

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

**Estimativas de evapotranspiração através de
sensoriamento remoto e métodos empíricos para o estado
do Rio de Janeiro e Parque Nacional do Itatiaia**

Tiago Marques Tito

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

Estimativas de evapotranspiração através de sensoriamento remoto e métodos empíricos para o estado do Rio de Janeiro e Parque Nacional do Itatiaia

TIAGO MARQUES TITO

Sob a Orientação do Professor

Rafael Coll Delgado

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2019

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M621e Marques Tito, Tiago, 1985-
Estimativas de evapotranspiração através de
sensoriamento remoto e métodos empíricos para o Estado
do Rio de Janeiro e Parque Nacional do Itatiaia /
Tiago Marques Tito. - Seropédica, 2019.
38 f.

Orientador: Rafael Coll Delgado.
Coorientador: Daniel C. de Carvalho.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, 2019.

1. Mata Atlântica. 2. Clima. 3. Sensoriamento
Remoto. 4. Evapotranspiração. I. Coll Delgado, Rafael,
1978-, orient. II. C. de Carvalho, Daniel, -,
coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais e Florestais. IV. Título.

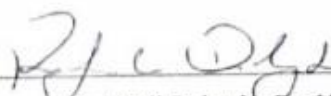
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TIAGO MARQUES TITO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2019.



Rafael Coll Delgado, Dr. UFRRJ

(Orientador)



Rafael de Ávila Rodrigues, Dr. UFG



Marcel Carvalho Abreu, Dr. UFRRJ



Sady Junior Martins Costa de Menezes, Dr. UFRRJ

À minha mãe, Maria Giovana Alves Tito.
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte e encorajamento para crescimento pessoal e acadêmico durante todos os anos de minha formação.

À minha mãe Maria Giovana Alves Tito, por ter me apoiado sempre neste caminho.

À minha companheira, Izabella Coutinho, por estar ao meu lado e incentivar a construção e finalização deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação, Jéssica Chaves, Jéssica Souza, Fernanda Tavares, Marcelle São Pedro, Marjorie Ochoski, Matheus dos Reis, Tamires Partelli, Déia Pereira.

À família Dionísio, Julia, Mariana, Daniel, Samuel e Wilma.

Aos meus primos Marcelo Trajano e Lais Alves.

Ao meu orientador Rafael Coll Delgado, pela oportunidade e proposta de trabalho, e ao meu coorientador Daniel Carvalho pela colaboração na análise dos dados e sua apresentação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF) e à UFRRJ pelo apoio e estrutura para a realização da pesquisa.

À FAPERJ, pelo financiamento do projeto do qual se originou os dados utilizados no segundo capítulo deste estudo.

À CAPES, pela bolsa de estudo. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A evapotranspiração consiste em uma etapa fundamental para a manutenção do ciclo da água. Conseqüentemente, sua ocorrência tem impacto na disponibilidade de água em ambientes naturais e antropizados e na produtividade agrícola. A fim de compreender o ciclo hidrológico em áreas com diferentes níveis de impacto, é importante que estudos de evapotranspiração sejam feitos tanto em ambientes naturais quanto antropizados. Em Unidades de Conservação, tais estudos podem contribuir para a elaboração de planos de manejo mais eficazes. Portanto, estudos que envolvam a aplicação de técnicas de estimativa de evapotranspiração são fundamentais para que esse parâmetro seja mais amplamente utilizado. Com o objetivo de compreender a dinâmica da evapotranspiração no Parque Nacional do Itatiaia e no Estado do Rio de Janeiro, esse estudo utilizou técnicas de sensoriamento remoto e equações empíricas. Para o Parque Nacional do Itatiaia foram utilizados sensores micrometeorológicos instalados em uma torre no Parque e foram utilizadas imagens de sensoriamento remoto orbital, todas as estimativas foram comparadas com o método de referência FAO-56, no período de dezembro de 2017 a novembro de 2018. Para o restante do estado as estimativas de evapotranspiração foram obtidas através do produto MOD16A2 e de sete equações empíricas, através do método de referência FAO-56, com dados obtidos através de seis estações meteorológicas no estado do Rio de Janeiro, no período de 2007 a 2013, incluindo fases de La Niña, El Niño e Neutralidade.

Palavras chave: mata atlântica, clima, sensoriamento remoto, evapotranspiração, Parque Nacional do Itatiaia.

ABSTRACT

Evapotranspiration is a fundamental step in maintaining the water cycle. Consequently, its occurrence has an impact on the availability of water in natural and man-made environments and on agricultural productivity. In order to understand the hydrological cycle in areas with different levels of impact, it is important that evapotranspiration studies are carried out both in natural and anthropogenic environments. In Conservation Units, such studies can contribute to the development of more effective management plans. Therefore, studies involving the application of evapotranspiration estimation techniques are essential for this parameter to be more widely used. In order to understand the dynamics of evapotranspiration in the Itatiaia National Park and in the State of Rio de Janeiro, this study used remote sensing techniques and empirical equations. For the Itatiaia National Park, micrometeorological sensors installed in a tower in the Park were used and images from orbital remote sensing were used, all estimates were compared with the FAO-56 reference method, from December 2017 to November 2018. For the rest of the state, evapotranspiration estimates were obtained using the product MOD16A2 and seven empirical equations, using the FAO-56 reference method, with data obtained from six meteorological stations in the state of Rio de Janeiro, in the period from 2007 to 2013, including La Niña, El Niño and Neutrality phases.

Keywords: Atlantic forest, climate, remote sensing, evapotranspiration, Itatiaia National Park.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de elevação e localização das estações meteorológicas convencionais utilizadas no estado do Rio de Janeiro.....	9
Figura 2. A) Valores de evapotranspiração de todos os métodos por período; B) Valores de evapotranspiração entre os métodos separados por período; C) Valores de evapotranspiração dos métodos em cada períodos. Asteriscos indicam diferença estatística pelo teste T de Student: * $\leq 0,05$; ** $\leq 0,01$; *** $\leq 0,001$; **** $\leq 0,0001$ e ns = sem significância estatística ($p > 0,05$).	15
Figura 3. Scatterplots entre estimativas de evapotranspiração da FAO-56 e métodos empíricos para os três períodos analisados.....	16
Figura 4. Valores do índice de concordância de Wilmott (barras), erro padrão da estimativa (mm d^{-1}) (pontos), coeficiente de determinação (triângulos) separados por período, métodos e estações meteorológicas.	17
Figura 5. Localização geográfica da área de estudo e da torre micrometeorológica instalada nas dependências do Parque Nacional do Itatiaia.	26
Figura 6. Torre micrometeorológica instalada no Parque Nacional do Itatiaia.....	28
Figura 7. Esquema de torre com sensores micrometeorológicos instalada no Parque Nacional do Itatiaia.	28
Figura 8. Localização geográfica e uso e ocupação do solo do PNI. (A) Afloramento rochoso, (B) Agropecuária, campo antrópico e outros campos, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (E) Floresta Ombrófila Densa Alto Montana, (F) Floresta Ombrófila Densa Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Sub Montana, Refúgio vegetal (H). Fonte: Delgado et al. (2018).	29
Figura 9. Boxplot da Evapotranspiração média por cobertura da terra para o período analisado.	33
Figura 10. Valores de evapotranspiração para os oito métodos analisados para o Parque Nacional do Itatiaia. Área hachurada em cinza significa o desvio padrão da série.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização, código e classificação das estações meteorológicas convencionais no Estado do Rio de Janeiro. Legenda: EMC = Estações Meteorológicas Convencionais; OMM = Organização Meteorológica Mundial.	10
Tabela 2. Meses de El Niño (vermelho), La Niña (azul) e neutros (negrito) baseados no limite de +/- 0,5 °C para o Oceanic Niño Index (NOAA, 2018).	11
Tabela 3. Métodos estatísticos utilizados para avaliação dos métodos empíricos e orbital. P_i é o valor estimado de Evapotranspiração (mm d^{-1}) no dia i ; O_i é a evapotranspiração de referência no dia i ; n é o número de meses analisados; e O é a evapotranspiração de referência média..	14
Tabela 4. Classes de classificação do índice de desempenho c.....	32
Tabela 5. Análises estatísticas dos métodos analisados em comparação com o método de referência.	34

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
Objetivo Geral	2
CAPÍTULO I: Estimativas de evapotranspiração baseadas em dados de superfície e de satélite e sua relação com El Niño-Oscilação Sul no estado do Rio de Janeiro	4
RESUMO	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1. Área de estudo.....	8
2.2. Clima.....	9
2.3. Dados meteorológicos de superfície	10
2.4. El Niño Oscilação Sul (ENOS)	10
2.5. Método de Penman-Monteith ajustado (FAO-56)	11
2.6. Equações empíricas	11
2.7. Produto MOD16A2.....	12
2.8. Análises estatísticas.....	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1. Neutralidade	17
3.2. La Niña.....	18
3.3. El Niño	19
4. CONCLUSÃO	20
CAPÍTULO II: Estimativas de evapotranspiração baseadas em dados de superfície e de satélite para o Parque Nacional do Itatiaia utilizando torre micrometeorológica.	21
RESUMO	22
ABSTRACT.....	23
1. INTRODUÇÃO	24
2. MATERIAL E MÉTODOS	26
2.1. Área de estudo.....	26
2.2. Sensores micrometeorológicos instalados na torre do PNI.....	27
2.3. Uso e cobertura da terra	29
2.4. Métodos de estimativa de evapotranspiração.....	30
2.5. Produto MOD16A2.....	31
2.6. Processamento dos dados micrometeorológicos e MOD16A2.....	31
2.7. Análises estatísticas.....	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4. CONCLUSÃO	35

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
----------------------------------	----

INTRODUÇÃO GERAL

A evapotranspiração funciona como uma importante conexão entre os ciclos da água, energia e carbono, pois durante o seu ciclo a água muda suas propriedades em decorrência da sua mudança de estado, participação na estrutura de carboidratos, ganho de potencial gravitacional, conteúdo de calor etc (OKI; KANAE, 2006).

A evapotranspiração é uma parte crítica do processo hidrológico: ao retornar para a atmosfera, cerca de dois terços do total da água que precipita nos continentes, governando a disponibilidade do recurso, a produtividade agrícola e a eficiência da irrigação (SONG et al., 2018; TALSMA et al., 2018). No contexto do aquecimento global, é esperado que haja alteração significativa do ciclo hidrológico expresso na modificação da evapotranspiração e da precipitação pluviométrica, o que pode não significar um aumento direto da disponibilidade hídrica, devido às mudanças nos padrões temporais e espaciais das chuvas (OKI; KANAE, 2006).

O termo evapotranspiração foi utilizado por Thornthwaite, no início de 1940 do século passado, como a combinação da água evaporada pela superfície do solo com a transpirada pelas plantas quando o suprimento hídrico é ilimitado (MENDONÇA et al., 2003).

Mendonça et al. (2003) expressou a estimativa da evapotranspiração como uma função exponencial da média mensal da temperatura do ar, justificando a ausência de outros elementos meteorológicos ao destacar o fato que eles variam junto com a temperatura do ar, produzindo uma revolução na agrometeorologia, pois a partir de então era possível estimar a disponibilidade hídrica do solo através de dados climáticos (CAMARGO; CAMARGO, 2000).

As limitações de tal método foram demonstradas ao se notar que a radiação solar apresenta uma maior correlação com a evapotranspiração (CHANG, 1959). Neste sentido, a equação proposta por Penman, utilizou uma abordagem mais refinada ao dividir a equação para estimativa de evapotranspiração em dois termos, um para o termo energético (radiação) e outro para o termo aerodinâmico (umidade e vento), resultando em uma estimativa que tem o potencial de manter a precisão em regiões úmidas e frias e em regiões quentes e secas (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Em 1977, Doorenbos & Pruitt estabeleceram o conceito de evapotranspiração de referência no boletim FAO-24 como “a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa com grama verde com altura de 8 a 15 cm, com cobertura uniforme, com crescimento ativo, completamente cobrindo o solo e sem deficiência hídrica”. Foram estabelecidos protocolos para cálculo da evapotranspiração através de 4 métodos, dependendo da disponibilidade de dados do usuário: o método de Blaney-Criddle, um método baseado em radiação; Penman-Monteith

modificado; um método de tanque, bem como um coeficiente de referência para culturas (K_c) (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Porém, durante a década seguinte se tornaram evidentes as limitações dos métodos apresentados, como a necessidade de utilização dos métodos em períodos diferentes, e as superestimativas obtidas para o método de Penman-Monteith utilizado (ALLEN et al., 1998).

Durante a década de 90 a FAO em colaboração com a *International Commission on Irrigation and Drainage* (ICID) recomendou a revisão das metodologias para estimativa de necessidades hídricas (ALLEN et al., 1994). Especialistas se reuniram em Roma para rever a definição de evapotranspiração de referência e definir um método padrão para o seu cálculo (CARVALHO et al., 2011).

A estimativa de evapotranspiração de referência foi reduzida a apenas um método, o de Penman-Monteith, e sua definição foi atualizada para a “taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética com altura de 12 cm, com uma resistência de superfície de 70 s.m^{-1} e com albedo de 0,23, com a evapotranspiração próxima de uma superfície extensa de grama verde de altura uniforme, crescimento ativo, cobrindo completamente o solo e sem deficiência hídrica” (ALLEN et al., 1994, 1998).

Estas modificações visaram melhorar as estimativas de evapotranspiração e a sua abrangência para uma maior amplitude de regiões e climas diferentes e os resultados foram publicados em 1998 no boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Uma vez que a física da equação estivesse correta e seu desenvolvimento se baseasse em dados de qualidade de diversas localidades, a estimativa deveria servir de base para estimar a evapotranspiração de referência (E_{to}) globalmente (PEREIRA et al., 2015).

Uma grande quantidade de métodos empíricos já foi desenvolvida para cálculo de evapotranspiração através de dados climáticos, com alguns sendo desenvolvidos para condições meteorológicas e agrícolas bastante específicas (ALLEN et al., 1998), permitindo a adequação dos métodos para regiões de origem e fornecendo simplicidade de uso frente às limitações de dados meteorológicos necessários (CARVALHO et al., 2011). No entanto, existe a possibilidade de que métodos empíricos só deem resultados confiáveis quando aplicados às condições climáticas similares ao do seu desenvolvimento (IRMAK, 2003).

Objetivo Geral

Diante da importância do monitoramento da E_{To} para o manejo de recursos hídricos e conservação de serviços ecossistêmicos, é fundamental a integração de ferramentas capazes de

fornecer estimativas satisfatórias de evapotranspiração. Entretanto, muitas questões ainda precisam ser respondidas, por exemplo: (1) Qual o efeito das fases do ENOS sobre a ETo?; (2) Que métodos, baseados em dados de superfície ou orbitais, mais se aproximam das estimativas da evapotranspiração de referência FAO-56?; (3) Esses métodos fornecem estimativas acuradas e que representam a variação da ETo nas diferentes fases ENOS? Para responder a essas perguntas, este trabalho tem como objetivo comparar a evapotranspiração de referência (FAO-56) com sete métodos empíricos baseados em dados meteorológicos de superfície e com o produto MOD16A2 derivado de dados de satélite, para três fases ENOS (El Niño, La Niña e Neutralidade) no Estado do Rio de Janeiro.

CAPÍTULO I: Estimativas de evapotranspiração baseadas em dados de superfície e de satélite e sua relação com El Niño-Oscilação Sul no estado do Rio de Janeiro

RESUMO

A necessidade de validar a qualidade de estimativas de evapotranspiração é vital para que este parâmetro tenha sua utilização ampliada. Para isto, se faz necessário avaliar tanto os novos produtos de sensoriamento remoto que expandem as áreas de evapotranspiração estimada, quanto as equações empíricas que fornecem estimativas com diferentes requerimentos de dados. Para examinar este problema, o presente estudo comparou as estimativas de evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto do produto MOD16A2 e de sete equações empíricas com as estimativas obtidas através do método de referência FAO-56, com dados obtidos através de seis estações meteorológicas no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Os dados abrangem o período de 2007 a 2013, o qual contém diferentes fases do fenômeno El Niño-Southern Oscillation: La Niña (2007-2008), El Niño (2009-2010) e Neutralidade (2013). Os métodos baseados tanto em dados de superfície como em dados de satélite, subestimaram as estimativas da evapotranspiração de referência FAO-56 para todas as estações meteorológicas e períodos analisados. O método Irmak-2 apresentou o desempenho mais próximo do método FAO-56 e o produto orbital MOD16A2 desempenho inferior aos métodos que utilizaram dados de estações meteorológicas de superfície.

Palavras-chave: mata atlântica, clima, sensoriamento remoto, evapotranspiração.

ABSTRACT

The need to validate the quality of evapotranspiration estimates is vital for this parameter to have its use expanded. For this, it is necessary to evaluate both the new remote sensing products that expand areas of estimated evapotranspiration, and empirical equations that provide estimates with different requirements for data. To examine this problem, the present study compared estimates of evapotranspiration obtained by remote sensing of the MOD16A2 product and seven equations with the estimates obtained using the FAO-56 reference method, with data obtained from six meteorological stations in the state of Rio de Janeiro, Brazil. The data cover the period from 2007 to 2013, which contains different phases of the El Niño Southern Oscillation phenomenon: La Niña (2007-2008), El Niño (2009-2010) and Neutrality (2013). The methods based on both surface and satellite data, underestimated the FAO-56 reference evapotranspiration estimates for all weather stations and periods analyzed. The Irmak-2 method showed the closest performance to the method FAO-56 and the MOD16A2 orbital product perform less than methods that used data of surface weather stations.

Keywords: Atlantic forest, climate, remote sensing, evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é um processo de perda simultânea de água por evaporação (do solo e outras superfícies) e por transpiração vegetal. Este processo é responsável pelo retorno de aproximadamente 60% de toda precipitação para a atmosfera e consumo de cerca da metade da energia solar incidente sobre a superfície terrestre (OVCHINNIKOV et al., 2014). Conseqüentemente, a evapotranspiração é considerada um componente crítico do ciclo hidrológico, com grande impacto no clima regional e global.

Tradicionalmente, o uso de lisímetros fornece a evapotranspiração de referência (ET_0) para diversas áreas de interesse agrícola. O método de Eddy Covariance (vórtices turbulentos) também é considerado confiável, apesar de ser frequentemente deficiente em fechar o balanço de energia (HA et al., 2017). No entanto, medidas diretas de evapotranspiração consomem grandes quantidades de tempo e recursos, sendo comum fazer estimativas a partir de dados meteorológicos, como balanço de radiação, temperatura do ar, pressão de vapor de água na atmosfera, velocidade do vento e umidade do solo (IRMAK et al., 2003). A FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) recomenda o uso da equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência e para calibrar outras equações (ALLEN et al., 1998; MORAES et al., 2018). Contudo, os inputs necessários para estimar a evapotranspiração por meio deste método nem sempre estão disponíveis para uma área de estudo, devido a baixa densidade de informações e baixa distribuição espaço-temporal, gerando falhas nos dados.

Métodos alternativos foram propostos para fornecer uma estimativa satisfatória de evapotranspiração utilizando dados de superfície mais comumente disponíveis. Várias equações empíricas foram propostas, baseadas em diferentes variáveis meteorológicas. Irmak et al. (2003) propuseram equações que utilizam radiação incidente e fluxo de radiação. Alexandris et al. (2006) basearam suas equações em radiação solar, temperatura, e umidade relativa. Valiantzas (2013) desenvolveram equações que utilizam temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa, e velocidade do vento. Todas estas equações empíricas foram validadas para o estado do Acre por Delgado et al. (2017).

As estimativas pontuais são necessárias e úteis, mas entender a evapotranspiração em nível regional se torna um componente estratégico para o manejo de recursos hídricos, sendo vital o estudo das características da variação da evapotranspiração em diferentes ambientes (LIU et al., 2013). No entanto, avaliações dos modelos de predição regionais de evapotranspiração são relativamente incipientes (BASTIAANSEN et al., 1998). O uso de

técnicas de sensoriamento remoto se torna uma alternativa viável para o monitoramento da evapotranspiração em grandes áreas (TALSMA et al., 2018).

Nos últimos anos, os sensores *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), presentes nos satélites Terra e Aqua da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) se tornaram uma alternativa para pesquisas ambientais. O *MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Product* (MOD16A2) baseia-se na equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração com resolução espacial de 500 m e resolução temporal de 8 dias (RUNNING et al., 2017a). Esse produto combina dados meteorológicos de reanálise, dados de satélite e de outros produtos oriundos do sensor MODIS. Foi demonstrado que oferece novas opções para modelagem agro hidrológica (AUTOVINO; MINACAPILLI; PROVENZANO, 2016), e seu uso foi sugerido em estudos de monitoramento na ausência de dados de superfície (MIRANDA et al., 2017).

O monitoramento da evapotranspiração é ainda mais relevante em regiões populosas inseridas em biomas ameaçados, que conseqüentemente exigem uma elevada demanda dos serviços ecossistêmicos como a regulação climática e recursos hídricos. O Estado do Rio de Janeiro é a terceira unidade federativa mais populosa do Brasil, possui uma alta diversidade ambiental e climática e está inserido na Mata Atlântica, um dos biomas mais ricos em biodiversidade e mais ameaçados do planeta.

Além disso, fenômenos com impacto no clima global, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) podem provocar variações no balanço hídrico (GUIMARÃES et al., 2012; AN, 2018) e, conseqüentemente, na evapotranspiração. O ENOS consiste de fases de aquecimento (fase El Niño) ou resfriamento (La Niña) anormal da superfície do Oceano Pacífico. Estes fenômenos modificam as variáveis meteorológicas ao longo de vários meses nos anos (MCPHADEN, 2015) e vem apresentando sua frequência aumentada devido às mudanças climáticas recentes (CAI et al., 2014).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O Estado do Rio de Janeiro está inserido na região sudeste do Brasil e se localiza entre os meridianos 40° 57' 59" W e 44° 53' 18" W e os paralelos 20° 45' 54" S e 23° 21' 57" S (**Figura 1**). O Rio de Janeiro faz divisa com os estados do Espírito Santo à Nordeste (NE), Minas

Gerais a Norte e Noroeste (N-NW), São Paulo a Sudoeste (SW), e com o Oceano Atlântico a Sul e Leste (S-E). Conta com uma área de 43.781,588 km², um perímetro de 937 km, um litoral de 636 km e uma população de 16.718.956 pessoas (IBGE, 2014). Tem 20,9 % de seu território coberto por vegetação natural, nas quais em sua maioria estão protegidas em 36 Unidades de Conservação estaduais e federais (SOS MATA ATLÂNTICA/INPE, 2014).

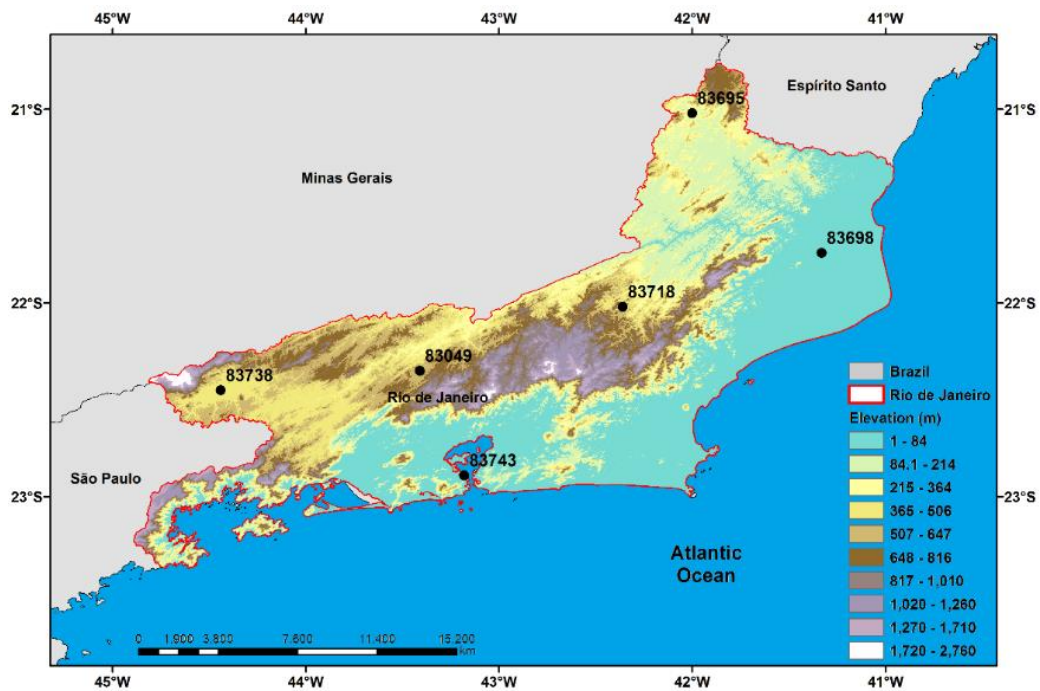


Figura 1. Mapa de elevação e localização das estações meteorológicas convencionais utilizadas no estado do Rio de Janeiro.

2.2. Clima

O clima predominante do Estado do Rio de Janeiro é o Tropical Úmido. No entanto, o Estado apresenta uma diversidade climática devido à variedade de ambientes como serras, planaltos de altitude e baixadas litorâneas. Nas serras e planaltos predominam climas com temperaturas mais amenas e elevada precipitação. Já nas baixadas litorâneas, apresentam um clima com temperaturas elevadas e baixa precipitação. Sua classificação climática de acordo com Köppen abrange as categorias *Af* (tropical, sem estação seca, 2,1% do território do estado); *Am* (tropical de monções, 5,3% do território do estado); *Aw* (tropical com inverno seco, 44,1% do território do estado); *Cfa* (úmido com clima oceânico e inverno seco, 14,3% do território do estado); *Cfb* (úmido com clima oceânico e verão temperado, 9,4% do território do estado); *Cwa* (úmido com inverno seco e verão quente, 17,9% do território do estado); e *Cwb* (úmido com inverno seco e verão temperado, 6,9% do território do estado) (ALVARES et al., 2013).

2.3. Dados meteorológicos de superfície

Os dados de superfície diários utilizados são provenientes da rede de monitoramento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET – <http://www.inmet.gov.com.br>), disponíveis no Banco de Dados para Ensino e Pesquisa (BDMEP – <http://www.inmet.gov.com.br>) para as Estações Meteorológicas Convencionais (EMC) de seis municípios do estado do Rio de Janeiro: Campos dos Goytacazes, Itaperuna, Paty do Alferes, Cordeiro, Resende e Rio de Janeiro (Tabela 1, Figura 1). As estações foram selecionadas por disponibilizarem os dados meteorológicos necessários com poucas falhas, dentro da temporalidade de eventos de La Niña (julho de 2007 a julho de 2008), El Niño (julho de 2009 a março de 2010) e Neutralidade, de janeiro a dezembro de 2013. Utilizou-se séries diárias de: temperatura máxima e mínima do ar (°C), insolação diária (horas), umidade relativa do ar (%) e velocidade média do vento ($m s^{-1}$). A escala diária foi convertida para mensal, através do cálculo da média.

Tabela 1. Localização, código e classificação das estações meteorológicas convencionais no Estado do Rio de Janeiro. Legenda: EMC = Estações Meteorológicas Convencionais; OMM = Organização Meteorológica Mundial.

EMC	Código (OMM)	Classificação climática	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Campos dos Goytacazes	83698	Aw	21° 45' 14" S	41° 19' 26" W	75
Itaperuna	83695	Aw	21° 12' 18" S	41° 53' 16" W	193
Paty do Alferes	83049	Cfa	22° 25' 44" S	43° 25' 8" W	673
Cordeiro	83718	Cwa	22° 1' 44" S	42° 21' 39" W	560
Resende	83738	Cwa	22° 28' 8" S	44° 26' 49" W	701
Rio de Janeiro	83743	Am	22° 54' 10" S	43° 12' 28" W	85

2.4. El Niño Oscilação Sul (ENOS)

A presença da fase El Niño, La Niña ou neutralidade foi definida através da classificação do NOAA Climate Prediction Center (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Os eventos têm duração de aproximadamente um ano, não apresentando a mesma quantidade de meses e nem todos acontecem em anos consecutivos. Através da Tabela 2 disponibilizada pela NOAA com as informações sobre o período de atuação de cada evento do fenômeno ENOS, foi possível

verificar o intervalo de ocorrência dos eventos extremos de La Niña, El Niño e Neutralidade, em que os meses que tiverem valor de ONI (*Oceanic Niño Index*) maior ou igual a 0,5 °C foram considerados de El Niño e menor ou igual a -0,5 °C foram considerados de La Niña. Os anos são organizados em trimestres e os eventos são classificados pelas cores vermelha (El Niño), azul (La Niña) e preta (Neutralidade). Os eventos de La Niña aconteceram de julho de 2007 até junho de 2008, de El Niño de julho de 2009 até março de 2010 e o período de Neutralidade foi de janeiro até dezembro de 2013.

Tabela 2. Meses de El Niño (vermelho), La Niña (azul) e neutros (negrito) baseados no limite de +/- 0,5 °C para o Oceanic Niño Index (NOAA, 2018).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2007	0,7	0,3	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-1,1	-1,4	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,7	-0,5	-0,2	0,1	0,4	0,5	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6
2010	1,5	1,3	0,9	0,4	-0,1	-0,6	-1,0	-1,4	-1,6	-1,7	-1,7	-1,6
2013	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3

2.5. Método de Penman-Monteith ajustado (FAO-56)

A evapotranspiração de referência (ET_o , em mm d^{-1}) foi calculada através da equação de Penman-Monteith ajustada por Allen et al. (1998) (Equação 1), em que: Δ é a curva da pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é o balanço de radiação na superfície ($\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor na superfície do solo ($\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$); γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T é a temperatura média do ar a 2 metros ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento a 2 metros (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e e_a é a pressão de vapor atual (kPa).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

2.6. Equações empíricas

Sete equações empíricas foram avaliadas neste trabalho. Foi utilizado o método desenvolvido por Alexandris et al. (2006), baseado em radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa (Equação 2), em que: ET_o (mm dia^{-1}) (Equação 2) é a evapotranspiração estimada através dos estágios C_1 e C_2 (Equação 3, Equação 4) em que R_s é a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); e RH é a umidade relativa do ar (%).

$$ET_o = 0,057 + 0,227C_2 + 0,643C_1 + 0,0124C_1C_2 \quad (2)$$

$$C_1 = 0,6416 - 0,00784RH + 0,372Rs - 0,00264RsRH \quad (3)$$

$$C_2 = -0,0033 + 0,00812T + 0,101Rs + 0,00584RsT \quad (4)$$

As equações descritas a seguir foram desenvolvidas por Irmak et al. (2003), e são denominadas no presente trabalho como Irmak-1 (Equação 5), e Irmak-2 (Equação 6) em que: R_s é a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_n é a radiação solar global; e T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

$$ET_o = -0,611 + 0,149R_s + 0,079T \quad (5)$$

$$ET_o = 0,489 + 0,289R_n + 0,023T \quad (6)$$

As quatro equações de Valiantzas (2013) utilizadas são denominadas neste trabalho como Val-1 (Equação 7), Val-2 (Equação 8), Val-3 (Equação 9), e Val-4 (Equação 10) em que: T é temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); R_s é a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_h é umidade relativa (%); u é velocidade do vento (m s^{-1}); T_{min} é temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); e ϕ é a latitude em radianos.

$$ET_o = 0,0393R_s\sqrt{T + 95} - 0,19R_s^{0,6}\phi^{0,15} + 0,048(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right)u^{0,7} \quad (7)$$

$$ET_o = 0,0393R_s\sqrt{T + 95} - 0,19R_s^{0,6}\phi^{0,15} + 0,0037(T + 20)(1,12T - T_{min} - 2)^{0,7} \quad (8)$$

$$ET_o = 0,0393R_s\sqrt{T + 95} - 0,19R_s^{0,6}\phi^{0,15} + 0,078(T + 20)1 - \frac{RH}{100} \quad (9)$$

$$ET_o = 0,0393R_s\sqrt{T + 95} - 0,19R_s^{0,6}\phi^{0,15} + 0,037(T + 20)(1,12T - T_{min} - 2)^{0,7}U_{av}^{0,7} \quad (10)$$

2.7. Produto MOD16A2

O produto MOD16A2 foi obtido a partir do site *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/>) para o período de 2007-2013, com resolução temporal de 8 dias. As imagens compactadas no formato *Hierarchical Data Format*

(HDF) foram processadas através do *software Modis Reprojection Tool* (MRT), resultando em produto de evapotranspiração no formato GEOTIFF, com datum de referência WGS84, sistema geodésico.

A versão 1.5 coleção 6 (MOD16A2) é baseado na lógica da equação de Penman-Monteith que usa dados meteorológicos de reanálise diários em um intervalo de 8 dias (RUNNING et al., 2017a). O algoritmo MOD16, baseado na equação de Penman-Monteith, estima a evaporação do solo e transpiração da vegetação (RUNNING et al., 2017a; AGUILAR et al., 2018). A nova coleção 6 aborda melhorias como o cálculo simplificado da fração de cobertura vegetal (F_c), utilizando o produto via satélite MOD15A2 FPAR (fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida), cálculo do fluxo de calor do solo, particionando linearmente a radiação líquida recebida em relação a F_c e melhores estimativas de condutância estomática, resistência aerodinâmica e resistência do camada limite (RUNNING et al., 2017a; AGUILAR et al., 2018).

Utilizando o *software* ArcGis 10.5 converteu-se as imagens para escala mensal através de suas médias e seus números digitais foram convertidos para valores biofísicos utilizando o fator de conversão 0,1 (RUNNING et al., 2017a). Para que a estimativa fosse representativa, foi considerado o valor médio de evapotranspiração dentro de uma grade regular de (5_i =linhas x 5_j =colunas) pixels em torno de cada Estação Meteorológica Convencional, o preenchimento das falhas de evapotranspiração do produto MOD16 foram preenchidas com interpolação espacial por Inverse Distance Weighting (IDW).

2.8. Análises estatísticas

A evapotranspiração mensal derivada das equações empíricas e do produto orbital MOD16A2 foi comparada com a evapotranspiração de referência, obtida através do método de Penman-Monteith (FAO-56). Para isso, foram utilizados os indicadores propostos por Anjos et al. (2016) e Delgado et al. (2017): erro padrão da estimativa (EPE), coeficiente de determinação (R^2) e índice de concordância de Wilmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) (Tabela 3).

Tabela 3. Métodos estatísticos utilizados para avaliação dos métodos empíricos e orbital. P_i é o valor estimado de Evapotranspiração (mm d^{-1}) no dia i ; O_i é a evapotranspiração de referência no dia i ; n é o número de meses analisados; e \hat{O} é a evapotranspiração de referência média.

Estatística	Equação
Erro Padrão da Estimativa	$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n - 1}}$
Coefficiente de determinação de Pearson	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \hat{O})^2}$
Coefficiente de correlação de Pearson	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \hat{x})(y - \hat{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \hat{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}}$
Índice de Concordância de Wilmott	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{O} + O_i - \hat{O})^2}$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os períodos de El Niño, La Niña apresentaram maiores amplitudes dos valores de evapotranspiração em relação a Neutralidade. Os valores médios da evapotranspiração no Estado do Rio de Janeiro foram de $3,81 \text{ mm d}^{-1}$, $3,63 \text{ mm d}^{-1}$ e $3,37 \text{ mm d}^{-1}$ para os períodos de El Niño, La Niña e Neutralidade respectivamente (**Figura 2A**). A estimativa de evapotranspiração média apresentou diferenças significativas ($p=0,0036$) entre os períodos avaliados (**Figura 2A**). Estes valores foram significativamente menores para o período de Neutralidade comparados com os demais. Embora o período de El Niño apresente valores de evapotranspiração mais elevados, os mesmos não diferiram significativamente com o La Niña (**Figura 2A**).

Maiores valores de evapotranspiração tendem a ser observados em períodos de El Niño e em estações mais quentes do ano (PEREIRA et al., 2009; ANJOS et al., 2016; MORAES et al., 2018), sob influência de fatores como temperatura do ar, umidade e precipitação pluviométrica (MORAES et al., 2018). As elevadas temperaturas mínimas do Brasil no ano de 2009 podem ter influenciado o aumento da evapotranspiração para o período de El Niño avaliado nesta pesquisa (GUIMARÃES et al., 2012).

No geral, a evapotranspiração foi maior nos períodos de El Niño e La Niña que no período de Neutralidade, para os diferentes métodos avaliados (**Figura 2B**). Foi observado diferenças significativas ($p<0,0048$) da evapotranspiração entre todos os métodos analisados por período (**Figura 2C**). O método FAO-56 apresentou os maiores valores de evapotranspiração

de 5,04 mm d⁻¹, 4,88 mm d⁻¹ e 4,51 mm d⁻¹ para os períodos El Niño, La Niña e Neutralidade, respectivamente (**Figura 2B** e **Figura 2C**). Os valores médios de evapotranspiração mais próximos da estimativa do método FAO-56 foram apresentados pelo método empírico Irmak-2. Este método estimou valores médios de evapotranspiração de 4,51 mm d⁻¹, 4,23 mm d⁻¹ e 3,97 mm d⁻¹ respectivamente para os períodos El Niño, La Niña e Neutralidade (**Figura 2B** e **Figura 2C**). O método Irmak-1 estimou os menores valores médios de evapotranspiração entre todos os períodos, variando de 3,08 mm d⁻¹, 3,01 mm d⁻¹ e 2,75 mm d⁻¹ para El Niño, La Niña e Neutralidade respectivamente (**Figura 2B** e **Figura 2C**). Somente o produto MOD16A2 apresentou menores valores de evapotranspiração no período de La Niña em relação ao de Neutralidade (**Figura 2B** e **Figura 2C**). Contudo, foi possível constatar um padrão onde os maiores valores de evapotranspiração foram apresentados pelo método de referência da FAO-56 seguidos de forma decrescente de Irmak-2, Val-3, Val-4, Val-1, Val-2, MOD16A2, Alex e Irmak-1 para todos os períodos (**Figura 2C**).

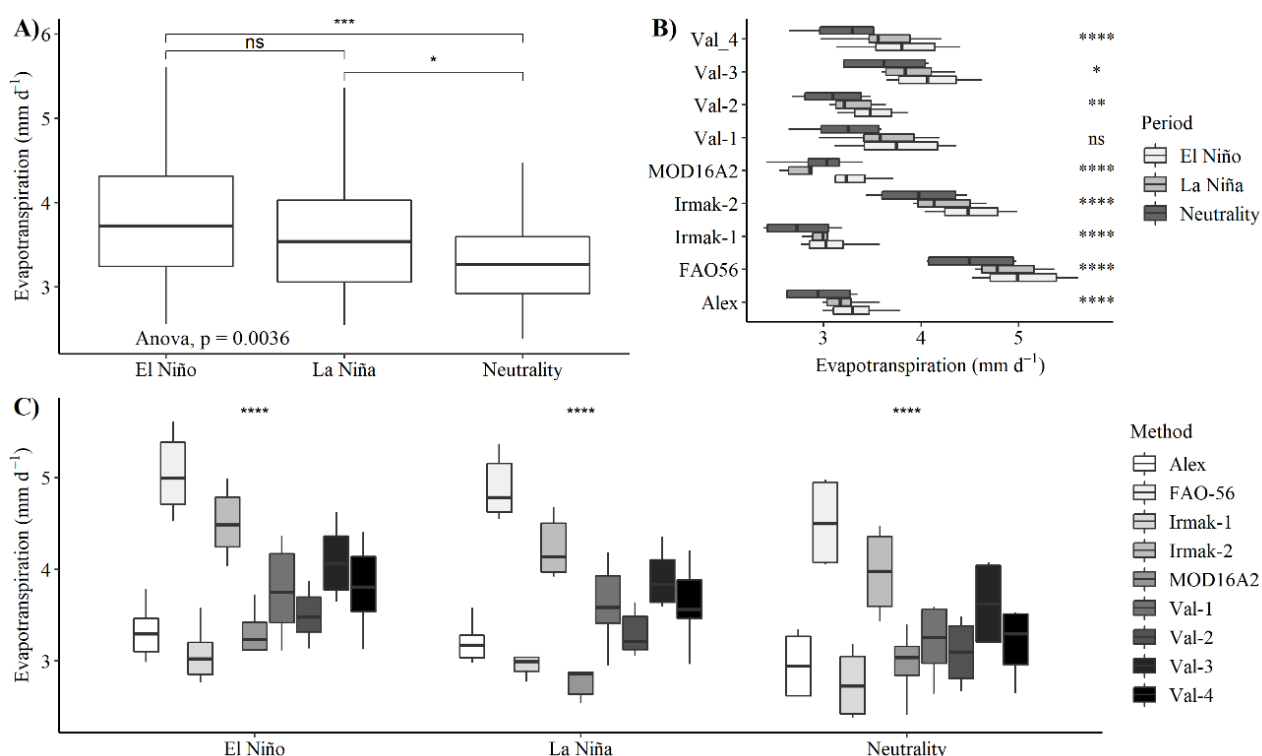


Figura 2. A) Valores de evapotranspiração de todos os métodos por período; B) Valores de evapotranspiração entre os métodos separados por período; C) Valores de evapotranspiração dos métodos em cada períodos. Asteriscos indicam diferença estatística pelo teste T de Student: * $\leq 0,05$; ** $\leq 0,01$; *** $\leq 0,001$; **** $\leq 0,0001$ e ns = sem significância estatística ($p > 0,05$).

Dentre todos os métodos testados, a evapotranspiração derivada do produto de sensoriamento remoto MOD16A2 apresentou o menor coeficiente de determinação (R^2) em relação à ETo de referência FAO-56 (Figura 3 e Figura 4). O método MOD16A2 teve, em geral, um baixo desempenho em termos de índice de concordância de Wilmott e altos valores para o Erro Padrão da Estimativa (Figura 4).

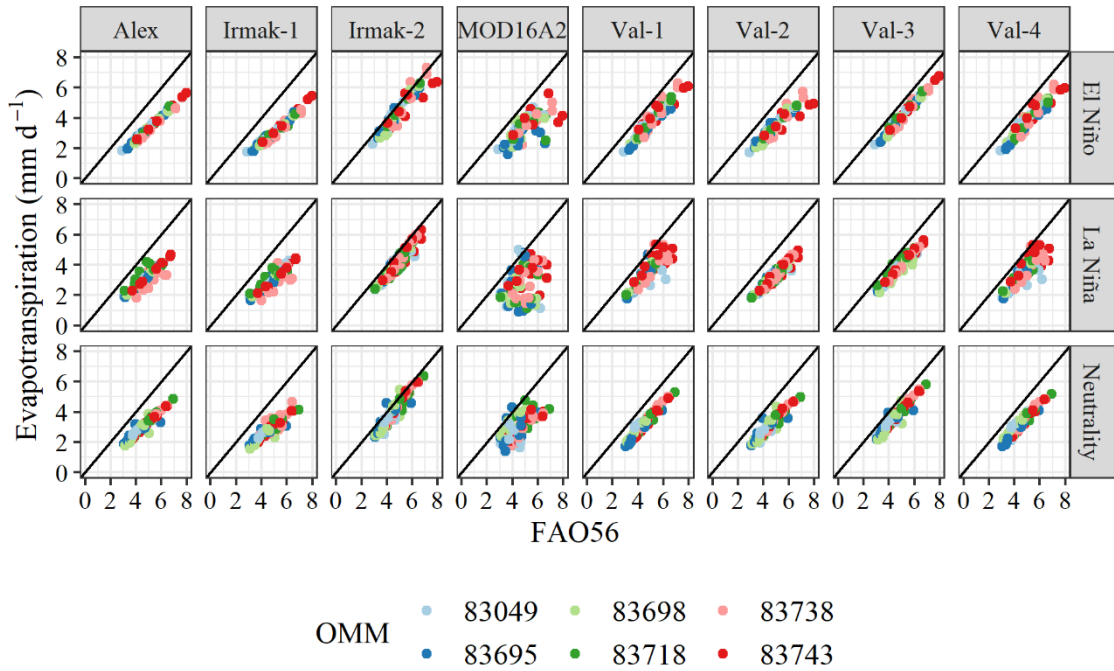


Figura 3. Scatterplots entre estimativas de evapotranspiração da FAO-56 e métodos empíricos para os três períodos analisados.

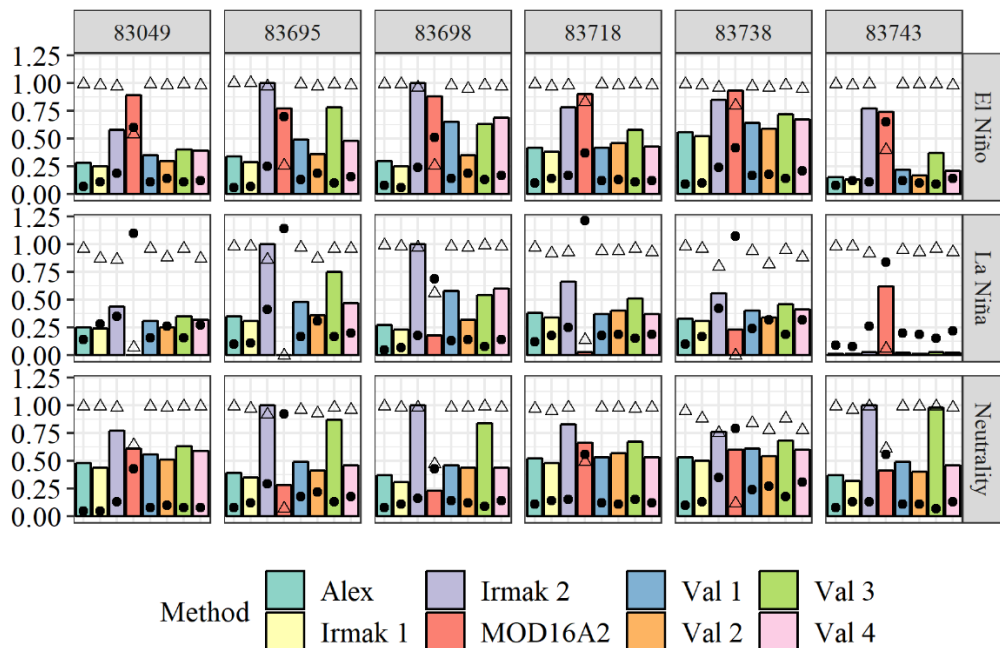


Figura 4. Valores do índice de concordância de Wilmott (barras), erro padrão da estimativa (mm d^{-1}) (pontos), coeficiente de determinação (triângulos) separados por período, métodos e estações meteorológicas.

O método empírico Irmak-2 apresentou alto coeficiente de determinação R^2 (0,75-0,99) em relação ao método FAO-56 (Figuras 3 e 4) e o melhor desempenho para o índice de concordância de Wilmott (**Figura 4**). O bom desempenho do método Irmak-2 pode ser em decorrência de seu desenvolvimento e calibração para áreas úmidas do estado da Flórida (EUA) (IRMAK et al., 2003), condições estas similares ao Estado do Rio de Janeiro. Uma hipótese para o desempenho superior do método Irmak-2 em relação à equação Irmak-1 pode ser que esta última utiliza a radiação solar incidente como um dos componentes do seu cálculo, variável que pode ter sua precisão comprometida em climas úmidos (IRMAK et al., 2003).

As limitações do produto derivado do sensor MODIS (MOD16A2) podem estar atribuídas aos efeitos de cobertura de nuvens e sombreamento de folhas (SRIVASTAVA et al., 2017). De acordo com Srivastava et al. (2017), estes estudos revelam que há a necessidade de padronização em escala regional dos produtos MODIS-ET usando os dados de PM ou lisímetros ou até mesmo uma possível modificação do algoritmo MOD16A2 embutido no MODIS para generalização.

No Noroeste do México, Aguilar et al. (2018) também encontraram subestimativas de ET quando comparados em cinco sítios com dados de vórtices turbulentos em zonas áridas e semiáridas sobre o cultivo de trigo e arbustos. Os autores relatam a necessidade de validações em outras áreas do México e não recomendam o uso do MOD16 para estas culturas localizadas nestas regiões.

Na Savana africana, África do Sul, Ramoelo et al. (2014) verificaram inconsistências do produto MOD16 quando comparados a dados de torres de fluxos, além disso ressaltam a importância de uma parametrização melhorada para condições locais.

3.1.Neutralidade

No período de neutralidade de 2013, para o método FAO-56, a estação 83695 (Itaperuna) apresentou a maior média para evapotranspiração anual ($4,98 \text{ mm d}^{-1}$), enquanto as estações 83718 (Cordeiro) e 83738 (Resende) apresentaram as menores médias ($4,06 \text{ mm d}^{-1}$) (Figura 3). A diferença entre as taxas de evapotranspiração pode ser decorrente da localização geográfica e altitude das estações (Tabela 1). Estes fatores geográficos influenciam diretamente a temperatura média anual e a umidade relativa regional, sendo estas variáveis climáticas contidas em quase todas as equações utilizadas. Itaperuna está localizada na região noroeste do Estado do Rio de Janeiro apresentando uma topografia mais baixa,

temperatura média anual de 24,8 °C e umidade relativa de 73,4% (INMET, 2018). Os municípios de Cordeiro e Resende estão inseridos centro-sul do Estado do Rio de Janeiro e possuem altitudes mais elevadas em relação a Itaperuna (Tabela 1). Este fator altitudinal proporciona temperaturas médias anuais entre 22,12 °C e 21,5 °C e umidades relativas entre 81,42 e 76,3%, respectivamente, para os municípios de Cordeiro e Resende. Tais variáveis climáticas podem ser consideradas altas em relação às normais históricas (1961-1990) visto que no ano de 2013 apresentou elevadas temperaturas em escala global no período de neutralidade. Este evento apresentou níveis similares ao evento de El Niño de 1998, sendo o ano com o registro de mais alta temperatura na Austrália (LEWIS; KAROLY, 2013), e de seca extrema na Califórnia (WANG et al., 2014).

As equações empíricas e o produto orbital MOD16A2 subestimaram a evapotranspiração se comparadas ao modelo FAO-56 no período de neutralidade (Figuras 2B e 2C). O método empírico Irmak-2 apresentou os resultados de evapotranspiração mais próximos ao modelo FAO-56, enquanto Irmak-1 demonstrou valores mais discrepantes (Figura 3). O produto MOD16A2 apresentou desempenho estatístico ruim em termos de coeficientes de determinação (R^2), apresentando valores de índice de concordância de Wilmott (d) próximos de 0,5 em diversas localidades, no entanto, sempre exibindo os maiores valores de Erro Padrão da Estimativa (EPE) (Figura 4). Os métodos Val-1, Val-2 e Val-4 apresentaram desempenhos estatísticos ótimos para R^2 (acima de 0,78) e EPE (abaixo de 0,31), enquanto o índice de concordância de Wilmott ficou em torno de 0,5 (Figuras 3 e 4). Os métodos Irmak-2 e Val-3 apresentaram os melhores índices estatísticos com alto R^2 (acima de 0,90), baixos valores de EPE (abaixo de 0,3), e altos índices de concordância de Wilmott (acima de 0,76) para todas as estações (Figura 4). Contudo, os métodos empíricos Irmak-2 e Val-3 se destacaram nas estações 83743 (Rio de Janeiro) 83698 (Campos dos Goytacazes) e 83695 (Itaperuna), apresentando os melhores índices estatísticos de EPE, R^2 e Wilmott. Portanto, para a estimativa de evapotranspiração no período de Neutralidade, os métodos de Irmak-2 e Val-3 se mostraram mais adequados utilizando os dados climáticos das estações 83743 (Rio de Janeiro) 83698 (Campos dos Goytacazes) e 83695 (Itaperuna).

3.2.La Niña

O evento de extremo de 2007-2008 é considerado de intensidade moderada a forte (MCCLATCHIE et al., 2008) e tipo CP (Central Pacific) (KAYANO et al., 2016). A estação 83695 (Itaperuna) apresentou a maior média de evapotranspiração anual (5,37 mm d⁻¹) e a

estação 83718 (Cordeiro) apresentou a menor média (4,55 mm d⁻¹), para o método FAO-56. Itaperuna apresentou 24,7 °C e 71,9% de umidade para o período. Cordeiro apresentou uma média de temperatura de 21,6 °C e 79,12% de umidade para o período.

Os métodos Val-1, Val-2, Val-3, e Val-4 apresentaram valores de R² e EPE satisfatórios, porém com índices de concordância de Wilmott baixos (Figura 4). O método Irmak-2 apresentou o melhor desempenho estatístico em termos de R² e EPE, tendo um bom desempenho para o índice de concordância de Wilmott para a maioria das localidades, exceto para a estação 83743 (Rio de Janeiro) (Figura 4). Na estação 83743 (Rio de Janeiro), a maioria dos métodos apresentou um índice de concordância de Wilmott próximo de 0,0 (Figura 4). Destaca-se a utilização do método de Irmak-2 para estimar a evapotranspiração pelas estações 83698 (Campos dos Goytacazes) e 83695 (Itaperuna), devido ao seu melhor desempenho estatístico apresentando um coeficiente de determinação R² (acima de 0,85), EPE (abaixo de 0,41) e valor máximo de índice de concordância de Wilmott (>0,99).

3.3.El Niño

O evento de El Niño entre os anos de 2009 e 2010 foi considerado moderado do tipo CP (Central Pacific) (KAYANO et al., 2016). O impacto deste evento de El Niño (2009-2010) provocou elevações na precipitação (TEDESCHI; GRIMM; CAVALCANTI, 2015; ANDREOLI et al., 2017) e o aumento das temperaturas médias no sudeste do continente sul-americano (BARROS; GRIMM; DOYLE, 2002; GUIMARÃES et al., 2012). Este processo esclarece a possível causa de os valores de evapotranspiração apresentarem taxas mais altas do que os outros períodos estudados (Figura 2A e 2C).

A estação 83695 (Itaperuna) apresentou a maior média de evapotranspiração anual através do método FAO-56 (5,61 mm d⁻¹), enquanto a estação 83739 (Resende) apresentou a menor média (4,52 mm d⁻¹). Assim como nos períodos de Neutralidade e de La Niña, todos os métodos utilizados neste estudo subestimaram as estimativas de evapotranspiração em comparação com método FAO-56 no período de El Niño (Figura 2C e 3). O método Irmak-2 apresentou as menores subestimativas, e o método Irmak-1 apresentou as maiores subestimativas.

O produto MOD16A2 apresentou melhores resultados do que nos períodos de La Niña e Neutralidade, com valores de R² e índice de concordância de Wilmott mais altos, ainda que mantendo altos valores de EPE (Figura 4). Os métodos Val-1, Val-2, Val-3 e Val-4 apresentaram valores de R² altos, baixo EPE e valores do índice de concordância de Wilmott

baixos (em torno de 0,4). Em geral, método Irmak-2 apresentou o melhor desempenho estatístico, com alto R^2 (acima de 0,96), baixo EPE (abaixo de 0,25), com alto índice de concordância de Wilmott para a maioria das estações (Figura 4). Nas estações 83695 (Itaperuna) e 83698 (Campos dos Goytacazes), o método Irmak-2 apresentou o melhor desempenho estatístico para o período, apresentaram altos valores de R^2 (0,97 e 0,96, respectivamente), coeficiente de concordância de Wilmott (1,00) e valores de EPE de 0,25 e 0,24, respectivamente.

4. CONCLUSÃO

Foi observado que, de modo geral, todos os métodos subestimaram a evapotranspiração em relação ao método FAO-56 para os períodos analisados. O método Irmak-2 apresentou as médias de evapotranspiração mais próximas às da FAO-56, bem como o melhor desempenho nas estatísticas utilizadas. O método MOD16A2 apresentou desempenho inferior à maioria dos métodos que utilizaram dados de superfície.

As médias de evapotranspiração do período de El Niño e La Niña não diferiram entre si, mas foram significativamente maiores do que o período de Neutralidade, para o método FAO-56. Este padrão também foi observado nas equações empíricas testadas e no produto de sensoriamento remoto.

Com os resultados expostos neste capítulo, fica evidente a importância da avaliação dos métodos empíricos de estimativa da ET antes de sua aplicação, bem como a influência das variáveis meteorológicas consideradas em suas equações neste fenômeno. Portanto, sugere-se a avaliação de outros métodos que tenham uma menor exigência de dados em relação ao método FAO-56, bem como a formação de uma base de dados para o ajuste de métodos empíricos para a estimativa da ET em âmbito regional.

CAPÍTULO II: Estimativas de evapotranspiração baseadas em dados de superfície e de satélite para o Parque Nacional do Itatiaia utilizando torre micrometeorológica.

RESUMO

Pesquisas em áreas naturais são fundamentais para se entender como o ciclo hidrológico se comporta em situações de baixo impacto antrópico e, dentro do contexto de Unidades de Conservação, pode embasar e contribuir para o manejo da área. Para isto, o presente estudo estimou e comparou estimativas de evapotranspiração através de diferentes métodos, utilizando sensores micrometeorológicos instalados em torre no Parque Nacional do Itatiaia e, através de imagens de sensoriamento remoto orbital, todas as estimativas foram comparadas com o método de referência FAO-56. Os dados utilizados para a pesquisa abrangem os meses de dezembro de 2017 até novembro de 2018. Os resultados indicam que todos os métodos, com exceção do Irmak-2, subestimaram a estimativa de evapotranspiração em relação ao método FAO-56. O método Irmak-2 apresentou o melhor desempenho estatístico, e Alex o pior. O produto MOD16A2 subestimou as estimativas do método de referência e apresentou baixo desempenho estatístico. O presente trabalho demonstra as diferenças de evapotranspiração por uso da terra dentro do território do Parque Nacional do Itatiaia, apontando as melhores equações empíricas de estimativa, bem como as limitações de uso de ferramenta de Sensoriamento Remoto.

Palavras-chave: FAO-56, evapotranspiração, Parque Nacional do Itatiaia, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Research in natural areas is fundamental to understanding how the hydrological cycle is behaves in situations of low anthropic impact and, within the context of Units of Conservation, can support and contribute to the management of the area. For this, the present study estimated and compared estimates of evapotranspiration through different methods, using micrometeorological sensors installed in a tower in the Itatiaia National Park and through orbital remote sensing images, all estimates were compared with the reference method FAO-56. The data used for the research cover the months of December 2017 until November 2018. The results indicate that all methods, with except for Irmak-2, underestimated the estimate of evapotranspiration in relation to the method FAO-56. The Irmak-2 method showed the best statistical performance, and Alex the worst. The product MOD16A2 underestimated the estimates of the reference method and showed low statistical performance. The present work demonstrates the differences in evapotranspiration by land use within the territory of the Itatiaia National Park, pointing out the best equations for empirical estimation, as well as the limitations of using a Remote Sensing tool.

Keywords: FAO-56, evapotranspiration, Itatiaia National Park, sensing remote.

1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é o bioma mais ameaçado do Brasil, originalmente ocupando 12% do território nacional (1,200,000 km²), hoje reduzida para cerca de 7% da sua extensão original e em sua maior parte muito fragmentada (VARJABEDIAN, 2010; SOS MATA ATLÂNTICA/INPE, 2014). A falta de informações sobre estes territórios vulneráveis se estabelece como uma limitação às estratégias de adaptação na região do território brasileiro que concentra 70% da população (FOLLADOR et al., 2018). Sendo assim, os fragmentos de vegetação do bioma se tornam importantes objetos de pesquisa, principalmente no tocante ao seu papel na regulação hídrica e manutenção de microclimas (SALATA et al., 2017; SOUZA et al., 2018).

A evapotranspiração é um componente vital do ciclo hidrológico, sendo responsável por cerca de 60% do retorno da água precipitada para a atmosfera (SONG et al., 2018), tendo sua estimativa se tornado cada vez mais importante no contexto do aumento na demanda dos recursos hídricos (HERMAN et al., 2018). A sua medição é importante, também, para acompanhar o impacto que o aumento da temperatura e diminuição da umidade, decorrentes das mudanças climáticas terão sobre ecossistemas terrestres sensíveis a secas (STEIDLE et al., 2015; MARIANO et al., 2018). Sendo tradicionalmente usada para o planejamento de irrigação, as estimativas de evapotranspiração em florestas naturais são importantes para acompanhamento do estado destes ambientes e para a calibração de métodos de estimativa orbital que podem ser utilizados em amplas áreas (NAGLER et al., 2005).

O estudo do tema é vital dentro do contexto das mudanças climáticas, em que existe grande incerteza no modo como a disponibilidade de água e os padrões de precipitação e evapotranspiração serão afetados (KINGSTON et al., 2009). O desenvolvimento de estudos de avaliação dos métodos de estimativa de evapotranspiração pode, a médio prazo, ser importante para se encontrar o método mais apropriado às variações meteorológicas futuras (VALIPOUR et al., 2017).

Diversas áreas naturais foram utilizadas para calibrar estimativas orbitais. Nagler (2013) utilizou torres de fluxo instaladas no Arizona (EUA) para calibrar um algoritmo de estimativa com utilização de índices de vegetação. As torres do LBA (Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) também foram utilizadas para calibração de produtos orbitais do sensor MODIS (RUNNING et al., 2017b). Porém, é necessário avaliar a qualidade da representatividade da evapotranspiração em diferentes áreas. Para isso já foram utilizadas torres

de fluxo instaladas na Amazônia (MOREIRA; SANTINI; RUHOFF, 2018) e estações meteorológicas convencionais (DELGADO et al., 2017).

Várias equações empíricas foram desenvolvidas e testadas ao longo dos anos, por exemplo: Valiantzas (2013) desenvolveu equações que utilizam temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa, e velocidade do vento; Irmak et al. (2003) criaram e desenvolveram equações que estimam a evapotranspiração utilizando radiação solar e temperatura média; Alexandris et al. (2006) desenvolveram uma equação baseada apenas em radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa. A avaliação destas equações já foi feita para o estado do Acre (DELGADO et al., 2017), sendo necessário ampliá-las para áreas de diferentes condições climáticas.

A estimativa de evapotranspiração modelada através de dados climáticos mais utilizada e confiável até o momento, foi a elaborada por Allen et al. (1998), que reduziu o cálculo da evapotranspiração de referência ao cálculo de uma equação modificada de Penman-Monteith, tornando-se o método de padrão para a maioria dos estudos de hidrologia aplicada (PEREIRA et al., 2015). No entanto, alguns dos dados requeridos para a computação da equação podem não estar disponíveis, especialmente em países em desenvolvimento com uma rede esparsa de estações meteorológicas, que invariavelmente apresentam falhas temporais (IRMAK et al., 2003; VALIANTZAS, 2013). Torna-se necessário, portanto, testar e validar equações que necessitem de menos dados de entrada ou sejam mais facilmente obtíveis.

No entanto, a representatividade de estimativas obtidas através de estações meteorológicas é limitada quando os estudos visam abranger grandes áreas. Neste contexto, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto se torna fundamental. Dentre as novas ferramentas disponíveis para o cálculo de evapotranspiração em ampla resolução espacial, está o sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo das plataformas orbitais Terra/Aqua e desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), o que representou um grande avanço ao disponibilizar gratuitamente produtos calculados e calibrados que expressam estimativas com ótima resolução espacial e temporal. O produto MOD16A2 tem como base teórica a aplicação do método Penman-Monteith em algoritmo que combina dados meteorológicos de reanálise e dados do sensor MODIS (RUNNING et al., 2017b).

A pesquisa corrente apresenta os primeiros resultados da utilização de sensores micrometeorológicos no Parque Nacional do Itatiaia, uma área de significativa preservação florestal que fornecerá dados essenciais para acessar a qualidade de métodos de estimativa orbital existentes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O Parque Nacional do Itatiaia (PNI) é o mais antigo do Brasil (Figura 5), tendo sido criado pelo decreto nº 1.713, de 14 de junho de 1937. Localiza-se na serra da Mantiqueira, no maciço do Itatiaia, entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. O parque tem originalmente 11.943 hectares (ampliado para os atuais 28.083 hectares atuais, em 1982), altitudes entre 540 e 2.791 metros, abriga alguns dos picos mais altos do país, com predominância de altitudes em torno de 2000 metros e declividades predominantes em torno de 30 a 47% (BARRETO et al., 2013a). Seu objetivo original foi o de conservar o seu aspecto primitivo, seus recursos naturais e atender às necessidades de ordem científica (BARRETO et al., 2013a; RAMOS et al., 1982). Atualmente é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral (SNUC, 2000) com a gestão do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), subordinado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA).

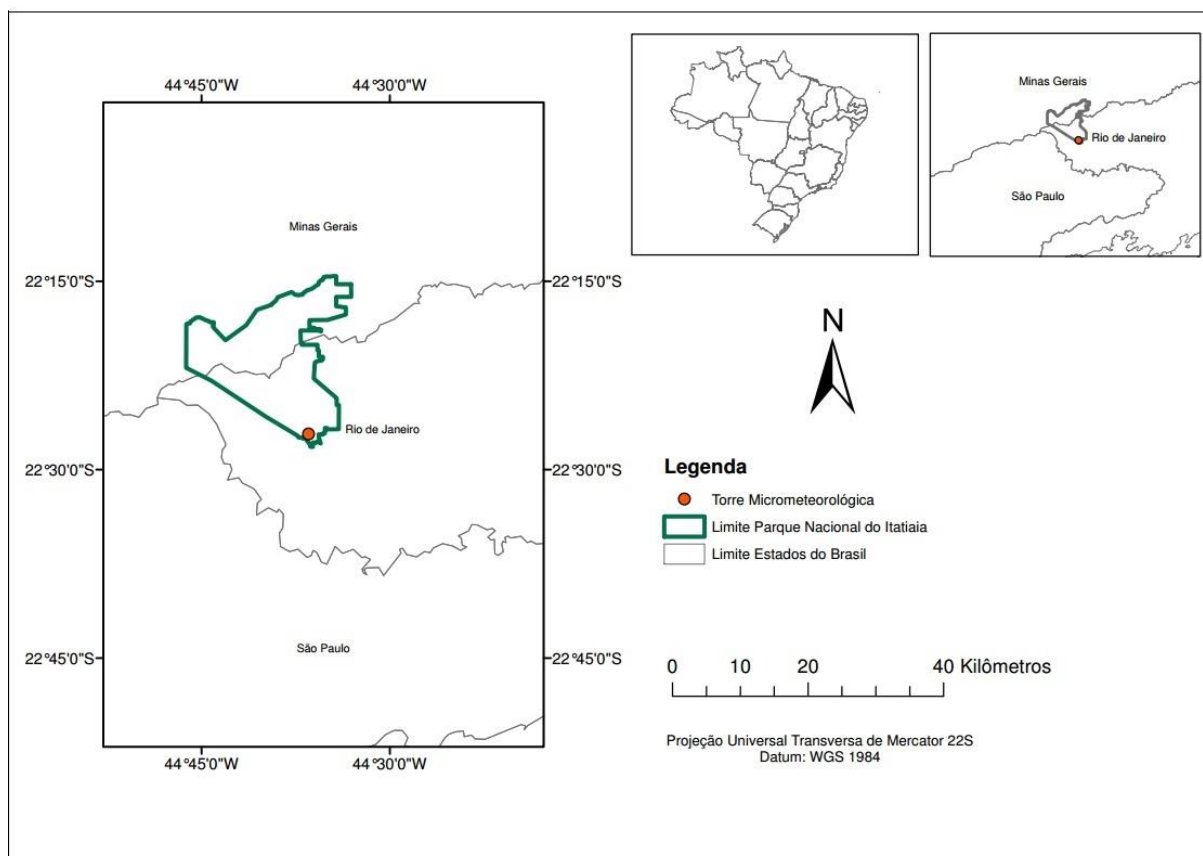


Figura 5. Localização geográfica da área de estudo e da torre micrometeorológica instalada nas dependências do Parque Nacional do Itatiaia.

De acordo com a classificação de Köppen, o domínio climático do município de Itatiaia é Tropical com inverno seco e verão quente (Cwa) (ALVARES et al., 2013). Para a área do PNI, o domínio é o mesotérmico com verão brando e estação chuvosa no verão (Cwb) e mesotérmico com verão brando sem estação seca (Cpb). Como a orografia é um fator determinante no clima, a condição Cwb acontece, geralmente, nas partes elevadas da montanha (cotas altimétricas acima de 1.600 metros), enquanto a Cpb ocorre nas partes baixas das encostas (BARRETO et al., 2013a).

As unidades dos grandes domínios morfoestruturais representativas da região sudeste, que compõem e influenciam as características climáticas da região do Parque Nacional do Itatiaia, são representadas pelas formações do Alto Rio Grande, da Serra do Mar, do Paraíba do Sul e a Serra da Mantiqueira. Na região do PNI, sob influência da Serra da Mantiqueira, formase um enorme bloco montanhoso de rochas intrusivas, o maciço do Itatiaia, que em seu ponto culminante, o pico do Itatiaiuçu, nas Agulhas Negras, atinge 2.787 metros de altitude (BARRETO et al., 2013b).

2.2.Sensores micrometeorológicos instalados na torre do PNI

A instalação da torre ocorreu no ano de 2015 próximo a Sede Administrativa do PNI entre as coordenadas 22° 27' 10.83" S, 44° 36' 28.51" W (Figura 6). Os sensores micrometeorológicos foram instalados na torre ao longo de 2016 e a partir de 2017 a coleta de dados foram iniciadas.

O local onde a torre foi instalada está situado a uma altitude de 835 metros. Cerca de 90% do uso e cobertura do solo da área de abrangência da torre é coberta por Floresta Ombrófila Densa Montana em diferentes estágios de sucessão. No geral, o estrato florestal apresenta uma altura média estimada de 15 metros e com dossel contínuo. O restante da área de abrangência é composto por construções pequenas, ruas e rios estreitos (>10%).



Figura 6. Torre micrometeorológica instalada no Parque Nacional do Itatiaia.

Os dados utilizados foram coletados através dos sensores micrometeorológicos acoplados na torre ao longo dos seus 30 metros de altura (**Figura 7**). Os dados de velocidade do vento (m s^{-1}) foram coletados através do sensor *Gill WindSonic*, instalado à altura de dez metros. Para captação de dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) foram utilizados dois sensores sonda modelo HC2S3 da empresa *Campbell Scientific*, instalados na torre na altura de dez e dois metros. Os dados coletados pelos sensores de umidade relativa do ar, temperatura do ar e vento foram compilados e armazenados em *datalogger CR3000* da empresa *Scientific Campbell*. A torre conta com três sensores de fluxo de calor no solo HFP01 e um sensor de infravermelho SI-111 na altura de 25 metros, que não foram utilizados nesta pesquisa.

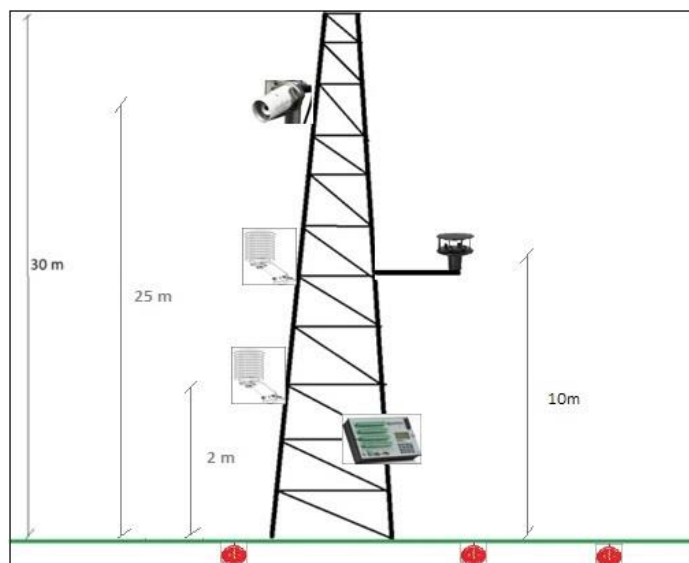


Figura 7. Esquema de torre com sensores micrometeorológicos instalada no Parque Nacional do Itatiaia.

2.3. Uso e cobertura da terra

Imagens de alta resolução espacial da plataforma orbital IKONOS (1 m Pancromática e 4 m Multiespectral) de julho de 2001 foram utilizadas para classificação de cobertura da terra para todo o perímetro do Parque Nacional do Itatiaia, sendo dividido em sete classes através de método manual com confirmação em campo (**Figura 8**) (HIPARC, 2011; DELGADO et al., 2018). As classes de vegetação foram classificadas conforme o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012). Através do software ArcGis 10.5, foi analisado a distribuição espacial da evapotranspiração em relação às sete classes de cobertura da Terra encontradas dentro da área de estudo.

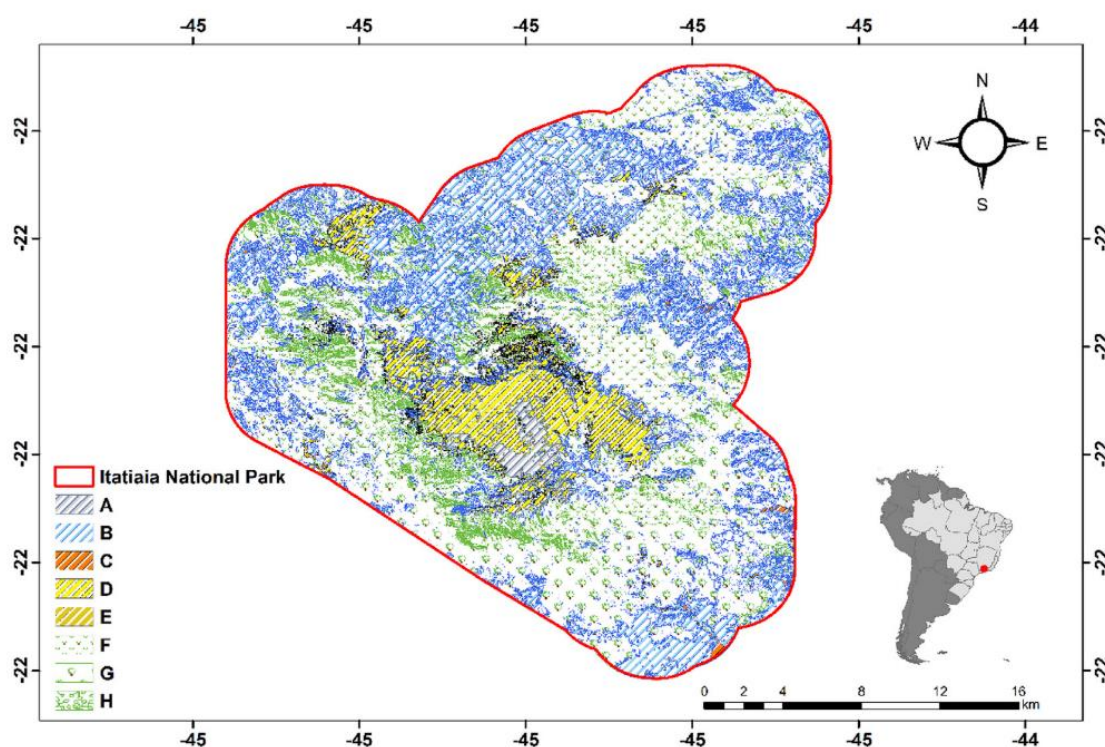


Figura 8. Localização geográfica e uso e ocupação do solo do PNI. (A) Afloramento rochoso, (B) Agropecuária, campo antrópico e outros campos, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (E) Floresta Ombrófila Densa Alto Montana, (F) Floresta Ombrófila Densa Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Sub Montana, Refúgio vegetacional (H). Fonte: Delgado et al. (2018).

A classe Afloramento rochoso (A) é identificada por áreas com ausência de vegetação, e presença de rochas expostas, principalmente nas áreas de grande altitude. Agropecuária, campo antrópico e outros campos (B) são áreas com alta interferência humana e implantação de culturas. A classe área urbana (C) corresponde às construções do município do Itatiaia, localizado nas imediações do PNI. De acordo com Vasconcelos (2011) os Campos de altitude

(D) ocorrem nas partes mais elevadas da Serra da Mantiqueira e do Mar, acima de 1500 metros de altitude, sendo formados predominantemente por comunidades herbáceo-arbustivas. De acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do IBGE (2012), as classes Floresta Ombrófila Densa Alto Montana (E), Floresta Ombrófila Densa Montana (F), e Floresta Ombrófila Densa Submontana (G) são formações florestais de montanha com dossel formado por árvores de até 30 metros, com variações dentre as classes de acordo com sua posição no relevo. A classe Refúgios vegetacionais (H) corresponde a áreas de vegetação com diferenças marcantes quanto à vegetação dominante da região, apresentando alta riqueza em espécies endêmicas, sendo mais comuns em altitudes tão elevadas quanto 1800 metros.

2.4. Métodos de estimativa de evapotranspiração

O método de Penman-Monteith parametrizado (Equação 1) (ALLEN et al., 1998) é considerado, neste trabalho, a fonte de dados observados. Em que: E_{To} é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Δ é a curva da pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é o balanço de radiação na superfície ($\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor na superfície do solo ($\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$); γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T é a temperatura média do ar a 2 metros ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento a dois metros (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e e_a é a pressão de vapor atual (kPa).

Valiantzas (2013) desenvolveu quatro equações empíricas simplificadas baseadas na equação de Penman-Monteith: a equação 7 (Val-1) utiliza dados de radiação solar incidente (R_s), temperatura máxima e mínima, umidade relativa (RH) e velocidade do vento (u). A equação 8 (Val-2) é uma simplificação da primeira, que não necessita de dados de umidade ou velocidade do vento. A equação 9 (Val-3) não requer velocidade do vento para cálculo, requerendo umidade relativa. A equação 10 (Val-4) requer apenas umidade relativa, e valores de temperatura máxima e mínima. As equações desenvolvidas por Irmak et al. (2003) necessitam de dados de radiação solar incidente (R_s), temperatura média do ar (T) (Irmak-1) (Equação 5), radiação solar global (R_n) e temperatura média do ar (Irmak-2) (Equação 6). A equação 2 proposta por Alexandris et al. (2006) utiliza radiação solar incidente (R_s), temperatura do ar (T) e umidade relativa (RH).

2.5. Produto MOD16A2

Os valores de evapotranspiração por sensoriamento remoto foram obtidos através do processamento de imagens do produto MOD16A2. Estas imagens foram adquiridas no site Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/>).

Para o período de 09 de dezembro de 2017 até 09 de novembro de 2018, obteve-se um total de 43 imagens, com resolução temporal de oito dias. O programa Modis Reprojection Tool (MRT) foi utilizado para transformar as imagens compactadas no formato Hierarchical Data Format (HDF), resultando em imagens no formato GEOTIFF com resolução espacial de 500 metros, em datum WGS84 (sistema geodésico).

Utilizou-se o programa ArcGis 10.5 para conversão de números digitais dos pixels em valores biofísicos de evapotranspiração através do fator de conversão de 0,1 (RUNNING et al., 2017b). O valor de evapotranspiração considerado foi o valor médio da área de 2,5 x 2,5 km ao redor da torre, para que haja maior relação com a área de abrangência da torre.

2.6. Processamento dos dados micrometeorológicos e MOD16A2

Os dados da torre micrometeorológica foram coletados entre 09 de dezembro de 2017 a 09 de novembro de 2018, totalizando 336 dias. Os dados foram coletados pelo Datalogger a cada hora, sendo convertidos para médias diárias. Em seguida, a evapotranspiração foi calculada através da equação FAO-56 e das equações empíricas. Posteriormente, foi feita a média da estimativa a cada oito dias, para que os resultados coincidisse com a resolução temporal do produto orbital MOD16A2 e pudesse ser feita a comparação estatística.

Em função da indisponibilidade de dados de insolação para a área do Parque Nacional do Itatiaia, foram coletados dados do município vizinho de Resende. Estes dados foram utilizados para a estimativa do balanço de radiação, que foi extrapolada para a área de estudo.

2.7. Análises estatísticas

Todos os métodos de estimativa de ETo analisados foram comparados estatisticamente com o método de referência FAO-56, seguindo a metodologia de Anjos et al., (2016) e Delgado et al., (2017) (Tabela 3). Para avaliação dos métodos, foram calculados o Erro Padrão da Estimativa (EPE), coeficiente de determinação de Pearson (R^2), Coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de Concordância de Wilmott (d) e o índice de desempenho c (Equação 11). O índice c combina os valores do Coeficiente de correlação de Pearson (r) e do índice de

Concordância de Wilmott (d) para se estabelecer uma classificação qualitativa da qualidade das estimativas, sendo proposto por Camargo & Sentelhas (1997) (Tabela 4).

$$c = r * d \quad (11)$$

Tabela 4. Classes de classificação do índice de desempenho c.

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas com a classe Floresta Ombrófila Densa Sub Montana tiveram a média mais alta de evapotranspiração (3,49 mm d⁻¹) devido à densidade de biomassa e ao porte dessa vegetação, enquanto as classes Afloramento rochoso e Refúgio vegetacional tiveram as médias mais baixas (2,54 mm d⁻¹) (Figura 9) devido à ausência de vegetação e elevada altitude, respectivamente. As demais classes apresentaram valores intermediários: Agropecuária, campo antrópico e outros campos (3,14 mm d⁻¹); Área urbana (3,20 mm d⁻¹); Campos de altitude (3,39 mm d⁻¹); Floresta Ombrófila Densa Alto Montana (3,09 mm d⁻¹); e Floresta Ombrófila Densa Montana (3,33 mm d⁻¹).

A tendência para a área analisada é de que a estimativa de evapotranspiração de áreas florestadas é, em geral, maior do que áreas não florestadas. Este padrão é encontrado em medições de evapotranspiração feitas por lísimetros de pesagem, e tem a tendência invertida em medições pelo método de Eddy Covariance (TEULING, 2018). Áreas com distúrbios na sua vegetação natural como as classes Agropecuária, campo antrópico e outros campos, e área urbana tendem a aumentar o albedo e modificar o balanço de energia, impactando a evapotranspiração nestas áreas e diminuindo seu potencial até que se estabeleçam as fases de sucessão mais avançadas (HIRANO; SUZUKI; HIRATA, 2017).

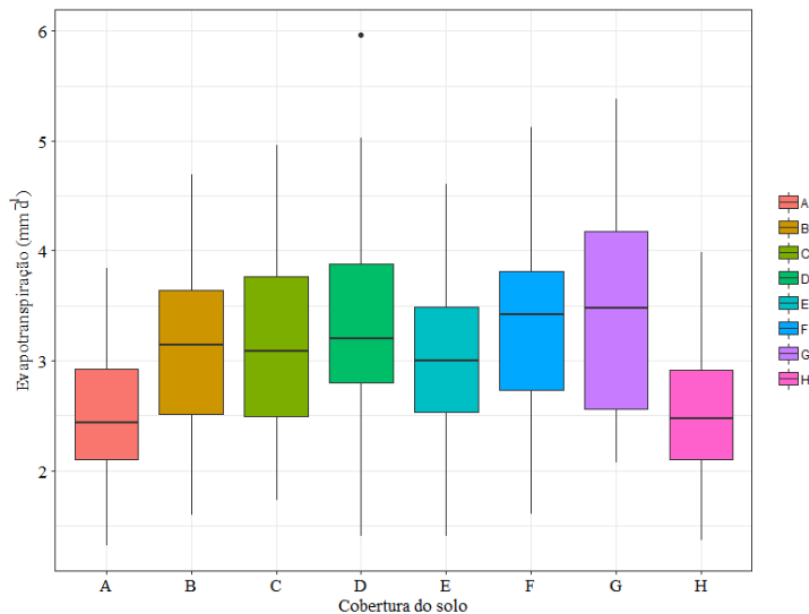


Figura 9. Boxplot da Evapotranspiração média por cobertura da terra para o período analisado.

A maioria dos métodos de evapotranspiração subestimou as estimativas em relação ao método FAO-56, com exceção do método Irmak-2 (Figura 10). O método FAO-56 teve uma estimativa de evapotranspiração média de 4,43 mm d⁻¹.

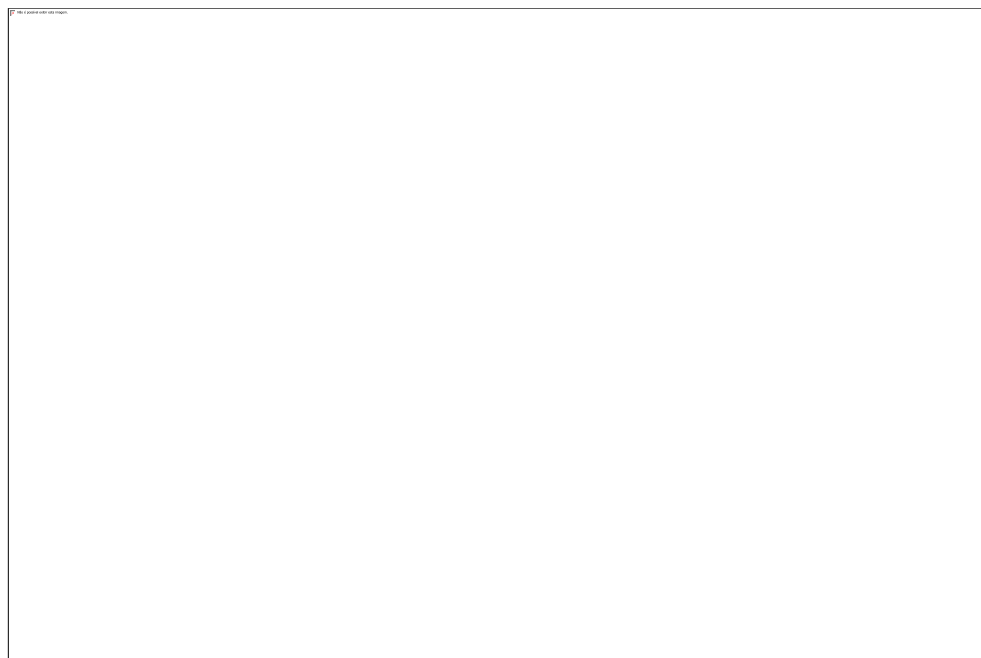


Figura 10. Valores de evapotranspiração para os oito métodos analisados para o Parque Nacional do Itatiaia. Área hachurada em cinza significa o desvio padrão da série.

O produto orbital MOD16A2 teve uma média de 3,31 mm d⁻¹ e teve o pior valor de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,43$), mostrando uma baixa correlação com os dados de

referência do método FAO-56. O método também apresentou o maior valor de Erro Padrão da Estimativa (EPE) ($0,75 \text{ mm d}^{-1}$), com um baixo valor de coeficiente de determinação de Wilmott (0,57) e um coeficiente c com valor de 0,38, sendo considerado “péssimo” em relação ao seu desempenho comparado ao método FAO-56 (Tabela 5). Segundo Autovino et al. (2016), a baixa performance do produto MOD16A2 está relacionada com a variabilidade espacial e a necessidade de validação local, resultando em subestimativas nos valores de evapotranspiração e baixo desempenho estatístico.

Tabela 5. Análises estatísticas dos métodos analisados em comparação com o método de referência.

	R ²	r	EPE (mm d ⁻¹)	d	c	Classificação de c
MOD16A2	0,43	0,66	0,75	0,57	0,38	Péssimo
Val-1	0,95	0,97	0,16	0,59	0,57	Sofrível
Val-2	0,90	0,95	0,24	0,58	0,55	Sofrível
Val-3	0,92	0,96	0,21	0,68	0,66	Mediano
Val-4	0,85	0,92	0,29	0,62	0,58	Sofrível
Irmak-1	0,89	0,94	0,22	0,70	0,66	Bom
Irmak-2	0,95	0,97	0,14	0,73	0,71	Bom
Alex	0,88	0,94	0,19	0,49	0,46	Mau

O método de Alex foi o que mais subestimou os dados de referência, com uma média de $2,75 \text{ mm d}^{-1}$, apresentando coeficiente de determinação de 0,88 e valor de EPE de $0,19 \text{ (mm d}^{-1}\text{)}$, relativamente baixo em comparação com outros métodos, mostrando um baixo coeficiente de Wilmott (0,49) Estes resultados demonstram uma baixa exatidão do método Alex em comparação com a FAO-56.

O método Irmak-2 superestimou a evapotranspiração em comparação com o método de referência FAO-56, obtendo uma média de $5,29 \text{ mm d}^{-1}$ para o período analisado. Portanto, mostrou-se o mais bem ajustado em termos estatísticos, com R² de 0,95, tendo menor valor de Erro Padrão da Estimativa ($0,14 \text{ mm d}^{-1}$), coeficiente de Wilmott com valor de 0,73 e um índice c de 0,71, sendo classificado com “Bom”. Dos métodos que subestimaram a estimativa encontrada pelo método de referência, o Irmak-1 foi o que mais se aproximou daquele, com média de $3,53 \text{ mm d}^{-1}$, tendo desempenho estatístico bastante adequado com valor de R² de 0,95, EPE de $0,22 \text{ mm d}^{-1}$, d de 0,70, e coeficiente c de 0,66, classificado como “Bom”. Em estudo conduzido na região da Serra da Mantiqueira, Pereira et al. (2009) concluíram que métodos que empregam radiação solar apresentaram um melhor desempenho do que métodos que utilizaram apenas dados meteorológicos, como temperatura do ar, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho.

Os métodos propostos por Valiantzas (2013) tiveram desempenho médio: o método Val-3 teve média de 3,40 mm d⁻¹; Val-4, média 3,23 mm d⁻¹; Val-1, média 3,09 mm d⁻¹ e Val-2, média 3,04 mm d⁻¹.

Testando as mesmas equações empíricas para as estações no estado do Acre, Delgado et al. (2017) encontraram resultados semelhantes, com o método Irmak-2 superestimando os valores de evapotranspiração em relação à FAO-56, e demais métodos fazendo subestimativas. O desempenho estatístico das equações empíricas aponta, também, para o melhor ajuste da equação Irmak-2 e pior desempenho da equação Alex.

4. CONCLUSÃO

Com a metodologia empregada neste estudo foi possível determinar quais métodos de estimativa de evapotranspiração foram mais consistentes.

Com exceção do método Irmak-2, todos os métodos empíricos subestimaram a evapotranspiração em comparação ao método FAO-56. Entre os métodos empíricos, Irmak-2 apresentou o melhor desempenho estatístico, seguido dos métodos Irmak-1 e Val-3. O método Alex apresentou as maiores subestimativas e o pior desempenho estatístico. O produto orbital MOD16A2 subestimou a evapotranspiração de referência e apresentou baixo desempenho em relação as estatísticas utilizadas.

Para que as estimativas dos ambientes em estudo possam ser cada vez mais significativas, é necessário expandir os pontos de amostragem. Neste sentido, a instalação de sensores em novas localidades, seja através de institutos oficiais de previsão do tempo ou através de institutos de pesquisa acadêmica, contribui para a disponibilização de novos dados significativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, A. L.; FLORES, H.; CRESPO, G.; MARÍN, M. I.; CAMPOS, I.; CALERA, A. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2018.

ALEXANDRIS, S.; KERKIDES, P.; LIAKATAS, A. Daily reference evapotranspiration estimates by the “Copais” approach. **Agricultural Water Management**, v. 82, n. 3, p. 371–386, 2006.

ALLEN, R. G.; LUIS, S. P.; RAES, D.; SMITH, M. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **Irrigation and Drainage**, v. 300, n. 56, p. 300, 1998.

ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 1–34, 1994.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AN, S.-I. Impact of Pacific Decadal Oscillation on Frequency Asymmetry of El Niño and La Niña Events. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 5, p. 493–494, 19 maio 2018.

ANDREOLI, R. V.; DE OLIVEIRA, S. S.; KAYANO, M. T.; VIEGAS, J.; DE SOUZA, R. A. F.; CANDIDO, L. A. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374–1390, mar. 2017.

ANJOS, A. W. dos; DELGADO, R. C.; LYRA, G. B.; SOUZA, L. P. de; SUHETT, E. R. Evapotranspiração a partir de produtos orbitais para o estado do Rio de Janeiro. **Irriga**, n. 1, p. 126–140, 2016.

AUTOVINO, D.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G. Modelling bulk surface resistance by MODIS data and assessment of MOD16A2 evapotranspiration product in an irrigation district of Southern Italy. **Agricultural Water Management**, v. 167, p. 86–94, 2016.

BARRETO, C. G.; CAMPOS, J. B.; ROBERTO, D. M.; ROBERTO, D. M.; SCHWARZSTEIN, N. T.; ALVES, G. S. G.; COELHO, W. Plano de Manejo: Parque Nacional do Itatiaia - Encarte 3 -. **Relatório Técnico Instituto Chico Mendes**, p. 215, 2013a.

BARRETO, C. G.; CAMPOS, J. B.; ROBERTO, D. M.; ROBERTO, D. M.; SCHWARZSTEIN, N. T.; ALVES, G. S. G.; COELHO, W. Plano de Manejo: Parque Nacional

do Itatiaia. Encarte 2. **Relatório Técnico Instituto Chico Mendes**, p. 117, 2013b.

BARROS, V. R.; GRIMM, A. M.; DOYLE, M. E. Relationship between Temperature and Circulation in Southeastern South America and its Influence from El Niño and La Niña Events. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 80, n. 1, p. 21–32, 2002.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.; HOLSTAG, A. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, 1998.

CAI, W.; BORLACE, S.; LENGAINNE, M.; VAN RENSCH, P.; COLLINS, M.; VECCHI, G.; TIMMERMANN, A.; SANTOSO, A.; MCPHADEN, M. J.; WU, L.; ENGLAND, M. H.; WANG, G.; GUILYARDI, E.; JIN, F. F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 2, p. 111–116, 2014.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Performance evaluation of different potential evapotranspiration estimating methods in the State of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 1997.

CAMARGO, Â. P. de; DE CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 125–137, 2000.

CARVALHO, L. G. de; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração De Referência: Uma Abordagem Atual De Diferentes Métodos De Estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

CHANG, J. H. An evaluation of the 1948 thornthwaite classification. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 49, n. 1, p. 24–30, 1959.

DELGADO, R. C.; PEREIRA, M. G.; TEODORO, P. E.; DOS SANTOS, G. L.; DE CARVALHO, D. C.; MAGISTRALI, I. C.; VILANOVA, R. S. Seasonality of gross primary production in the Atlantic Forest of Brazil. **Global Ecology and Conservation**, v. 14, p.392, abr, 2018.

DELGADO, R. C.; SOUZA, L. P. de; PEREIRA, G.; ALMEIDA, C. T. de; RODRIGUES, R. de Á. Orbital and surface evapotranspiration compared to FAO-56 standard in state of Acre. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 547–559, 2017.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 24, p. 144, 1977.

FOLLADOR, M.; VIEZZER, J.; EGLER, M.; BECHER, M.; HACH, L.; PEREIRA, V.; ROCHA, A.; VAZ, C.; VIEIRA, T.; AMONI, M.; OTHERS. Modelling Potential Biophysical Impacts of Climate Change in the Atlantic Forest: Closing the Gap to Identify

Vulnerabilities in Brazil. **Climate Change Adaptation in Latin America**, n. January, p. 33–64, 2018.

GUIMARÃES, D. P.; REIS, R.; SUL, E. N.; NIÑA, L.; ENOS, O.; SUL, E. N. Impactos do Fenômeno Enos Sobre a Temperatura no Brasil. **Revista Espinhaço**, v. 1, n. 1, p. 34–40, 2012.

HA, W.; SPRINGER, A. E.; DONNELL, F. C. O.; KOLB, T. E. Sensitivity of Evapotranspiration Models to Onsite and Offsite Meteorological Data for a Ponderosa Pine Forest. **Current perspective to predict actual evapotranspiration**, 2017.

HERMAN, M. R.; NEJADHASHEMI, A. P.; ABOUALI, M.; HERNANDEZ-SUAREZ, J. S.; DANESHVAR, F.; ZHANG, Z.; ANDERSON, M. C.; SADEGHI, A. M.; HAIN, C. R.; SHARIFI, A. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 39–49, 2018.

HIPARC, 2011. Projeto IKONOS e Itatiaia. Processamento Digital de Imagens. Relatório Técnico, julho, 2011.

HIRANO, T.; SUZUKI, K.; HIRATA, R. Energy balance and evapotranspiration changes in a larch forest caused by severe disturbance during an early secondary succession. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 457–468, 2017.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. p. 150, 2012.

IRMAK, S.; IRMAK, A.; ALLEN, R. G.; JONES, J. W. Solar and Net Radiation-Based Equations to Estimate Reference Evapotranspiration in Humid Climates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, n. 5, p. 336–347, 2003.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. De; GARCIA, S. R.; ALAN, J. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. p. 7–12, 2016.

KINGSTON, D. G.; TODD, M. C.; TAYLOR, R. G.; THOMPSON, J. R.; ARNELL, N. W. Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 20, p. 3–8, 2009.

LEWIS, S. C.; KAROLY, D. J. Anthropogenic contributions to Australia's record summer temperatures of 2013. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 14, p. 3708–3709, 2013.

LIU, S. M.; XU, Z. W.; ZHU, Z. L.; JIA, Z. Z.; ZHU, M. J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 24–38, 2013.

MARIANO, D. A.; SANTOS, C. A. C. dos; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.;

SCHILTMAYER, A. V.; TADESSE, T.; SVOBODA, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, n. September 2017, p. 129–143, 2018.

MCCLATCHIE, S.; GOERICKE, R.; KOSLOW, J. A.; SCHWING, F. B.; BOGRAD, S. J.; CHARTER, R.; WATSON, W.; LO, N.; HILL, K.; GOTTSCHALCK, J.; L'HEUREUX, M.; XUE, Y.; PETERSON, W. T.; EMMETT, R.; COLLINS, C.; GAXIOLA-CASTRO, G.; DURAZO, R.; KAHRU, M.; MITCHELL, B. G.; HYRENBACK, K. D.; SYDEMAN, W. J.; BRADLEY, R. W.; WARZYBOK, P.; BJORKSTEDT, E. The state of the California Current, 2007-2008: La Niña conditions and their effects on the ecosystem. **California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report**, v. 49, n. July 2016, p. 39–76, 2008.

MCPHADEN, M. J. Playing hide and seek with El Niño. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 9, p. 791–795, 2015.

MENDONÇA, J. C.; DE SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 275–279, 2003.

MIRANDA, R. D. Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. De; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Reliability of MODIS Evapotranspiration Products for Heterogeneous Dry Forest: A Study Case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, v. 2017, n. 14, 2017.

MORAES, S.; LOPES, S.; FANAYA, E. D.; MARINHO, V. G.; PEREIRA, F.; DEISIANE, C.; COSTA, O.; CHERRI, U.; FLORESTAL, E.; ESTADUAL, U. Comparative performance of empirical methods to estimate the reference evapotranspiration in Aquidauana, MS, Brazil. **Científica**. p. 143–150, 2018.

MOREIRA, A. A.; SANTINI, D.; RUHOFF, A. L. Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM em sítios de fluxos turbulentos do Programa LBA Evaluation of remotely sensed evapotranspiration products MOD16 and GLEAM in eddy covariance flux sites from LBA Pro. **Ciência e Natura**, v. 40, p. 112–118, 2018.

NAGLER, P. L.; GLENN, E. P.; NGUYEN, U.; SCOTT, R. L.; DOODY, T. Estimating Riparian and Agricultural Actual MODIS Enhanced Vegetation Index. **Remote Sensing**. p. 3849–3871, 2013.

NAGLER, P. L.; SCOTT, R. L.; WESTENBURG, C.; CLEVERLY, J. R.; GLENN, E. P.; HUETE, A. R. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced

Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 3, p. 337–351, 2005.

OKI, T.; KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. **Science**, v. 313, n. 5790, p. 1068–1072, 2006.

OVCHINNIKOV, M.; ACKERMAN, A. S.; AVRAMOV, A.; CHENG, A.; FAN, J.; FRIDLIND, A. M.; GHAN, S.; HARRINGTON, J.; HOOSE, C.; KOROLEV, A.; MCFARQUHAR, G. M.; MORRISON, H.; PAUKERT, M.; SAVRE, J.; SHIPWAY, B. J.; SHUPE, M. D.; SOLOMON, A.; SULIA, K. Intercomparison of large-eddy simulations of Arctic mixed-phase clouds: Importance of ice size distribution assumptions. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 6, n. 1, p. 223–248, mar, 2014.

PEREIRA, D. dos R.; YANAGI, S. de N. M.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da; SILVA, L. A. da. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2488–2493, 2009.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4–20, 2015.

RAMOELO, A.; MAJOZI, N.; MATHIEU, R.; JOVANOVIC, N.; NICKLESS, A.; DZIKITI, S. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. **Remote Sensing**, v. 6, p. 7406–7423, 2014.

RAMOS, P. C. M.; SOUZA, O. C. de; LIMA, A. A. de A.; SÁ, L. F. S. N. **Plano de Manejo: Parque Nacional do Itatiaia Relatório Técnico Instituto Chico Mendes**, 1982. .

RUNNING, S.; MU, Q.; ZAO, M.; MORENO, A. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. n. July, 2017a.

RUNNING, S. W.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. 2017b.

SALATA, F.; GOLASI, I.; PETITTI, D.; DE LIETO VOLLARO, E.; COPPI, M.; DE LIETO VOLLARO, A. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 30, p. 79–96, 2017.

SNUC. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. 2000. Lei Federal n. 9.985/2000. 13 p. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LeIs/L9985.htm>. Acesso em: 22 de dezembro de 2018.

SONG, X.; ZHU, K.; LU, F.; XIAO, W. Spatial and temporal variation of reference evapotranspiration under climate change: a case study in the Sanjiang Plain, Northeast China. **Hydrology Research**, v. 49, n. 1, p. 251–265, fev, 2018.

SOS MATA ATLÂNTICA/INPE. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica. **Fundação SOS Mata Atlântica e Instituto de Pesquisas Espaciais**, p. 1–61, 2014.

SOUZA, T. C. de O.; DELGADO, R. C.; MAGISTRALI, I. C.; DOS SANTOS, G. L.; DE CARVALHO, D. C.; TEODORO, P. E.; DA SILVA JÚNIOR, C. A.; CAÚLA, R. H. Spectral trend of vegetation with rainfall in events of El Niño-Southern Oscillation for Atlantic Forest biome, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 11, p. 688, 2018.

SRIVASTAVA, A.; SAHOO, B.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Evaluation of Variable-Infiltration Capacity Model Evapotranspiration Estimates in a River Basin with Tropical Monsoon-Type Climatology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. Icid, 2017.

STEIDLE NETO, A. J.; BORGES JÚNIOR, J. C.; ANDRADE, C. L. .; LOPES, D. C.; NASCIMENTO, P. T. Reference evapotranspiration estimates based on minimum meteorological variable requirements of historical weather data. **Chilean journal of agricultural research**, v. 75, n. 3, p. 366–374, 2015

TALSMA, C. J.; GOOD, S. P.; JIMENEZ, C.; MARTENS, B.; FISHER, J. B.; MIRALLES, D. G.; MCCABE, M. F.; PURDY, A. J. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 260–261, n. May, p. 131–143, 2018.

TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 8, p. 2045–2064, 2015.

TEULING, A. J. A Forest Evapotranspiration Paradox Investigated Using Lysimeter Data. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, 2018.

VALIANTZAS, J. D. Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 13–23, 2013.

VALIPOUR, M.; ALI, M.; SEFIDKOUHI, G.; SARJAZ, M. R. Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 50–60, 2017.

VARJABEDIAN, R. Lei da Mata Atlântica: Retrocesso ambiental. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 147–160, 2010.

VASCONCELOS, M. F. de. O que são campos rupestres e campos de altitude nos topos de montanha do leste do Brasil? **Brazilian Journal of Botany**, v. 34, n. 2, p. 241–246, 2011.

WANG, S.-Y.; HIPPS, L.; GILLIES, R. R.; YOON, J.-H. Probable causes of the abnormal ridge accompanying the 2013-2014 California drought: ENSO precursor and anthropogenic warming footprint. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 9, p. 3220–3226, 16 de maio, 2014.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995, 1985.