



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

HENOS CARLOS KNUPLER JORDÃO LISBOA

MAPEAMENTO DO SALDO DE RADIAÇÃO DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, RJ

Prof. Dr. RAFAEL COLL DELGADO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO – 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

HENOS CARLOS KNUPLER JORDÃO LISBOA

**MAPEAMENTO DO SALDO DE RADIAÇÃO DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO,
RJ**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. RAFAEL COLL DELGADO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO – 2014

**MAPEAMENTO DO SALDO DE RADIAÇÃO DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO,
RJ**

HENOS CARLOS KNUPLER JORDÃO LISBOA

Monografia aprovada em 26 de novembro de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Coll Delgado – UFRRJ
Orientador

Prof. Msc. Emanuel José Gomes de Araújo – UFRRJ
Membro

Carlos Magno Moreira de Oliveira – UFRRJ
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, a toda
minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força, sabedoria, proteção e saúde para enfrentar todos os desafios da vida;

Aos meus familiares, principalmente minha mãe Helenice Knupler Jordão, por todo amor, dedicação, incentivo aos estudos e confiança;

Ao professor e orientador Rafael Delgado, pela amizade, apoio, compreensão, e por estar sempre disposto a me ajudar.

Aos membros da banca, Professor Emanuel José Gomes de Araújo e Carlos Magno Moreira de Oliveira, pela importante contribuição nesse trabalho.

Ao professor e tutor Alexandre Monteiro, pela amizade, pelas caixas de cerveja pagas nos churrascos do PET-Floresta e principalmente pela sua dedicação na formação de seus alunos.

A toda equipe do Laboratório de Sensoriamento Remoto Ambiental e Climatologia Aplicada, pela amizade e trabalho conjunto.

Ao Laboratório de Gênese e Classificação do Solo (LGCS), PET-Floresta e à Flora Jr., pelo aprendizado, pelo crescimento profissional e pelas amizades adquiridas.

Ao Fundo Amazônia/BNDES, pela experiência, aprendizado, amizades adquiridas e por contribuir para minha formação pessoal e profissional.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelo acolhimento, auxílio e pela incrível oportunidade para formação acadêmica e pessoal.

À todos professores, técnicos e alunos do Instituto de Florestas, em especial a turma 2010-I do Curso de Engenharia Florestal, pelas amizades, festas e palhaçadas....

A todos do alojamento, em especial o M5-532, pelo aprendizado de vida, amizades, momentos de alegria e estresse, que sem dúvida contribuíram para me tornar uma pessoa melhor.

As meninas da casa bonita, pelo abrigo, companheirismo e histórias compartilhadas.

À toda nação Paraíba da UFRRJ, pelo acolhimento, amizade, que foram primordiais para suportar a saudade da terra natal e familiares.

À todos irmãos Agriculinos, Bueno, Goiâno, Jailson, Quememes, Léo, Grandão, Sr. Popo, Cristiane, Aldeane, Everton, Bambi, PH, Euzilene, Vila, Pinto, Adeilson, Benigno, Géssica, Higor, Sabugo, Bolota, Tarso, e aos que por ventura não foram lembrados.

Aos companheiros de pinga Uelison e Ananias, por todas histórias engraçadas vividas.

E em especial, a Marianna Fernandes Santana, pelo amor, companheirismo, carinho, amizade, cuidado e todo apoio, crucial para eu conseguir superar a muitos obstáculos e me tornar uma pessoa melhor.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo (a) estimar e validar o saldo de radiação (R_n), através do algoritmo SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land e (b) avaliar o saldo de radiação (R_n), através da dinâmica espaço-temporal da paisagem, utilizando o algoritmo ISODATA, no município do Rio de Janeiro, RJ. Foi calculado o Saldo de radiação da superfície (R_n) de todo o município do Rio de Janeiro através do algoritmo SEBAL, com imagens TM – Landsat 5 e, através do método Penman-Monteith (FAO 56) com dados de estação meteorológica do município do Rio de Janeiro para os dias 28/01/1986, 24/02/1990, 29/12/2003, 31/08/2006 e 15/02/2010. Foi realizado o mapeamento do uso e ocupação do solo para as mesmas datas, por meio da classificação não supervisionada utilizando o algoritmo “ISODATA”. Os valores de R_n obtidos com algoritmo SEBAL para o recorte da área da estação meteorológica foram ligeiramente inferiores aos obtidos pelo método Penman-Monteith (FAO 56), apresentando $VM = -36$ (Wm^{-2}) e $EPE = 84,44$ Wm^{-2} . A curva de R_n obtida com os R_n do algoritmo para as datas, apresentou alta correlação com a curva obtida com os valores de R_n obtidos à superfície. Os Valores de R_n obtidos com o algoritmo para as classes de uso e ocupação da terra do município do Rio de Janeiro, foram semelhantes aos encontrados por outros autores para as mesmas classes.

Palavras-chave: refletância, sensoriamento remoto, balanço de radiação.

ABSTRACT

This study aimed to (a) estimate and validate the net radiation (R_n) through the SEBAL algorithm and (b) assess the net radiation (R_n) through the spatio-temporal dynamics of the landscape, using the ISODATA algorithm in the municipality of Rio de Janeiro, RJ. Calculated the net radiation of the surface (R_n) of the entire municipality of Rio de Janeiro through the SEBAL algorithm with TM images - Landsat 5 and by Penman-Monteith (FAO 56) method with data from weather station in the city of Rio de Janeiro for days 02/24/1990, 12/29/2003, 08/31/2006 and 02/15/2010. Mapping the use and occupation of land for the same dates was conducted through unsupervised classification with ISODATA algorithm. R_n values obtained with SEBAL algorithm for area weather station were slightly lower than those obtained by the Penman-Monteith method (FAO 56), presenting $MV = -36$ (Wm^{-2}) and $PE = 84.44$ Wm^{-2} . The curve of R_n obtained with the algorithm showed high correlation with the curve obtained with the values of R_n to the surface in the studied dates. Values of R_n obtained with the algorithm for the classes of land use and occupation of the city of Rio de Janeiro, were similar to those found for the same classes by other authors.

Keywords: reflectance, remote sensing, radiation balance

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1. Objetivo geral	1
2.2. Objetivos específicos	1
3. REVISÃO DE LITERATURA	2
3.1. Balanço de radiação	2
3.2. Surface Energy Algorithm for Land – SEBAL	3
3.3. Sensoriamento Remoto	3
3.4. O Sensoriamento Remoto e o Balanço de Energia à superfície.....	4
4. MATERIAL E MÉTODOS	6
4.1. Área de Estudo.....	6
4.2. Imagens TM-Landsat 5	6
4.3. Saldo de Radiação (R_n)	7
4.4. Operações ERDAS IMAGINE 2011	8
4.4.1. União das bandas.....	8
4.4.2. Calibração Radiométrica (L_{λ_i}).....	8
4.4.3. Reflectância (ρ_{λ_i}).....	9
4.4.4. União da Reflectância	9
4.4.5. Índice de Vegetação Ajustado aos Efeitos do Solo (SAVI).....	9
4.4.6. Índice de Área Foliar (IAF).....	10
4.4.7. Emissividade	10
4.4.8. Albedo Planetário ou Albedo do topo da atmosfera (α_{toa})	10
4.4.9. Albedo da Superfície (α).....	11
4.4.10. Temperatura da Superfície (T_s).....	11
4.4.11. Radiação de Onda Longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$).....	12
4.4.12. Radiação de onda longa emitida pela atmosfera ($R_{L\downarrow}$)	12
4.4.13. Radiação de onda curta emitida pela atmosfera ($R_{s\downarrow}$).....	13
4.4.14. Saldo de Radiação (R_n).....	13
4.5. Classificação não supervisionada (ISODATA)	14
4.6. Análise estatística	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	15

5.1. Validação do algoritmo SEBAL para obtenção do saldo de radiação (R_n) no município do Rio de Janeiro, RJ.....	15
5.2. Saldo de radiação para os diferentes usos e ocupação da terra do município do Rio de Janeiro	17
6. CONCLUSÃO	23
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Localização Geográfica da área de estudo..... 6
- Figura 2:** Correlação dos valores observados e estimados de Rn para as datas das imagens TM - Landsat 5 do município do Rio de Janeiro, RJ, analisadas neste estudo. 17
- Figura 3:** Dinâmica do uso e ocupação da terra (Classificação não supervisionada, “Isodata”), do município do Rio de Janeiro, para as datas analisadas neste estudo. Classes: (A.) Água, (B.) Área Alagável, (C.) Vegetação, (D.) Campo, (E.) Agricultura, (F.) Área Urbana e (G.) Solo Exposto..... 18
- Figura 4:** Mapas de uso e ocupação da terra (A) e do saldo de radiação – Rn (Wm^{-2}) (B), do município do Rio de Janeiro, para as datas analisadas neste estudo. 20
- Figura 5:** Saldo de Radiação obtido para cada classe de uso e ocupação da terra 22

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Data, sensor, órbita/ponto e hora da passagem em TMG (Time Mean Greenwich) do satélite TM - Landsat 5 na cidade do Rio de Janeiro – RJ 7
- Tabela 2:** Descrição das bandas do sensor TM do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração ($L_{mín} - a$ e $L_{max} - b$) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA) no período de 1 de março de 1984 a 4 de maio e após 4 de maio de 2003..... 8
- Tabela 3:** Parâmetros utilizados nas equações para calcular o saldo de radiação (R_n). 14
- Tabela 4:** Resultado e análise estatística do valores do Saldo de Radiação (R_n) obtidos pelo método Penman-Monteith (FAO-56) e algoritmo SEBAL para estação meteorológica do Município do Rio de Janeiro..... 16
- Tabela 5:** Valor médio do saldo de radiação (Wm^{-2}) para as diferentes classes de uso e ocupação da terra, do município do Rio de Janeiro, RJ. 21

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar que chega a Terra é a principal fonte de energia necessária para praticamente toda a vida e os movimentos atmosféricos do planeta. Em meio aos processos físicos que ocorrem na superfície terrestre, o saldo de radiação (R_n) é de fundamental importância na redistribuição de umidade e calor na baixa troposfera, visto que é o principal responsável pelo aquecimento do solo e do ar, bem como pela evapotranspiração (PEREIRA *et al.*, 1997; SILVA *et al.*, 2005).

Existem diversos equipamentos convencionais, como saldo-radiômetros, que medem o saldo de radiação *in loco*, com boa precisão. No entanto, estes equipamentos resultam em medidas pontuais desta variável do balanço de energia, sendo representativas somente para pequenas áreas, sujeitas a condições semelhantes, localizadas no entorno da medição (DI PACE *et al.*, 2008). Neste sentido, para a determinação da distribuição espacial do saldo de radiação em áreas com características heterogêneas, vem sendo desenvolvidos diferentes métodos e algoritmos associados a técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto, dentre eles o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) é tido como uma alternativa apropriada, gerando resultados significativos.

No entanto, para melhorar a acurácia do algoritmo SEBAL são necessárias parametrizações de diversas equações para melhor ajustá-las à realidade local da região de estudo. Essa validação é realizada por comparação entre os dados estimados e os dados obtidos em campo por medição direta dos fluxos de superfície ou utilizando métodos de medição pontual, tal como o método Penman-Monteith (FAO 56).

Com isso, acredita-se que a obtenção do balanço de radiação com o SEBAL ajustado à região, associado a utilização de geotecnologias para geração de resultados temáticos e quantitativos, pode-se contribuir com o processo de gestão do sistema hídrico regional, monitoramento contínuo da cobertura vegetal, das matas ciliares e uso e ocupação do solo bem como dos demais ecossistemas, podendo-se obter a evapotranspiração real dos cultivos agrícolas, da vegetação nativa e dos corpos hídricos com custo relativamente baixo e alta eficiência. Neste sentido, Biudes *et al.* (2009) cita que o conhecimento do balanço de radiação de uma região é importante para caracterizar o microclima local, e também para identificar as interações entre as variáveis ambientais e à superfície, além de ser relevante para a formulação de políticas ambientais e climáticas (ANDRADE, 2009).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Mapear o saldo de radiação do município do Rio de Janeiro

2.2. Objetivos específicos

(i) estimar e validar o saldo de radiação (R_n), através do algoritmo SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land; e

(ii) Avaliar o saldo de radiação (R_n), através da dinâmica espaço-temporal da paisagem do município do Rio de Janeiro, RJ.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Balanço de radiação

A radiação solar ao penetrar na atmosfera sofre vários processos de atenuação e absorção que a modificam. Uma fração da radiação incidente é refletida pelas nuvens e espalhada pela atmosfera pelo processo de espalhamento. Neste sentido, Oliveira (2012) diz que ao incidir na Terra, a irradiância solar sofre uma série de processos que a modifica, como a reflexão, transmissão, espalhamento e absorção pelos gases, aerossóis e nuvens que compõem a atmosfera. Jin *et al.* (2011) também cita que a radiação é afetada pelas propriedades da atmosfera e da superfície. Com isso apenas uma parte da radiação atinge diretamente a superfície da Terra, enquanto que o restante representa as contribuições difusas e térmicas da atmosfera (OKE, 1987; LIOU, 2002).

O balanço de radiação à superfície representa a contabilidade da radiação que chega e sai da superfície na forma de ondas longas e ondas curtas, onde são considerados positivos os fluxos em direção a superfície e negativos os que saem da mesma (SILVA, 2004). Em que parte da radiação solar que chega à superfície da Terra, em média 9% corresponde a radiação ultravioleta, 44% corresponde a radiação visível que é efetivamente utilizada na fotossíntese (Radiação Fotossinteticamente Ativa -RFA), e 47% a radiação infravermelha (Iqbal, 1983).

A radiação de onda longa é o fluxo radiante de energia emitido pelos gases atmosféricos e pelas superfícies líquidas e sólidas da Terra. Com uma temperatura média em torno de 300 K, a Terra apresenta a máxima emissão de Radiação eletromagnética (REM) em torno de $9,7 \mu\text{m}$, sendo que a maioria da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de $4 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$, por isto, é denominada radiação de onda longa ou radiação termal, em comparação com o espectro da radiação solar que está contido no intervalo de $0,1 \mu\text{m}$ a $4,0 \mu\text{m}$ (Brutsaert, 1982).

O balanço de ondas longas é geralmente obtido em função da lei de Stefan-Boltzmann aplicada à atmosfera e à superfície (DIAK *et al.*, 1994; TARPLEY, 1994; BASTIAANSEN *et al.*, 1998; JUPP, 1988; PARLOW, 2000; YANG, 2000; YUNHAO *et al.*, 2003).

O balanço de onda curta é expresso em função da radiação solar global e do albedo da superfície. Considerando-se a inexistência de observações de radiação solar em muitos pontos da superfície da Terra e as dificuldades inerentes a sua obtenção, muitos modelos têm sido desenvolvidos visando estimar a radiação solar global, difusa e direta. Entre eles, citam-se os de Beyer *et al.* (1991), Moriarty (1991), Satyamurty e Lahiri (1992), dentre outros.

A quantificação do saldo de radiação (R_n) é imprescindível para a estimativa do balanço de energia, sendo este, a principal fonte de energia a ser repartida no aquecimento do solo, ar e evapotranspiração (SILVA *et al.*, 2005), usado em várias aplicações

incluindo monitoramento e previsões climáticas e do tempo e em meteorologia agrícola (BISHT *et al.*, 2005).

3.2. Surface Energy Algorithm for Land – SEBAL

O SEBAL é um modelo que visa fazer estimativas dos componentes do Balanço de Energia – BE e, por conseguinte, da evapotranspiração, baseado em combinações de relações empíricas e parametrizações físicas (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998). Trezza (2002) cita que o SEBAL é um modelo de processamento de imagens de satélite para o cálculo da evapotranspiração em grandes áreas.

Atualmente, o SEBAL é um dos mais destacados algoritmos para estudos de fluxo de calor na superfície que vem sendo utilizado por alguns pesquisadores em várias partes do mundo, tais como: Bastiaanssen *et al.* (1998), Bastiaanssen (2000), Granger (2000), Moran (1994) e Silva *et al.* (2002).

Este algoritmo pode ser aplicado em imagens digitais de qualquer sensor orbital que efetue medidas de radiância no visível, infravermelho próximo e termal, tais como: TM - Landsat 5 (BEZERRA *et al.*, 2008; MENEZES *et al.*, 2011, ANDERSON *et al.*, 2012), NOAA-AVHRR (TIMMERMANS e MEIJERINK, 1999; BASTIAANSSEN e ALI, 2003; PAIVA, 2005), MODIS/Terra/Aqua (DI LONG *et al.*, 2010; SANTOS, 2011; OLIVEIRA, 2012) e ASTER/Terra (HAFEEZ *et al.*, 2002; WANG *et al.*, 2005).

3.3. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é a ciência e arte de obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um instrumento que não entra em contato direto com o objeto, área ou fenômeno em investigação (LILLESAND e KIEFIR, 1979 e 1995).

A composição espectral do fluxo radiante proveniente da superfície da Terra produz informações sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas de solos, água e vegetações que caracterizam o sistema terrestre (HUETE, 1988). E por meio da tecnologia do sensoriamento remoto é possível obter imagens e outros tipos de dados e informações dessa superfície, através da captação e/ou registro da energia refletida pelos alvos (FLORENZANO, 2002).

Com o propósito a obtenção de conhecimentos da Terra que propiciem uma melhor compreensão de fenômenos naturais, de sua evolução e dos impactos sobre o meio ambiente o Programa Espacial da NASA (National Aeronautics and Space Administration) vem lançando desde 1972 satélites da série Landsat.

O Landsat 5, que foi lançado em março de 1984 e desativado em janeiro de 2013, é dotado com dois sistemas de “scanners”: o antigo MSS (Multispectral Scanner Subsystem), para fazer comparações das imagens dos Landsat 1 a 3 e um “scanner” mais desenvolvido, o Thematic Mapper (TM). Em comparação com o MSS, o TM é caracterizado por uma resolução espacial de 30 m e de 120 m, no canal térmico (no MSS, 80 m e 240 m) e um intervalo menor entre seus canais. Tem órbita quase polar e heliosíncrona, numa altitude média de 705,3 km e uma inclinação de 98, 3°. Para

percorrer sua órbita, precisa de 99 minutos, o que significa fazer em um dia 14,58 órbitas. Em 16 dias, o Landsat 5 cobre toda a Terra. A passagem pelo equador ocorre às 9:45 h (hora local). Suas imagens apresentam uma resolução radiométrica de 8 bits (256 níveis de cinza).

Quadro 1: Principais aplicações de cada uma das faixas espectrais do Landsat - 5

Bandas	Intervalo Espectral (µm)	Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT-5
1	(0,45 – 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenoides). Apresenta sensibilidades a pluma de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera
2	(0,52 – 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 – 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação (ex: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex: campo, cerrado e floresta). Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 – 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuras, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 – 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causando por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 – 12,50)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 – 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Fonte: Lillesand e Kiefer (1995)

3.4. O Sensoriamento Remoto e o Balanço de Energia à superfície

Dada as limitações do emprego de saldo radiômetros para grandes áreas, diversas metodologias alternativas baseadas em sensores orbitais têm suprido essa grande lacuna (SILVA *et al.*, 2005; BISHT *et al.*, 2005; BEZERRA *et al.*, 2008) e o sensoriamento remoto têm a grande vantagem de propiciar estimativas de temperatura da superfície em uma escala regional ou global (DASH *et al.*, 2002).

Neste sentido, para estimar o saldo de radiação (Rn) e demais componentes do balanço de energia à superfície com imagens de satélites, algoritmos têm sido formulados

e o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998), tem sido aplicado e validado em diferentes ambientes.

Duas variáveis são indispensáveis à determinação do R_n utilizando o sensoriamento remoto orbital são o albedo (SILVA *et al.*, 2005) e a temperatura da superfície (SOUZA e SILVA, 2005; SOUZA *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2008)

O albedo é obtido por sensoriamento remoto pela razão entre a irradiância refletida e a irradiância incidente. Os satélites medem a reflectância espectral, em bandas estreitas, no topo da atmosfera. A conversão de múltiplas reflectâncias em bandas estreitas em uma única banda é um procedimento em que a radiação solar espectral incidente, em cada banda, é ponderada por um fator de proporcionalidade. O albedo planetário é obtido pela integração dessas ponderações. Por sua vez, o albedo da superfície é estimado em função do albedo planetário e da transmitância atmosférica de ondas curtas (BASTIAANSEN *et al.*, 1998)

Ao determinarem o albedo superficial corrigido e o albedo estimado através da análise multiespectral de imagens do TM - Landsat 5 (nos canais 1, 2, 3, 4 e 7), de acordo com o método proposto por Bastiaanssen (1995), Silva *et al.* (2002) concluíram que os valores do albedo para os alvos estudados foram semelhantes aos valores do albedo calculados com dados de superfície.

Utilizando o algoritmo SEBAL para avaliar o balanço de radiação, os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração horária em três regiões do estado do Ceará, Moreira (2007) afirma que o algoritmo apresentou resultados significativos, sendo bastante eficiente para estimativa destas variáveis.

Para áreas irrigadas, áreas de vegetação nativa de caatinga e área urbana dos municípios de Petrolina, PE e Juazeiro, BA, Silva *et al.* (2005) também determinaram o balanço de radiação com algoritmo SEBAL, concluindo que a técnica de balanço de radiação com imagens de satélite produz valores consistentes comparados com observações realizadas do balanço radioativo à superfície, para áreas irrigadas, solo descoberto e superfície livre de água na região do submédio do Rio São Francisco.

Para os anos de 2000 e 2001, Bezerra (2004) obteve valores médios do saldo de radiação instantâneo de $566,6 \text{ W.m}^{-2}$ e $579,9 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente para áreas irrigadas com pivô central, $532,6 \text{ W.m}^{-2}$ e $509,9 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente para áreas de solo exposto e, $705,1 \text{ W.m}^{-2}$ e $550,4 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente para áreas de vegetação nativa de Caatinga.

Para área de vegetação nativa na região da Chapada do Araripe, CE, Bezerra (2006) utilizando o SEBAL obteve valores do saldo de radiação instantânea 550 W.m^{-2} para áreas de solo exposto e vegetação rala, valores entre 650 e 700 W.m^{-2} para áreas de cobertura vegetal e, valores acima de 700 W.m^{-2} para área de vegetação densa, no topo da chapada e corpos hídricos.

Há também os trabalhos de Durand *et al.* (2007) e Borges *et al.* (2010) para regiões da Ceará e Bahia, respectivamente, que obtiveram valores de saldo de radiação instantâneo variando de 150 a 870 W.m^{-2} para áreas de irrigação, solo exposto e de vegetação nativa.

Em área urbana de Mossoró Baptista *et al.* (2005) avaliaram as ilhas de calor, saldo de radiação, através de imagens de temperatura da superfície e do visível do ASTER

com a finalidade de analisar o desconforto térmico e as manifestações de seca da vegetação.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

O município do Rio de Janeiro, localizado entre as latitudes $22^{\circ} 45'$ e $23^{\circ} 50'$ S, e longitudes $43^{\circ} 05'$ e $43^{\circ} 50'$ W (Figura 1). A sua classificação climática segundo Köppen, consiste no tipo “Aw”, caracterizado por invernos secos e frios e verões úmidos e chuvosos. Apresenta temperatura média anual de $23,9^{\circ}\text{C}$ e temperaturas máximas e mínimas de $27,3^{\circ}\text{C}$ no verão e $21,1^{\circ}\text{C}$ no inverno, com precipitação em torno de $1.258 \text{ mm.ano}^{-1}$ e número médio de 124 dias com precipitação (ZERI *et al.*, 2011).

Apresenta vegetação de Floresta Ombrófila Densa com predominância dos latossolos com características distróficas e raramente eutróficas. Ocorrem ainda solos litólicos em trechos das encostas (IBGE, 1992; Embrapa e Secretaria Municipal de Meio Ambiente, 1999).

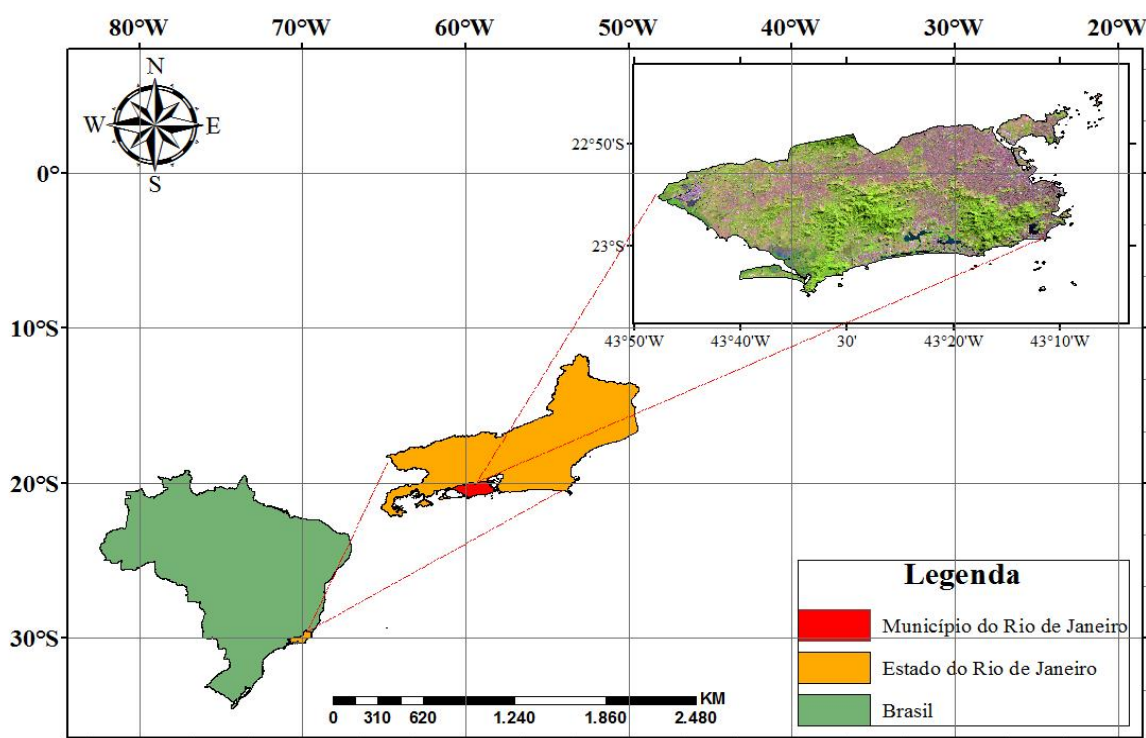


Figura 1: Localização Geográfica da área de estudo

4.2. Imagens TM-Landsat 5

Foram selecionadas sistematicamente 5 imagens do sensor TM (Thematic Mapper) do satélite Landsat 5 (Tabela 1), órbita 217 e ponto 76 da série histórica

disponibilizada no Catalogo de Imagens no sitio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) de forma a obter-se concomitantemente imagens com menor cobertura de nuvens e disponibilidade das variáveis de Temperatura média do ar (Ta em °C), Umidade Relativa do ar (UR em %) e insolação (n em horas) do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>) para os mesmos dias e anos das imagens (Tabela 1).

Tabela 1: Data, sensor, órbita/ponto e hora da passagem em TMG (Time Mean Greenwich) do satélite TM - Landsat 5 na cidade do Rio de Janeiro – RJ

Ano	Satélite	Sensor	Data	Hora da Passagem (TMG)	Orbita/Ponto
1986	Landsat-5	TM	28/01/1986	12:19:06	217/76
1990	Landsat-5	TM	24/02/1990	12:13:12	217/76
2003	Landsat-5	TM	29/12/2003	12:30:44	217/76
2006	Landsat-5	TM	31/08/2006	12:45:36	217/76
2010	Landsat-5	TM	15/02/2010	12:42:54	217/76

As imagens TM - Landsat 5 são compostas de sete bandas espectrais com resolução espacial de 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e de 120 m na banda 6 (termal), resolução radiométrica de 8 bits e temporalidade da plataforma de 16 dias. São disponibilizadas gratuitamente pelo INPE, com referência geográfica de Datum WGS-84 (Word Geodetic System) e Sistema de Projeção UTM (Universal Transverso de Mercator).

4.3. Saldo de Radiação (Rn)

Para obtenção do saldo de Radiação (Rn), as imagens foram processadas no software ERDAS IMAGINE 2011, utilizando a plataforma Model Maker. Utilizou-se como padrão o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) proposto por Bastiaanssen et al., (1998). No software ERDAS IMAGINE 2011 calculou-se a união das bandas do satélite, a calibração radiométrica, refletividade, albedo no topo da atmosfera, albedo da superfície, índices de vegetação, emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal, emissividade da banda larga, temperatura da superfície, radiação de onda longa emitida pela atmosfera e superfície, radiação de onda curta descendente emitida pela atmosfera e o saldo de radiação. O software ArcGIS versão 10.2 foi utilizado para confecção de dados vetoriais, banco de dados e mapas.

O cálculo da Radiação de onda longa emitida pela atmosfera (R_{Ll}) e de onda curta emitida pela atmosfera na direção de cada pixel (R_{Sl}), que compõem o saldo de radiação foram realizados em planilha Excel 2013.

4.4. Operações ERDAS IMAGINE 2011

4.4.1. União das bandas

Para unir as bandas espectrais separadas (1 a 7), de cada uma das 5 imagens utilizadas neste estudo, adotou-se a ferramenta Layer Stack do software ERDAS IMAGINE 2011, obtendo-se imagens multiespectrais.

4.4.2. Calibração Radiométrica ($L_{\lambda i}$)

Para o cálculo da Radiância Espectral de cada banda ($L_{\lambda i}$), o número digital (ND) de cada pixel da imagem é convertido em radiância espectral monocromática. Isso representa a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite TM - Landsat 5 (aproximadamente 705 km de altura), para as bandas 1, 2, 3, 4, 5, e 7; para banda 6. Essa radiância representa a energia emitida por cada pixel e pode ser obtida pela equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND \quad (1)$$

em que:

$L_{\lambda i}$ = Radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);

a,b = são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)

ND = intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255);

i = são as bandas (1,2,3,4,5,6,7) do satélite TM - Landsat 5.

Foram utilizados os valores de a_i e b_i propostos por Chander e Markhan (2009), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Descrição das bandas do sensor TM do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração ($L_{mín} - a$ e $L_{max} - b$) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA) no período de 1 de março de 1984 a 4 de maio e após 4 de maio de 2003

Bandas TM	Comprimento de onda (μm)	01/03/1984 a 04/05/2003			Após 04/05/2003		
		$L_{mín}$	L_{max}	$E_{\lambda i}$	$L_{mín}$	L_{max}	$E_{\lambda i}$
1 (azul)	0,45 - 0,52	- 1,52	152,10	1957	- 1,52	193	1957
2 (verde)	0,52 - 0,60	- 2,84	296,81	1829	- 2,84	365	1826
3 (vermelho)	0,63 - 0,69	- 1,17	204,30	1557	- 1,17	264	1554
4 (IV - próximo)	0,76 - 0,90	- 1,51	206,20	1047	- 1,51	221	1036
5 (IV - médio)	1,55 - 1,75	- 0,37	27,19	219,3	- 0,37	30,2	215
6 (IV - termal)	10,4 - 12,5	1,2378	15,303	-	1,2378	15,303	-
7 (IV - distante)	2,08 - 2,35	-0,15	14,38	74,52	-0,15	16,5	80,67

Fonte: Chander e Markhan (2009) (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>)

4.4.3. Reflectância (ρ_{λ_i})

A Reflectância Monocromática de cada banda (ρ_{λ_i}), definida como sendo a razão entre o fluxo de radiação solar refletido pela superfície e o fluxo de radiação solar incidente, foi obtida segundo a equação (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{E_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

em que:

ρ_{λ_i} = Reflectância monocromática;

L_{λ_i} = Radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);

E_{λ_i} = Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$), (Tabela 2)

Z = Ângulo zenital solar (obtido no cabeçalho das imagens adquiridas, e depende da órbita, ponto e época do ano) (Tabela 3);

d_r = Dia astronômico do ano (U.A), de acordo com Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (Tabela 3), dada por (Iqbal, 1983), (Allen et al., 2002), (Allen et al., 2007);

i = São as bandas (1,2,3,4,5 e 7) do satélite TM - Landsat 5.

4.4.4. União da Reflectância

Para cada imagem realizou-se a união da refletividade, com a ferramenta Layer Stack do software ERDAS IMAGINE 2011, com exceção da banda 6, por ser uma banda termal não refletiva.

4.4.5. Índice de Vegetação Ajustado aos Efeitos do Solo (SAVI)

O cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI), que é um índice que busca amenizar os efeitos de “background” do solo (formação do solo), através da inclusão de um fator de ajuste (L) que é variável com o grau de fechamento do dossel, permitindo melhoria na interpretação das variáveis da vegetação, foi utilizada a equação de Huete (1988):

$$SAVI = \frac{(1+L) \times (\rho_N - \rho_V)}{(L + \rho_N + \rho_V)} \quad (3)$$

em que:

SAVI = Índice de Vegetação Ajustado para os efeitos do Solo;

L = Constante, cujo valor usado foi 0,5 (Accioly et al., 2002; Boegh et al., 2002; Silva et al., 2005);

ρ_{IV} = Refletividade do infravermelho próximo, corresponde a banda 4 do TM – Landsat 5;

ρ_V = Refletividade do vermelho, corresponde a banda 3 do TM – Landsat 5.

4.4.6. Índice de Área Foliar (IAF)

O Índice de Área Foliar (IAF), definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, foi obtido pela seguinte equação empírica (Allen et al., 2002):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (4)$$

4.4.7. Emissividade

Como cada pixel não constitui um corpo negro, há necessidade de se estabelecer a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal (ε_{NB}) do TM – Landsat 5 (10,4 a 12,5 μm), para fins do cômputo da temperatura da superfície (T_s) em Kelvin (K), bem como no cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície, que nesse caso é considerada a emissividade da banda larga (ε_0) (4 – 100 μm).

As emissividades foram obtidas através das seguintes equações (Allen et al., 2002; Trezza, 2002; Tasumi, 2003):

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF \quad (6)$$

Para pixels com $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ($NDVI < 0$), $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$ (Allen et al., 2002).

*NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

4.4.8. Albedo Planetário ou Albedo do topo da atmosfera (α_{toa})

O cálculo do Albedo Planetário (α_{to}), isto é, o albedo não corrigido, foi obtido pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas dos canais reflectivos do TM - Landsat 5 (SILVA, 2005):

$$\alpha_{toa} = 0,293.\rho_1 + 0,274.\rho_2 + 0,233.\rho_3 + 0,157.\rho_4 + 0,033.\rho_5 + 0,011.\rho_7 \quad (7)$$

em que:

α_{to} = Albedo planetário;

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 = albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

4.4.9. Albedo da Superfície (α)

O cálculo do albedo da superfície para os efeitos atmosféricos (α) é obtido mediante correção atmosférica que considera a transmitância e a refletância atmosférica em todo o domínio da radiação de onda curta, sendo determinado por meio da equação (Bastiaanssen, 1995; Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (8)$$

em que:

α = Albedo da Superfície;

α_{toa} = Albedo planetário;

α_p = Radiação solar refletida pela atmosfera que varia entre 0,025 e 0,04, foi utilizado o valor de 0,03 (é o mais comumente utilizado, considerado como valor médio);

τ_{sw} = Transmissividade atmosférica.

Para as condições de céu claro, a transmissividade atmosférica foi calculada por meio da seguinte equação (ALLEN et al., 2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2.10^{-5}z \quad (9)$$

em que:

z = Altitude (m) da estação meteorológica da área estudada (Tabela 3).

4.4.10. Temperatura da Superfície (T_s)

O cálculo da temperatura da superfície (T_s), em graus Kelvin (K), foi obtido em função da radiância espectral da banda 6 ($L_{\lambda 6}$) e a emissividade de cada no domínio espectral da banda termal (ε_{NB}), através da seguinte equação (Morse et al., 2000; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (10)$$

em que:

T_s = Temperatura da superfície (K);

ε_{NB} = emissividade de cada no domínio espectral da banda termal;

K_1 e K_2 = São constantes de calibração da banda termal do sensor TM do Landsat, 5607,76 $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$, respectivamente;

$L_{\lambda 6}$ = Radiância espectral da banda 6.

4.4.11. Radiação de Onda Longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$)

A radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$) (Wm^{-2}), é obtida pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da temperatura da superfície (K) e da emissividade da superfície (ε_0):

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (11)$$

em que:

$R_{L\uparrow}$ = Radiação de onda longa emitida pela superfície (Wm^{-2});

ε_0 = Emissividade de cada pixel;

σ = Constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$);

T_s = Temperatura da superfície (K).

4.4.12. Radiação de onda longa emitida pela atmosfera ($R_{L\downarrow}$)

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície ($R_{L\downarrow}$) ($W m^{-2}$) também foi calculada pela equação de Stefan-Boltzman, em função da emissividade do ar (ε_a) e da temperatura do ar (T_a), obtida em estação meteorológica na área de estudo:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (12)$$

em que:

$R_{L\downarrow}$ = radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície ($W m^{-2}$);

ϵ_a = Emissividade do ar;

T_a = Temperatura do ar (K) (Tabela 3).

A emissividade do ar foi obtida segundo modelo proposto por Bastiaanssen (1995) e calibrado por Allen et al. (2002a):

$$\epsilon_a = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (13)$$

em que:

τ_{sw} = Transmissividade atmosférica.

4.4.13. Radiação de onda curta emitida pela atmosfera ($R_{s\downarrow}$)

A radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) corresponde ao fluxo de radiação solar (direta e difusa) que atinge a superfície terrestre e que, para condição de céu claro, foi obtida pela equação (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2000):

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (14)$$

em que:

S = Constante solar ($1367 W m^{-2}$);

Z = Ângulo zenital solar (obtido no cabeçalho das imagens adquiridas, e depende da órbita, ponto e época do ano) (Tabela 3);

d_r = Dia astronômico do ano (U.A), de acordo com Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (Tabela 3), dada por (Iqbal, 1983), (Allen et al., 2002), (Allen et al., 2007);

τ_{sw} = Transmissividade atmosférica.

4.4.14. Saldo de Radiação (R_n)

O saldo de radiação à superfície (R_n) ($W m^{-2}$), foi calculado através da seguinte equação do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} (1 - \epsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (15)$$

em que:

R_n = Saldo de Radiação (Wm^{-2});

$R_{S\downarrow}$ = Radiação de ondas curtas emitidas pela atmosfera (incidente) (Wm^{-2});

α = Albedo da superfície (unidade);

$R_{L\downarrow}$ = Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel (Wm^{-2});

$R_{L\uparrow}$ = Radiação de onda longa emitida pela superfície (cada pixel) (Wm^{-2});

ε_o = Emissividade de cada pixel.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nas equações para calcular o saldo de radiação (R_n)

Parâmetros	Data				
	28/01/1986	24/02/1990	29/12/2003	31/08/2006	15/02/2010
Ângulo zenital solar (Z)	38,85	43,20	32,71	44,44	35,43
Distância relativa Terra-Sol (UA)	0,9846665	0,9892993	0,983357	1,0094676	0,9874422
Elevação do sol (Cabeçalho da imagem Inpe)	51,1504	46,799	57,2899	45,5614	54,5725
Temperatura do ar (K)	301,05	301,1	303,4	295,05	307,15

4.5. Classificação não supervisionada (ISODATA)

Existem diferentes metodologias de classificação das imagens de satélite, como o classificador “árvore de decisão” usada por Delgado, (2010) para identificar as áreas plantadas de cinco culturas no estado de Minas Gerais, classificação supervisionada e não supervisionada.

Conforme metodologia adotada por Freitas *et al.* (2012) foi utilizada a classificação não supervisionada, visando mapear o uso e ocupação da terra do município de Rio de Janeiro com o classificador “ISODATA” para as respectivas datas analisadas neste estudo (Tabela 1). Adotou-se o número de 15 classes e 30 processos iterativos.

Realizou-se a reclassificação das classes em comum, agrupando-as em 7 classes distintas de uso e ocupação, sendo elas: água (Áreas formadas por águas continentais e ambientes estuarinos, lagoas, rios, canais, açudes e represas), área alagável (Áreas ocupadas por brejos, baixios, com a vegetação característica desses ambientes), solo exposto (solo descoberto e estradas sem pavimentação), área urbana (áreas construídas e estradas pavimentadas), Vegetação (Floresta arbórea e arbustiva, em estágios avançados de desenvolvimento e de regeneração), Campo (Áreas com vegetação rasteira, graminóides, situadas em planícies ou encostas e floresta em estágio inicial de desenvolvimento e regeneração) e agricultura (diferentes tipos de culturas anuais). Posteriormente converteu-se os pixels de mesma semelhança para área em hectares

utilizando o ArcGIS versão 10.2. Para isso utilizou-se as seis bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7 que tem máxima resolução de 30m, sendo que um pixel corresponde a 0,09 hectares.

4.6. Análise estatística

Com o saldo de radiação obtido através do algoritmo SEBAL e o calculado através da aplicação da equação de Penman-Monteith (FAO-56) com os dados provenientes da estação meteorológica do município do Rio de Janeiro (Latitude -22° 88', Longitude -43°18' e Altitude de 11,10 m), foi avaliado o desempenho estatístico por meio do Erro médio relativo (%), Desvio Padrão (s), Coeficiente de Variação (CV%), Viés Médio (VM) e Erro Padrão da Estimativa (EPE).

$$E\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)}{N} \cdot 100 \quad (16)$$

$$s = \pm \sqrt{s^2} \quad (17)$$

$$CV\% = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (18)$$

$$VM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (19)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (20)$$

em que, P_i é o $i^{\text{ésimo}}$ valor estimado da ET, O_i é o $i^{\text{ésimo}}$ valor observado da R_n e N é o número de dados analisados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Validação do algoritmo SEBAL para obtenção do saldo de radiação (R_n) no município do Rio de Janeiro, RJ.

Na Tabela 3 estão os valores médios do Saldo de radiação (R_n) obtidos através do algoritmo SEBAL e método Penman-Monteith (FAO-56) para a área da estação meteorológica do município do Rio de Janeiro. Para as datas estudadas, pôde-se observar

que o algoritmo SEBAL, em relação ao método Penman-Monteith (FAO-56), subestimou os valores de R_n , apresentado VM negativo com $EPE = 84,44 \text{ Wm}^{-2}$, no entanto, ressaltasse menor variação ($CV\% = 7,59$) para os valores estimados de R_n obtidos pelo Algoritmo.

Na data 31/08/2006 observou-se o maior erro relativo da estimativa (-18%), estando este, dentro dos erros apresentados na literatura. Santos *et al.* (2010) obteve diferença entre o saldo de radiação observado e estimado de aproximadamente 23%. O erro relativo médio entre os valores observados e estimados de R_n foi inferior a 7%, estando de acordo com afirmativa de Daughtry *et al.* (1990), em que o erro médio entre medições e estimativas de R_n com sensoriamento remoto são inferiores a 7%.

Os erros relativos obtidos nesta pesquisa não representam uma validação perfeita do SEBAL, sendo importante ponderar pois o próprio método Penman-Monteith (FAO-56), usado para validação dos resultados, pode apresentar erros devido a falhas decorrentes de falta de manutenção dos instrumentos.

Tabela 4: Resultado e análise estatística do valores do Saldo de Radiação (R_n) obtidos pelo método Penman-Monteith (FAO-56) e algoritmo SEBAL para estação meteorológica do Município do Rio de Janeiro.

DATA	PENMAN-MONTEITH (Wm^{-2})	SEBAL (Wm^{-2})	Erro Médio Relativo (%)	EPE (Wm^{-2})	VM (Wm^{-2})
28/01/1986	704,42	599,29			
24/02/1990	596,80	569,94			
29/12/2003	716,83	659,25	4,05	84,44	-36,98
31/08/2006	450,41	534,66			
15/02/2010	692,59	613,03			
s	112,17	41,64			
CV%	17,74	7,59			

Na Figura 2 observa-se a proximidade entre as curvas de R_n geradas a partir de dados de superfície através da equação de Penman-Monteith e da estimativa através do SEBAL para os dados orbitais do sensor TM - Landsat 5. Apesar de subestimar os valores de R_n , a curva obtida com o Algoritmo apresenta boa correlação com a curva de R_n do método Penman-Monteith, demonstrando graficamente o baixo erro de estimativa do Algoritmo. Giongo *et al.* (2010) obteve correlação de 0,994 e 0,984, para o R_n registrados nas torres USR e PDG e o estimado pelo algoritmo SEBAL, na área correspondente a cada torre. Tasumi *et al.* (2008), em estimativa de R_n de 49 localidades dos Estados Unidos da América, observaram uma correlação média de 95% entre os valores medidos e estimados pelo algoritmo SEBAL, também Di Pace *et al.* (2008), obteve boas estimativas de R_n estimado e medido a superfície no nordeste brasileiro.

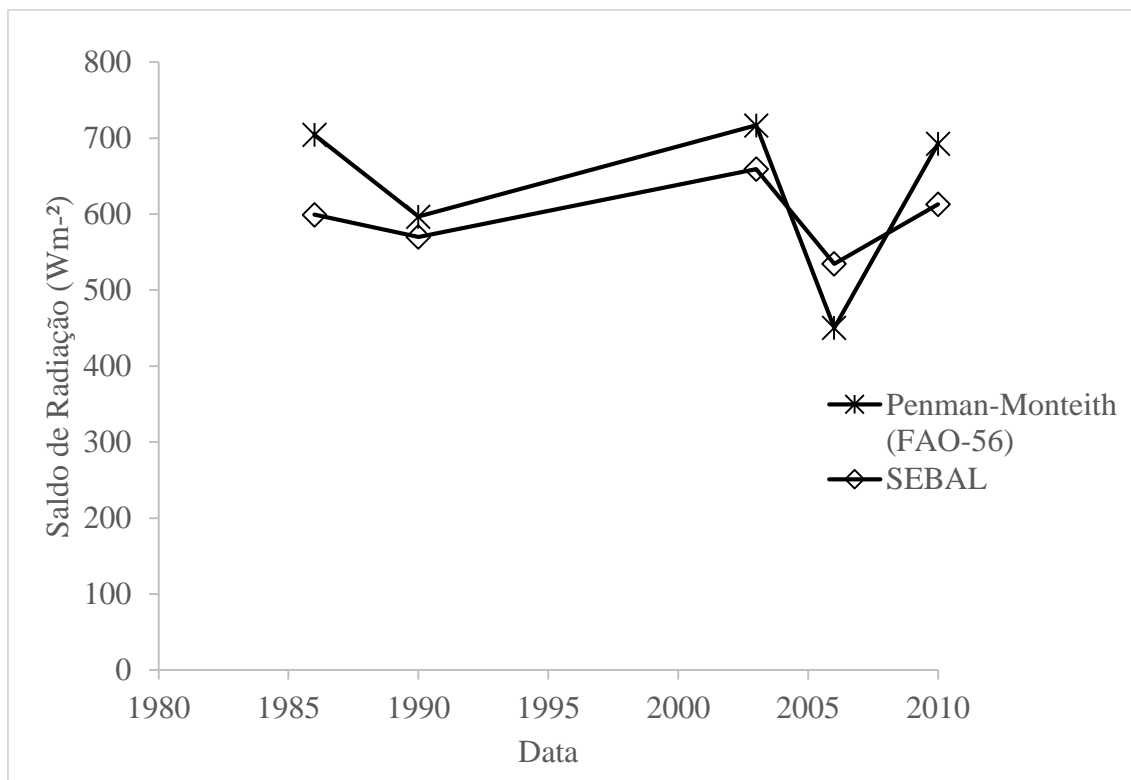


Figura 2: Tendência dos valores observados e estimados de Rn para as datas das imagens TM - Landsat 5 do município do Rio de Janeiro, RJ, analisadas neste estudo.

5.2. Saldo de radiação para os diferentes usos e ocupação da terra do município do Rio de Janeiro

Conforme a metodologia de Freitas *et al.* (2012), obteve-se os mapas e a área de cada classe de uso e ocupação do município do Rio de Janeiro para as datas analisadas neste estudo (Tabela 1).

Na Figura 3 tem-se a dinâmica (variação da área em hectare ao longo das datas estudadas) do uso e ocupação do solo do município do Rio de Janeiro, obtida pelo algoritmo “Isodata”.

O método de classificação não supervisionada com o classificador “Isodata” exibiu bom desempenho, apresentando aproximação com os dados do Instituto Pereira Passos/ Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (IPP/PCRJ), em que o IPP/PCRJ computou 57.091,7 ha de área urbana, 38.678,7 ha de vegetação, 14.497,0 ha de campo e 4.106,0 ha de área agrícola, para o ano de 2010 e, o classificador “Isodata” com dado TM – Landsat 5, computou 67.781,43 ha de área urbana, 25.589,97 ha de área de vegetação, 10.416,60 ha de campo e 5.998,32 ha de área agrícola, para o mesmo ano.

Ressalta-se também, que o mapeamento realizado com o classificador “ISODATA”, apresentou semelhante tendência de redução da área de vegetação e área de campo e, aumento da área urbana e de agricultura, com a apresentada por Fusco (2012).

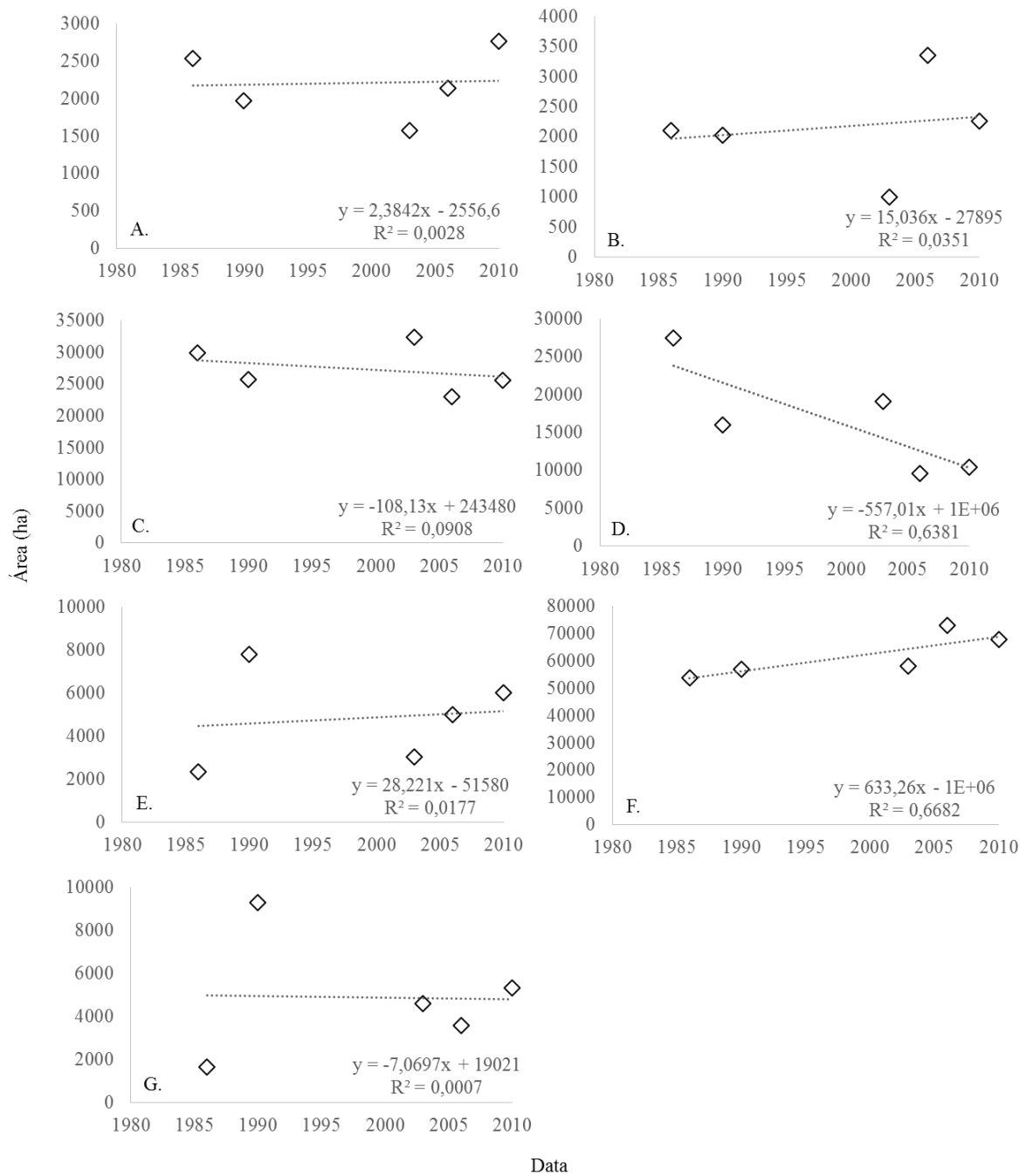


Figura 3: Dinâmica do uso e ocupação da terra (Classificação não supervisionada, “Isodata”), do município do Rio de Janeiro, para as datas analisadas neste estudo. Classes: (A.) Água, (B.) Área Alagável, (C.) Vegetação, (D.) Campo, (E.) Agricultura, (F.) Área Urbana e (G.) Solo Exposto.

Na Figura 4 estão representados as classes de uso e ocupação da terra (A) e os valores do saldo de radiação (Rn) (B) para as datas estudadas, na qual as áreas mais claras indicam menores valores de Rn.

Observou-se predominância de vegetação nos maciços da Pedra Branca, Tijuca e Gericinó em todas as datas da Figura 4A. e, altos valores de Rn para estas áreas em todas as datas deste estudo (Figura 4B). Segundo Machado *et al.* (2014), áreas de vegetação possuem menores valores de albedo, refletindo uma menor porcentagem da radiação de

ondas curtas, que, em conjunto com uma menor perda por radiação de ondas longas em função de apresentarem menores temperaturas, favorece a disponibilidade da energia na forma de saldo de radiação.

As regiões de baixada do município do Rio de Janeiro estão predominantemente ocupadas com área urbana (Figura 4A) e, conseqüentemente pouca área de vegetação, apresentando ainda, tendência de aumento da urbanização (Figura 3F.). Concomitantemente, estas áreas apresentaram baixos valores de Rn (Figura 4B.). Em seu estudo, Uda *et al.* (2013) constatou que os menores valores de Rn foram observados nas áreas com menor densidade de biomassa (com SAVI positivo e mais próximo de zero) e com maior albedo.

Ainda Uda *et al.* (2013), verificou maiores perdas da radiação de onda longa nas áreas urbanas, devido temperatura da superfície mais elevadas, baixa densidade de biomassa e maior albedo, favorecendo uma maior perda de radiação para a atmosfera e, conseqüentemente, um menor armazenamento desta.

A tendência observada de aumento da urbanização relacionado a redução da vegetação pode gerar sérios impactos à área estudada. Em seu estudo, Andrade (2014) constatou em que a redução na cobertura vegetal causa alterações no fluxo de calor no solo, devido a maior exposição deste à radiação, ela intensificando o fluxo de calor sensível e reduzindo o fluxo de calor latente, assim reduzindo o saldo de radiação a superfície e conseqüentemente evapotranspiração, dessa forma afetando a formação de nuvens e o regime hidrológico da região, fazendo com que a atmosfera local se torne mais aquecida e com menos teor de umidade.

Semelhante ao constatado por Andrade (2014), verificou-se variação significativa dos valores de Rn entre as áreas de vegetação e área urbana. Neste sentido, Di Pace (2008) cita que o saldo de radiação não é influenciado apenas pelo total de radiação solar global incidente mas, também, e principalmente, pela topografia e tipo de cobertura da superfície (DI PEACE, 2008). Além disso, Delgado *et al.* (2013) constatou que existe uma variação térmica característica entre as classes de uso e ocupação do solo, e que portanto, é possível classificar cada tipo de cobertura de acordo com o comportamento térmico, sendo a classe mais quente formada por áreas antropizadas, seguida da classe pastagem.

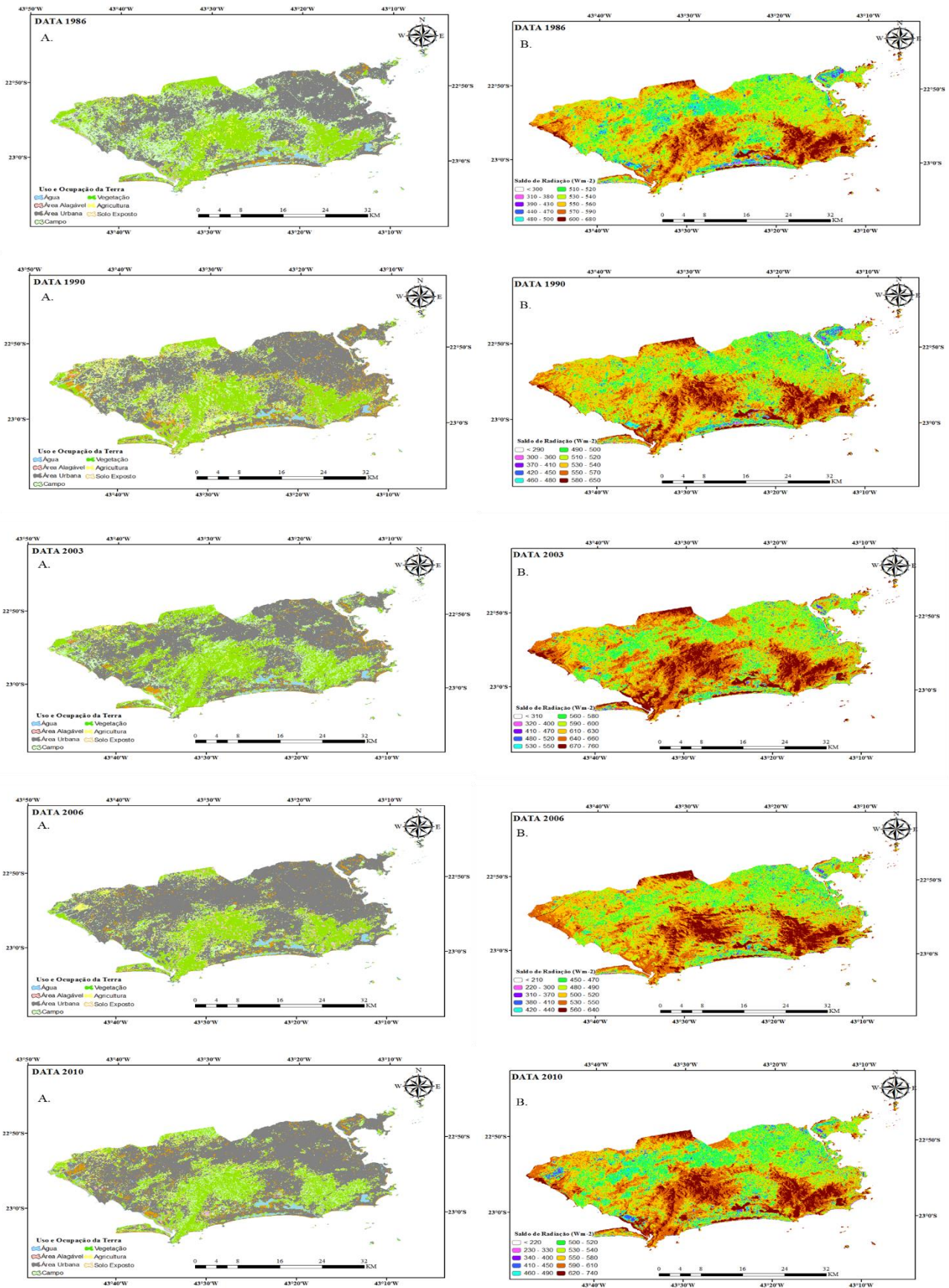


Figura 4: Mapas de uso e ocupação da terra (A) e do saldo de radiação – Rn (Wm⁻²) (B), do município do Rio de Janeiro, para as datas analisadas neste estudo.

Na Tabela 4, estão os valores obtidos com a extração do Saldo de Radiação calculado pelo SEBAL dos polígonos das classes de uso e cobertura do solo para o município do Rio de Janeiro.

Tabela 5: Valor médio do saldo de radiação (Wm^{-2}) para as diferentes classes de uso e ocupação da terra, do município do Rio de Janeiro, RJ.

Data	Rn (Wm^{-2})						
	Água	Área Alagável	Vegetação	Campo	Agricultura	Área Urbana	Solo Exposto
28/01/1986	609,87	586,97	572,96	551,76	548,01	522,71	417,92
24/02/1990	603,13	582,04	563,36	534,99	525,67	504,03	517,00
29/12/2003	711,96	668,83	647,32	644,16	606,05	591,82	535,62
31/08/2006	566,49	573,42	544,86	531,75	498,25	488,65	424,98
15/02/2010	640,60	612,58	598,43	601,83	562,85	531,96	440,50

Dentre todas as classes de uso e cobertura do solo, a água apresentou os maiores valores médios de Rn, variando entre $566,49 Wm^{-2}$ a $711,96 Wm^{-2}$ (Tabela 4). Di Pace (2004) Obteve Rn $719,25 Wm^{-2}$ no ano de 2000 e $744,53 Wm^{-2}$ em 2001, para açude na região nordeste do Brasil, Silva et al., (2005) encontrou Rn $751,3 Wm^{-2}$ no lago de sobradinho e, mapeando o saldo de radiação da Bacia do Alto Rio Negro, Uda et al. (2013) obteve Rn médio de $610 Wm^{-2}$ para mesma classe.

A classe solo alagável, vegetação e campo, apresentaram os maiores valores de Rn, após a classe água, respectivamente (Figura 5). Para área alagável obteve-se Rn $573,42$ em agosto de 2006, sendo o maior Rn na data de dezembro de 2003, com valor $668,83 Wm^{-2}$. Machado et al. (2014) encontrou Rn entre $600 Wm^{-2}$ em agosto 2006 e $750 Wm^{-2}$ em janeiro de 2011 em área de Manguezal.

A área de vegetação apresentou Rn entre $544,86$ a $647 Wm^{-2}$ e a classe campo apresentou Rn entre $531,75$ a $644,16 Wm^{-2}$. Estes saldos de radiação são semelhantes aos obtidos em outros estudos, em que Bezerra (2004) obteve $705,1 Wm^{-2}$ e $550,4 Wm^{-2}$, respectivamente para áreas de vegetação nativa de Caatinga, Uda et al. (2013) obteve Rn médio $526 Wm^{-2}$ para floresta nativa.

Os saldos de radiação obtidos para agricultura, área urbana e solo exposto também foram semelhantes aos computados por outros autores. Em Área cultivada Di Pace (2004) obteve $546,80 Wm^{-2}$ e $547,61 Wm^{-2}$ em 2000 e 2001, Uda et al. (2013) obteve Rn $444 Wm^{-2}$ para área de agricultura na Bacia do Alto Rio Negro, região sul do Brasil.

O saldo de radiação computado na classe área urbana foram semelhantes ao obtido por Leivas et al. (2008), que computou Rn médio igual $513 Wm^{-2}$ em área urbana e, superiores aos obtidos por Uda et al. (2013), que obtiveram Rn 404 e $429 Wm^{-2}$.

Para áreas de solo exposto os valores obtidos estão de acordo com os apresentados na literatura, onde Bezerra (2004) obteve valores médios do saldo de radiação, $532,6 W.m^{-2}$ e $509,9 W.m^{-2}$ e. Valores em torno de $420 W m^{-2}$ foram encontrados em solo exposto por Silva et al. (2005) e Giongo (2008). No litoral pernambucano Machado et al. (2014) obteve valores de Rn, variando entre 450 em 2006 e $600 W m^{-2}$ em 2011 em áreas de solo exposto.

Esses menores valores de Rn devem-se aos maiores valores de albedo e da temperatura da superfície, verificados nas áreas de solo exposto que, em consequência, reduzem o saldo de radiação (MACHADO *et al.*, 2014)

Na Figura 5, tem-se a representação gráfica dos saldos de radiação obtidos para as classes de uso e ocupação da terra do município do Rio de Janeiro, onde observou-se um padrão do Rn obtido para cada classe, nas datas estudadas, em que as classes de menor albedo como água, área alagável e vegetação, apresentaram os maiores valores de Rn e, as classes de maior albedo como área urbana e solo exposto, apresentaram os menores valores de Rn. Segundo Uda *et al.* (2013) as classes área urbana e solo exposto possuem características opostas a dos corpos hídricos, correspondendo às áreas com maior perda de energia por reflexão e emissão.

Os maiores valores de Rn da data de 29/12/2003, podem ser reflexo, de este ter sido o dia mais quente, dentre as datas estudadas, apresentado temperatura de 30,25 °C.

Os menores Rn observados na área urbana e solo exposto também refletem em maior temperatura da superfície. As áreas com maior exposição do solo a radiação, apresentam menor Rn, e consequentemente maiores valores de temperatura do ar, próximo a superfície (ANDRADE, 2014).

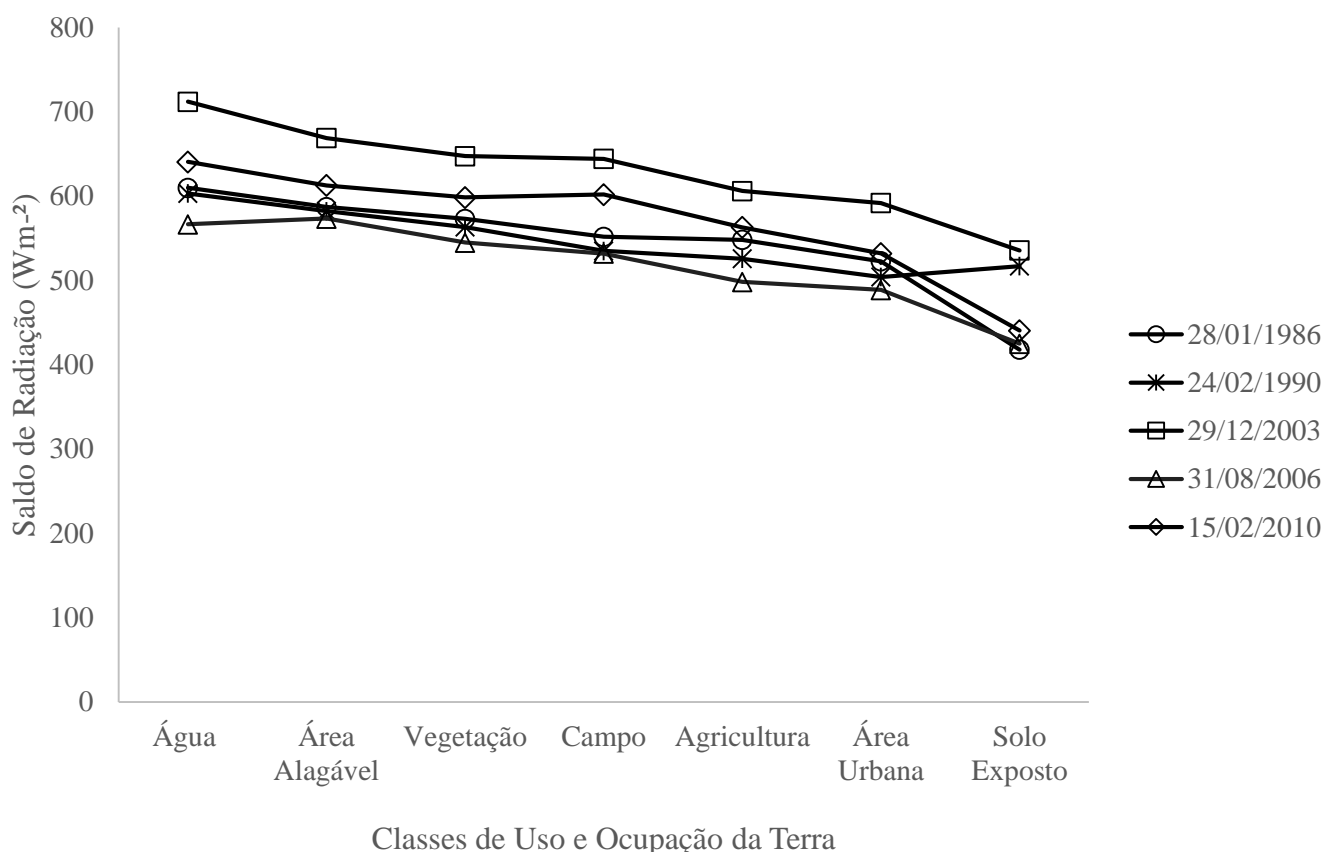


Figura 5: Saldo de Radiação obtido para cada classe de uso e ocupação da terra

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados podemos concluir que:

- A técnica do balanço de radiação com imagens de satélites produziu valores dos componentes do balanço de radiação consistente com observações realizadas do balanço radiativo à superfície.
- O algoritmo SEBAL pode ser aplicado de forma operacional, para grandes áreas, utilizando imagens de baixa resolução espacial.
- Os maiores valores de Rn foram encontrados nas áreas com menor influência antrópica (água, vegetação e áreas alagadas).
- O cômputo do balanço de energia usando o algoritmo SEBAL possibilita observar quantitativamente e espacialmente as formas diferenciadas do uso da radiação líquida pelos diferentes tipos de cobertura do solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L. J.; PACHECO, A.; COSTA, T. C. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. 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.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998, 300p.

ALLEN, R.; BASTIAANSEN, W.; WATERS, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation – Advanced training and user’s manual**. Idaho, 2002. 97p.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 288 f. Thesis (Ph.D) - Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation, **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998.

BASTIAANSEN, 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.

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

BEYER, H. G., HENNING, H. M., LUTHER, J., SCHREITMULER, K. R. The monthly average daily time pattern of beam radiation. **Solar Energy**, v 47, p. 347-353, 1991.

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

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. 127p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p. 305-317, 2008.

BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear-sky days. **Remote Sensing of Environment**, v.97, n.1, p.52-67, 2005.

BIUDES, M.S.; JÚNIOR, J.H.C.; NOGUEIRA, J.S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em carambazal e pastagem no norte do pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, p. 135-143, 2009.

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.

BORGES, V.P.; OLIVEIRA, A.S. de; SILVA, B.B. da. Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado. **Ciência e Agrometeorologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 485-493, 2010.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: D. Reidel, 1982. 299p.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.; HELDER, D. "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors", **Remote Sensing of Environment** v.113 p. 893-903, 2009.

Daughtry, C.S.T.; Kustas, W.P.; Moran, M.S.; Pinter, P.J., Jr.; Jackson, R.D.; Brown, P.W.; Nichols, W.D.; Gay, L.W.. Spectral estimates of Net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment**. v.32, p.111-124, 1990.

DELGADO, R.C.; RODRIGUES, R.A.; JÚNIOR, J.F.O.; GOIS, G. Uso do sensor TM na estimativa da temperatura da superfície e mudança no uso do solo em Viçosa, MG, Brasil. **Revista Geografia Acadêmica**, v.7, n.1, p. 17-30, 2013.

DELGADO R. C. **Análise da evolução espaço-temporal das lavouras no Estado de Minas Gerais**. 2010. 132 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DI AK, G. R., SCHEUER, C. J., WHIPPLE, M. S., SMITH, W. L. Remote sensing of land - surface energy balance using data from the High-Resolution Interferometer Sounder (HIS): A simulation study. **Remote Sensing of Environment**, v. 48 p. 106-118, 1994.

DI LONG, D. GAO, Y., SINGH, V.P. Estimation of daily average net radiation from MODIS data and DEM over the Baiyangdian watershed in North China for clear sky days. **Journal of Hydrology**, v.388, p. 217-233, 2010.

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) – Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DI PACE, F.T.D.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R.; SILVA, S.T.A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p.385-392, 2008.

DURAND, B.J.; GONDIM, R.S.; SILVA, E.J. da.; MORREIRA, L.C.J.; TEIXEIRA, A.S. dos. Estimativa da evapotranspiração real utilizando o algoritmo SEBAL e imagens do satélite Landsat 7. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17.; 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007.

EMBRAPA e PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Mapeamento pedológico e interpretações úteis ao planejamento ambiental do município do Rio de Janeiro, RJ**. Rio de Janeiro: Relatório técnico, 1999.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélites para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2002.

FREITAS, D. M.; DELGADO, R. C.; RODRIGUES, R. A.; SOUSA, L. P. Variabilidade espaço-temporal na mudança da paisagem no município de Acrelândia, AC. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, n.14; p. 935– 946, 2012.

GIONGO, P.R.; MOURA, G.B. de A.; SILVA, B.B. da; ROCHA, H.R. da; MEDEIROS, S.R.R. de; NAZARENO, A.C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.279-287, 2010.

GIONGO, P.R. **Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície**. 2008. 92 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Tecnologia Rural.

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

HAFEEZ, M.M.; CHEMIMY. VAN DE GIESEN N. BOUMAN, B.A. M Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: SYMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, Processing and Applications, 2002, Ottawa, Canadá. **Anais...**Ottawa: 2002.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v.4, n.4, p.367-376, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE/ Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 1, 1994.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. New York: Academic Press. 1983. 212p.

JIN, Y.; RANDERSON, J. T.; GOULDEN, M. L. Continental-scale net radiation and evapotranspiration estimated using MODIS satellite observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2302-2319, 2011.

JUPP, D.L.B. Directional radiance and emissivity measurement models for remote sensing of the surface energy balance. **Environment Modelling Software**, vol. 13, 341 – 351, 1998.

LEIVAS, J.F. **Uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa do balance de radiação na superfície**. 2008. 107f. Tese (Doutorado em Fitotecnia com ênfase em Agrometeorologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LILLESAND, T. M. and KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 2. ed. New York: J. Wiley, 1987. 850p.

LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2.ed. Academic Press, 2002. 583p.

MACHADO, C.C.; SILVA, B.B. da.; ALBUQUERQUE M.B. de.; GALVÍNIO J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM – Landsat 5 e o algoritmo

SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.1, p. 55 - 67, 2014.

MARKHAM, B.L.; BAKER, J.L. "Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamix Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures". **Landsat Technical Notes**, n. 1, p. 3-5, 1987.

MENEZES, S.J.M. da C., SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V.P., CLERIANI, J.M., ANDRADE, R.G. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração em plantios de eucalipto utilizando o algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 - TM. **Revista Árvore**, v.35, n.3, p. 649-657, 2011.

MORAN, M. S. Irrigation in Arizona using satellites and airplanes. **Irrigation Science**, v. 15, p. 34-44, 1994.

MOREIRA, L.C.J. **Estimativa da evapotranspiração horária usando o algoritmo SEBAL e imagens do Landsat 5-TM**. 2007. 91 f. Monografia (Agronomia) - Universidade Federal do Ceará.

MORIARTY, W. W. Estimation of diffuse from measured global solar radiation. **Solar Energy**, v. 47, n.2, p. 75-82, 1991.

MORSE, A.; TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; KRAMBER, W. J. **Aplication of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River basin of Idaho through remote sensing**. 2000. 98 f. Final Report. Boise: Department of Water Resources/University of Idaho.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Routledge, 1987. 435p.

OLIVEIRA, L.M.M. de.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONIO, A.C.D.; SILVA, B.B. da.; MACHADO, C.C.C.; GALVÍNICIO, J.D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos da bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p. 1209-1217, 2012.

PAIVA, C.M. **Estimativa do Balanço de Energia e da Temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. 2005. 248 f. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil) - Rio de Janeiro.

PARLOW, E. Spatio – Temporal investigation of net radiation and heat fluxes – results from a satellite data Analysis. 51 ST INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Brazil.

PEREIRA, A. R., VILA NOVA, N. A., SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiracao**. 1.ed. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183p.

SANTOS, C.A.C. Análise das necessidades hídricas da vegetação Tamarisk Através da razão de Bowenn e do modelo SEBAL. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.1, p. 85-94, 2011.

SANTOS, C. A. C.; BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; RAMANA RAO, T. V. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p. 383-392, 2010.

SATYAMURTY, V. V., LAHIRI, P. K. Estimation of symmetric and asymmetric hourly global and diffuse radiation from daily values. **Solar Energy**, v. 48, n. 1, p. 7- 14, 1992.

SILVA, R. C. **Estudo do balanço de radiação no pantanal sul mato-Grossense**. São José dos Campos: INPE, 2002. 213p.

SILVA, B. B. Da.; FEITOSA, J. R.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; COSTA, F. J. F. Balanço de Radiação no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho utilizando técnicas de sensoriamento remoto e imagens Landsat 5 – TM. CONGRESSO BRASILEIRO DE 119 METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz de Iguaçu. **Anais...** Paraná: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002, CD-ROM.

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

SOUZA, J. D., SILVA, B. B., CEBALLOS, J. C. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica**. v.26, n.1, p.31-44, 2008.

SOUZA, J. D., SILVA, B. B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n.4, p.349-358, 2005.

TARPLEY, J.D. Monthly evapotranspiration from satellite and conventional meteorological observations. **Bulletin of American Meteorological Society**, vol. 7, n. 5, 703 – 713, 1994.

TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; TREZZA, R. Estimation of at surface reflectance and albedo from satellite for routine, operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrology**, v. 13, n. 2, p. 51-63, 2008.

TIMMERMANS, W.J.; MEIJERINK, A.M.J. Remotely sensed actual evapotranspiration: implications for groundwater in Botswana. **International Journal of Applied Earth Observation**, v.1, Issue 3-4, 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.

UDA, P.K.; CORSEUIL, C.W.; KOBAYAMA, M. Mapeamento do saldo de radiação da bacia do Alto Rio Negro, região sul brasileira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n.2, p. 249-258, 2013.

WANG, J., KIMURA, R.; BASTIAANSEN, W. Monitoring ET with Remote Sensing and the Management of Water Resources on a Basin Scale, 11TH CERES INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, Chiba, Japan. 2005.

YANG, L. Integration of a numerical model and remotely sensed data to study urban/rural land surface climate processes. **Computers and Geosciences**, Ottawa, v.26, p. 451-468, 2000.

YUNHAO, C. L., XIAOBING, J., GUIFEI, S. An estimation model for daily regional evapotranspiration. **International Journal of Remote sensing**, v. 24, n .1, p. 199-205, 2003.

ZERI, M.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B. Spatiotemporal analysis of particulate matter, sulfur dioxide and carbon monoxide concentrations over the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 113, n. 1, p. 1-14, 2011.