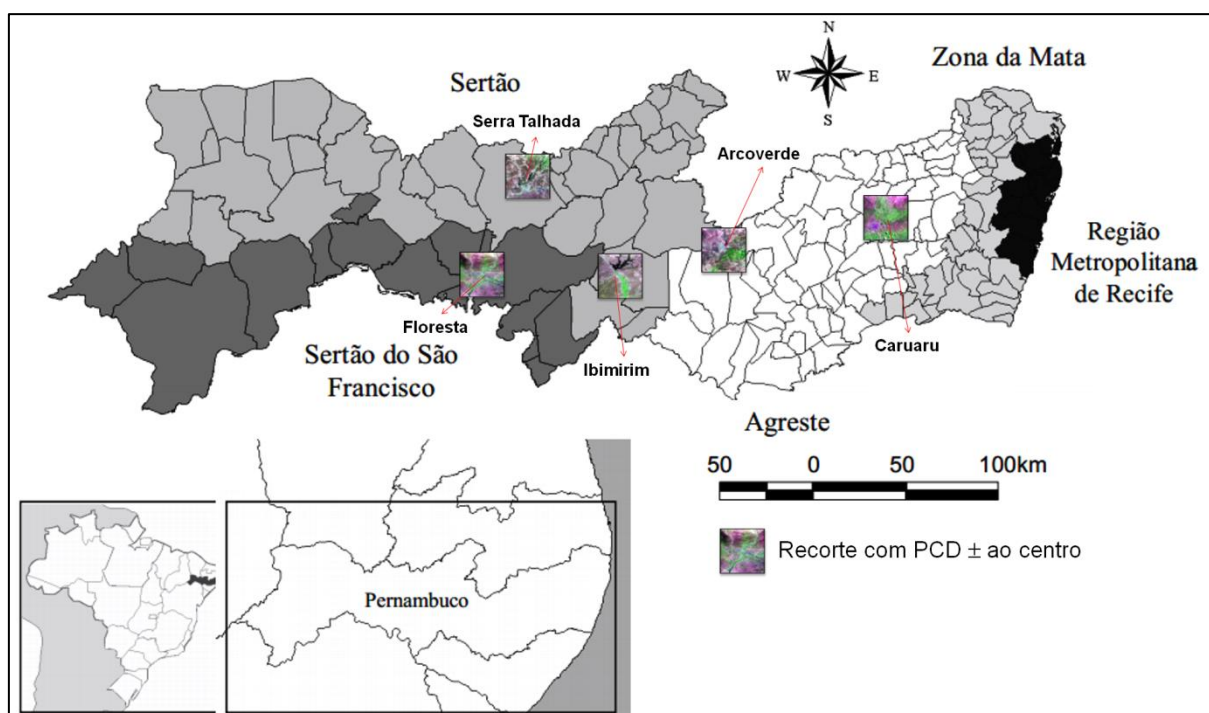
Fonte: Chander e Markham (2003)

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS

As áreas selecionadas para este estudo estão localizadas no Agreste, Sertão e Sertão do São Francisco de Pernambuco (Figura 1), representadas pelos Municípios de Arcoverde (longitude 37° 03' 14" Oeste, latitude 08° 25' 08" Sul e altitude 663 m), Caruaru (longitude 35° 58' 34" Oeste, latitude 08° 17' 00" Sul e altitude 554 m), Floresta (longitude 38° 34' 07" Oeste, latitude 08° 36' 04" Sul e altitude 316 m), Ibimirim (longitude 37° 41' 24" Oeste, latitude 08° 32' 27,6" Sul e altitude 400 m) e Serra Talhada (longitude 38° 17' 54" Oeste, latitude 07° 59' 31" Sul e altitude 429m).

Figura 1 Localização das áreas dos recortes de imagens TM-LANDSAT 5 utilizadas no cálculo do saldo de radiação com o SEBAL.



Fonte: PEREIRA NETO, (2012).

O sertão pernambucano (Sertão e Sertão do São Francisco) representa, praticamente, a metade do Estado, sendo caracterizado por baixos índices pluviométricos anuais, que oscilam entre 500 e 800 mm. As chuvas da maior parte do Sertão concentram-se nos meses de janeiro a abril e nesse período precipitam-se de 60 a 70% do total anual. As exceções no período chuvoso ficam por conta do extremo sudoeste, precisamente em Petrolina, onde as principais chuvas começam em dezembro, prolongando-se até março; e a região do Pajeú e do Moxotó, cujo principal período chuvoso vai de fevereiro a maio (BARROS et al., 1994).

O Município de **Arcoverde** está localizado na Mesorregião Sertão e na Microrregião Sertão do Moxotó do Estado de Pernambuco. A vegetação ali encontrada é formada por *Florestas Subcaducifólia e Caducifólia*, próprias das áreas agrestes e sertão. Apresenta tipo climático BSh, de acordo com a classificação de Köppen, tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se inicia de janeiro a fevereiro com término em setembro, com chuvas concentradas entre janeiro a abril, podendo se adiantar até outubro (CPRM, 2005a).

**Caruaru**, Município localizado na Mesorregião Agreste e na Microrregião Vale do Ipojuca, apresenta vegetação formada por *Florestas Subcaducifólia e Caducifólia*, próprias das áreas agrestes. O clima é do tipo tropical chuvoso, com verão seco, com estação chuvosa se inicia de janeiro a fevereiro com término em setembro, podendo se adiantar até outubro (CPRM, 2005b).

No Município de **Floresta**, localizado no sertão, Mesorregião do São Francisco pernambucano, prevalece o tipo climático BSs'h', ou seja, muito quente, semiárido, tipo estepe, com estação chuvosa adiantada para o outono, entre janeiro e maio. As precipitações pluviométricas se distribuem com acentuada irregularidade, não só anualmente como também mensalmente. A cobertura vegetal dominante é a *Caatinga Hiperxerófila*: de modo geral, pouco densa e arbustiva, com atividade biológica muito baixa durante a maior parte do ano. O número de espécies tende a ser relativamente reduzido (ARAÚJO FILHO et al., 2001).

No Sertão Pernambucano e Microrregião Sertão do Moxotó, localiza-se o Município de **Ibimirim**. Nesta região semiárida do Estado de Pernambuco, o clima é bastante quente e seco, com precipitação média anual em torno de 450 mm e período chuvoso de janeiro a abril. O clima dominante em toda área é do tipo semiárido quente, ou BShw, segundo Köppen. Os meses de março e abril se apresentam como os mais chuvosos, e agosto, setembro e outubro como os menos chuvosos (CPRM, 2005c). No Município de Ibimirim a precipitação pluviométrica anual apresenta uma média de 513,1 mm. A vegetação é a *Caatinga Hiperxerófila*, formada por espécies vegetais com alta capacidade de retenção de água durante a estação mais quente, quando perdem a folhagem, reduzindo consideravelmente o metabolismo vegetal, com abundância de cactácea e plantas de porte mais baixos e espalhadas, devido a severidade do clima como também pela edafologia da região. Entre outras espécies destacam-se a jurema (*Mimosa sp.*), faveleiro, marmeleiro

(*Planta sp*), xique-xique (*Pilocereus gounelliei*), pinhão (*Jatropha mollissima*) e facheiro (*Cereus sp*) (TEMÓTEO, 2000).

O Município de **Serra Talhada** está localizado na parte setentrional da Microrregião Pajeú, porção norte do Estado de Pernambuco, inserido na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, que representa a paisagem típica do semiárido nordestino, caracterizada por uma superfície de pediplanação bastante monótona, relevo predominantemente suave-ondulado. A vegetação é basicamente composta por *Caatinga Hiperxerófila* com trechos de *Floresta Caducifólia*. O clima é do tipo tropical semiárido, com chuvas de verão. O período chuvoso se inicia em novembro com término em abril, com precipitação média anual de 431,8 mm (CPRM, 2005d).

#### 4.2 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DAS PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS

Foram usados dados de Temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e Radiação Solar Global ( $R_g$ ), das Plataformas de Coleta de Dados - PCD (Tabela 3) pertencentes à rede do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco - LAMEPE, vinculado ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco - ITEP, e que fazem parte do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais via Satélite - SCD, desenvolvido e operado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

Tabela 3 Identificação e localização das Plataformas de Coleta de Dados

Código	Município	Longitude	Latitude
PCD32567	Caruaru	35° 54' 56,88" W	08° 14' 17,88" S
PCD32566	Arcoverde	37° 03' 20,16" W	08° 26' 00,96" S
PCD32289	Ibimirim	37° 40' 42,96" W	08° 32' 17,88" S
PCD32285	Serra Talhada	38° 17' 18,96" W	07° 55' 50,16" S
PCD32026	Floresta	38° 34' 30,00" W	08° 36' 05,04" S

Fonte: SCD – Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais via Satélite (2007 e 2008)

Os dados ambientais coletados pelas PCD's são retransmitidos pelos satélites e recebidos nas estações terrenas de Cuiabá ou de Alcântara e enviados para o Centro de Missão de Coleta de Dados, em Cachoeira Paulista, São Paulo, para processamento, armazenamento e disseminação aos usuários. O envio desses

dados aos usuários é feito através da *Internet*, em no máximo 30 minutos após a recepção (YAMAGUTI et al., 2009)

Os dados das PCD's foram disponibilizados por hora, com taxa de amostragem por minuto (60 medições/hora) no caso da  $T_{ar}$  e feita integração das amostragens para a Rg. Para a obtenção das medidas ( $L_{inst.}$ ) estimadas para o instante da passagem do satélite, foi feita a seguinte aproximação:

$$L_{inst.} = L_{ant.} + \left\{ \left[ (L_{post.} - L_{ant.}) \times (H_{inst.} - H_{ant.}) \right] / \Delta t \right\} \quad (\text{Eq.4})$$

onde  $L_{ant.}$  é a medida de  $T_{ar}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou Rg ( $\text{Wm}^{-2}$ ), da hora logo anterior ao instante do imageamento,  $L_{post.}$  é a medida de  $T_{ar}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou Rg ( $\text{Wm}^{-2}$ ) da hora logo posterior ao instante do imageamento,  $H_{inst.}$  é a hora da passagem do satélite, registrada na imagem, e  $H_{ant.}$  é a hora logo anterior ao instante do imageamento. Estas duas últimas medidas foram apresentadas em hora e décimos (Ex.: 9h 30min = 9,5h). E  $\Delta t$  é igual a 01 (uma) hora.

Para a estimativa do  $Rn_{PCD}$  considerado como "referência terrestre" foi empregado o seguinte algoritmo:

$$Rn_{PCD} = (1 - \alpha_s) \times Rg + \sigma \times (\varepsilon_{ar} \times T_{ar}^4 - \varepsilon_s \times T_s^4) \quad (\text{Eq.5})$$

onde  $\alpha_s$  é o albedo médio de superfícies vegetadas do semiárido brasileiro, igual a 0,2 (SILVA et al., 2010);  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann;  $\varepsilon_{ar}$  é emissividade aparente do ar próximo a superfície, igual a 0,98 (PAZ et al., 2002);  $\varepsilon_s$  é emissividade média sobre o território pernambucano, igual a 0,94 (BASTOS et al., 2000). E  $T_{ar}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) é a temperatura aproximada do ar no momento do imageamento do satélite medida pelos instrumentos das PCD's.

A Temperatura do solo ( $T_s$ ) foi calculada pela fórmula (SENTELHAS e ANGELOCCI, 2009):

$$T_s = -4,56 + 1,38 \times T_{ar} \quad (\text{Eq.6})$$

sendo  $T_{ar}$  medido pelos instrumentos das PCD's, em  $^{\circ}\text{C}$  – Grau Celsius.

#### 4.3 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

A aquisição das imagens TM-LANDSAT 5 ortorretificadas foram feitas junto à Divisão de Geração de Imagens – DGI, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e ao *Earth Observing System Data and Information System* - EOSDIS desenvolvido pelo *Goddard Space Flight Center* - GSFC, da *National Aeronautics and Space Administration* – NASA. O processamento de imagens (empilhamento e

recorte, reamostragem e uso do *Model maker*, entre outras tarefas) foi realizado no software ERDAS IMAGINE 9.1.

Além dos dados espectrais, algumas informações relativas à imagem são indispensáveis para a implementação dos cálculos, tais como: a) data e a hora de aquisição da cena; b) o ângulo de elevação solar no momento de aquisição da cena; c) as coordenadas geodésicas (latitude e longitude) do centro da cena, obtidas dos Cadastros de Cena, que vem junto com a cena solicitada e d) os coeficientes necessários para permitir a transformação dos valores dos pixels calibrados em valores de radiância e refletância.

Foram utilizados recortes das imagens de 25 Km por 25 Km, exceto em Serra Talhada com recorte de 22,5 Km por 22,5 Km, tendo as PCD's, ofertadora dos dados meteorológicos complementares, localizadas o mais próximo possível do centro do recorte, para que as mesmas pudessem servir de referência para todo o recorte.

Foram utilizadas duas imagens por cidade (Tabela 4), uma no período chuvoso e outra no período seco, entre os anos de 2007 e 2008, obtidas pelo Mapeador Temático (TM) do satélite LANDSAT 5. A passagem do TM-LANDSAT 5 sobre as referidas áreas ocorre por volta das 9h 30min (tempo legal), variando em alguns minutos e segundos em função da época do ano. Estas cenas foram recortadas conforme dito anteriormente.

Tabela 4 Datas, Órbitas e Ponto das imagens utilizadas.

Cidades	Período chuvoso	Período seco	Orbita	Ponto
Floresta	05/04/2007	19/12/2008	216	066
Arcoverde	19/07/2007	10/11/2008	215	066
Ibimirim	19/07/2007	26/11/2008	215	066
Serra Talhada	26/07/2007	01/11/2008	216	065
Caruaru	07/04/2007	29/08/2007	214	066

Fonte: Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007 e 2008)

Para a obtenção do saldo de radiação à superfície instantâneo ( $R_n$ ) foram desenvolvidos vários modelos com o *Model Maker* do ERDAS, destinados às tarefas descritas nas seções abaixo. Ademais, foram feitas estimativas da radiação solar incidente na área estudada, bem como da radiação de onda longa emitida pela atmosfera, na direção da superfície.



#### 4.3.1 Calibração radiométrica

A primeira etapa computacional foi a obtenção da calibração radiométrica, que consiste na conversão do número digital (ND) de cada pixel e banda (“b”) do sensor TM-LANDSAT 5, em radiância espectral ( $L_{\lambda b}$ ). Estas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel de aproximadamente 30 m por 30 m, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medidas ao plano orbital do satélite LANDSAT 5 ( $\pm 705$  Km de altitude), para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7; na banda 6, essa radiância representa a energia emitida representativa de cada pixel de 120 m por 120 m, e a calibração foi efetivada segundo a equação (MARKHAM e BAKER, 1987):

$$L_{\lambda b} = L_{min,b} + \left( \frac{L_{max,b} - L_{min,b}}{255} \right) ND \quad (\text{Eq.7})$$

onde  $L_{min,b}$  e  $L_{max,b}$  são as radiâncias mínima e máxima obtidas mediante processo de calibração do TM - LANDSAT 5, cujos valores, válidos para imagens geradas após 5 de maio de 2003, de acordo com CHANDER e MARKHAM (2003), estão representados na Tabela 2.

#### 4.3.2 Reflectância monocromática

Em seguida, calculou-se a reflectância monocromática de cada banda ( $\rho_{\lambda b}$ ), que é obtida pela razão entre a radiação solar refletida e radiação solar incidente em cada pixel. Em outras palavras,  $\rho_{\lambda b}$  representa a porção da radiação solar de cada banda que é refletida por cada pixel da imagem e o seu cômputo foi efetivado pela equação (ALLEN *et al.*, 2002):

$$\rho_{\lambda b} = \frac{\pi L_{\lambda b}}{IETAtm_{\lambda b} \times \cos Z d_r} \quad (\text{Eq.8})$$

onde  $L_{\lambda b}$  ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) é a radiância espectral de cada banda (Tabela 2), “Z” (rad) é o ângulo zenital solar (que pode ser obtido no catálogo das imagens do INPE),  $IETAtm_{\lambda b}$  ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ) é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Tabela 2) e  $d_r$  (raio vetor Terra-Sol) é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ) em dado dia do ano (DSA), que de acordo com IQBAL (1983), foi dado por:

$$d_r = 1 + 0,034 \cos[(DSA 2\pi)/365,25] \quad (\text{Eq.9})$$

em que DSA representa o dia sequencial do ano e o argumento da função  $\cos$  está em radiano. O valor médio anual de  $d_r$  é igual a 1,00 e o mesmo varia entre 0,97 e 1,03, aproximadamente.

Para um momento qualquer do dia, o cosseno do ângulo zenital solar ( $\cos Z$ ) pode ser calculado pela equação apresentada:

$$\cos Z = \text{sen}\phi \times \text{sen}\delta + \cos\phi \times \cos\delta \times \text{cosh} \quad (\text{Eq.10})$$

onde  $\phi$  é a latitude em graus;  $\delta$  é a declinação solar em graus;  $h$  é o ângulo horário, em graus. O ângulo horário é considerado zero, ao meio dia solar, negativo no período da manhã e positivo no período da tarde. E foi calculado através da seguinte equação:

$$h = (t - 12) \times 15^\circ \quad (\text{Eq.11})$$

em que  $t$  é à hora solar na área imageada no instante da passagem do satélite no dia em estudo.

Quando a área de estudo tem pequena, ou mesmo, declividade nula, como no caso deste estudo, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol ( $E$ ), que se encontra no catálogo da imagem, ou seja:

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \text{sen}(E) \quad (\text{Eq.12})$$

em que o argumento do cosseno é dado em radiano.

Quando as áreas de estudo possuem inclinação considerável, o ângulo de incidência da radiação solar depende da inclinação da superfície e do seu aspecto, isto é, do azimute da normal da superfície. Nesses casos, se faz necessário obter, para a área de estudo, o Modelo de Elevação Digital do terreno - DEM. Este DEM pode ser obtido gratuitamente em diferentes *sites* na Internet.

#### 4.3.3 Albedo planetário ou albedo no topo da atmosfera

O albedo planetário ou albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) representa o albedo da superfície no domínio da radiação de onda curta (0,3 – 3,0  $\mu\text{m}$ ), ou seja, para as bandas de 1 a 5 e a banda 7 do TM-LANDSAT 5. O  $\alpha_{toa}$  foi obtido por meio da estimativa de combinação linear das reflectâncias espectrais monocromáticas, de índices -  $\omega_b$  estabelecidos para cada banda, segundo a expressão, também usada por Allen et al. (2002):

$$\alpha_{toa} = (\omega_1 \rho_{\lambda 1}) + (\omega_2 \rho_{\lambda 2}) + (\omega_3 \rho_{\lambda 3}) + (\omega_4 \rho_{\lambda 4}) + (\omega_5 \rho_{\lambda 5}) + (\omega_7 \rho_{\lambda 7}) \quad (\text{Eq.13})$$

Cada índice ( $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_7$ ) foi obtido pela razão entre a constante solar específica da banda “b” e a somatória de todas as constantes IETAtm, qual seja:

$$\omega_b = \frac{IETAtm_{\lambda b}}{\sum IETAtm_{\lambda b}} \quad (\text{Eq.14})$$

O albedo planetário não sofre a influência da transmissividade atmosférica, que diminui a intensidade com que a radiação solar atinge a superfície.

#### 4.3.4 Albedo da superfície

O albedo da superfície foi um dos parâmetros de entrada revisto por TEIXEIRA et al. (2009) e por consequência foi obtido por dois Critérios.

No Critério A: o albedo da superfície ( $\alpha_{sup}$ ) foi obtido mediante correção atmosférica que considera a transmitância –  $\tau_{sw}$  e a refletância atmosférica -  $\alpha_a$  em todo o domínio da radiação de onda curta, que varia entre 0,025 e 0,04, mas para o modelo SEBAL tem sido recomendado o valor de 0,03, com base em BASTIAANSSEN (2000), sendo  $\alpha_{sup}$  determinado por meio da equação (BASTIAANSSEN, 1995; BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005):

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_a}{\tau_{ins} \times \tau_{ref}} \quad (\text{Eq.15})$$

Ao se considerar que não há inclinação da superfície (relevo não muito acidentado) e as transmitâncias atmosféricas relativas à radiação solar incidente ( $\tau_{ins}$ ) e a radiação solar refletida ( $\tau_{ref}$ ) são as mesmas (para condições de céu claro), teríamos que  $\tau_{ins} \times \tau_{ref}$  seria igual a  $\tau_{sw}^2$  para todas as bandas e para todos os pixels. Esta última,  $\tau_{sw}$ , foi calculada a partir do modelo (ALLEN et al., 2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \omega \quad (\text{Eq.16})$$

onde  $\omega$  é a altitude de cada pixel (m), que para os cálculos realizados utilizou-se a altitude das cidades onde as PCD's encontram-se.

No Critério B, para o albedo da superfície -  $\alpha_o$ , foi utilizada a seguinte relação linear simplificada (TEIXEIRA et al., 2009):

$$\alpha_o = 0,08 + 0,61 \times \alpha_{toa} \quad (\text{Eq.17})$$

#### 4.3.5 Índices de vegetação

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um indicador sensível das condições fenológicas, da

densidade e do porte da vegetação, sendo obtido pela razão entre a diferença das reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho ( $\rho_4$  e  $\rho_3$ , respectivamente no caso do TM) e a soma das mesmas reflectâncias, conforme equação usada por Allen *et al.* (2002):

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (\text{Eq.21})$$

O NDVI varia de  $-1$  a  $+1$ , sendo que para superfícies com alguma vegetação varia de 0 a 1. Já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo - SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, utilizou-se a expressão (HUETE, 1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (\text{Eq.22})$$

Foi utilizado L igual a 0,1 (BEZERRA, 2006), embora o seu valor mais frequente seja 0,5 (HUETE e WARRICK, 1990; ACCIOLY *et al.*, 2002; BOEGH *et al.*, 2002). Sendo importante observar que o NDVI e o SAVI calculado para as superfícies cobertas de água e nuvens, geralmente, são menor que zero.

O Índice de Área Foliar - IAF é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, pixel a pixel. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela seguinte equação empírica, obtida por Allen *et al.* (2002):

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (\text{Eq.23})$$

#### 4.3.6 Emissividade da superfície

Para estimar a emissividade da superfície referente ao intervalo de comprimento de onda no domínio espectral entre 10,4 e 14,5  $\mu\text{m}$ , correspondente à banda termal do TM-LANDSAT 5 ( $\epsilon_{NB}$ ), foi usada a equação (ALLEN *et al.*, 2002; TREZZA, 2002; TASUMI, 2003; GOMES *et al.*, 2009):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \times IAF \quad (\text{Eq.18})$$

Como no cômputo do albedo da superfície o emissividade previsto no SEBAL para o infravermelho termal, emitida por cada pixel das demais bandas do TM-

LANDSAT 5 (de 1 à 5 e a banda 7), foi revisto por Teixeira et al. (2009) e sua estimativa sobreveio por dois Critérios.

No Critério A: a emissividade no domínio da banda larga ( $\varepsilon_0$ ), na faixa de 4 a 100 $\mu\text{m}$ , foi dada por (ALLEN et al., 2002; TREZZA, 2002; TASUMI, 2003; GOMES et al., 2009):

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF \quad (\text{Eq.19})$$

Segundo Allen et al. (2002), as emissividades  $\varepsilon_{NB}$  e  $\varepsilon_0$  podem ser obtidas, limitando-se a condições em que  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$ . Desta forma, para pixels com  $IAF \geq 3$ , considera-se  $\varepsilon_{NB}$  e a  $\varepsilon_0 = 0,98$  e para corpos de água ( $NDVI < 0$ )  $\varepsilon_{NB} = 0,99$  e  $\varepsilon_0 = 0,985$ .

Critério B: para estimar a emissividade no domínio da banda larga ( $\varepsilon_0'$ ) foi aplicada a equação de regressão linear (TEIXEIRA et al., 2009):

$$\varepsilon_0' = 0,059 \times \ln(NDVI) + 1,004 \quad (\text{Eq.20})$$

#### 4.3.7 Temperatura da superfície a partir das imagens

Outro dos parâmetros de entrada revisto por Teixeira et al. (2009) foi a Temperatura da superfície estimada a partir da radiância na banda 6 do TM-LANDSAT 5 ( $T_{sat}$ ) e por isso apresentou-se dois Critérios para este parâmetro.

No Critério A: uma vez computado o  $\varepsilon_{NB}$  as temperaturas de cada pixel da superfície foram calculadas através da equação de Planck invertida, como foi usado por Markham e Barker (1987), Tasumi (2003), entre outros. A  $T_{sat}$ , obtida em Kelvin (K), foi estimada em função da radiância espectral da banda termal ( $L_{\lambda,6}$ ) e da emissividade  $\varepsilon_{NB}$ , segundo equação:

$$T_{sat} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (\text{Eq.24})$$

onde  $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1260,56 \text{ K}$  são constantes de radiação específica da banda termal do TM-LANDSAT 5 segundo Allen et al. (2002) e Silva et al. (2005), entre outros.

Para o Critério B: utilizou-se a regressão linear simples (TEIXEIRA et al., 2009):

$$T_0 = 1,07 \times T_{sat} - 20,17 \quad (\text{Eq.25})$$

em que  $T_0$  e  $T_{sat}$ , são obtidas em Kelvin (K).

#### 4.3.8 Radiação de onda curta incidente

A radiação solar global incidente,  $R_s$  ( $Wm^{-2}$ ) foi considerada constante em toda a área do recorte da imagem, tendo-se o imageamento em dia claro sem cobertura de nuvem. E na ausência de registros piranométricos, a  $R_s$  foi obtida segundo modelo proposto por Allen et al. (2002); utilizado por Trezza (2002); Tasumi (2003) e Silva et al. (2005):

$$R_s = S_0 \times \cos Z \times d_r \times \tau_{sw} \quad (\text{Eq.26})$$

em que  $S_0$  é a constante solar ( $1.367,0 W m^{-2}$ );  $\tau_{sw}$  é a transmissividade da atmosfera, em decimal;  $Z$  é o ângulo zenital do Sol, informado na imagem, em graus; e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ) em dado dia do ano.

#### 4.3.9 Radiação de onda longa incidente

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície,  $R_{ol,atm}$  ( $W m^{-2}$ ), também foi calculada pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da emissividade aparente do ar -  $\varepsilon_a$  e da temperatura do ar próximo da superfície -  $T_{ar}$ , obtida nas PCD's, em Kelvins. Logo:

$$R_{ol,atm} = \varepsilon_a \sigma T_{ar}^4 \quad (\text{Eq.27})$$

Da mesma forma com que se tratou a emissividade no domínio da banda larga, também para a  $\varepsilon_a$  considerou-se duas equações computadas.

No Critério A: a  $\varepsilon_a$  foi estimada usando-se a equação proposta proposto por Bastiannssen (1995), calibrado por Allen et al. (2002):

$$\varepsilon_a = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (\text{Eq.28})$$

No Critério B: a  $\varepsilon_a'$  foi estimada usando-se a equação proposta por Teixeira et al. (2009):

$$\varepsilon_a' = 0,95(-\ln \tau_{sw})^{0,103} \quad (\text{Eq.29})$$

### 4.4 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS USADOS

Na avaliação dos resultados utilizou-se a Diferença entre os valores, o desvio relativo (Desvio %) e a raiz do desvio quadrado médio (RDQM).

#### 4.4.1 Diferença

Foi aqui definida como sendo a diferença do saldo de radiação computado pelos modelos (saldo\_modelos) e o valor do saldo de radiação calculado a partir do

Rg medido por instrumento nas estações, estimados para o instante do imageamento do satélite (saldo\_PCD).

$$Diferença = (saldo\_modelos - saldo\_PCD) \quad (Eq.30)$$

#### 4.4.2 Desvio relativo

O desvio relativo (Desvio %) foi definido como sendo o módulo da Diferença dividida pelo saldo de radiação calculado a partir do Rg medido por instrumento nas estações, estimados para o instante do imageamento do satélite (saldo\_PCD) em percentual.

$$Desvio \% = [|(saldo\_modelos - saldo\_PCD)| \div saldo\_PCD] \times 100 \quad (Eq.31)$$

E o desvio relativo médio foi calculado como:

$$Desvio \% \text{ médio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Desvio \%_i \quad (Eq.32)$$

onde o Desvio %<sub>i</sub> é o i-ésimo valor do desvio relativo e o N é o número de desvios relativos analisados.

#### 4.4.3 Raiz do desvio quadrado médio

A raiz do desvio quadrado médio (RDQM) foi definida como sendo a raiz quadrada da média das diferenças ao quadrado.

$$RDQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (saldo\_modelos_i - saldo\_PCD_i)^2} \quad (Eq.33)$$

Em que saldo\_modelos<sub>i</sub> e saldo\_PCD<sub>i</sub> representam, respectivamente, o i-ésimo valor do saldo de radiação computado pelos modelos e o i-ésimo valor do saldo de radiação calculado a partir do Rg medido por instrumento nas estações, estimados para os instantes do imageamento do satélite nas datas e cidades estudadas; e N é o número de dados analisados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de  $Rn_A$  instantâneo ( $Wm^{-2}$ ), referentes aos pixels do recorte das imagens, no qual as estações estão inseridas, computados por sensoriamento remoto, Critério A, e os valores de  $Rn_{PCD}$  ( $Wm^{-2}$ ) calculados a partir do  $R_g$  medido por instrumento nas estações, estimados para o instante do imageamento do satélite, como também as diferenças entre estes dois dados e os percentuais desses últimos, em função dos estimados (Desvio %, desvio relativo) estão listados, por datas e cidades, e separados em período chuvoso e seco, na Tabela 5.

Para o Critério A (Tabela 5), no período chuvoso, o maior desvio relativo encontrado foi em Floresta com 11,77%, o menor desvio relativo, de 6,99%, foi encontrado em Serra Talhada, e o desvio relativo médio foi de 8,74%. Já para o período seco, o maior desvio foi encontrado em Serra Talhada com 17,50%, o menor desvio relativo foi de 5,17%, encontrado pelos cálculos para a cidade de Floresta, e o desvio relativo médio foi de 8,67%.

Tabela 5 Resultado do cômputo do  $Rn_A$  instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) com o Critério A, computado por sensoriamento remoto e Desvios relativos encontrados entre o  $Rn_A$  instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) e o  $Rn_{PCD}$  ( $Wm^{-2}$ ).

Cidades/Datas	Critério A			
	$Rn_A$	$Rn_{PCD}$	Diferença	Desvio %
<b>Período chuvoso</b>				
Floresta 05/04/2007	515,6	584,4	68,8	11,77
Caruaru 07/04/2007	535,5	587,1	51,6	8,80
Arcoverde 19/07/2007	501,1	545,9	44,8	8,22
Ibimirim 19/07/2007	473,3	514,1	40,8	7,94
Serra Talhada 26/07/2007	534,0	574,1	40,1	6,99
Desvio Relativo Médio				8,74
<b>Período seco</b>				
Caruaru 29/08/2007	564,6	604,6	40,0	6,62
Serra Talhada 01/11/2008	606,3	735,0	128,7	17,50
Arcoverde 10/11/2008	650,8	692,7	41,9	6,05
Ibimirim 26/11/2008	606,9	561,9	-45,0	8,00
Floresta 19/12/2008	602,2	635,0	32,8	5,17
Desvio Relativo Médio				8,67

Fonte: PEREIRA NETO (2012)



Na Tabela 6 estão listados, por datas e cidades, e separados em período chuvoso e seco, os valores de  $Rn_B$  instantâneo, referentes aos pixels do recorte das imagens, no qual as estações estão inseridas, computados por sensoriamento remoto, com o Critério B utilizando os ajustes dos parâmetros de entrada para o Submédio São Francisco segundo Teixeira et al. (2009) e os valores de  $Rn_{PCD}$  calculados a partir do  $R_g$  medido por instrumento nas estações, estimados para o instante do imageamento do satélite, como também as diferenças entre estes dois dados e os percentuais desses últimos, em função dos  $Rn_{PCD}$  (Desvio %).

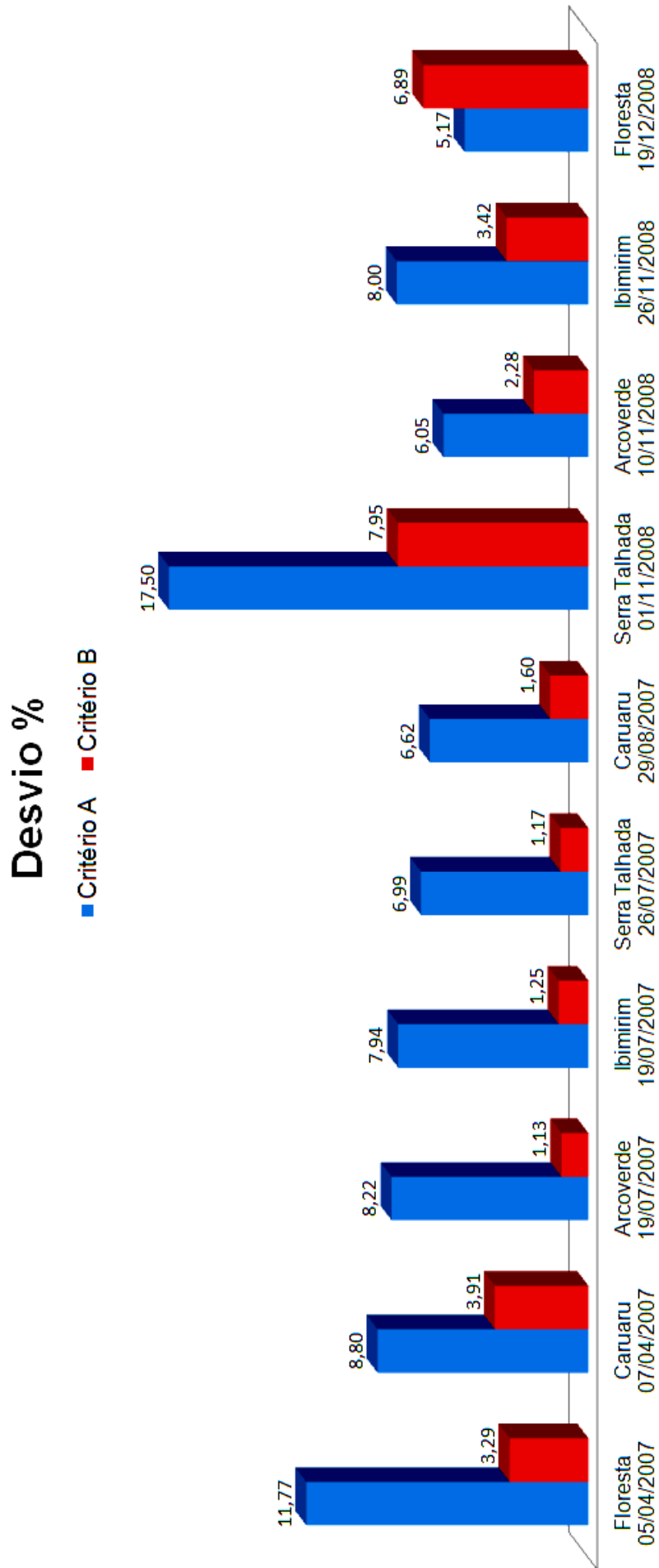
Tabela 6 Resultado do cômputo do  $Rn_B$  instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) utilizando a calibração para o Submédio São Francisco, computado por sensoriamento remoto e Desvios percentuais encontrados entre o  $Rn_B$  instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) e o  $Rn_{PCD}$  ( $Wm^{-2}$ ).

Cidades/Datas	Critério B			
	$Rn_B$	$Rn_{PCD}$	Diferença	Desvio %
<b>Período chuvoso</b>				
Floresta 05/04/2007	603,6	584,4	-19,2	3,29
Caruaru 07/04/2007	610,1	587,1	-23,0	3,91
Arcoverde 19/07/2007	539,7	545,9	6,2	1,13
Ibimirim 19/07/2007	507,7	514,1	6,4	1,25
Serra Talhada 26/07/2007	580,8	574,1	-6,7	1,17
Desvio % Médio				2,15
<b>Período seco</b>				
Caruaru 29/08/2007	614,2	604,6	-9,6	1,60
Serra Talhada 01/11/2008	676,5	735,0	58,5	7,95
Arcoverde 10/11/2008	708,5	692,7	-15,8	2,28
Ibimirim 26/11/2008	682,3	561,9	-22,6	3,42
Floresta 19/12/2008	678,7	635,0	-43,7	6,89
Desvio % Médio				4,43

Fonte: PEREIRA NETO (2012)

Para o Critério B (Tabela 6) no período chuvoso o maior desvio foi para Caruaru com 3,91%, o menor de 1,13% para Arcoverde, e o desvio médio foi de 2,15%. Já para o período seco o maior desvio foi para Serra Talhada com 7,95%, o menor desvio foi 1,60% para a localidade de Caruaru, e o desvio médio foi de 4,43%.

Figura 2 Gráfico dos percentuais dos Desvios encontrados entre o  $R_n$  instantâneo e o  $R_{n_{PCD}}$  a partir dos dados das PCD's.



Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

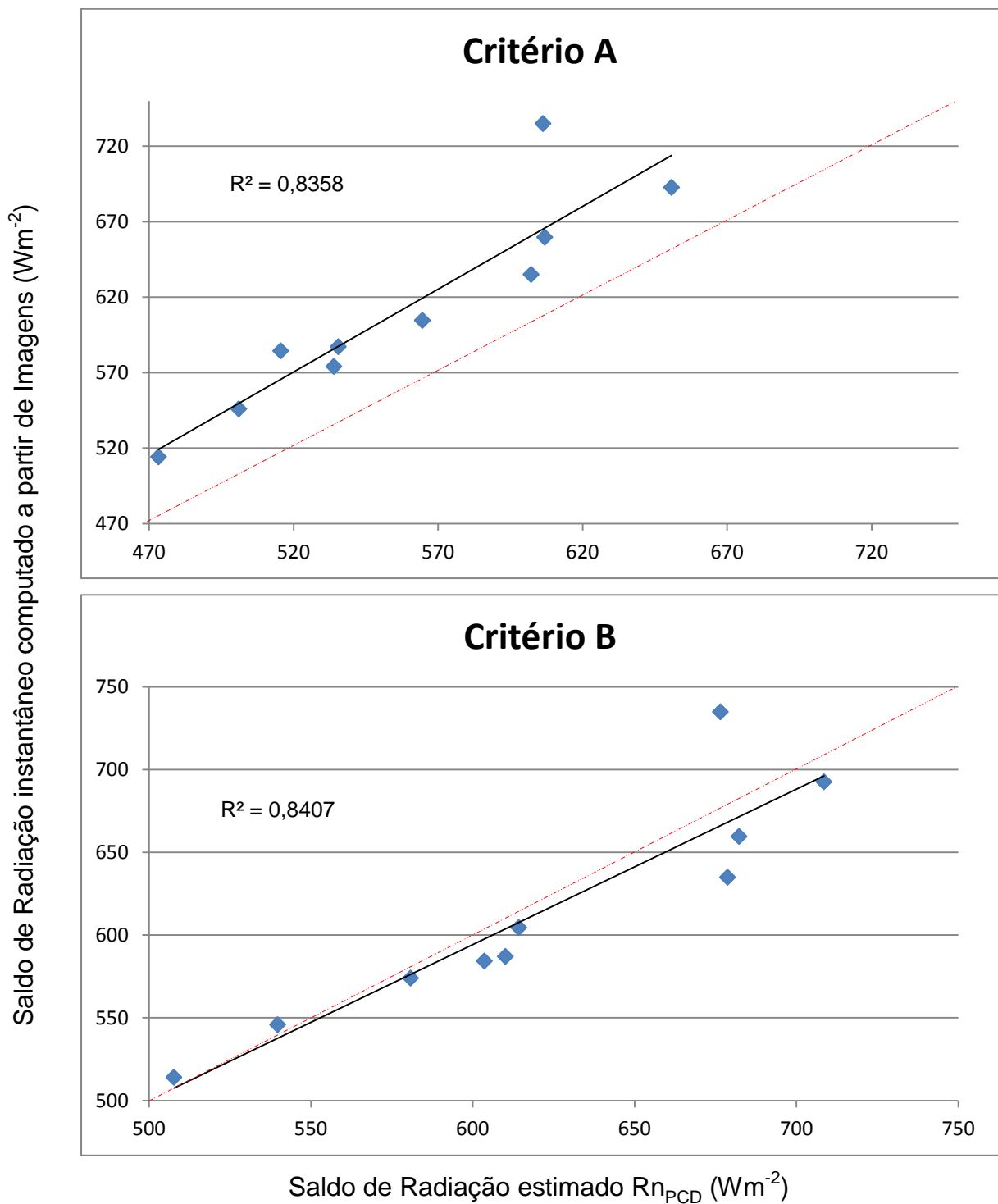
Os valores de  $R_n$  instantâneo apresentados nas duas tabelas anteriores, Tabela 5 e Tabela 6, tem padrões semelhantes aos obtidos por Silva et al. (2005), em áreas irrigadas do Projeto Nilo Coelho (áreas de vegetação nativa e parte da área urbana dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA), bem como com os alcançados por Silva et al. (2011), na determinação do balanço de radiação no Perímetro Irrigado São Gonçalo e áreas adjacentes, utilizando imagens da área do ano de 2008. Gomes (2009) observou que o  $R_n$  instantâneo variou de 375,6 a 731,3  $Wm^{-2}$  para o bioma Cerrado do Município de Santa Rita do Passa Quatro, valores abrangentes aos aqui discutidos. Já Gowda et al. (2008) obtiveram resultados de saldo de radiação instantâneo entre 500 e 642,6  $W m^{-2}$  para a área agrícola do *Texas High Plains*.

Ao observar o gráfico dos desvios relativos (Desvios%) do cômputo do  $R_n$  instantâneo (Figura 2) utilizando ou não os coeficientes parametrizados por Teixeira et al. (2009), pode-se notar que a correção dos coeficientes surtiram efeitos muito significativos. Com exceção de Floresta, em 19/12/2008, que não apresentou mudança significativa no resultado do  $R_n$  instantâneo entre os Critérios.

A média dos desvios relativos (Desvios %) encontrados nos 10 (dez) momentos de avaliação, utilizando os 02 (dois) Critérios foi de 6,00%, correspondente com o que é esperado. Para Daughtry et al. (1990), o desvio médio entre medições e estimativas de  $R_n$  com sensoriamento remoto devem ser inferiores a 7%, evidenciando que o SEBAL mantém uma aproximação consistente para diversas áreas, no cômputo do  $R_n$  instantâneo por sensoriamento remoto.

A relação entre o  $R_n$  instantâneo, utilizando os 02 (dois) Critérios, de todos os períodos estudados, computados por sensoriamento remoto e o  $R_{n_{PCD}}$ , estimados a partir do  $R_g$  medidos nas estações meteorológicas, estão representados na Figura 3. Os resultados mostraram melhores acordos entre os dados do Critério B, enquanto que os dados no qual foram utilizados os parâmetros do Critério A, resultaram em sobre-estimação, apresentando regressão linear de  $R^2=0,84$  nos dois Critérios.

Figura 3 Relação entre o saldo de radiação instantâneo ( $Rn_{A \ e \ B}$ ), computados por sensoriamento remoto e o  $Rn_{PCD}$  estimado a partir do  $R_g$  medidos nas estações meteorológicas automáticas, para todos os períodos estudados.

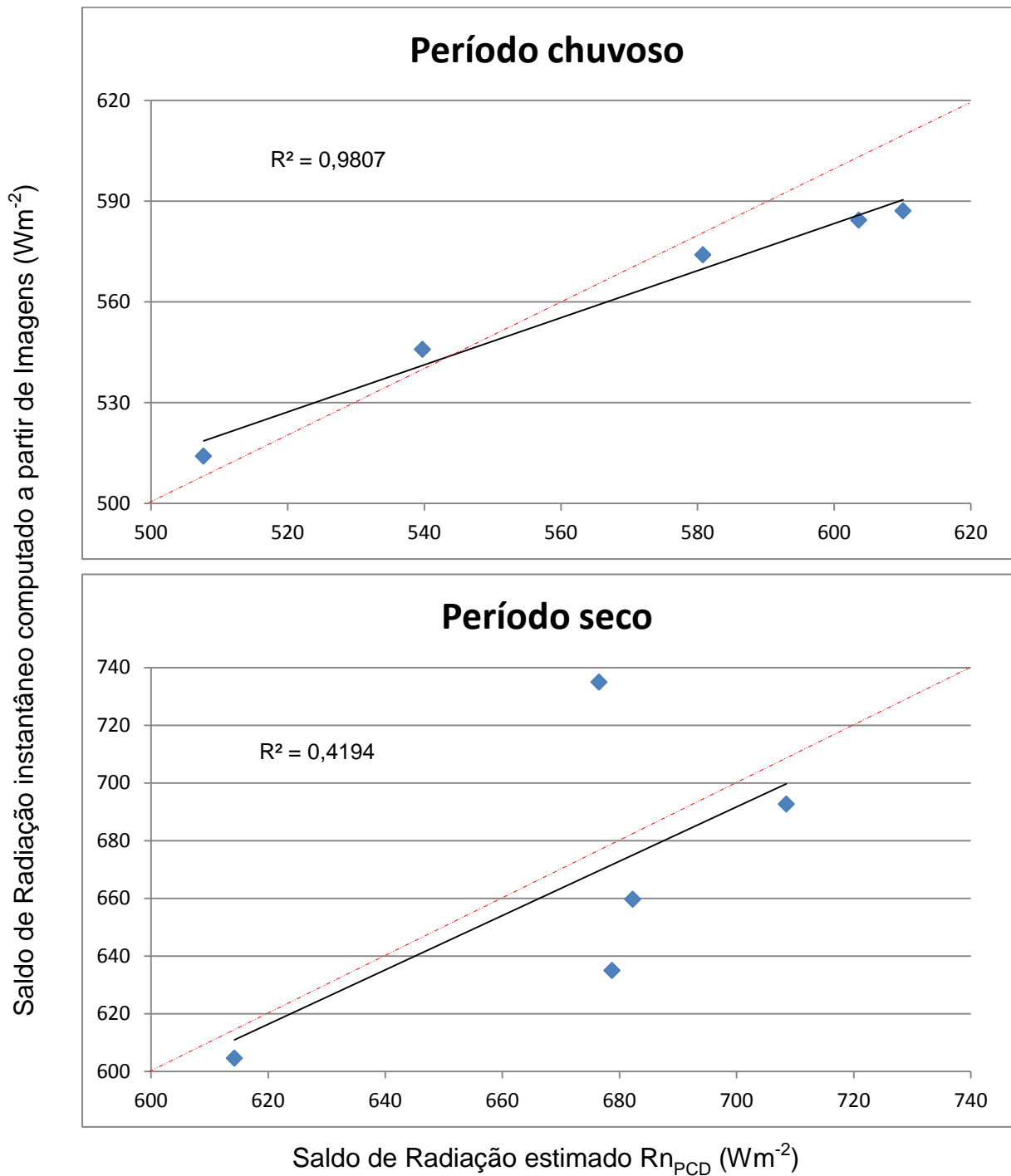


Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

Ao se fazer o recorte nos dados do Critério B, nos períodos chuvoso e seco, Figura 4, para cada cidade, o valor de R-quadrado melhorou para 0,98 na relação dos dados para o período chuvoso e o período seco apresentou uma linha de

tendência linear com  $R^2 = 0,42$ . O melhor desempenho com os dados do período chuvoso, para as cidade em análise sugere um peso sazonal limitante às calibrações para os parâmetros de entrada do SEBAL, realizadas por Teixeira et al. (2009).

Figura 4 Relação entre os saldos de radiação ( $Rn_B$ ), computados com os parâmetros do Critério B, após recorte por período pluviométrico do ano e o  $Rn_{PCD}$  estimado a partir do  $Rg$  medidos nas estações meteorológicas automáticas.



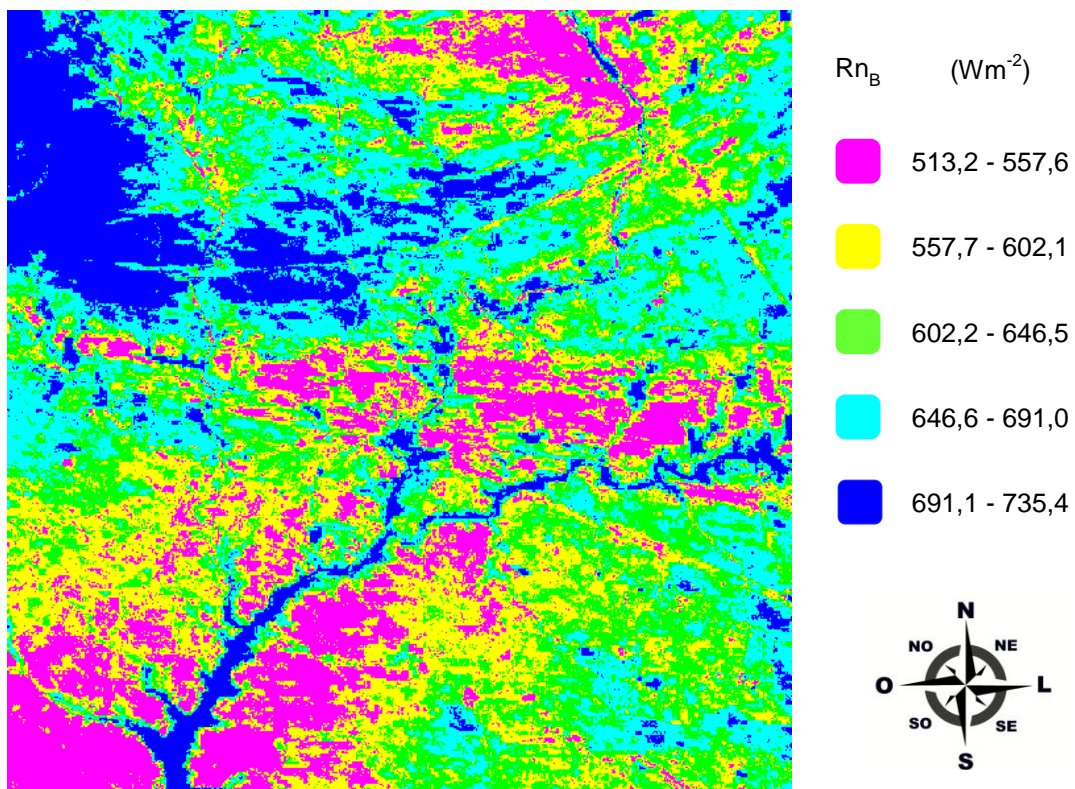
Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

Em média, o Critério B diminuiu o percentual de variação, entre o  $Rn_B$  instantâneo e o  $Rn_{PCD}$  em 69%, o que representa um resultado de grande importância e utilidade prática, reforçando a necessidade de mais trabalhos de calibração localizada.

A média das diferenças absolutas calculadas para os dados do Critério B, no período chuvoso, em todas as cidades, foi de  $12,3 \text{ Wm}^{-2}$ ; para o período seco foi de  $21,0 \text{ Wm}^{-2}$ . O que representa um desvio relativo (Desvio %) em média maior para o período seco (4,43%) em comparação com o período chuvoso (2,15%), do cômputo do  $Rn$  instantâneo por sensoriamento remoto. Uma desvantagem inversa, entre sazonalidade da radiação solar e distribuição intra-anual das precipitações pluviais mensais, pode ser observado nos resultados dos desvios relativos encontrados por Gomes et al. (2009), tanto para o  $Rn$  do bioma Cerrado como para as áreas de cana-de-açúcar.

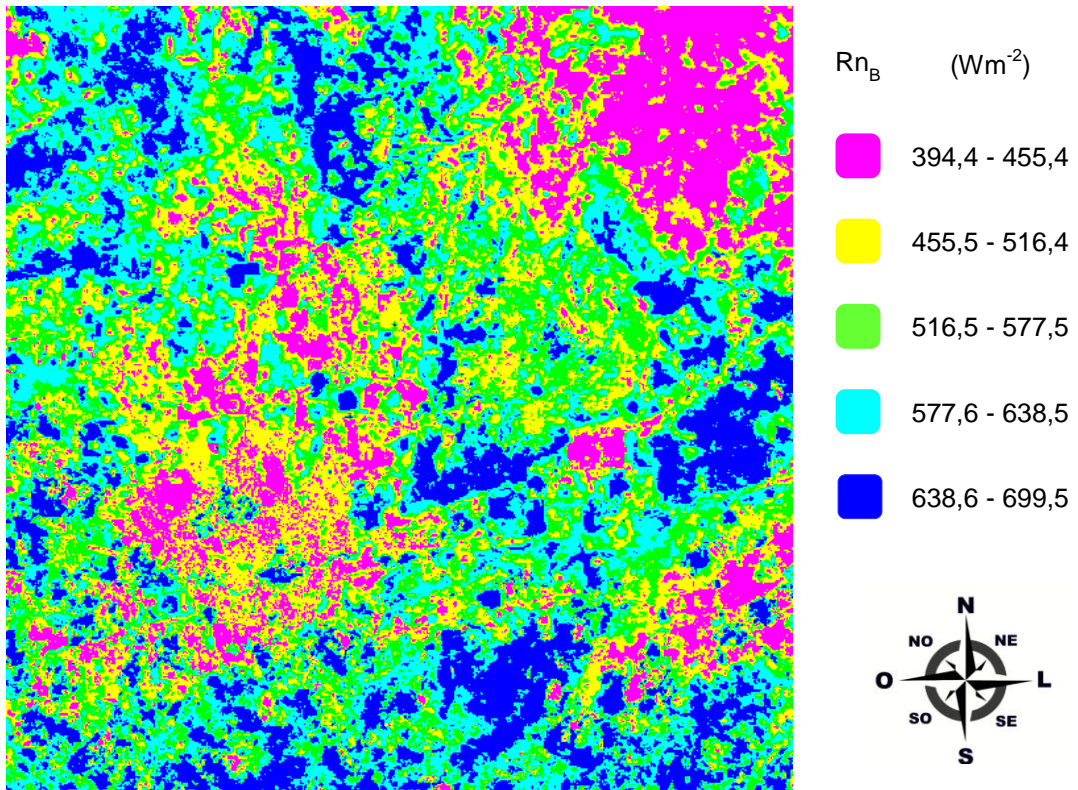
Nas figuras de 5 a 9 têm-se os mapas da distribuição dos saldos de radiação, computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ), dos períodos chuvoso dos recorte das imagens das cidades estudadas.

Figura 5 Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Floresta de 05/04/2007.



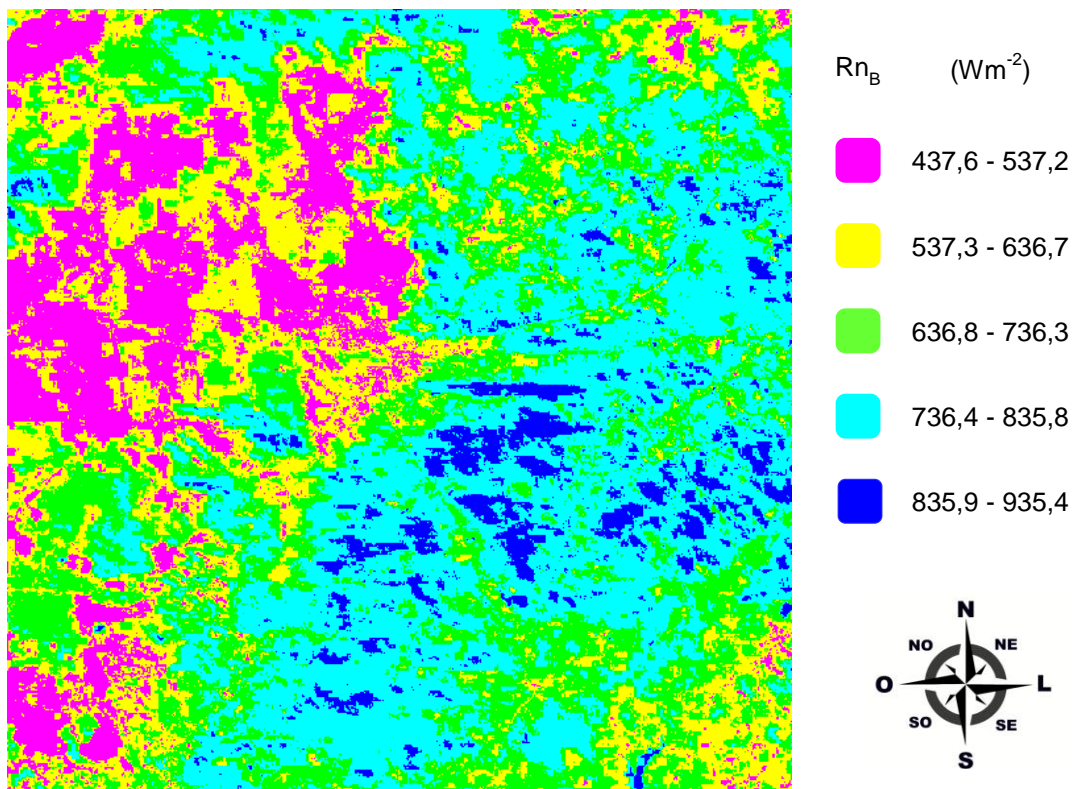
Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

Figura 6 Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Caruaru de 07/04/2007.



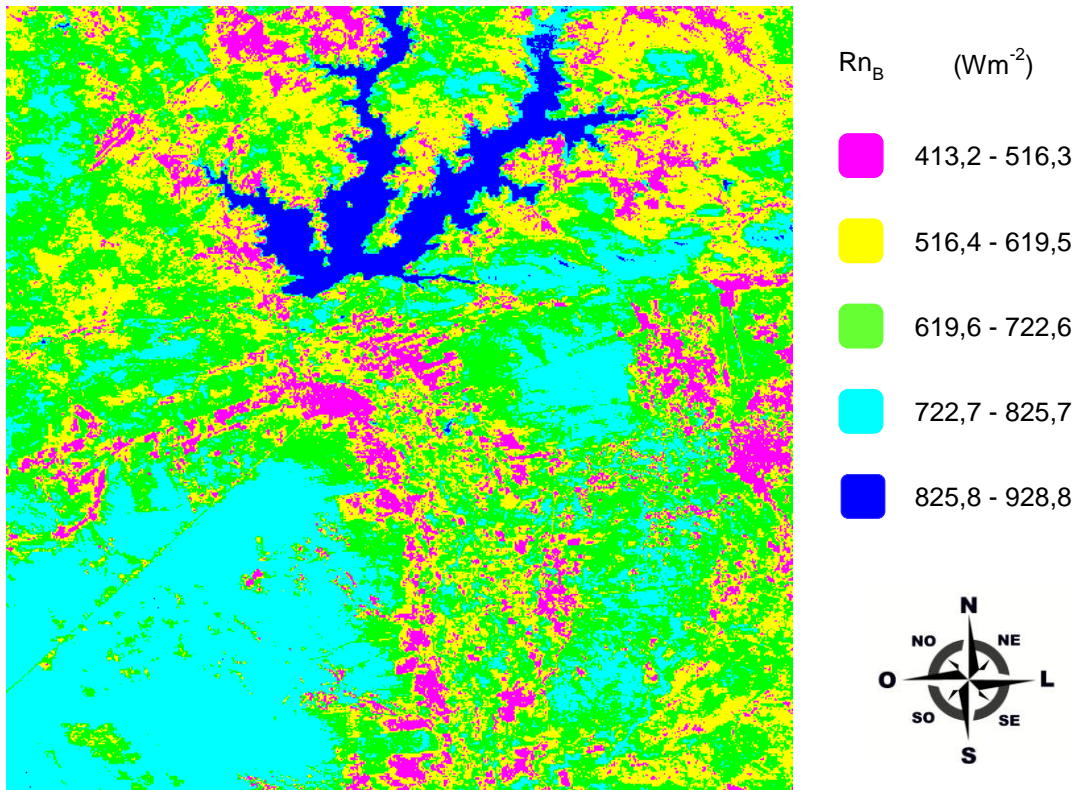
Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

Figura 7 Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Arcoverde de 19/07/2007.



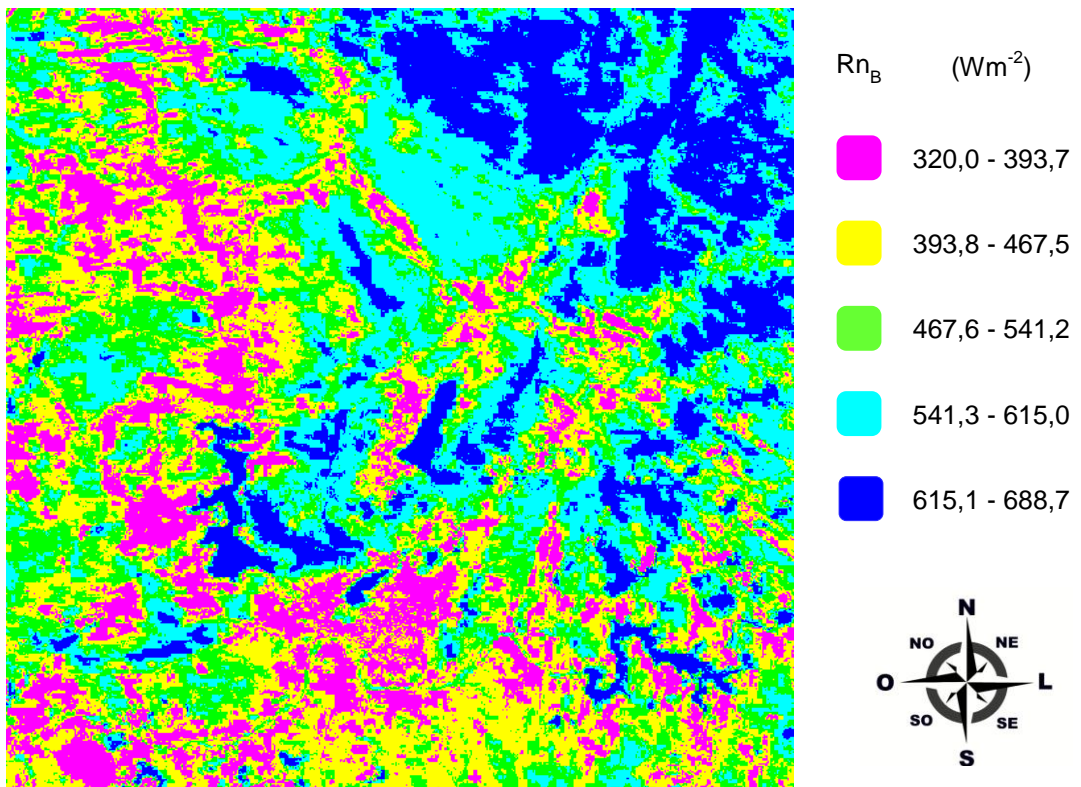
Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

Figura 8 Relação Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Ibimirim de 19/07/2007.



Fonte: PEREIRA NETO, (2012)

Figura 9 Mapa do saldo de radiação computados com os parâmetros do Critério B ( $Rn_B$ ) do recorte sobre Serra Talhada de 26/07/2007.



Fonte: PEREIRA NETO, (2012)



## 6 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados demonstraram a importância da calibração regional dos parâmetros internos do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL, em Pernambuco, diminuindo, em média, de 69% os desvios percentuais obtidos quando comparados os  $R_n$ 's instantâneos computados através do SEBAL com os obtidos a partir da medição do  $R_g$  dos instrumentos das PCD's.

Comparando os resultados dos saldos energéticos computados, utilizando as imagens de satélite, com os resultados de estimativas de saldos energéticos a partir da energia global medida no radiômetro das estações meteorológicas automáticas do Agreste e do Sertão pernambucano, os valores estão dentro do esperado, com desvio relativo total médio abaixo de 7%.

A correlação dos saldos de radiação computados no Agreste e no Sertão de Pernambuco, com o SEBAL, com parâmetros de entrada regionalizado para o vale do Submédio São Francisco, encontrado em Teixeira et al. (2009), para todos os períodos estudados, obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,84, com um valor de raiz quadrada da média das diferenças ao quadrado (RDQM) igual a  $26,84 \text{ Wm}^{-2}$ . Após a separação dos dados por período pluviométrico do ano nas cidades estudadas, o resultado foi de  $R^2 = 0,98$ , com um RDQM =  $14,29 \text{ Wm}^{-2}$ , para o período chuvoso e de  $R^2 = 0,42$ , com um RDQM =  $35,16 \text{ Wm}^{-2}$ , para o período seco.

Essa diferença dos coeficientes de determinação, para os períodos chuvoso e seco, nos inspira a propor continuar com o processo de calibração dos parâmetros de entrada do SEBAL, para o Estado de Pernambuco, desta vez procurando determiná-los para a sazonalidade da radiação solar e distribuição intra-anual das precipitações pluviais mensais ao longo das regiões do Estado.

## REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L. J. et al. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.

AHMAD, M.; BASTIAANSSEN, W. G. M. Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 17, p. 141-161, 2003.

ALLEN, R. G. et al. A LANDSAT-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 251-268, 2005.

ALLEN, R. G.; et al. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**, Rome, Italy, 15 f., 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 380-394, 2007.

ALLEN, R. G; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL. **Advanced Training and Users Manual** – Idaho Implementation, version 1.0. 2002.

ALVES, D. T. de M. et al. Qualidade ambiental da lâmina d'água da Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ: subsídios aos estudos de impactos ambientais em lagoas costeiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos. **Anais...** Santos: INPE, 1998. p. 79-88.

American Society of Civil Engineers - EWRI. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**: Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration, Environmental and Water Resources Institute. Reston, 2005. 59p.

ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada na cana-de-açúcar**. 2008. 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ARAÚJO FILHO, J. C. de et al. **Diagnóstico ambiental do município de Floresta, Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2001. 20 p. (Circular Técnica 10).

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. London: Academic Press, 1988. 307 p.

ATAÍDE, K. R. P. **Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos do sensor MODIS Terra e Aqua.** 2006. 78 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

AZEVEDO, P. V. et al. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, v. 88, n. 1-3, p. 201-208, 2007.

AZEVEDO, P. V.; DA SILVA, B. B.; DA SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 1, n. 58, p. 241-254, 2003.

BARROS, A. H. C. et al. **Climatologia das estações experimentais do IPA.** Recife: LAMEPE, 1994. 137 p.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate.** 1995. 273 f. Tesis Ph. D. (Dissertation, CIP Data Koninklijke Biblioteheek - Wageningen Agricultural University, Den Haag.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.198–212, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. Low cost satellite data applied to monthly irrigation performance monitoring benchmarks of Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, Cairo, v. 15, p. 53-79, 2001.

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, p. 85-93, 2005.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58, p.171-192, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; BOS, M. G. Irrigation performance indicators based on remotely sensed data: a review of literature. **Irrigation and Drainage Systems**, Cairo, v. 13, p. 291-311, 1999.

BASTIANNSEEN, W.G.M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 94, p. 321-340, 2003.

BASTOS, E. J. B.; SOUZA, R. A. F.; ALVALÁ, R. C. S. Emissividade da superfície sobre Brasil a partir de observações do SSM/I em 19 GHz e 85 GHz. **Brazilian Journal of Geophysics**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 147-160, 2000.

BEZERRA, B. G. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

BEZERRA, M. V. C. **Balço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto**. 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

BISHT, G. et al. 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.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using LANDSAT TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, n. 1, p. 329-343, 2002.

CEBALLOS, J. C.; MOURA, G. B. de A. Solar radiation assessment using meteosat 4-VIS imagery. **Solar Energy**, v. 60, p. 209-219, 1997.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

CHEMIN, Y. et al. Using remote sensing data for water depletion assessment at administration and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan. **Agricultural Water Management**, v. 64, p.183-196, 2004.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

DAUGHTRY, C. S. T.; KUSTAS, W. P.; MORAN, M. S. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, p. 111-124, 1990.

DI PACE, F. T. **Estimativa do balanço de radiação à superfície terrestre utilizando imagens TM - LANDSAT 5 e modelo de elevação digital.** 2004. 120 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DI PACE, F. T. et al. Mapeamento do saldo de radiação com imagens TM-LANDSAT 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 385-392, 2008.

DI AK, G. R. et al. Estimating land surface energy budgets from space: Review and current efforts at the University of Wisconsin – Madison and USDA – ARS. **Bulletin of American Meteorological Society**, Washington, v. 85, n. 1, p. 65-78, 2004.

DUCHEMIN, J. et al. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. **Agricultural Water Management**, v. 79, p. 1-27, 2006.

FEITOSA, J. R. P. **Uso de técnica de sensoriamento remoto e imagens LANDSAT - TM e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de radiação à superfície.** 2005. 164 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos.** 2007. 186 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

GIONGO, P. R. **Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície.** 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

GOMES, H. B. et al. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens TM-LANDSAT 5. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.

GOWDA, P. H. et al. ET mapping for agricultural water management: Present status and Challenges. **Irrigation Science**, v. 26 n. 3, p. 223-237, 2008.

HAFEEZ, M. M. et al. Field evapotranspiration estimation in Central Luzon, Philipphines, using differents sensor: LANDSAT 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: SYMPOSIUM ON GEOSPATIAL THOERY, PROCESSING AND APPLICATIONS, 2002, Ottawa. Anais... Ottawa, 2002. 1 CD-ROM.

HEMAKUMARA, H. M.; CHANDRAPALA, L.; MOENE, A. F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation áreas measured from large aperture scintillometer. **Agriculture Water Management**, v. 58, p. 109-112, 2003.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index – SAVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. R.; WARRICK, A. R. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, p. 155-167, 1990.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canada: Academic Press, 1983. 408p.

IZIOMON, M. G.; MAYER, H.; MATZARAKIS, A. Empirical models for estimating net radiation flux: a case study for three mid-latitude sites with orographic variability. **Astrophysics and Space Science**, v. 273, p. 313-330, 2000.

JIMÉNEZ, J. I. et al. On the estimation of long wave radiation flux from clear skies. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 38, n. 1, p. 37-42, 1987.

LEITÃO, M. M. V. B. R. **Balço de radiação em três ecossistemas da Floresta Amazônica: campina, campinarana e mata densa**. 1994. 135 f. Tese (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos.

LIBERATO, A. M.; CARDOSO, F. L. Análises da radiação de onda curta e onda longa na Amazônia. **Revista de Geografia**, Recife, v. 27, n. 3, p. 155-168, 2010.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 2004. 763 p.

LOPES, G. M. **Balço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens TM-LANDSAT 5 - TM**. 2003. 229 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MARKHAM, B. L.; BARKER, L. L. Thematic map per band pass solar exoatmospherical irradiances, **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 3 p. 517-523, 1987.

MEDINA, J. L. et al. Determination an analysis of regional of regional evapotranspiration in southern Spain based on remote sensing and Gis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 23, n. 4, p. 427-432, 1998.

MENDONÇA, J. C. **Estimativa da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região Norte Fluminense, RJ.** 2007. 145 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro.

MOHAMED, Y. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; SAVENNIJE, 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.

MONTONE, V. O.; SENTELHAS, P. C. Modelos de estimativa do saldo horário de radiação (R<sub>n</sub>) para Piracicaba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. **Anais eletrônicos...** Belém: criatividadecoletiva.com, 2010. 1 CD-ROM.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologia de aplicação.** São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto – princípios e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308 p.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR.** 2005. 218 f. Tese (Doutorando em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PAZ, R. S. et al. Análise inversa para estimar propriedades físicas de uma superfície vegetada a partir do balanço de radiação. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, II., 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2002.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Editora Agropecuária Ltda, 2002.

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

SAMARASINGHE, G. B. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. **Agriculture Water Management**, v. 58, p. 145-157, 2003.

SANTOS, R. A. **Estudo das variações dos componentes do balanço hídrico e área com solo exposto na bacia hidrográfica do rio Verde, Goiás.** 2010. 155 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing, models and methods for image processing**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.

SENTELHAS, P. C. et al. Evaluation of a Penman-Monteith approach to provide reference and crop canopy leaf wetness duration estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 141, n. 2-4, p. 105-17, 2006.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Temperatura do solo e do ar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2009. 144 p.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J. Estimating hourly net radiation for leaf wetness duration using the Penman-Monteith equation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 91, n. 1, p. 205-215, 2008.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A. L. C. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 71-77, 2003.

Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Arcoverde, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005a. 11 p.

Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Caruaru, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005b. 11 p.

Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Ibimirim, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005c. 12 p.

Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Serra Talhada, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005d. 12 p.

SILVA, A. P. N. et al. Albedo de superfície estimado a partir de imagens TM-LANDSAT 5 – TM no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, Recife, v. 27, n. 1, p. 154-168, 2010.

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

SILVA, B. B. da; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo - PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 3, p. 145-152, 2011.



SILVA, B. B. et al. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM – LANDSAT 5. **Revista de Geografia**, Recife, v. 25, n. 2, p. 33-52, 2008.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - LANDSAT 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 14, p. 1-10, 2006.

SILVA, V. B. **Diagnóstico da desertificação no Município de Ibimirim - PE**. 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

TANG, B.; LI, Z. L. Estimation of instantaneous net surface longwave radiation from MODIS cloud-free data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3482-3492, 2008.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. 2003. 357 f. Ph.D. Dissertation – University of Idaho, Idaho.

TASUMI, M. et al. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, Cairo, v. 19, p. 355-376, 2005.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G. Satellite-Based ET mapping to assess variation in the ET with timing of crop development. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 54-62, 2007.

TEIXEIRA, A. H. de C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462-476, 2009.

TEMÓTEO, J. W. C. **Base municipal de informações das águas subterrâneas: município de Ibimirim – PE**. Recife: CPRM, 2000. 18 p.

TIMMERMANS, W. J.; MEIJERINK, A. M. J. Remotely sensed actual evapotranspiration: implications for groundwater management in Botswana. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 1, p. 222-233, 1999.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control**. 2002. 247 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering) – Utah State University, Logan, Utah.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: Gráfica e Editora Stilo, 2000. 532 p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449 p.

WANG, J. et al. **A modified SEBAL model for spatially estimating pecan consumptive water use for Las Cruces**, New Mexico. 2005. Disponível em: <<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/92016.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2011.

WANG, W.; LIANG, S. Estimation of high-spatial resolution clear sky longwave downward and net radiation over land surfaces from MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 745-754, 2009.

YAMAGUTI, W. et al. **O sistema brasileiro de coleta de dados ambientais: estado atual, demandas e estudos de propostas de continuidade da missão de coleta de dados**. São José dos Campos, SP: INPE, 2009. 77 p. (Relatório Interno SCD-ETD-002).

ZHANG, B. et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1629-1640, 2008.