



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

ALLAN WERNER DOS ANJOS

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE PRODUTOS ORBITAIS PARA O ESTADO
DO RIO DE JANEIRO NO ANO DE 2003**

Profº. Dr. RAFAEL COLL DELGADO

Orientador

**Seropédica - RJ
Junho – 2014**



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

ALLAN WERNER DOS ANJOS

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE PRODUTOS ORBITAIS PARA O ESTADO
DO RIO DE JANEIRO NO ANO DE 2003**

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

Prof.º Dr. RAFAEL COLL DELGADO

Orientador

**Seropédica - RJ
Junho – 2014**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE PRODUTOS ORBITAIS PARA O ESTADO
DO RIO DE JANEIRO NO ANO DE 2003**

Comissão Examinadora

Monografia apresentada em 18 de junho de 2014.

Prof^o. Dr. Rafael Coll Delgado

UFRRJ/IF/DCA

Orientador

Prof^o. Dr. Gustavo Bastos Lyra

UFRRJ/IF/DCA

Membro

Esp. Eduardo Ribeiro Suhett

IBGE/DGC/PARADA DE LUCAS, RIO DE JANEIRO

Membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais e irmão,

Ediloy, Thea e Patrick

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu amor, por estar ao meu lado sempre, por ter me dado uma família e amigos tão especiais e pela minha vida.

Aos meus familiares, principalmente meus pais Ediloy e Thea, por estarem sempre presentes, pelo carinho e incentivo.

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

Aos membros da banca, Professor Gustavo Bastos Lyra e Eduardo Ribeiro Suhett, 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.

Ao PET-Floresta e à Flora Jr., pelo aprendizado, pelo crescimento profissional e pelas amizades adquiridas.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por contribuir para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos professores e alunos da turma 2009-I do Curso de Engenharia Florestal da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela importante contribuição no início da minha formação acadêmica e pelos laços de amizade.

À turma 2009-II do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelas amizades, viagens, festas e palhaçadas, por terem me acolhido como parte da turma, não poderia me formar com uma turma melhor!

Aos meus amigos desde o início de Rural, Edu, Lucão e Diego, e os mais recentes, Bender e João, pelas risadas, churrascos, rodadas de chimarrão, conversas, e acima de tudo a amizade, considero vocês como irmãos!

Ao meu irmão Patrick e cunhada Maria Luiza, pelo incentivo, carinho e pelos momentos bons vividos na cidade maravilhosa!

RESUMO

Nos últimos anos a demanda hídrica para fins domésticos, industriais e principalmente agropecuários, têm crescido significativamente. Devido à preocupação com a qualidade e quantidade de água disponível para o consumo humano, é importante o manejo correto dos recursos hídricos, proporcionando uma melhor eficiência na absorção de água pelas plantas. Para isso, é necessário conhecer a capacidade do solo e da vegetação em perder água para o meio atmosférico, sendo a base para se quantificar o consumo de água pela vegetação. Com o objetivo de obter uma melhor espacialização dos valores de evapotranspiração (ET) para extensas áreas, foram utilizadas imagens de Land Surface Temperature (LST) e Enhanced Vegetation Index (EVI), geradas por produtos do sensor MODIS, a bordo do satélite AQUA/EOS PM-1. Para o ano de 2003, as imagens mensais de LST e EVI foram obtidas pelos produtos MYD11A2 e MYD13A2, respectivamente, representando o estado do Rio de Janeiro pelos tiles H13V11 e H14V11. As imagens foram convertidas pelo software Modis Reprojection Tool (MRT) e processadas pelo software ArcGIS 10.1, resultando em valores de ET obtidos pelo modelo proposto por NAGLER et al. (2005). Os valores estimados de ET foram correlacionados com valores observados nas Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) dos municípios de Resende e Maricá, RJ. A análise estatística apresentou resultados satisfatórios dos valores de ET obtidos pelo sensor MODIS, porém é importante que haja uma maior representatividade das EMS no estado para estudos futuros. Para a EMS de Maricá houve uma melhor correlação ($r^2 = 0,78$, $r = 0,88$, $d = 0,49$, $EPE = 0,13$ mm/dia e $VM = -0,09$ mm/dia), podendo estar relacionado às condições climáticas próximas à região de onde o modelo de ET foi criado. A distribuição espacial das taxas de ET foi comparada com base na sazonalidade, sendo que o período de verão apresentou ET mais elevada (7,82 mm/dia). Para o inverno, houve menor amplitude das taxas de ET, atingindo o máximo de 5,83 mm/dia. Comparando a ET de acordo com o uso do solo, a média anual mais elevada foi encontrada na região nordeste do estado (4,09 mm/dia), composta predominantemente pela agricultura. Áreas cobertas por florestas apresentaram valores médios anuais de ET menores (2,68 mm/dia), principalmente pelo fato da classe estar concentrada em regiões de altitude, de baixas temperaturas e de relevo acidentado, dificultando a incidência de radiação solar. Os resultados servem como subsídio para estimativas de demanda hídrica da vegetação, como também para estudos de produtividade de fitomassa e mudança da paisagem. Entretanto, torna-se importante que fatores como o relevo, número de EMS e outros sensores, sejam considerados para complementar esses estudos.

Palavras-chave: Plataforma orbital, estatística e uso da terra

ABSTRACT

In the last few years the water demand for domestic, industrial and mainly agricultural purposes, have grown significantly. Because of concerns about the quality and quantity of water available for human consumption, it is important the correct management of water resources, providing better efficiency in the absorption of water by plants. For this, it is necessary to know the capacity of soil and vegetation to lose water to the atmospheric environment, being the basis for quantifying water consumption by vegetation. Images of Land Surface Temperature (LST) and Enhanced Vegetation Index (EVI), generated by the MODIS sensor, aboard the AQUA/EOS PM-1 satellite, were used in order to obtain a better spatial distribution for evapotranspiration (ET) values for larger areas. For the year 2003, the monthly LST and EVI images were obtained by MYD11A2 and MYD13A2 products, respectively, representing the state of Rio de Janeiro by the tiles H13V11 and H14V11. The images were converted by Modis Reprojection Tool (MRT) software and processed by ArcGIS 10.1 software, resulting in ET values obtained by the model proposed by NAGLER et al. (2005). The estimated values of ET were correlated with observed values in Surface Weather Stations (SWS) of Resende and Maricá municipalities, RJ. Statistical analysis showed satisfactory values of ET obtained by the MODIS sensor results, however, it is important to have a greater representation of SWS in the state for future studies. Maricá SWS had a better correlation ($r^2 = 0,78$, $r = 0,88$, $d = 0,49$, Standard Error of Estimate (SEE) = 0,13 mm/day and Mean Bias (MB) = -0,09 mm/day), and it may be related to similar climatic conditions with the region where the ET model was created. The spatial distribution of ET rates were compared based on seasonality, where the summer period had higher ET (7,82 mm/day). For winter, there was a lower amplitude of ET rates, reaching the maximum of 5,83 mm/day. Comparing the ET according to land use, higher rates of annual average were found in the northeast region of the state (4,09 mm/day), composed predominantly by agriculture. Forest areas showed lower annual average of ET (2,68 mm/day), mainly because this class is concentrated in regions of altitude, low temperatures and rugged terrain, turning more difficult the incidence of solar radiation. The results serve as an aid for estimating vegetation water demand, as well as for studies of phytomass productivity and landscape changing. However, it is important that factors such as relief, number of SWS and other sensors are considered to complement these studies.

Keywords: Orbital platform, statistics and land use

SUMÁRIO

LISTA DE EQUAÇÕES.....	viii
LISTA DE FIGURA.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Importância da Evapotranspiração em Sistemas Florestais.....	2
2.2. Uso da Equação Proposta por NAGLER et al. (2005) na Estimativa da ET.....	3
2.3. Temperatura da Superfície Terrestre – <i>Land Surface Temperature</i>	4
2.4. Índice de Vegetação Melhorado – <i>Enhanced Vegetation Index</i>	5
2.5. Mudança da Paisagem.....	6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
3.1. Área de Estudo.....	7
3.2. Metodologia.....	8
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
4.1. Análise Estatística.....	11
4.2. Distribuição Espacial da ET.....	13
4.3. Comparação da ET Sazonal para Diferentes Classes de Uso do Solo.....	17
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	19
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
7. ANEXOS.....	26

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação para a conversão de dados 16 bits para temperaturas em Kelvin (K).....	9
Equação 2: Equação para a conversão de Kelvin (K) para graus Celsius (°C).....	9
Equação 3: Equação para o ajuste do <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI).....	9
Equação 4: Equação para o cálculo da Evapotranspiração (ET) proposta por NAGLER et al. (2005).....	9
Equação 5: Equação para o cálculo da Evapotranspiração (ET) sazonal.....	9
Equação 6: Equação para o cálculo do Viés Médio (VM).....	9
Equação 7: Equação para o cálculo do Erro Padrão da Estimativa (EPE).....	9
Equação 8: Equação para o cálculo do Coeficiente de Correlação (r).....	10
Equação 9: Equação para o cálculo do Coeficiente de Determinação (r ²).....	10
Equação 10: Equação para o cálculo do Índice de Willmott (d).....	11

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização geográfica da área de estudo.....	8
Figura 2: Fluxograma com as etapas de obtenção dos valores de Evapotranspiração (ET) e das análises estatísticas.....	11
Figura 3: Correlação dos valores observados e estimados de Evapotranspiração (ET) ao longo de 2003 para a EMS de Resende, RJ.....	12
Figura 4: Correlação dos valores observados e estimados de Evapotranspiração (ET) ao longo de 2003 para a EMS de Maricá, RJ.....	13
Figura 5: Distribuição espacial da Evapotranspiração (ET) para o verão de 2003.....	14
Figura 6: Distribuição espacial da Evapotranspiração (ET) para o outono de 2003.....	15
Figura 7: Distribuição espacial da Evapotranspiração (ET) para o inverno de 2003.....	16
Figura 8: Distribuição espacial da ET para a primavera de 2003.....	17
Figura 9: Boxplot exploratório das classes de uso do solo para o verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) de 2003.....	19
Figura 10: Evapotranspiração (ET) sazonal para a classe agricultura.....	27
Figura 11: Evapotranspiração (ET) sazonal para a classe área urbana.....	28
Figura 12: Evapotranspiração (ET) sazonal para a classe floresta.....	28
Figura 13: Evapotranspiração (ET) sazonal para a classe pastagem.....	29
Figura 14: Mapas mensais de <i>Land Surface Temperature</i> (LST) para o estado do Rio de Janeiro.....	30
Figura 15: Mapas mensais de <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI) para o estado do Rio de Janeiro.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da análise estatística da Evapotranspiração (ET) média entre o método Penman-Monteith (FAO) e o sensor MODIS.....	12
Tabela 2: Valores de Evapotranspiração (ET) pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para o verão de 2003.....	26
Tabela 3: Valores de Evapotranspiração (ET) pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para o outono de 2003.....	26
Tabela 4: Valores de Evapotranspiração (ET) pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para o inverno de 2003.....	26
Tabela 5: Valores de Evapotranspiração (ET) pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para a primavera de 2003.....	27

1. INTRODUÇÃO

Em função da crescente demanda hídrica para fins domésticos, industriais e, principalmente, agropecuários, a humanidade, até algumas décadas atrás, tinha a água como um bem infinito e que a capacidade de autodepuração dos corpos d'água também o era (MARQUES et al., 2007). Os autores destacam ainda, que nas últimas décadas, o crescimento industrial e o aumento populacional e da produtividade agrícola tiveram como consequência a preocupação com a qualidade e disponibilidade de água para o consumo humano (MARQUES et al., 2007).

O manejo dos recursos hídricos proporciona melhor eficiência no processo de absorção de água pelas plantas e assim, reduz o seu desperdício. De acordo com ESTEVES et al. (2010), a necessidade de determinar a demanda de água para atender o consumo das culturas agrícolas, aliada à um correto dimensionamento do sistema de irrigação é o principal parâmetro para o uso sustentável. A base para se quantificar o consumo de água de determinada vegetação, está comumente associada à capacidade da superfície do solo e da vegetação de transferir água para o meio atmosférico (ESTEVES et al., 2010).

A evapotranspiração (ET) é definida como a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água e de transpiração das plantas, ou seja, é a perda total de vapor de água do sistema solo-planta para a atmosfera. Segundo MEDEIROS (2002) a ET pode ser estimada por meio de modelos utilizando dados de estações meteorológicas. Os modelos são desde os mais simples, como os baseados na temperatura, até os mais complexos, que envolvem o balanço de energia ao nível das plantas, como o método de Penman-Monteith. Entretanto, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto vem sendo empregada em situações onde há pouca disponibilidade de dados meteorológicos.

BEZERRA et al. (2008) comentam que os métodos de determinação da ET_r (Evapotranspiração Real) se mostram úteis, pois são capazes de propiciar a sua estimativa em áreas com grande heterogeneidade e dimensão, ao contrário de métodos micrometeorológicos, como o método das correlações turbulentas e da razão de Bowen e mesmo medidas diretas com lisímetros.

A possibilidade de coleta de informações detalhadas ao longo de extensas áreas agrícolas ou de vegetação, em um curto período de tempo e quantificação de parâmetros físicos da superfície terrestre como a temperatura da superfície, índices de vegetação e mudança da paisagem com alta resolução temporal e espacial são as principais vantagens na obtenção de dados via sensoriamento remoto em grandes áreas (DELGADO et al., 2012; FREITAS et al., 2012).

O sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um dos cinco instrumentos do satélite TERRA/EOS AM-1 (*Terra/Earth Observing System AM-1*) além de também estar a bordo do satélite AQUA/EOS PM-1 (*Aqua/Earth Observing System PM-1*). Estes satélites foram lançados em 1999 e 2002, respectivamente, e fazem parte do projeto “*Earth Observing System*” (EOS), financiado pelo programa da NASA “*Earth Science Enterprises*” (ESE) (JUSTICE et al., 2002). O sensor MODIS é composto por um instrumento eletro-óptico de varredura mecânica que utiliza o movimento do satélite para fornecer imageamento a partir da Radiação Eletromagnética (REM) refletida pela superfície terrestre, onde a energia é focada para os diferentes detectores cobertos por filtros espectrais (LATORRE et al., 2003). A sua utilização tem como objetivo obter dados para estudos da atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e proporciona cobertura global praticamente diária. De acordo com ZHANG et al. (2009), seus dados estão disponíveis desde

2000, e assim constitui-se de uma das fontes mais confiáveis no que se refere a estudos de grande escala ou até mesmo de escala global. O MODIS possui alta resolução radiométrica de 12 bits, em 36 bandas espectrais, que imageiam o intervalo de 0,4 μm a 14,4 μm do espectro. É composto por duas bandas com 250 m, outras cinco bandas com 500 m e as demais 29 bandas com 1 km de resolução. Os dados MODIS são transferidos para estações terrestres onde são processados em diferentes níveis hierárquicos. A partir desses níveis são computados vários produtos, e que, posteriormente devem ser validados através de uma variedade de métodos.

As aplicações dos produtos MODIS, resultam em uma série de informações distribuídas no espaço. Uma delas é a ET, que pode ser obtida através do MOD15, que disponibiliza o Índice de Área Foliar (IAF) (*Leaf Area Index - LAI*) e a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation - FPAR*) absorvida pela vegetação, fornecidos diariamente ou em uma base de oito dias (CUNHA et al., 2013). Esses produtos tratam da propriedade estrutural do dossel da vegetação, medindo a área foliar por unidade de área terrestre, como também das proporções da radiação disponível nos comprimentos de onda que a vegetação fotossinteticamente ativa absorve (400 nm a 700 nm) (LATORRE et al., 2003).

Outros produtos do sensor MODIS como o MOD11A2 (TERRA/EOS AM-1) e MYD11A2 (AQUA/EOS PM-1), responsáveis pela geração de dados de Temperatura de Superfície Terrestre (TST) (*Land Surface Temperature - LST*) e os MOD13A2 (TERRA/EOS AM-1) e MYD13A2 (AQUA/EOS PM-1) para a utilização do Índice de Vegetação Melhorado (IVM) (*Enhanced Vegetation Index - EVI*) também podem servir como subsídio para a estimativa da ET (OLIVEIRA & BAPTISTA, 2011).

1.1 Objetivos

O presente trabalho, tem como objetivo estimar a ET a partir do sensor MODIS por meio da validação do modelo proposto por NAGLER et al. (2005), correlacionar com valores estimados com dados de estações meteorológicas de superfície (EMS) situadas no estado do Rio de Janeiro para o ano de 2003, e por fim, comparar a sua relação com diferentes coberturas do solo para cada estação do ano.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração em Sistemas Florestais

Os ecossistemas florestais desempenham inúmeras funções para o bem estar do ser humano. Entre elas pode-se destacar a mitigação do clima, redução de enchentes e recarga para os rios, controle de erosão, melhoramento da qualidade da água no solo e nos rios, atenuação da poluição atmosférica, fornecimento de oxigênio, absorção de gás carbônico, prevenção contra ação do vento e ruídos, recreação e educação, produção de biomassa e fornecimento de energia (KOBAYAMA, 2000; TUNDISI et al., 2010).

LIMA (2008) cita que pesquisas chegaram à conclusão de que a precipitação em áreas ocupadas por florestas era significativamente maior do que em áreas com vegetação rasteira. Entretanto, a simples atuação do vento pode provocar diferenças nas medições nesses dois tipos de ambientes. Áreas florestadas apresentam velocidade do vento inferior do que em áreas abertas, facilitando a interceptação das gotículas pelo pluviômetro, o que não foi levado em consideração nesses estudos. Outra conclusão equivocada é em relação à maior produção

de água em bacias hidrográficas com predominância de florestas comparado às bacias com outro tipo de cobertura vegetal. O que realmente ocorre é a redução da disponibilidade de água em bacias florestadas, devido à maior demanda hídrica de espécies com maior porte e massa foliar (LIMA, 2008). Entretanto, o fluxo de água em sistemas como esse é mais estável em épocas de seca e chuvas extremas (BALBINOT et al., 2008). Segundo TRIMBLE et al. (1987), a diminuição da vazão em bacias hidrográficas florestadas ocorre devido ao aumento das perdas da água por evapotranspiração, principalmente nos anos secos.

As florestas apresentam microclima caracterizado pelas altas taxas de umidade, sendo que a alta concentração de vapor d'água sugere maior possibilidade de ocorrência de chuvas. Esse conceito foi reforçado com a comprovação de que a precipitação sobre os oceanos é 43% maior do que em áreas continentais (CHANG, 1982). A precipitação em ambientes florestais também pode ser resultado da combinação entre altas taxas de evapotranspiração e aumento da rugosidade aerodinâmica formada pelo dossel, o que possibilita a formação de nuvens (ANDRÉ et al., 1989; PIELKE et al., 1998). Porém, PEREIRA (1989) relata que maiores precipitações em áreas florestadas são atribuídas aos efeitos orográficos, visto que as florestas podem se estabelecer em regiões de altitude, onde as chances de formação de nuvens são maiores devido ao resfriamento das massas de ar. De acordo com BALBINOT et al., (2008), a simples presença da floresta não interfere obrigatoriamente na precipitação, e que a neblina e o orvalho que respingam das folhas e dos ramos contribuem para a redistribuição da precipitação sob a floresta. Segundo BRUIJNZEEL (2004), a presença de vegetação alta pode acrescentar o acúmulo de água nos solos florestais devido à interceptação da neblina e de nuvens em regiões costeiras e montanhosas pelas copas das árvores.

Para se considerar o possível efeito da evapotranspiração sobre as chuvas, é necessário levar em conta a constante movimentação do ar. Exemplo disso é a umidade atmosférica proveniente dos oceanos que eventualmente se precipita em áreas continentais. Os efeitos da floresta sobre a precipitação podem variar de acordo com o fator escala. Do ponto de vista global, a influência da floresta sobre a precipitação representa 1,3% da precipitação média anual. Em escala regional, as florestas representam até 27% da precipitação, dependendo da área da bacia. Portanto, o padrão de distribuição horizontal de chuva do planeta corresponde com o padrão de circulação da atmosfera e os efeitos locais de fatores fisiográficos (LIMA, 2008).

Além da precipitação, é importante destacar as condições de umidade do solo, comumente determinada pela ET, sendo que a umidade do solo é fator importante nas taxas de escoamento em bacias hidrográficas, servindo como subsídio para estudos relacionados ao aproveitamento da água em forma de reservatórios e à proteção contra fenômenos como por exemplo, erosão e inundação (LOAGUE & FREEZE, 1985). Outro fator atuante nas florestas relacionado à evapotranspiração é a assimilação de carbono, cujo taxas de ET são relacionadas com a necessidade das plantas em assimilar carbono para o seu desenvolvimento e crescimento (MONTIETH, 1988).

2.2. Uso da Equação Proposta por NAGLER et al. (2005) na Estimativa da ET

De acordo com a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (CIID) (*International Commission on Irrigation & Drainage – ICID*) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), dentre inúmeros métodos de estimativa de evapotranspiração de referência, é considerado como padrão o de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), sendo utilizado também para avaliar outros métodos. Mesmo apresentando desempenho satisfatório quando comparado com medidas em lisímetros, muitas vezes o seu emprego é restringido pela disponibilidade de dados meteorológicos e geográficos (temperatura do ar máxima e mínima, radiação solar global, velocidade do vento, umidade

relativa máxima e mínima do ar, altitude, latitude, dia Juliano, pressão atmosférica), o que acaba exigindo o uso de métodos mais simples (MEDEIROS, 2002).

Com o objetivo de estimar a evapotranspiração real diária de forma direta e sem a necessidade de quantificar outros complexos processos hidrológicos, surgem algoritmos operacionais e modelos que permitem produzir mapas de ET em escalas locais ou regionais. Entre eles se destacam o NLDAS (*North American Land Data Assimilation Systems*), LIS (*Land Information System*), ALEXI (*Atmosphere-Land Exchange Inverse*, DisALEXI (*Disaggregated ALEXI model*), SEBS (*Surface Energy Balance System*), S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*), SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration*) e outros algoritmos (ANDRADE, 2009).

O modelo proposto por NAGLER et al. (2005) foi desenvolvido nos Estados Unidos para a vegetação ripária ao longo do Middle Rio Grande River, Novo México. É um modelo baseado em Índice de Vegetação (IV) (*Vegetation Index – VI*) para estimar a ET a partir do sensor MODIS. Na elaboração desse modelo, os dados de ET obtidos por meio de quatro estações meteorológicas de superfície foram correlacionadas com VI e LST gerados a partir do MODIS (NAGLER et al., 2005). Durante quatro anos para quatro tipos de sítios diferentes ao longo da zona ripária do Middle Rio Grande River, foram feitas análises de correlação e regressão da ET obtida pelas estações com os dados de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*), EVI e LST do sensor MODIS. Entre o EVI e o NDVI, o primeiro apresentou maior correlação com os dados de ET obtidos em campo, principalmente pelo fato de que o EVI incorpora informações das bandas do azul, vermelho, e infra-vermelho próximo, e o NDVI somente as bandas do vermelho e infra-vermelho próximo. Plantas sob estresse hídrico apresentam alterações nas taxas de clorofila a e b (EMBRY & NOTHNAGEL, 1994), diferenças que são perceptíveis principalmente na faixa do azul. Além disso, o NDVI é significativamente saturado em regiões com alta concentração de biomassa (HUETE et al., 2002).

2.3. Temperatura da Superfície Terrestre (*Land Surface Temperature*)

A LST é uma das principais variáveis em estudos ambientais e de mudanças climáticas, e que pode ser aplicada na estimativa do balanço de energia, caracterização de estresse hídrico de plantas e seu desenvolvimento fenológico, monitoramento de estiagens e incêndios florestais, como também em estudos relacionados a modelos hidrológicos, meteorológicos e climáticos (GOWDA et al., 2008; KALMAN et al., 2008; DEPPE et al., 2007). De acordo com KATO & YAMAGUCHI (2005), a LST é influenciada diretamente pelas variações no clima, e sua estimativa é de extrema importância em estudos de monitoramento de dinâmicas espaciais como processos de urbanização, catástrofes naturais e outras alterações na paisagem. A constante diminuição das áreas vegetadas, resulta em mudanças na atmosfera local, e conseqüentemente, alteram os padrões de temperatura e das chuvas da região, como também a direção e a velocidade dos ventos (KATO & YAMAGUCHI, 2005; ANJOS et al., 2013).

Como pré-requisito essencial para a estimativa da LST, a emissividade espectral da superfície é um parâmetro físico que está relacionado a uma capacidade, inerente à superfície, em converter energia armazenada em energia radiante, emitindo-a para o espaço (SOBRINO et al., 1993). Segundo LOPES & RIZZI (2007), a emissividade em superfícies terrestres varia principalmente em função de água no solo ou na cobertura vegetal, e atinge valores entre 0,85 a 0,99. Estudos realizados na Serra da Mantiqueira e do Vale do Rio Paraíba do Sul no estado do Rio de Janeiro demonstram a variabilidade da emissividade em função da vegetação, sendo

que para o ano de 2003, os valores de emissividade em áreas florestadas foram entre 0,97 e 0,98, e em pastagens entre 0,95 e 0,97 (LOPES & RIZZI, 2007).

Para o monitoramento da LST em grandes extensões, vem sendo empregado técnicas de sensoriamento remoto, principalmente devido à alta resolução temporal e espacial (WARREN et al., 2012). Por meio dessas técnicas, a LST é determinada a partir da detecção da radiação de ondas longas, emitida na faixa do infravermelho, e detectada por sensores orbitais (GUSSO et al., 2007). Entre os principais sensores utilizados para a obtenção de dados de LST se destacam o MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), TM (*Thematic Mapper*) e ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) (WARREN et al., 2012; DEPPE et al., 2007; ANJOS et al., 2013). Entretanto, a utilização do sensor MODIS vem sendo cada vez mais atrativa, pois são adquiridas duas cenas diárias e são fornecidos diferentes produtos de LST processados e distribuídos gratuitamente. Diferente dos sensores ASTER e ETM, a alta frequência temporal das imagens termais do MODIS possibilita a captura de forma adequada a dinâmica temporal da ET, pois o padrão espaço-temporal da precipitação/irrigação altera a ET na escala diária (WARREN et al., 2012).

Nos últimos anos, tem sido proposto alguns algoritmos para a análise da cobertura do solo e cálculo do balanço de energia à superfície (SILVA et al., 2011). O modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) utiliza a temperatura da superfície, reflectância da superfície hemisférica e NDVI, como também suas relações para estimar fluxos da superfície para um espectro maior de tipologias (BASTIAANSEN et al., 1998). Para o período entre 2003 e 2011 na cidade do Rio de Janeiro (CRJ), RJ, ANJOS et al. (2013) revelam que valores estimados da LST por meio do algoritmo SEBAL, comparados com valores observados de cinco Estações Meteorológicas de Superfície obtiveram os seguintes índices estatísticos, $r = 0,83$, $r^2 = 0,7$ e Erro Padrão da Estimativa (EPE) = $2,93^{\circ}\text{C}$, demonstrando que o algoritmo foi capaz de estimar a LST com precisão. Outro fato importante no estudo revela que, além dos sistemas meteorológicos, a presença de superfícies vegetadas também possui influência significativa na LST. Regiões compostas por florestas, como por exemplo os maciços do Mendanha e Gericinó, atingiram valores até 28°C mais baixos em relação ao restante da malha urbana da CRJ, de acordo com o período estudado (ANJOS et al., 2013).

A distribuição geográfica de faixas de LST mais amenas possui estreita relação com a presença de áreas contínuas de vegetação, como relatam os estudos realizados no município de Minaçu, GO, em 2001. Segundo NASCIMENTO et al. (2009), áreas providas de vegetação que ocupam 52,5 % do município, apresentam LST entre $22,1^{\circ}\text{C}$ e 24°C em 49,9% da área dessa tipologia. A vegetação é composta por extensos trechos de cerrado, principalmente, nas regiões oeste e noroeste do município, embora as pastagens componham a classe mais significativa, em termos de área de ocorrência (NASCIMENTO et al., 2009).

2.4. Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index*)

O EVI foi formulado a partir da combinação do SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e do ARVI (*Atmosphere Resistant Vegetation Index*) (SILVA et al., 2011). O EVI é um índice desenvolvido para realçar o sinal da vegetação por meio da otimização na sensibilidade em regiões com altos valores de biomassa e permite realizar um melhor monitoramento da vegetação, devido à redução dos efeitos de substrato do dossel e da influência da atmosfera (JIANG et al., 2008). Segundo GAO et al. (2000), o EVI possui melhor resposta das variações estruturais do dossel, incluindo o LAI, tipo de dossel, fisionomia da planta e arquitetura do dossel.

Segundo LACRUZ & JÚNIOR (2007), produtos de VI do sensor MODIS consistem numa composição dos melhores pixels no intervalo de 16 dias, o que resulta numa imagem de melhor qualidade em relação às imagens diárias. Produtos de VI gerados a partir desse sensor apresentam alta resolução espacial, espectral e radiométrica, sendo que atualmente se destacam o NDVI e EVI (TUCKER et al., 2005; JIANG et al., 2008). A principal diferença entre os dois é pelo fato do EVI utilizar a banda do azul, além das bandas do vermelho e infravermelho próximo, o que proporciona uma melhor correlação linear com o LAI, menor saturação para florestas tropicais e temperadas, como também uma menor sensibilidade para a contaminação de aerossóis residuais gerados pelas queimadas na Amazônia e norte da Ásia (BOEGH et al., 2002; HUETE et al., 2006; XIAO et al., 2004; MIURA et al., 1998; XIAO et al., 2003).

Estudos de sazonalidade do bioma cerrado através do NDVI e EVI realizados por FERREIRA et al. (2005) revelam que o EVI apresentou um melhor desempenho para a discriminação sazonal da vegetação, por ser mais sensível às pequenas variações do LAI. Tratando-se do bioma Amazônia, LACRUZ et al. (2005) monitoraram as mudanças em um corredor ecológico localizado no estado do Pará, entre janeiro de 2001 a dezembro de 2003, por meio de imagens EVI. Através de análise harmônica, foi possível caracterizar o comportamento de diferentes tipologias de uso e cobertura do solo, o que mostra a viabilidade do uso do produto EVI para esse tipo de estudo, principalmente quando se trabalha com extensas áreas (FORMIGONI et al. 2011).

A análise harmônica ou análise de Fourier tem sido utilizada para a análise de séries sucessivas de imagens de sensoriamento remoto (JAKUBAUSKAS et al., 2001). Esta análise permite representar uma função complexa como a somatória de ondas senoidais e cossenoidais, onde cada onda é definida por um valor único de fase e de amplitude. Como resultado, são geradas as imagens de termo aditivo, que corresponde à média aritmética do EVI do conjunto de imagens, e as imagens de amplitude, que indicam a variação máxima do EVI (LACRUZ & JÚNIOR, 2007).

2.5. Mudança da Paisagem

O conhecimento da distribuição dos tipos de cobertura vegetal e suas variações fenológicas torna-se indispensável para o planejamento de uma política coerente e eficiente de desenvolvimento sustentável (CREPANI et al., 2002). Segundo SANTOS (2007), a forma como se dá a ocupação do espaço tem provocado inúmeros problemas ambientais, como a degradação da cobertura vegetal, perda da biodiversidade, obstrução e alteração da rede de drenagem, transmissão de doenças de veiculação hídrica, contaminação e poluição do ar, água e solo, perda de terras produtivas e desencadeamento de processos erosivos.

A vegetação pode sofrer alterações em curtos períodos de tempo e dentro de pequenas distâncias, sendo que a sua delimitação em datas diferentes indica as mudanças, sua direção e a velocidade ao longo do tempo, o que possibilita a compreensão do cenário atual e reconstruir cenários passados (ALTMANN et al., 2009). Entre as principais mudanças se destaca a redução da paisagem florestal, que tem como causas primordiais a atual política de incentivo à exportação, o que favorece o aumento da fronteira agrícola e a implantação de novos projetos pecuários (SANTOS et al., 2005). Com isso, torna-se necessário o uso de imagens orbitais como alternativa de provimento de dados e informações que possam subsidiar o controle e fiscalização de determinada região (STEININGER, 1996).

O mapeamento da cobertura vegetal e uso atual do solo, em grandes áreas, tem sido realizado utilizando dados de sensoriamento remoto obtidos por plataformas orbitais (CREPANI et al., 2002). Entre os sensores, que servem como fonte de informações nos estudos de monitoramento de causas e efeitos da degradação da paisagem, se destacam o

LANDSAT/TM, NOAA/AVHRR, SPOT/HRV e mais recentemente, TERRA/MODIS e TERRA/ASTER (SANTOS et al., 2005). A detecção de mudanças do uso e cobertura da terra pode ser feita por meio da utilização de conjuntos de imagens multitemporais e de multisensores, o que possibilita a integração de informações advindas de um determinado sensor para o outro, processo que pode se tornar operacional em tarefas de monitoramento de paisagem para indicação temática de degradação/regeneração e para avaliar os níveis do processo atuante (SANTOS et al., 2005).

No caso da utilização do sensor TM, a interpretação visual de imagens de satélites é um método preciso para o mapeamento do uso e cobertura da terra, porém torna-se praticamente inviável pela grande demanda de tempo quando aplicada em áreas extensas (VASCONCELOS & NOVO, 2004). Em função disso, surgem novos métodos de classificação automática, baseados na segmentação de imagens e na classificação por regiões (NASCIMENTO, 1997).

A detecção de mudanças é feita por meio do reconhecimento de alterações nos padrões característicos de determinado alvo nas imagens, num espaço de tempo (SANTOS et al., 2005). Segundo GREEN et al. (1994), as técnicas de detecção variam de acordo com os objetivos a serem alcançados, sendo classificadas como técnicas para tornar possível a detecção, para medir as alterações e para a atualização temática e espacial das mudanças. Portanto, a escolha dos dados a serem utilizados, relacionando o tipo, a sequência de ocorrência e o tempo de existência das transformações, devem ser devidamente considerados (SANTOS et al., 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A área de estudo foi o estado do Rio de Janeiro, localizado entre as latitudes 20°45'45" e 23°22'10" S e longitudes 40°57'20" e 44°53'20" W (Figura 1), com área de 43.864,3 km² (FIDALGO et al., 2007). Ocupando a região sudeste do Brasil, o estado está totalmente inserido no Bioma Floresta Atlântica, apresentando ainda importantes fragmentos de floresta. Com relevo tipicamente acidentado, o uso e ocupação da terra é constituído principalmente por pastagens, áreas urbanas e alguns tipos de agricultura, de acordo com cada região e fragmentos florestais remanescentes do bioma Mata Atlântica (CRUZ et al., 2009).

Atualmente, o estado está dividido geopoliticamente em 92 municípios, inseridos em oito regiões de governo: Região Norte Fluminense (RNF), Região Noroeste Fluminense (RNoF), Região Serrana (RG), Região Centro Sul Fluminense (RCSF), Região Baixadas Litorâneas (RBL), Região Metropolitana (RM), Região Médio Paraíba (RMP) e Região Costa Verde (RCV) (CEPERJ, 2014).

Devido ao relevo complexo, altitude e fenômeno da continentalidade/maritimidade, o estado do Rio de Janeiro apresenta diferentes padrões climáticos. Outro fator que contribui para a diversidade climática da área de estudo é a atuação dos sistemas meteorológicos de grande escala (Sistemas Frontais – SF, Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS e Alta Subtropical do Atlântico Sul – ASAS), principalmente quando interagem com o relevo. (ANDRÉ et al., 2008).

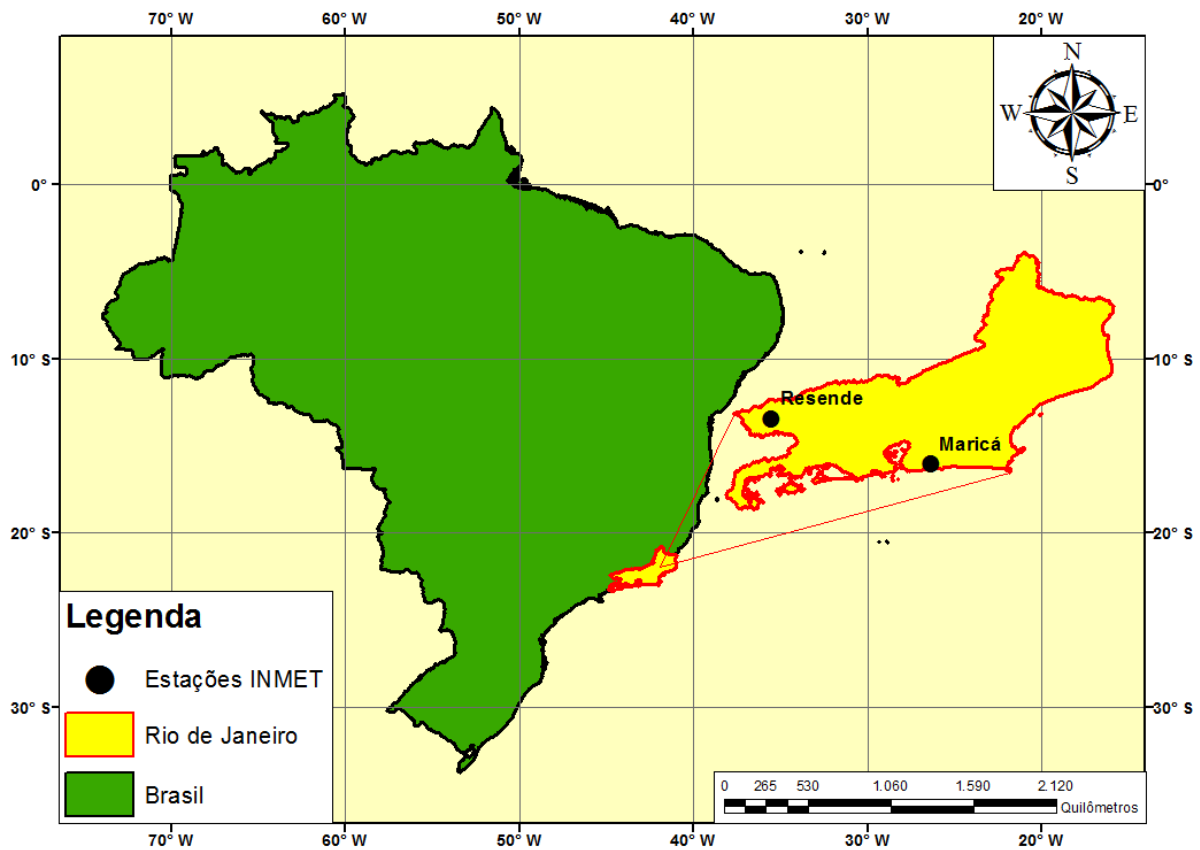


Figura 1: Localização geográfica da área de estudo.

3.2. Metodologia

Os produtos utilizados no estudo foram os MYD11A2 e MYD13A2 com resolução espacial de 1 km, gerados a partir do sensor MODIS, a bordo do satélite AQUA/EOS PM-1 (*Aqua/Earth Observing System PM-1*) com horário de passagem as 13:30 horas. As imagens foram obtidas por meio do “*United States Geological Survey – Global Visualization Viewer*” (USGS – GLOVIS), disponíveis no link <http://glovis.usgs.gov/>. Utilizando a plataforma do USGS – GLOVIS, foram selecionadas imagens de janeiro a dezembro de 2003, correspondentes aos tiles H13V11 e H14V11, abrangendo todo o limite da área de estudo. Com o objetivo de fornecer imagens livres de nuvens e atmosféricamente corrigidas, os produtos MYD11A2 e MYD13A2 são gerados a partir da média dos valores entre 1 a 8 e 1 a 16 dias, respectivamente. Para correlacionar os valores estimados de ET pelo sensor com os valores observados pelas EMS, foi necessário trabalhar com imagens em que o dia das medições observadas estivesse inserido nos intervalos temporais de cada produto, nesse caso, o dia 15 de todos os meses. Dessa forma, foram adquiridas duas imagens para cada produto e dois produtos para cada mês ao longo de um ano, totalizando 48 imagens em projeção sinusoidal contínua e em Formato de Dados Hierárquicos (FDH) (*Hierarchical Data Format – HDF*).

Posteriormente, os dados disponibilizados em projeção sinusoidal e em formato HDF foram convertidos para a projeção Sistema de Coordenadas Geográficas (SCG) (*Geographic Coordinate System – GCS*) e formato Geotiff por meio do software *Modis Reprojection Tool* (MRT). Este programa também possibilitou o mosaico dos tiles H13V11 e H14V11 como também selecionar a banda LST do produto MYD11A2 e a banda EVI do produto MYD13A2.

Para a aplicação da equação de evapotranspiração proposta por NAGLER et al. (2005) foram necessários alguns ajustes dos dados de índice de vegetação e de temperatura da superfície, como também outros processamentos de imagens por meio do software ArcGIS 10.1. Os ajustes foram feitos somente na área de estudo com o objetivo de otimizar o processamento das imagens. Para isso, foi utilizado a ferramenta *Extract by Mask* para o recorte da área de estudo com os limites do estado do Rio de Janeiro em formato shapefile, obtidos pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) no seguinte endereço eletrônico: < http://www.inea.rj.gov.br/basetematica_estadoambiente/>. Com o uso da ferramenta *Raster Calculator*, os dados do produto MYD11A2 disponibilizados em 16 bits foram convertidos para temperaturas em Kelvin (K) (Equação 1) e em seguida para Grau Celsius (°C) (Equação 2) por meio das seguintes equações:

$$T_k = \text{MYD11A2} \times 0,02 \quad (1)$$

$$T_c = T_k - 273,15 \quad (2)$$

em que, T_k é a temperatura em Kelvin e T_c é a temperatura em Grau Celsius.

Além disso, o EVI disponível no produto MYD13A2 possui escala de -1 a 1 e, por isso, foi necessário reescalonar os dados para valores positivos (EVI^*) de acordo com a Equação 3.

$$\text{EVI}^* = \frac{\text{EVI} + 1}{2} \quad (3)$$

em que, EVI^* é o *Enhanced Vegetation Index* ajustado e EVI é o *Enhanced Vegetation Index*.

Em seguida, os dados ajustados de LST e de EVI foram aplicados na equação de evapotranspiração proposta por NAGLER et al. (2005) demonstrada a seguir:

$$ET = 0,355(1 - \exp^{-2,28 \times \text{EVI}^*}) \times (T_c - 20,3) + 0,70 \quad (4)$$

em que, ET é a evapotranspiração diária (mm/dia), EVI^* é o *Enhanced Vegetation Index* ajustado e T_c é a temperatura em Grau Celsius.

Para os meses que apresentaram valores de ET negativos (Janeiro, Março, Abril, Maio, Junho, Novembro e Dezembro), houve a necessidade de reclassificar os mesmos para valores acima de zero por meio da ferramenta *Reclassify*. A partir dessa etapa, foram gerados os mapas de ET por sazonalidade utilizando a ferramenta *Raster Calculator* pela seguinte equação:

$$ET_s = \frac{\sum ET_m}{3} \quad (5)$$

em que, ET_s é a evapotranspiração diária sazonal (mm^{dia}) e ET_m é a evapotranspiração diária mensal (mm/dia).

Com os valores sazonais de Verão (Dezembro – Fevereiro), Outono (Março – Maio), Inverno (Junho – Agosto) e Primavera (Setembro – Novembro) de ET estimados pelo sensor MODIS e observados pelas EMS do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) ao longo

do ano 2003, foi avaliado o desempenho estatístico por meio do Viés Médio (VM) (Equação 6), Erro Padrão da Estimativa (EPE) (Equação 7), Coeficiente de Correlação (r) (Equação 8), Coeficiente de Determinação (r²) (Equação 9) e Índice de Willmott (d) (Equação 10).

$$VM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (6)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (8)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

em que, P_i é o i^{ésimo} valor estimado da ET, O_i é o i^{ésimo} valor observado da ET, O é a média dos valores observados e N é o número de dados analisados.

A análise estatística foi aplicada utilizando valores mensais de ET para o ano de 2003 nos municípios de Resende, cuja EMS está localizada na latitude 22,44° S e longitude 44,43° W a uma altitude de 439,89 metros e Maricá, cuja EMS está localizada na latitude 22,91° S e longitude 42,81° W a uma altitude de 4 metros. Os valores observados de ET das EMS foram calculados a partir do método Penman-Monteith, recomendado pela FAO 56 (ALLEN et al., 1998). Os valores estimados foram obtidos por meio da média dos valores de ET dos pixels inseridos nos limites municipais, disponibilizados em formato shapefile pelo INEA. Com os limites municipais de cada EMS foi utilizada a ferramenta *Extract by Mask* para a obtenção dos valores médios mensais de ET, os quais foram correlacionados com os valores observados das estações meteorológicas. Essa metodologia foi adotada para que não houvesse nenhuma subestimativa ou superestimativa dos valores gerados pelo sensor, visto que a resolução dos pixels é de 1 km.

Para a comparação da ET entre diferentes tipos de uso e cobertura da terra foram elaborados gráficos Boxplot para cada estação do ano. As tipologias adotadas na estatística foram agricultura, área urbana, floresta e pastagem referentes ao ano de 2010, as quais foram disponibilizadas pelo INEA em formato shapefile. Os polígonos de cada tipologia serviram como limites para a aplicação da ferramenta *Extract by Mask* para cada sazonalidade do ano, gerando portanto, 16 conjuntos de dados de ET. Para a inserção dos valores de ET de cada pixel no Boxplot foi necessário converter os dados Raster para Ponto por meio da ferramenta *Raster to Point*. Dessa forma foi possível organizar os dados em formato DBF (*Data Base Format*) para o processamento da estatística. Na Figura 2 encontra-se o fluxograma de todas as etapas desenvolvidas.

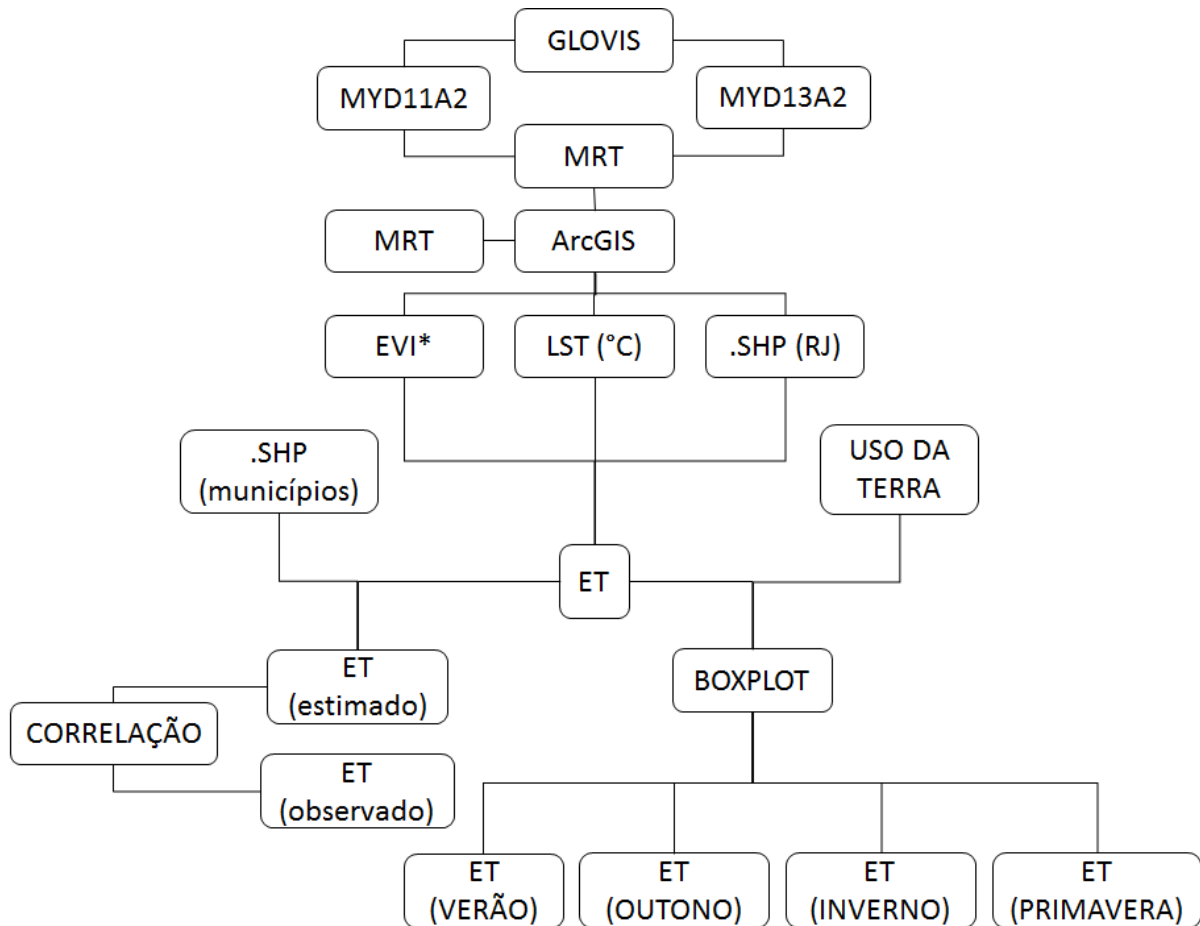


Figura 2: Fluxograma com as etapas de obtenção dos valores de ET e das análises estatísticas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Estatística

Na Tabela 1, os valores sazonais médios de ET obtidos por meio do sensor MODIS, apresentaram os seguintes índices estatísticos, $r^2 = 0,41$, $r = 0,64$, $d = 0,38$, $EPE = 0,29$ mm/dia e $VM = -0,04$ mm/dia, quando comparado com os dados observados na EMS de Resende. Para a EMS de Maricá, os índices estatísticos dos valores sazonais médios de ET foram os seguintes, $r^2 = 0,78$, $r = 0,88$, $d = 0,49$, $EPE = 0,13$ mm/dia e $VM = -0,09$ mm/dia. Os municípios apresentam temperaturas do ar médias anuais distintas em função da altitude. A maior proximidade de temperaturas do ar médias anuais do município de Maricá em relação às temperaturas da região árida e semi-árida de onde o modelo de estimativa da ET proposto por NAGLER et al. (2005) foi implementado, pode explicar o seu melhor desempenho estatístico em relação à EMS de Resende. De acordo com o VM negativo, notou-se a tendência da subestimativa dos valores obtidos por meio do sensor MODIS. Entretanto, devido aos índices r^2 , r e d apresentarem valores positivos, principalmente para Maricá e, EPE menor que 0,3 mm/dia, o modelo é indicado para estimativa da ET para extensas áreas como o estado do Rio de Janeiro.

Tabela 1: Resultados da análise estatística da ET média entre o método Penman-Monteith (FAO) e o sensor MODIS.

EMS	SAZONALIDADE	PENMAN-MONTEITH (FAO) (mm/dia)	MODIS (mm/dia)	r ²	r	d	EPE (mm/dia)	VM (mm/dia)
RESENDE	VERÃO	4,29	3,16	0,41	0,64	0,38	0,29	-0,04
	OUTONO	3,11	2,78					
	INVERNO	2,28	3,35					
	PRIMAVERA	3,53	3,22					
MARICÁ	VERÃO	4,74	3,56	0,78	0,88	0,49	0,13	-0,09
	OUTONO	3,35	3,19					
	INVERNO	2,30	3,02					
	PRIMAVERA	3,91	3,14					

Na Figura 3 observa-se a proximidade entre as curvas de ET geradas a partir de dados de superfície através da equação de Penman-Monteith e da estimativa através de dados orbitais do sensor MODIS, com valores próximos de janeiro a julho e outubro. Nos meses de abril e maio houve variação nula, entretanto, o mês de novembro apresentou variação máxima de 2,16 mm/dia. A maior taxa de ET estimada ocorreu no mês de setembro, atingindo 4,74 mm/dia, entretanto, no mês de novembro foi constatada a taxa mínima de 1,33 mm/dia.

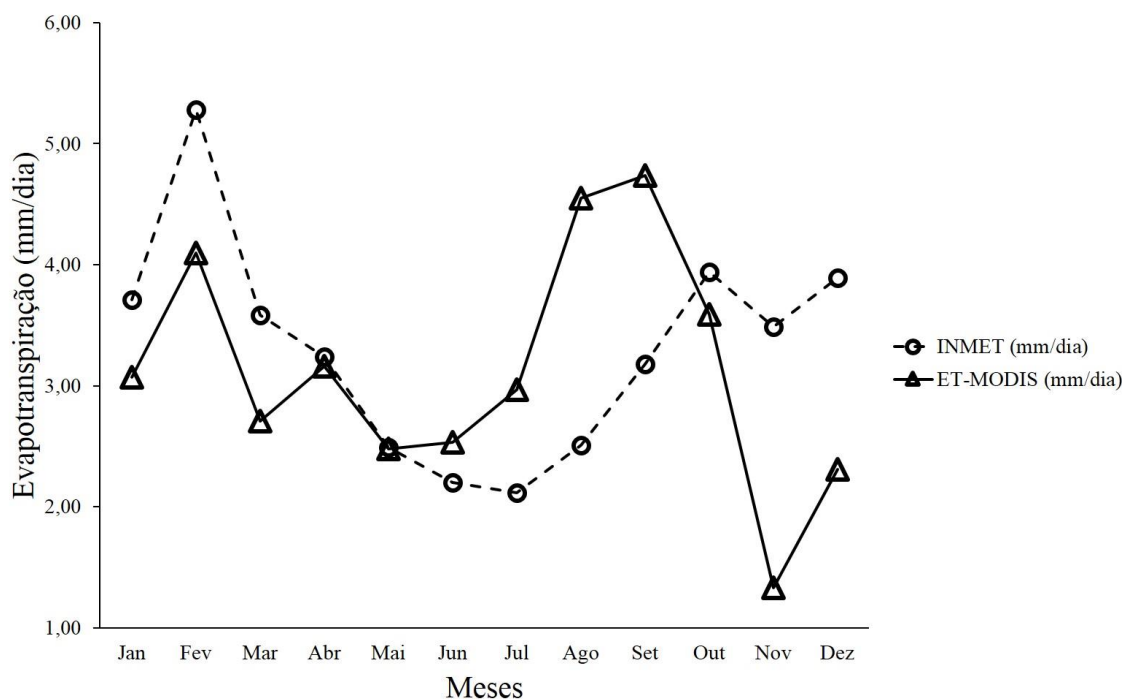


Figura 3: Correlação dos valores observados e estimados de ET ao longo de 2003 para a EMS de Resende, RJ.

A Figura 4 também apresenta curvas com tendências similares de ET entre os valores observados e estimados. Os meses de janeiro, abril, junho e setembro apresentaram variações mínimas, o que demonstra uma melhor correlação entre as curvas ao longo do ano. Entretanto, em dezembro houve uma variação máxima de 2,07 mm/dia. A maior taxa de ET obtida pelo sensor MODIS ocorreu no mês de janeiro (4,44 mm/dia) e a menor no mês de dezembro (2,05 mm/dia).

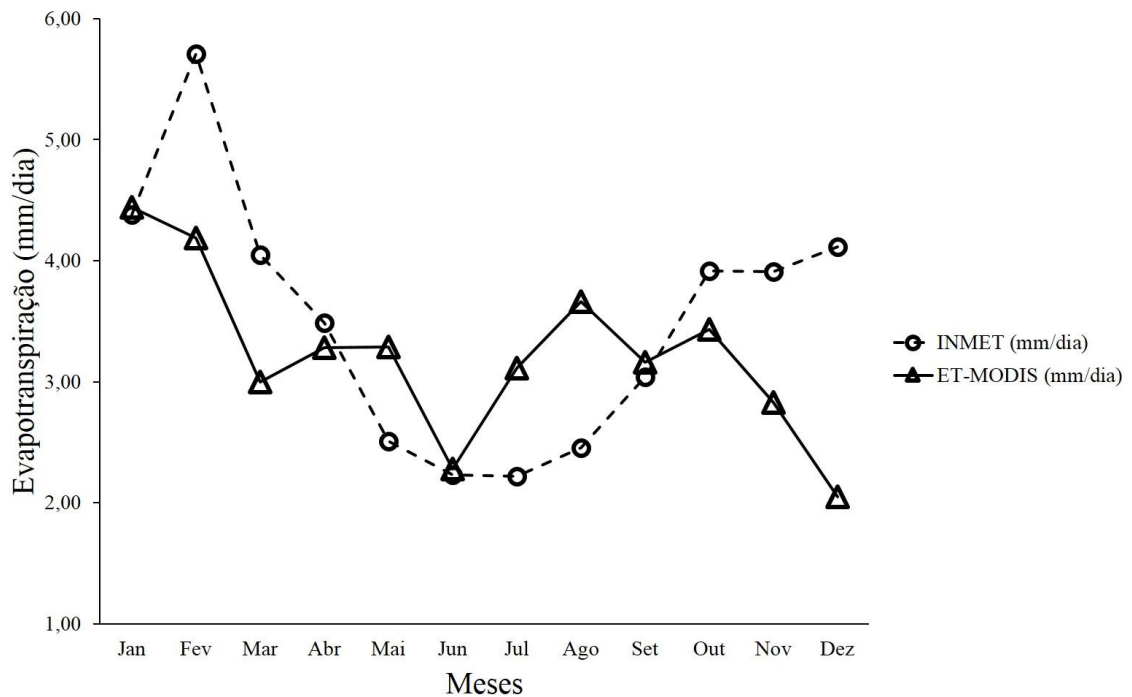


Figura 4: Correlação dos valores observados e estimados de ET ao longo de 2003 para a EMS de Maricá, RJ.

De acordo com RUHOFF (2011), os maiores erros na estimativa do saldo de radiação ocorreram na estação chuvosa, o que pode ser reflexo dos dias parcialmente nublados ou com presença de nuvens que não foram detectadas e corrigidas pelo sensor. No mesmo estudo, os valores de ET estimados pelo algoritmo SEBAL com imagens MODIS na região de Cerrado apresentaram variação média entre 6 mm/dia na estação chuvosa e 2 mm/dia na estação seca.

A correlação foi baseada em valores observados de evapotranspiração de referência (ET_o) e de valores estimados de evapotranspiração real (ET_r), sendo assim, em ambas as EMS, observa-se o padrão de superestimativa na estação chuvosa e subestimativa na estação seca.

Outro fator que pode estar associado ao desempenho estatístico da ET para as EMS é em relação ao clima semi-árido do estado do Novo México, nos Estados Unidos, onde o modelo foi desenvolvido. Na comparação entre valores de ET estimados pelo modelo proposto por NAGLER et al. (2005) e observados em EMS localizadas nas regiões norte e nordeste, OLIVEIRA & BAPTISTA (2011) revelam que nas áreas as quais o clima é tropical semi-úmido ou equatorial, os coeficientes de determinação são baixos. Já as EMS localizadas em regiões semi-áridas apresentam maiores coeficientes.

4.2. Distribuição Espacial da ET

Pela Figura 5, observam-se taxas de ET para o verão de 2003, que variam entre 1,2 e 7,8 mm/dia, sendo que os valores mais elevados se encontraram nas regiões leste e sudeste. Segundo GIONGO & VETTORAZZI (2011), na estação chuvosa observam-se valores elevados de ET, em função de uma maior disponibilidade hídrica e maior aporte de energia, onde o saldo de radiação (R_n) é superior à estação seca. Maiores taxas de ET nessas regiões estão associadas ao uso do solo predominante de culturas agrícolas, com menor albedo. Valores inferiores a 3,12 mm/dia se concentraram na região central e extremo oeste do estado, cujas principais características são o relevo acidentado e altitudes elevadas. Pelo método SEBAL, GIONGO & VETTORAZZI (2011) obtiveram resultados semelhantes na

especialização do Rn e ET na Bacia do Rio Corumbataí, SP, onde áreas agricultáveis, com espécies de menor albedo, apresentaram valores elevados de Rn e ET. As áreas com relevo mais acidentado, obtiveram valores inferiores de Rn e ET, em função da menor incidência de radiação solar. O mesmo estudo apresentou valores de ET que variaram de 5 a 7 mm/dia, para o verão de 2009, e 4 a 6 mm/dia para o verão de 2010. Em Kirindi Oya, Sri Lanka, BASTIAANSEN & BANDARA (2001) ao utilizarem o SEBAL em áreas agrícolas, obtiveram valores na ordem de 5,6 mm/dia para o verão de 1997.

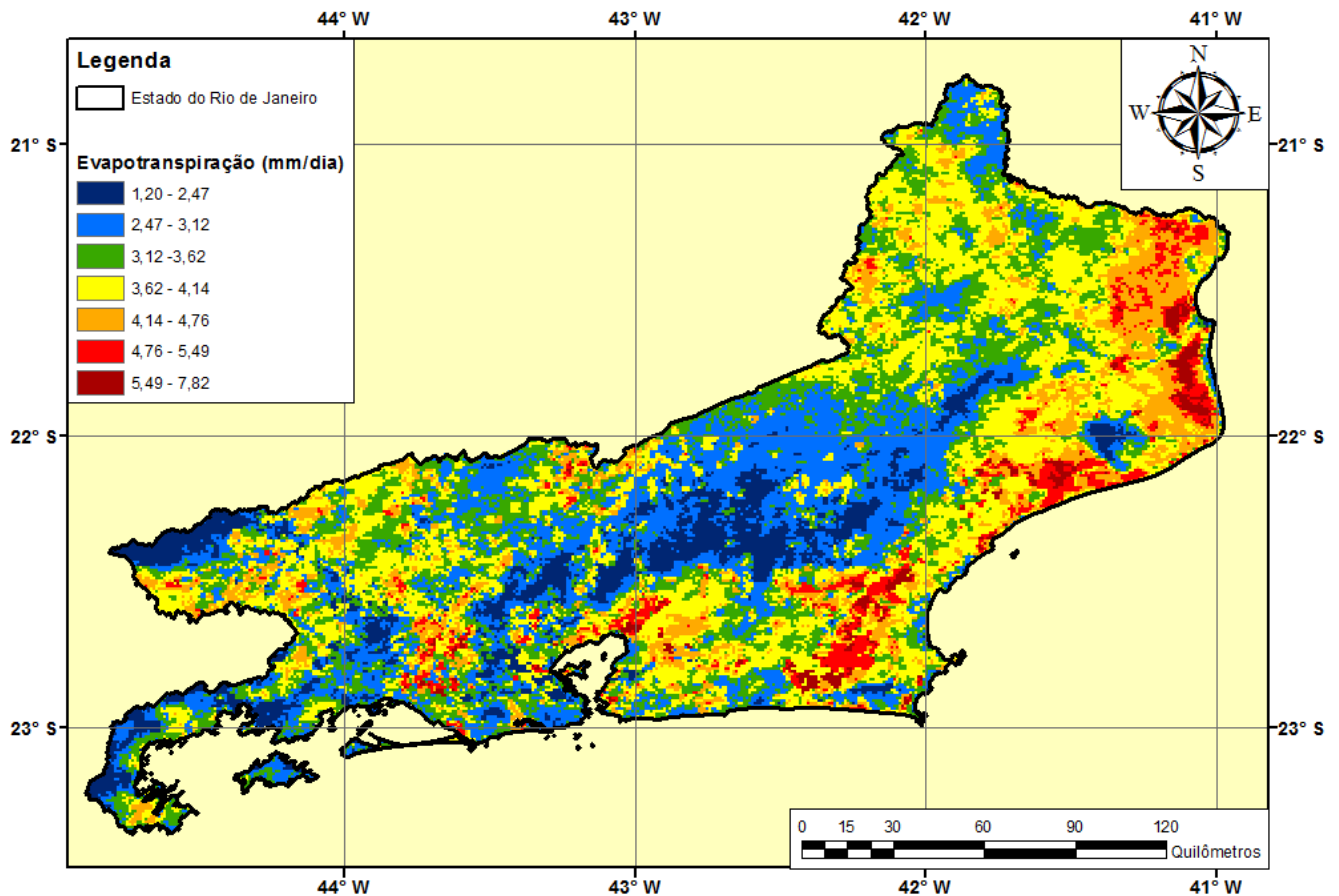


Figura 5: Distribuição espacial da ET para o verão de 2003.

No outono (Figura 6), houve uma diminuição dos valores máximos de ET em relação ao verão. Nesse período, as taxas de ET variaram entre 0,01 e 6,00 mm/dia, sendo que as maiores taxas de ET se concentram nas regiões leste e sudeste, mantendo padrão similar de distribuição do período anterior (Figura 5). É possível observar taxas de ET abaixo de 3,00 mm/dia se estendendo da região oeste a central do estado, ocupando uma área maior em relação ao período de verão. De maneira geral, a distribuição espacial da ET mostrou padrões similares para as estações de verão e outono, devido ao relevo e ocupação do solo, porém, em função da redução da disponibilidade hídrica e menor energia disponível no sistema, o outono apresentou menor amplitude e menores taxas de ET.

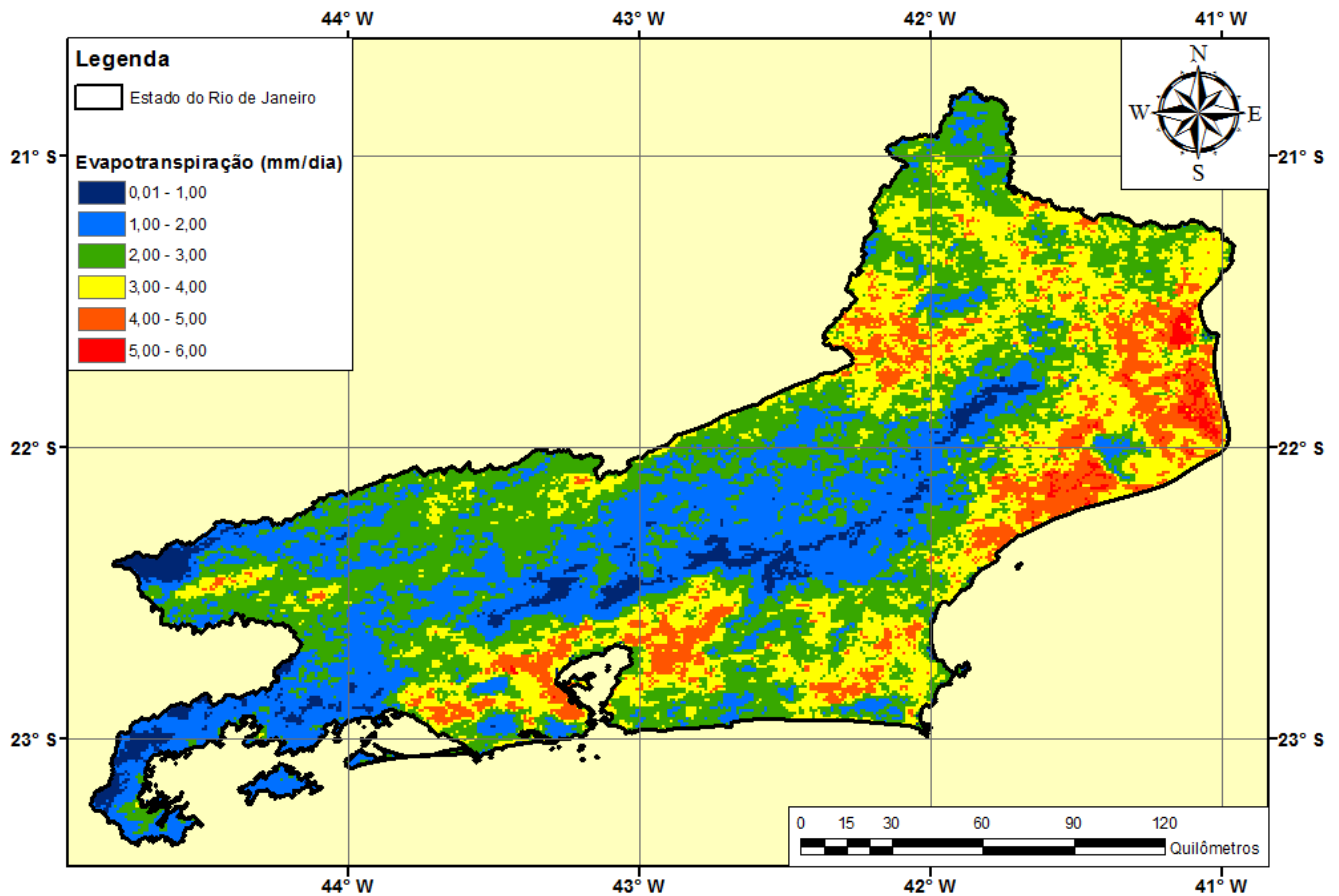


Figura 6: Distribuição espacial da ET para o outono de 2003.

Devido aos fatores de baixa disponibilidade hídrica e pouca energia no sistema, o período de inverno (Figura 7), apresentou as menores taxas de ET do ano, variando entre 0,52 e 5,83 mm/dia. Notou-se que as maiores taxas de ET ocorreram na região norte, ocupada predominantemente por pastagens, e se estendendo pela região costeira de baixa altitude, composta por pastagens, agricultura e urbanização. Valores de ET abaixo de 3,14 mm/dia novamente se concentraram na região central e extremo oeste do estado. Estudos realizados por GIONGO & VETTORAZZI (2011) revelam que para a Bacia do Rio Corumbataí, o período de seca apresentou valores de ET entre 2,00 e 5,00 mm/dia. No Sistema Aquífero Guarani, Rio Grande do Sul, SCHIRMBECK et al. (2009) aplicaram dados de LST obtidos pelo MODIS em um modelo simplificado da equação de Penman-Monteith, ajustado para o sensoriamento remoto. Neste estudo, os autores obtiveram valores aproximados de ET para os meses de julho e agosto de 2009, variando entre 0,5 e 4,0 mm/dia.

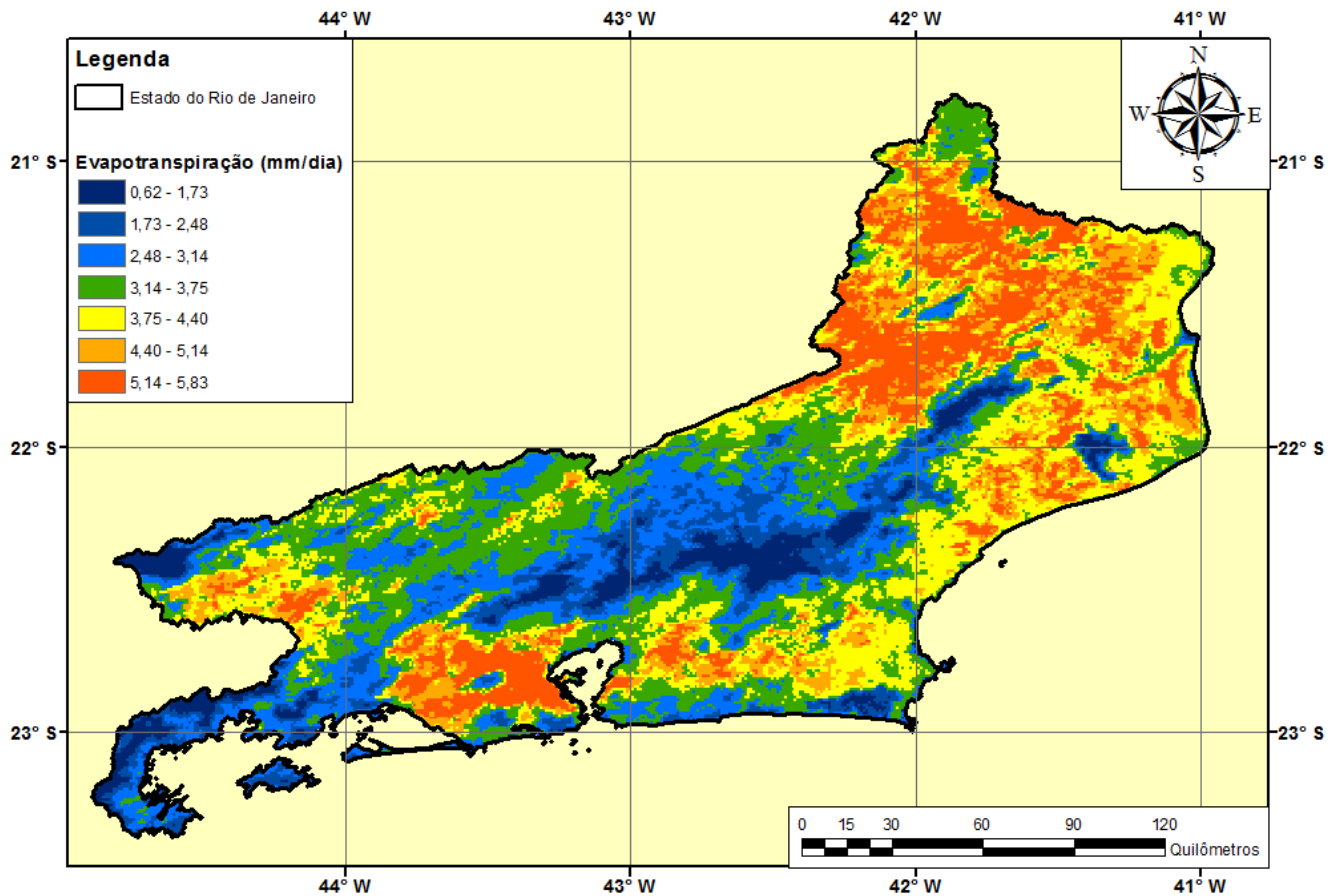


Figura 7: Distribuição espacial da ET para o inverno de 2003.

Para o período de primavera (Figura 8) houve aumento das taxas de ET, com variação entre 0,89 e 6,97 mm/dia. Nessa época, ocorreu aumento da disponibilidade de energia, o que trouxe como resultado maiores precipitações e disponibilidade hídrica no sistema. A distribuição espacial da ET se manteve constante, onde as maiores taxas ocorrem na região norte, onde além de maiores temperaturas, as pastagens e agricultura caracterizam um sistema água-solo-planta menos estável. As regiões com menores taxas de ET se concentraram nas regiões central e extremo oeste, onde o relevo é mais acidentado e predomina vegetação mais densa, a qual consiste um sistema água-solo-planta mais estável.

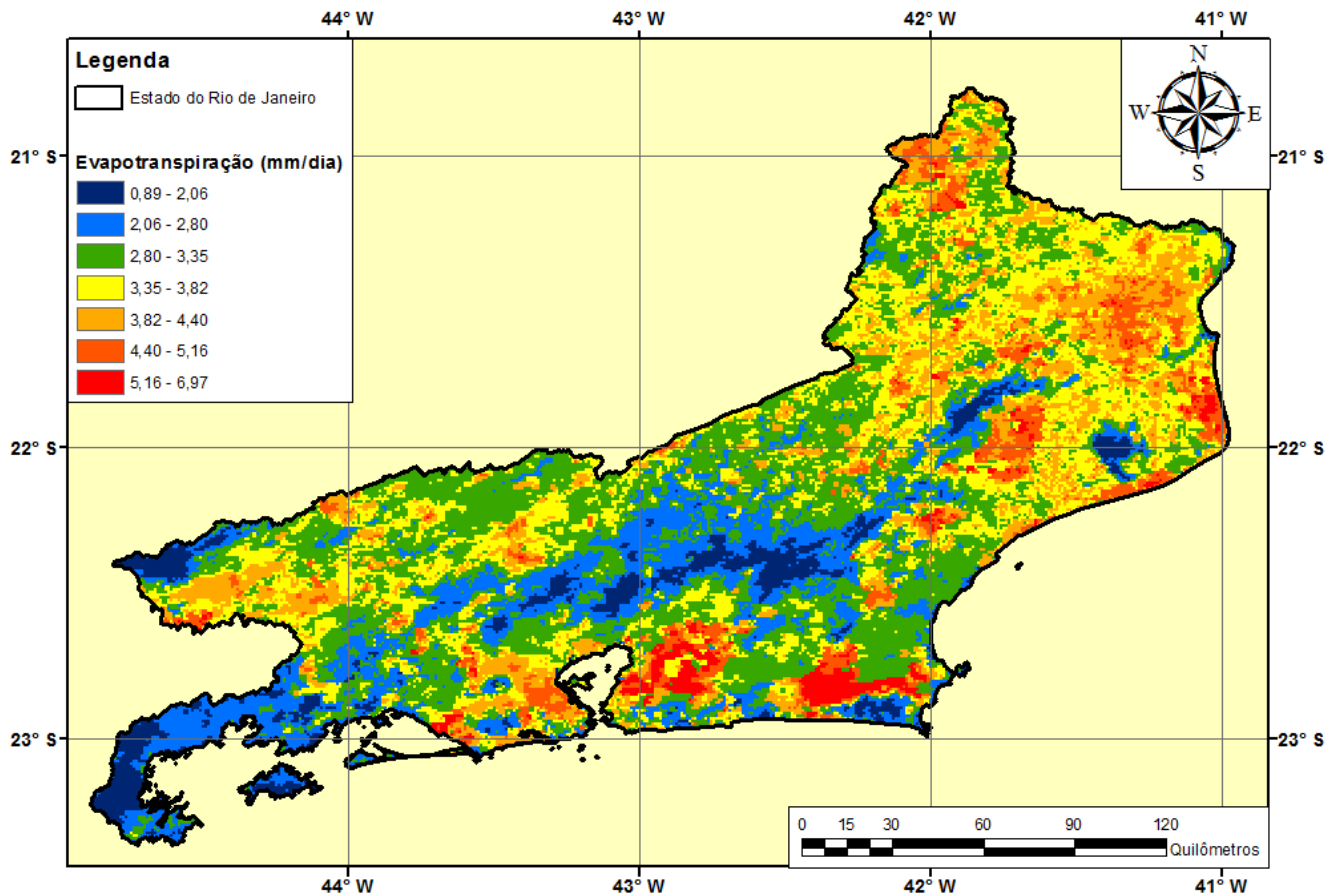


Figura 8: Distribuição espacial da ET para a primavera de 2003.

Comparando os mapas de ET em função da sazonalidade, observou-se influência das estações chuvosas e secas por meio da disponibilidade de energia e hídrica no sistema, apresentando maiores e menores taxas de ET, respectivamente. A distribuição espacial das taxas de ET manteve o mesmo padrão nas Figuras 5, 6, 7 e 8, onde os valores mínimos de ET se concentraram nas regiões central e sudeste e, os valores máximos na região nordeste do estado. Essa variação espacial está relacionada às características fisiográficas da área de estudo, onde o relevo, clima e vegetação influenciam diretamente nas taxas de ET. MENEZES et al. (2007) utilizaram o Modelo Digital de Elevação (MDE) no procedimento de aplicação do algoritmo SEBAL para as condições de relevo montanhoso de Minas Gerais. Os estudos revelaram que de acordo com as feições de lago, vegetação e solo, as taxas de ET podem variar em média de 0,47 mm/h para relevos planos a 0,67 mm/h para relevos montanhosos.

4.3. Comparação da ET Sazonal para Diferentes Classes de Uso do Solo

A avaliação exploratória dos dados pelo Boxplot (Figura 9), revela que para o período de verão de 2003 (Figura 9a), as classes apresentaram variação de ET de 1,29 mm/dia. A classe agricultura apresentou as maiores taxas de ET, com valores médios de 4,31 mm/dia, próximos ao 3º quartil (4,57 mm/dia). A classe com as menores taxas de ET foi a de floresta, com valores médios de 3,02 mm/dia, próximos ao 1º quartil (2,63 mm/dia). Área urbana e pastagem obtiveram valores médios de 3,45 mm/dia e 3,69 mm/dia, respectivamente. A classe

área urbana apresentou valores médios próximos ao 1º quartil (3,00 mm/dia), entretanto, pastagem obteve valores médios próximos ao 3º quartil (4,05 mm/dia). Para todas as classes houveram valores atípicos (máximos e mínimos) de *outlier*, principalmente valores atípicos máximos nas classes área urbana e agricultura, 7,41 mm/dia e 7,82 mm/dia, respectivamente.

Para o período de outono de 2003 (Figura 9b), pelo gráfico Boxplot observou-se redução dos valores médios de ET em relação ao verão para as classes agricultura (4, mm/dia), floresta (2, mm/dia) e pastagem (3, mm/dia). Além disso, as mesmas classes apresentaram valores médios iguais ao 1º quartil. As variações das taxas de ET para cada classe mantiveram o mesmo padrão em relação ao verão, com exceção do aumento para 4, mm/dia dos valores médios para área urbana. Para todas as classes houve menor amplitude das taxas de ET, cujos valores máximos não ultrapassaram os 6,00 mm/dia, sendo que a classe área urbana se destaca por não apresentar valores atípicos de *outlier*.

Na Figura 9c, é possível observar que as taxas de ET para o inverno de 2003 atingiram no máximo 5,83 mm/dia, porém, os valores médios foram superiores em relação aos períodos anteriores. A classe com valores médios mais elevados foi a de área urbana, diferente do ocorrido no período de verão, onde a agricultura apresentou taxas mais elevadas em relação às outras classes. Os valores médios para agricultura (4,21 mm/dia), área urbana (4,38 mm/dia), floresta (2,85 mm/dia) e pastagem (3,94 mm/dia) se aproximaram do 1º quartil. A classe área urbana repetiu o mesmo padrão apresentado no outono por não apresentar valores atípicos de *outlier*.

As taxas de ET para as classes durante o período de primavera (Figura 9d) apresentaram padrão similar em relação ao inverno, onde os valores médios de ET obtidos na classe agricultura (3,82 mm/dia) e área urbana (3,81 mm/dia) foram mais elevados, seguidos de pastagem (3,51 mm/dia) e floresta (2,83 mm/dia). Para o período de primavera, os valores de ET alcançaram maiores amplitudes para todas as classes, com destaque da área urbana, atingindo valores atípicos máximos de *outlier* de até 6,00 mm/dia. Entretanto, os valores atípicos de *outlier* foram observados em todas as classes. Além disso, os valores médios de ET para as classes se concentraram na região central entre o 1º e 3º quartil.

Ao analisar a Figura 9, notou-se maiores variações de ET no verão e primavera, sendo ocasiões de grande disponibilidade de energia e de água no sistema. As classes que apresentam a maior variação de ET em períodos chuvosos e de seca são pastagem e agricultura. Segundo OLIVEIRA & PEREIRA (2012), a alta variabilidade de ET em áreas de pastagem está relacionada à sensibilidade estomatal desse tipo de vegetação em períodos de seca, reduzindo a sua transpiração, como também sua área verde. Por outro lado, devido à baixa demanda hídrica em períodos chuvosos, houve maior perda de água desse tipo de vegetação para a atmosfera.

Valores de ET em áreas de floresta foram inferiores às demais classes principalmente, pela influência do relevo acidentado e com maiores altitudes. Tais características contribuem para uma menor disponibilidade de energia e a presença de temperaturas mais baixas. As baixas taxas de ET em áreas de floresta podem estar associadas à vegetação densa, pelo fato de apresentar um sistema água-solo-plantas mais estável. Além disso, MATSUSHITA et al. (2007) revelam que apesar do EVI possuir vantagem no estudo de vegetações densas devido à redução dos efeitos de substrato do dossel e da influência atmosférica, por outro lado, sofre forte interferência da topografia, diferente do NDVI. Outro fator que deve ser levado em consideração é a presença de fragmentos florestais com áreas menores que a resolução de 1 km, podendo haver subestimativa de valores de ET em função da matriz.

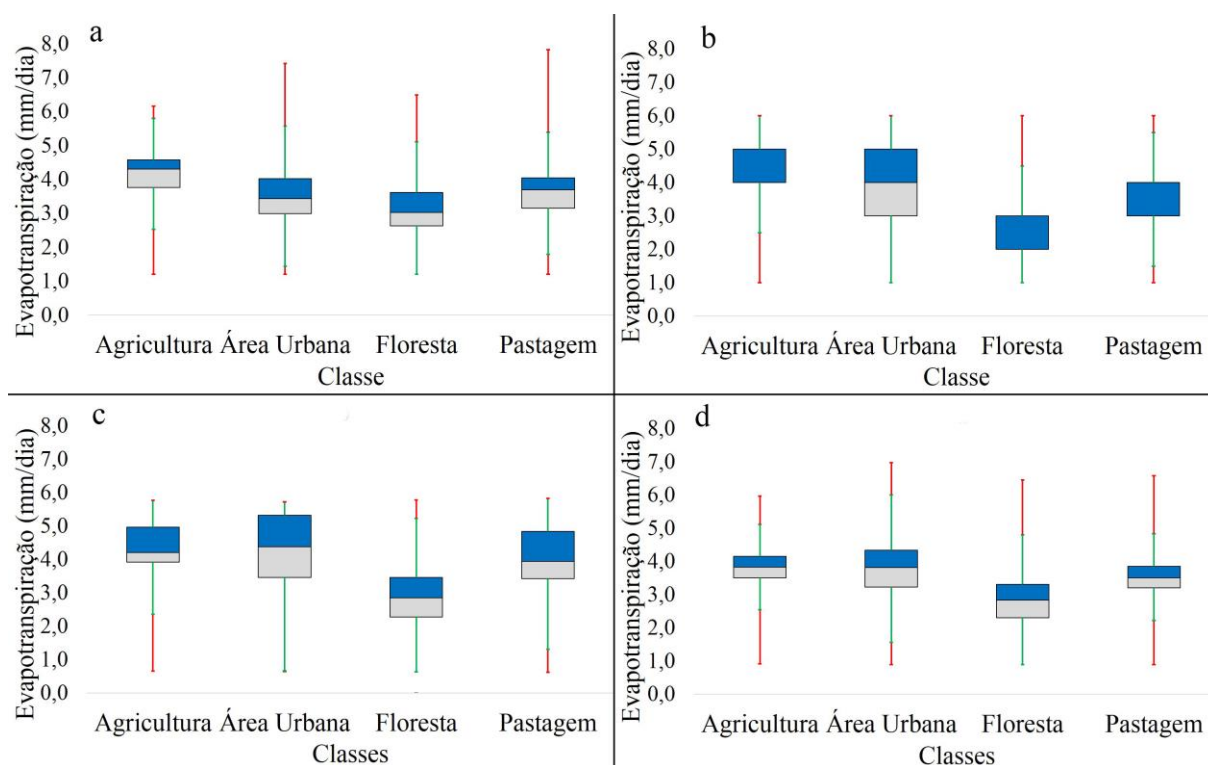


Figura 9: Boxplot exploratório das classes de uso do solo para o verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) de 2003.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise estatística entre valores de ET observados pelas EMS e estimados pelo sensor MODIS apresenta índices satisfatórios, tornando o modelo aplicável para estudos hidrológicos em grandes áreas.

É importante que haja outras comparações com maiores quantidades de EMS e outros sensores, para levar em consideração outras resoluções espaciais e regiões do estado do Rio de Janeiro.

A subestimativa dos valores obtidos pelo sensor MODIS demonstra a necessidade de ajustes no modelo proposto por NAGLER et al. (2005) para a sua melhor adequação em áreas com clima tropical e subtropical.

A distribuição espacial da ET para o estado do Rio de Janeiro apresenta maiores índices na estação chuvosa, com concentração na região nordeste, composta predominantemente por agricultura.

Os menores valores de ET ocorrem em áreas de altitude, com concentração de cobertura florestal. A subestimativa da ET para áreas florestadas demonstra a necessidade de incluir a variável topográfica em estudos de ET em regiões de relevo acidentado.

Os resultados deste estudo podem servir como subsídio para estimativas de produtividade de fitomassa, mudança da paisagem e demanda hídrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 1, n. 56, p. 297, 1998.
- ALTMANN, A. L.; ECKHARDT, R. R.; REMPEL, C. Evolução do uso e cobertura da terra – estudo de caso no município de Teutônia – RS – Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 3, p. 273-283, 2009.
- ANDRADE, G. M. et al. Mapeamento de Parâmetros Biofísicos e da Evapotranspiração usando técnicas de Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2., Corumbá. **Anais...** Corumbá: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2009. p. 695-704.
- ANDRÉ, J. C. et al. Impact of forests on mesoscale meteorology. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 324, n. 1223, p. 407–422, 1989.
- ANDRÉ, R. G. B. et al. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 501-509, 2008.
- ANJOS, A. W. et al. Temperatura da superfície continental associada aos eventos meteorológicos na cidade do Rio de Janeiro, RJ. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 3692-3707, 2013.
- BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Revista Ambiente**, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; BANDARA, K. M. P. S. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka. **Irrigation Science**, v. 21, n. 1, p. 1-15, 2001.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, n. 1, p. 198-212, 1998.
- BEZERRA, B. D., SILVA, B. D., 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.
- BOEGH, E. et al. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 179–193, 2002.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, n. 1, p. 185–228, 2004.

CEPERJ – Fundação Centro Estadual de Estatísticas Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ceperj.rj.gov.br/ceep/info_territorios/divis_regional.html>. Acesso em: jul. 2014.

CHANG, M. **Laboratory Notes Forest Hydrology**. 1 ed. Texas: School of Forestry, Stephen F. Austin State University, 1982. 203 p.

CREPANI, E. et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento no mapeamento regional da cobertura e uso atual da terra. **Geografia**, v. 27, n. 1, p. 119-135, 2002.

CRUZ, C. B. M. et al. Classificação orientada a objetos na geração do mapa de uso e cobertura da terra do estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. P. 7789-7796.

CUNHA, A. P. M. D. A., ALVALÁ, R. C. D. S., OLIVEIRA, G. S. D. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28 n. 2, p. 139-152, 2013.

DELGADO, R. C. et al. Classificação espectral de área plantada com a cultura da cana-de-açúcar por meio da árvore de decisão. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 369-380, 2012.

DEPPE, F. et al. Utilização de dados de temperatura de superfície, precipitação e umidade para a identificação e monitoramento de incêndios em tempo quase real. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 4447-4452.

EMBRY, J.; NOTHNAGEL, E. Photosynthetic light-harvesting during leaf senescence in *Panicum miliaceum*. **Plant Science**, v. 95, n. 2, p. 141– 152, 1994.

ESTEVES, B. D. S. et al. Avaliação do Kt para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Campos dos Goytacazes-RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 274-278, 2010.

FERREIRA, M. E. et al. Análise da sazonalidade de paisagens antrópicas e nativas do bioma Cerrado através dos produtos MODIS índices de vegetação, área foliar e atividade fotossintética. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 505-512.

FIDALGO, E. C. C. et al. Remanescentes da Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro: distribuição dos fragmentos e possibilidades de conexão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. P. 3885-3892

FORMIGONI, M. H.; XAVIER, A. C.; LIMA, J. S. S. Análise temporal da vegetação na região do nordeste através de dados do EVI do MODIS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 1-8, 2011.

FREITAS, D. M. et al. Variabilidade espaço-temporal na mudança da paisagem no município de Acrelândia, AC. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 1, p. 935-946, 2012.

GAO, X.; HUETE, A. R.; NI, W.; MIURA, T. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 1-2, p. 609 – 620, 2000.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento do saldo de radiação e evapotranspiração diária, por meio de imagens TM/LANDSAT-5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 4663-4670.

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.

GREEN, K.; KEMPKA, D.; LACKEY, L. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 60, n. 3, p. 265-271, 1994.

GUSSO, A.; FONTANA, D. C.; GONÇALVES, G. A. Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com uso do sensor AVHRR/NOAA. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 231-237, 2007.

HUETE, A. R. et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, 2006.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 195– 213, 2002.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/basetematica_estadoambiente/>. Acesso em jul. 2013.

JAKUBAUSKAS, M. E.; LEGATES, D. R.; KASTENS, J. H. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 4, p. 461 – 470, 2001.

JIANG, Z. et al. Development of a two-band enhances vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 1, p. 3833-3845, 2008.

JUSTICE, C. O. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 2, p. 3-15, 2002.

KALMAN, J. D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 421-469, 2008.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 1, p. 44-54, 2005.

KOBIYAMA, M. Ruralização na gestão de recursos hídricos em área urbana. **Revista OESP Construção**, v. 5, n. 32, p.112-117, 2000.

LACRUZ, M. S. P.; JÚNIOR, M. A. S. Uso de séries temporais EVI/MODIS e análise harmônica para o estudo da bacia do Rio Taquari. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 59, p. 9-15, 2007.

LACRUZ, M. S. P.; SANTOS, J. R.; CONFORTE, J. C. Utilização de séries temporais de imagens MODIS/Terra e análise harmônica para o monitoramento de corredores ecológicos. In: BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 3223-3228.

LATORRE, M. L. et al. Sensor Modis: Características Gerais e Aplicações. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 91-121, 2003.

LIMA, W. P. **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2008. 242 p.

LOAGUE, K. M.; FREEZE, R. A. A comparison of rainfall runoff modeling techniques on small upland watersheds. **Water Resources Research**, v. 21, n. 1, p. 229-248, 1985.

LOPES, P. M. O.; RIZZI, R. Modelagem da emissividade da superfície terrestre em regiões montanhosas a partir de dados do sensor Modis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 2797-2804.

MARQUES, M. N. et al. Avaliação do impacto da agricultura em áreas de proteção ambiental pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape, São Paulo. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1171-1178, 2007.

MATSUSHITA, B. et al. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case of study in high-density cypress forest. **Sensors**, v. 7, n. 11, p. 2636-2651, 2007.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MENEZES, S. J. M. C. et al. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3475-3482.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W. J. D. Vegetation detection through smoke-filled AVHRIS images: An assessment using MODIS band passes. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 24, p. 32001–32011, 1998.

MONTIETH, J. L. Does transpiration limit the growth of vegetation or vice versa? **Journal of Hydrology**, v. 100, n. 1, p. 57-68, 1988.

NAGLER, P. L. et al. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 1, p.17-30, 2005.

NASCIMENTO, D. T. F.; SOUSA, S. B.; OLIVEIRA, I. J. A relação entre valores de temperatura superficial terrestre (TST), o uso e cobertura do solo e a topografia no município de Minaçu-GO (2001). **Ateliê Geográfico**, v. 3, n. 2, p. 93-107, 2009.

NASCIMENTO, P. S. R. **Avaliação de técnicas de segmentação e classificação em imagens Landsat-TM visando o mapeamento de unidades de paisagem na Amazônia**. 1997. 120 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

OLIVEIRA, B. S.; PEREIRA, G. Avaliação da evapotranspiração em diferentes usos do solo no Pantanal utilizando dados do sensor Terra-MODIS. SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 4., Bonito. **Anais...** Bonito: INPE, 2012. p. 870-878.

OLIVEIRA, M. R.; BAPTISTA, G. M. M. Validação do Modelo Espectral de Estimativa de Evapotranspiração na Região de Gilbués, Piauí. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 5925-5932.

PEREIRA, H. C. **Policy and Practice of Water Management in Tropical Areas**. Boulder: Westview Press, 1989. 237 p.

PIELKE, R. A. et al. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. **Global Change Biology**, v. 4, n. 1, p. 461–475, 1998.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 162 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SANTOS, J. R.; MALDONADO, F. D.; GRAÇA, P. M. L. A. Integração de imagens LANDSAT/ETM+ e CBERS-2/CCD para detecção de mudanças em área da Amazônia sob domínio da floresta de transição. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 51, n. 1, p. 15-21, 2005.

SANTOS, R. F. **Vulnerabilidade Ambiental - Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?** 2 ed. Brasília: MMA, 2007. 192 p.

SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; COSTA, S. C. F. E. Impactos da urbanização na temperatura e no balanço da radiação à superfície no município de Fortaleza – CE com base em imagens espectrais do TM/Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 917-924.

SOBRINO, J. A.; CASELLES, V.; COLL, C. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature. **Il Nuovo Cimento**, v. 16, n. 3, p. 219-236, 1993.

STEININGER, M. Tropical secondary forest regrowth in Amazonian: age, area and change estimation with Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 1, p. 9-27, 1996.

TUCKER, J. C. et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 20, p. 4485–4498, 2005.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do código florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropical**, v. 10, n. 4, p. 67-75, 2010.

TRIMBLE, S.W.; WEIRICH, F.H.; HOAG, B.L. Reforestation and the reduction of water yield on the southern Piedmont since circa 1940. **Water Resources Research**, Washington, v. 23, n. 1, p. 425-437, 1987.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí – PA. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, v. 34, n. 3, p. 487-493, 2004.

WARREN, M. S. et al. Procedimento para alteração da emissividade do produto de temperatura do Modis – MOD11. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 4, p. 465-474, 2012.

XIAO, X. et al. Satellitebased modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 519–534, 2004.

XIAO, X. et al. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: Continental-scale observations in Northern Asia. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 3, p. 385–392, 2003.

ZHANG, Y. et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. **Global Ecology and Biogeography**, v. 18, n. 1, p. 280–290, 2009.

7. ANEXOS

Tabela 2: Valores de ET pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para o verão de 2003.

Classe	Verão 2003			
	Agricultura	Área Urbana	Floresta	Pastagem
Mínimo	2,30	1,21	1,20	1,21
Q1	3,78	3,00	2,63	3,15
Médio	4,31	3,45	3,02	3,69
Q3	4,57	4,02	3,62	4,05
Máximo	6,16	7,41	6,49	7,82
IQR	1,19	1,53	1,49	1,35
Outlier Mínimo	2,59	1,47	1,20	1,80
Outlier Máximo	5,76	5,55	5,10	5,39

Tabela 3: Valores de ET pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para o outono de 2003.

Classe	Outono 2003			
	Agricultura	Área Urbana	Floresta	Pastagem
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00
Q1	4,00	3,00	2,00	3,00
Médio	4,00	4,00	2,00	3,00
Q3	5,00	5,00	3,00	4,00
Máximo	6,00	6,00	6,00	6,00
IQR	1,50	3,00	1,50	1,50
Outlier Mínimo	2,50	1,00	1,00	1,50
Outlier Máximo	6,00	6,00	4,50	5,50

Tabela 4: Valores de ET pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para o inverno de 2003.

Classe	Inverno 2003			
	Agricultura	Área Urbana	Floresta	Pastagem
Mínimo	0,65	0,65	0,63	0,62
Q1	3,92	3,46	2,28	3,43
Médio	4,21	4,38	2,85	3,94
Q3	4,97	5,33	3,45	4,84
Máximo	5,77	5,73	5,77	5,83
IQR	1,57	2,80	1,77	2,12
Outlier Mínimo	2,35	0,66	0,63	1,32
Outlier Máximo	5,77	5,73	5,22	5,83

Tabela 5: Valores de ET pelo Boxplot exploratório das classes de usos do solo para a primavera de 2003.

Primavera 2003				
Classe	Agricultura	Área Urbana	Floresta	Pastagem
Mínimo	0,92	0,89	0,89	0,89
Q1	3,51	3,22	2,30	3,20
Médio	3,82	3,81	2,83	3,51
Q3	4,15	4,33	3,30	3,85
Máximo	5,97	6,97	6,45	6,58
IQR	0,96	1,67	1,50	0,98
Outlier Mínimo	2,54	1,56	0,89	2,22
Outlier Máximo	5,11	6,00	4,80	4,83

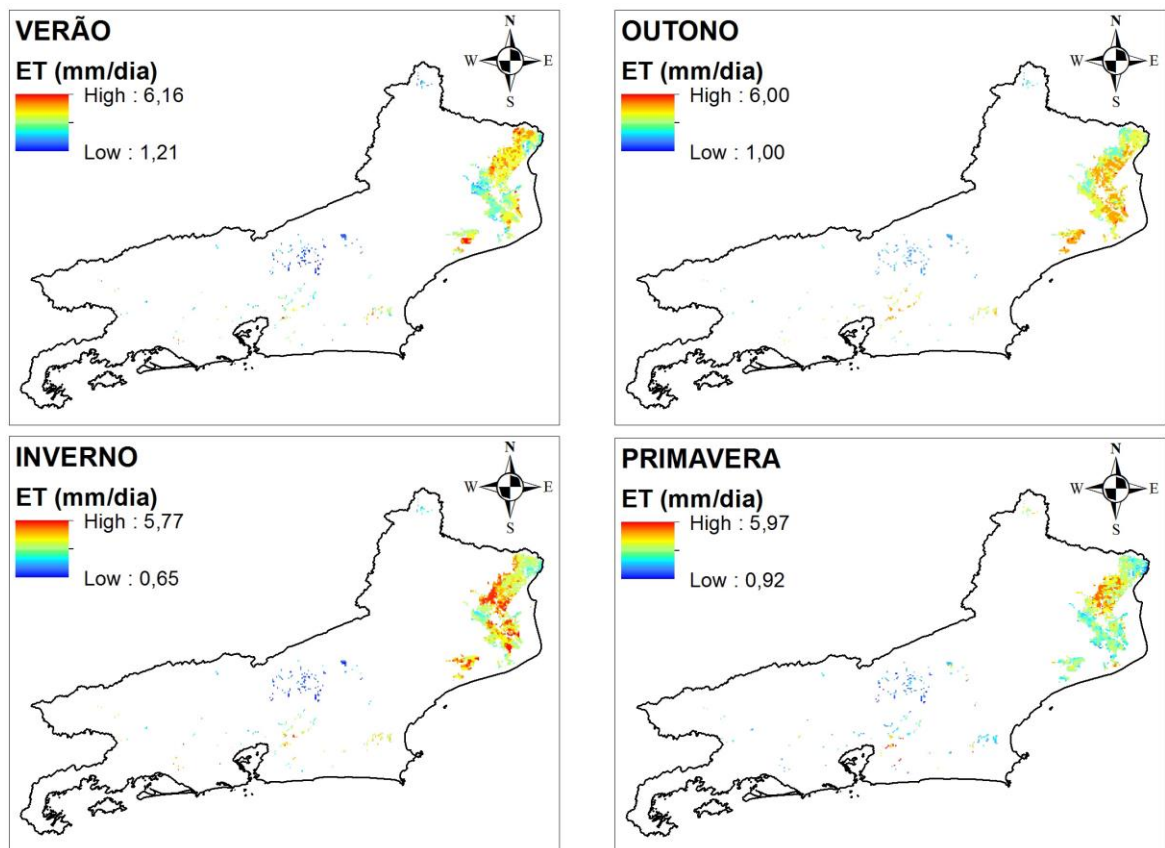


Figura 10: ET sazonal para a classe agricultura.

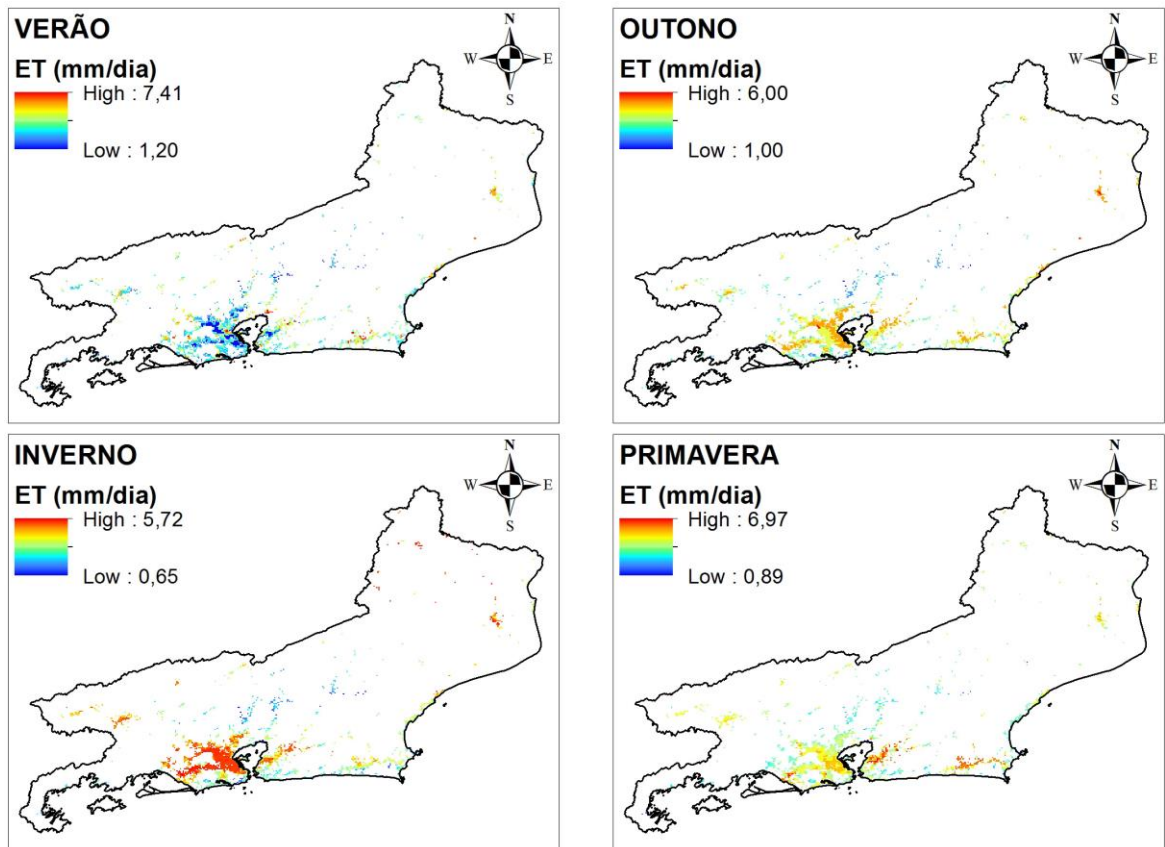


Figura 11: ET sazonal para a classe área urbana.

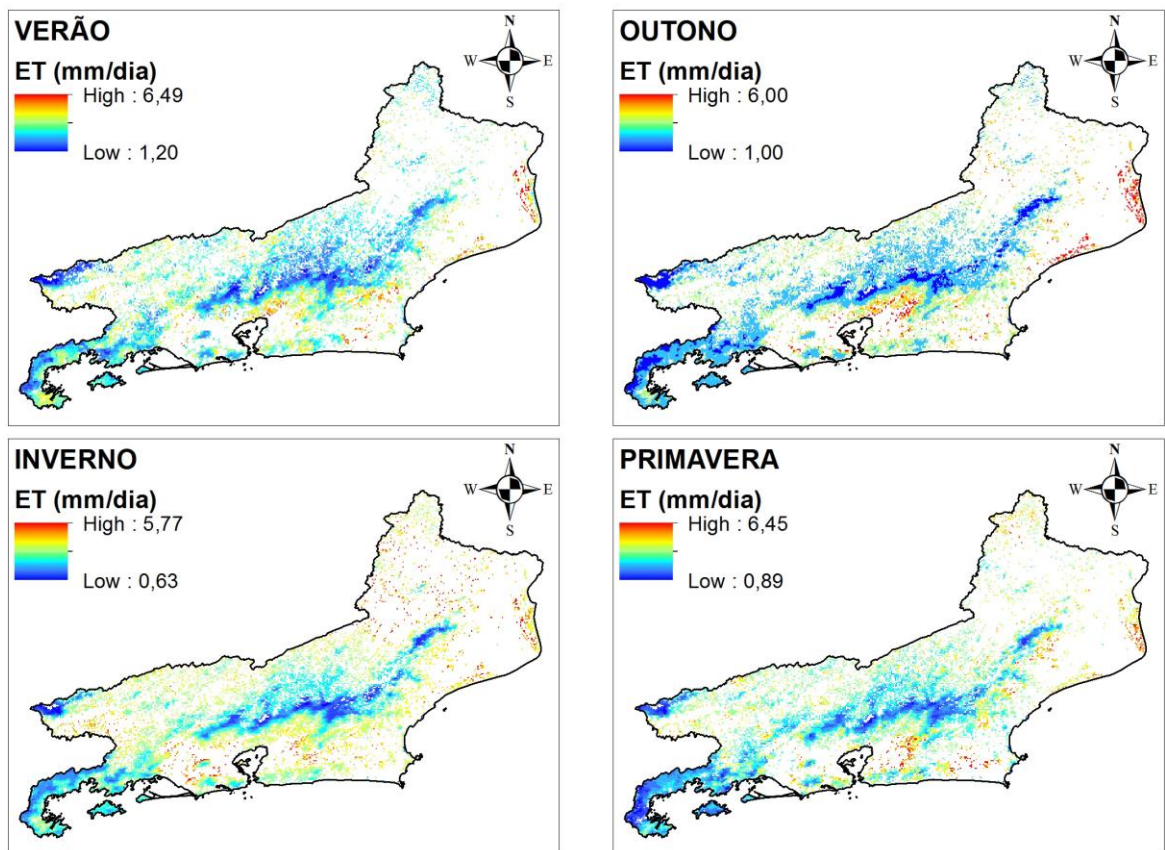


Figura 12: ET sazonal para a classe floresta.

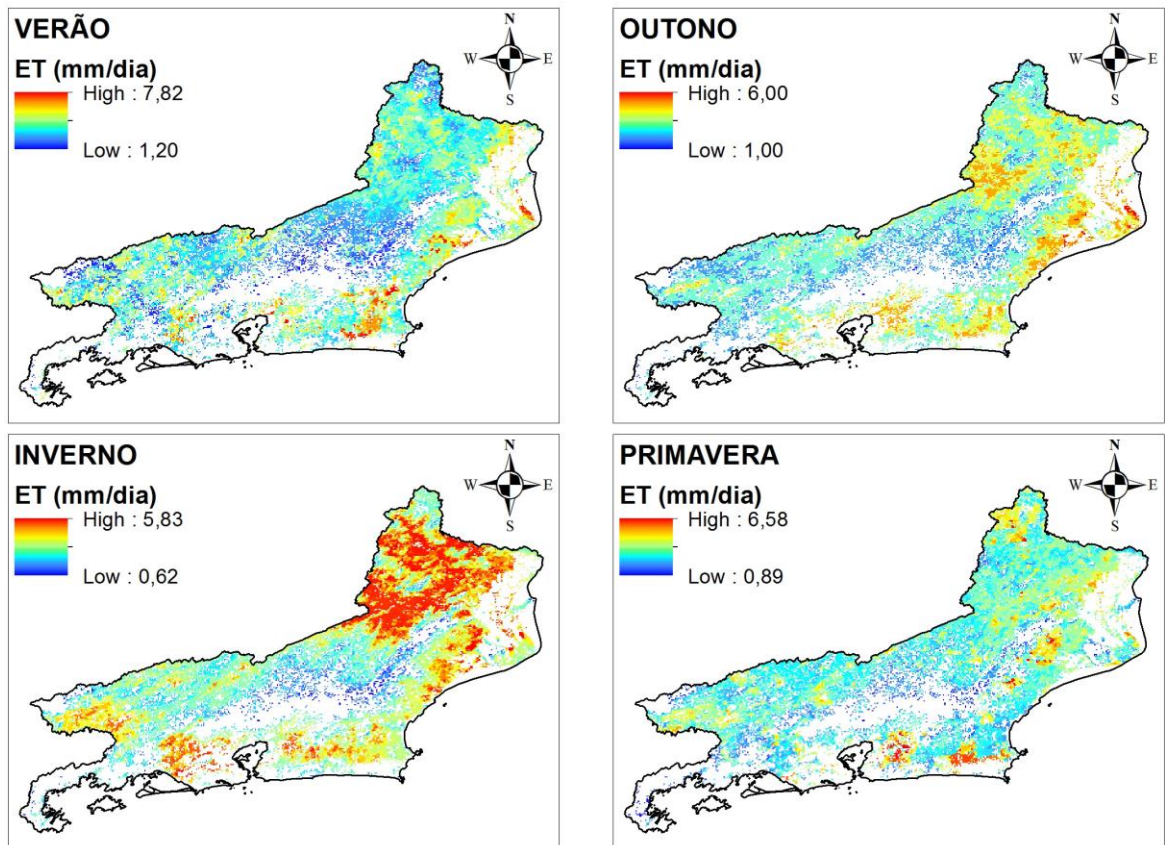


Figura 13: ET sazonal para a classe pastagem.

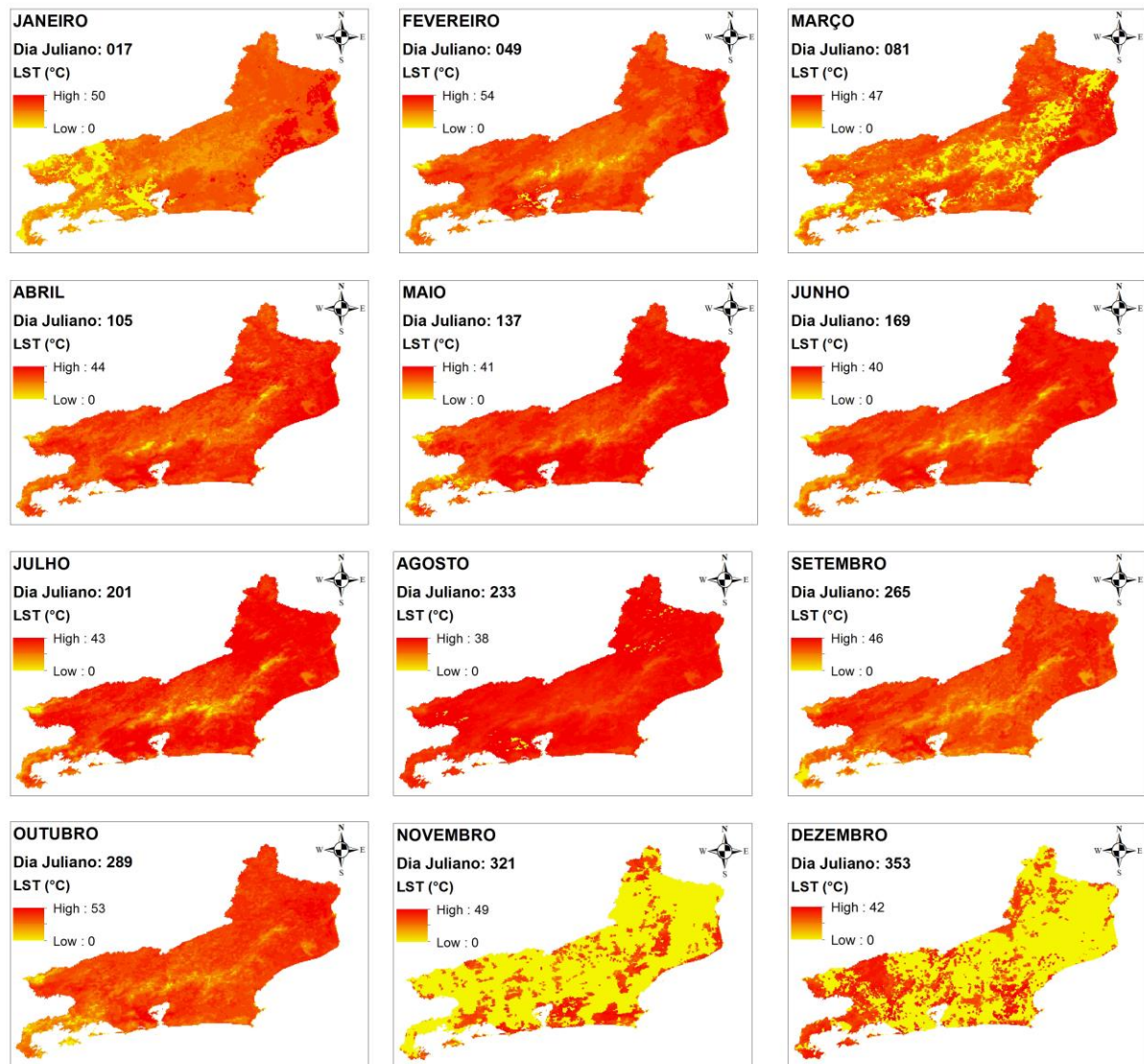


Figura 14: Mapas mensais de LST para o estado do Rio de Janeiro.

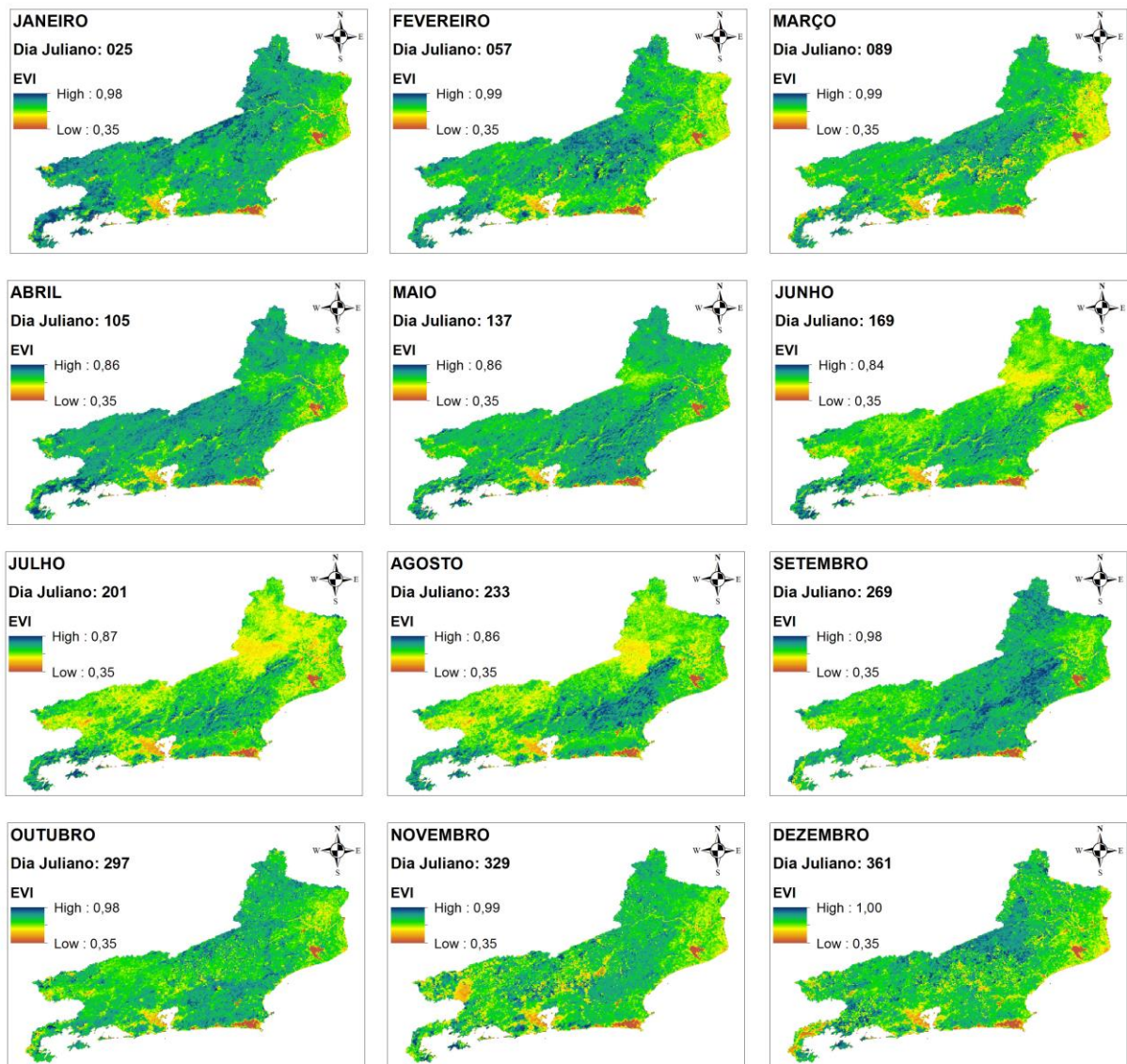


Figura 15: Mapas mensais de EVI para o estado do Rio de Janeiro.