

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**DISSERTAÇÃO**

**Avaliação do produto MOD11A2 para o  
monitoramento da temperatura do dossel florestal  
em área de Mata Atlântica, Brasil**

**MELINA DANIEL DE ANDRADE**

**2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO PRODUTO MOD11A2 PARA O MONITORAMENTO  
DA TEMPERATURA DO DOSSEL FLORESTAL EM ÁREA DE MATA  
ATLÂNTICA, BRASIL**

**MELINA DANIEL DE ANDRADE**

*Sob a orientação do Professor*  
**Rafael Coll Delgado**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do título de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Meio Ambiente.

Seropédica, RJ  
Dezembro 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)

A553a Andrade, Melina Daniel de , 1986-  
Avaliação do produto MOD11A2 para o monitoramento da temperatura do dossel florestal em área de Mata Atlântica, Brasil / Melina Daniel de Andrade. - Paracambi, 2019.  
37 f.: il.

Orientador: Rafael Coll Delgado.  
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, 2019.

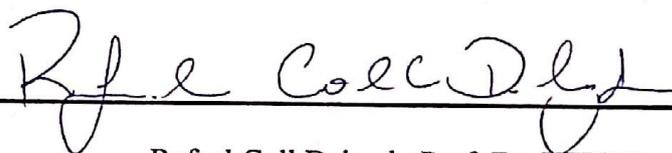
1. Sensoriamento Remoto. 2. Satélite Ambiental. 3. Temperatura da Superfície Terrestre. 4. Unidade de Conservação. I. Delgado, Rafael Coll, 1978-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

MELINA DANIEL DE ANDRADE

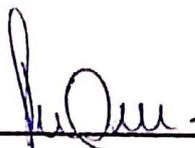
Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de Concentração Meio Ambiente.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/12/2019



---

Rafael Coll Delgado Prof. Dr. UFRRJ  
(Orientador)



---

Sady Junior Martins Costa de Menezes Prof. Dr. UFRRJ



---

Rafael de Ávila Rodrigues Prof. Dr. UFG

*Aos meus pais, Charles Sandres de Andrade e Marlei Moretto Daniel de Andrade, que me deram todo o suporte para enfrentar esse desafio.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que me enviou força para concluir cada etapa dessa caminhada, me mantendo sã e ilesa durante os momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Charles e Marlei, e minha irmã, Charlene, que são meu alicerce, e foram fundamentais ao me darem condições para seguir em frente e ir além do que eu imaginava poder, e ao meu namorado, Eduardo, por toda ajuda, apoio e incentivo.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Rafael Coll Delgado, por ter depositado a sua confiança em mim quando apareci do nada e solicitei sua orientação, e por todos os ensinamentos que foram essenciais para a elaboração dessa dissertação.

Aos colegas Raquel, Maria, Caio, João, Maristela, Elton, Mariane, Pedro e Carla pela parceria em diversos trabalhos durante esses dois anos de mestrado, que gerou não só bons frutos acadêmicos como também um forte laço de amizade. Obrigada especialmente a Raquel, Maria e Caio pelo convívio mais próximo e serem os responsáveis por me sentir acolhida novamente na UFRRJ.

Aos demais amigos do LSRACA pela troca de conhecimento e por todos os momentos de descontração.

Aos professores participantes da banca examinadora, pelo aceite na participação desta etapa e pelas contribuições dadas a este trabalho.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e Parque Nacional do Itatiaia pela autorização para instalação da Torre Micrometeorológica, o que possibilitou a execução dessa pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento do projeto relacionado a este estudo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela oportunidade e formação acadêmica.

A todos que de alguma forma contribuíram com esse trabalho.

## RESUMO

ANDRADE, Melina Daniel **Avaliação do produto MOD11A2 para o monitoramento da temperatura do dossel florestal em área de Mata Atlântica, Brasil**. 2019. 37p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

Os dosséis florestais são responsáveis por uma parcela significativa das trocas gasosas e de vapor d'água atmosférico, possuindo importante influência no equilíbrio do clima global. A análise da temperatura do dossel indica o comportamento fisiológico da vegetação em relação a variações climáticas. Dados orbitais de temperatura da superfície terrestre (TST), como os produtos do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), podem ser utilizados na medição da temperatura do dossel em escala regional e global. Entretanto, incertezas relacionadas a precisão dos dados orbitais fazem da validação desses produtos um passo essencial no estabelecimento de sua aplicabilidade. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo validar os dados de temperatura da superfície terrestre do produto MOD11A2 V006 a partir de dados de temperatura da superfície do dossel obtidos por sensor de radiação infravermelha instalado em área de floresta atlântica no Parque Nacional do Itatiaia (PNI). Para a validação do produto MOD11A2 foi realizada a análise comparativa entre os dados de TST obtidos através do sensor MODIS e os dados da temperatura do dossel obtido pelo sensor de radiação infravermelha SI-111 acoplado à Torre Micrometeorológica de 30 metros do PNI. A avaliação foi baseada no coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), viés médio (VM), raiz quadrática do erro médio (REM), e índice de concordância de Willmott ( $d$ ). Também foram analisadas as variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento) e a Temperatura da Superfície Terrestre, coletadas de janeiro a dezembro de 2018 no PNI. Os resultados mostram que o produto MOD11A2 superestima a temperatura do dossel no período diurno (VM variando de 1,56°C a 3,57°C) e subestima no período noturno (VM variando de -0,18°C a -4,22°C). No período diurno os trimestres correspondentes à estação seca apresentaram correlação muito alta ( $r = 0,74$  e  $0,86$ ) e os maiores valores do índice de concordância de Willmott ( $d = 0,70$  e  $0,64$ ). No período noturno o produto MOD11A2 não apresentou um bom desempenho para a estimativa da TST, principalmente no período chuvoso, apresentando correlação negativa e baixo índice de concordância nos meses de janeiro a março ( $-0,51$  e  $0,11$ ) e de outubro a dezembro ( $-0,07$  e  $0,18$ ). Dessa forma é possível afirmar que o produto MOD11A2 possui limitações para estimar a temperatura da superfície terrestre e que possíveis alterações no algoritmo deste produto possam ser realizadas para regiões de alta umidade atmosférica.

**Palavras-chave:** Satélite ambiental, Parâmetros biofísicos, Unidade de Conservação.

## ABSTRACT

ANDRADE, Melina Daniel **Evaluation of the MOD11A2 product for canopy temperature monitoring in the Brazilian Atlantic Forest**. 2019. 37p Dissertation (Master Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

The forest canopies are responsible for a significant portion of gas and water vapor exchange between plant and atmosphere, having an important influence on global climate balance. The canopy temperature analysis indicates the vegetation physiological behavior in relation to climatic variations. Remote sensing of Land Surface Temperature (LST), like the *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) sensor products, may be used to measure the canopy temperature on regional and global scale. However, uncertainties related to the accuracy of orbital data make the validation of these products an essential step in establishing their applicability. Therefore, this work aims to validate the MOD11A2 V006 product from canopy surface temperature data obtained by infrared radiation sensor installed in an Atlantic Forest area in Itatiaia National Park (PNI). For the validation of the MOD11A2 product, a comparative analysis between the LST data, obtained by the MODIS sensor, and the canopy temperature data, obtained by the SI-111 infrared radiation sensor coupled to the PNI Micrometeorological Tower, was performed. The evaluation was based on Pearson's correlation coefficient ( $r$ ), bias (VM), root mean square error (RMSE), and Willmott's index of agreement ( $d$ ). Meteorological variables (air temperature, air relative humidity and wind speed and direction) and Land Surface Temperature collected from January to December 2018 in the PNI were also analyzed. The results show that the MOD11A2 product overestimates the canopy temperature in the daytime (VM ranging from  $1.56^{\circ}\text{C}$  to  $3.57^{\circ}\text{C}$ ) and underestimates in the night time (VM ranging from  $-0.18^{\circ}\text{C}$  to  $-4.22^{\circ}\text{C}$ ). During daytime, the months corresponding to the dry season presented a very high correlation ( $r = 0.74$  and  $0.86$ ) and the highest values of the Willmott index of agreement ( $d = 0.70$  and  $0.64$ ). At night time, the MOD11A2 product did not present a good perform for the TST estimation, especially in the rainy season, presenting a negative correlation and low agreement index from January to March ( $-0.51$  and  $0.11$ ) and from October to December ( $-0.07$  and  $0.18$ ). Therefore, it is possible to state that the MOD11A2 product has limitations to estimate the land surface temperature and that possible changes in the algorithm of this product can be performed for regions of high atmospheric humidity.

**Key words:** Environmental satellite, Biophysical parameters, Conservation Unit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização Geográfica da área de estudo e domínio climático de Köppen (Cwa) úmido tropical com inverno seco e verão quente, (Cfa) úmido tropical sem estação seca com verão quente, (Cwb) úmido tropical com inverno seco e verão temperado, (Cfb) úmido tropical sem estação seca com verão temperado e (Cwc) úmido tropical com inverno seco e verão curto e fresco.....	10
Figura 2: Uso e ocupação do solo (A) Afloramento Rochoso, (B) Agricultura, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (E) Áreas de plantação (F) Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Montana e (H) Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana.....	11
Figura 3: Área delimitada para extração dos valores de TST. ....	14
Figura 4: Localização Geográfica da Torre Micrometeorológica. ....	15
Figura 5: Torre Micrometeorológica do PNI e aparelhos acoplados (A.) torre, (B.) sensor de radiação infravermelha, (C.) sensor de temperatura do ar e umidade, (D.) sensor de vento, (E.) sensor de fluxo de calor do solo e (D.) datalogger. ....	17
Figura 6: Boxplot das variáveis meteorológicas.....	19
Figura 7: Rosa dos ventos da estação micrometeorológica do PNI para os períodos (A.) diurno (B.) noturno. ....	20
Figura 8: Boxplot da temperatura do dossel mensal. ....	21
Figura 9: Variação horária das variáveis micrometeorológicas. ....	22
Figura 10: Diferença entre temperatura do dossel (Td) e temperatura do ar (Tar). ....	23
Figura 11: Variação mensal da TST (A) diurna, (B) noturna.....	24
Figura 12: Temperatura da Superfície Terrestre por uso e cobertura do solo. (A) Afloramento Rochoso, (B) Agricultura, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (F) Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Montana e (H) Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana. ....	25
Figura 13: Boxplot da TST mensal derivada do sensor SI-111 e do produto MOD11A2 (A.) Diurna, (B.) Noturna.....	27
Figura 14: Dispersão dos dados diurnos e noturnos observados pelo sensor SI-111 em função dos estimados pelo produto MOD11A2. ....	29
Figura 15: Qualidade dos pixels da amostra para os períodos (A.) diurno, (B.) noturno.....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características do sensor MODIS .....	6
Tabela 2: Produtos MODIS para superfície terrestre .....	7
Tabela 3: Produtos MOD11.....	8
Tabela 4: <i>Layers</i> do produto MOD11A2.....	9
Tabela 5: Classes de uso e cobertura do solo, abreviação e área de abrangência. ....	11
Tabela 6: Grau de dependência espacial (GDE) dos modelos geoestatísticos. ....	13
Tabela 7: Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r). ....	18
Tabela 8: Estatística descritiva da TST mensal.....	24
Tabela 9: Estatística descritiva da TST por classe e uso do solo (A) Afloramento Rochoso, (B) Agricultura, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (F) Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Montana e (H) Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana.....	26
Tabela 10: Análise estatística entre a temperatura do dossel coletada pelo sensor SI-111 e a TST estimada pelo produto MOD11A2 para o ano de 2018 no PNI. ....	28

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>BRDF</b>	Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional, do inglês <i>Bidirectional reflectance distribution function</i>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>EOS</b>	<i>Earth Observing System</i>
<b>ESE</b>	<i>Earth Science Enterprises</i>
<b>GDE</b>	Grau de Dependência Espacial
<b>HDF</b>	<i>Hierarchy Data Format</i>
<b>MODIS</b>	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
<b>NASA</b>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<b>NDVI</b>	Índice de Vegetação por Diferença de Normalizada, do inglês <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>PNI</b>	Parque Nacional do Itatiaia
<b>QC</b>	Controle de Qualidade, do inglês <i>Quality Control</i>
<b>REM</b>	Raiz Quadrática do Erro Médio
<b>Tar</b>	Temperatura do ar
<b>Td</b>	Temperatura do Dossel
<b>TIR</b>	Infravermelho Termal
<b>TST</b>	Temperatura da Superfície Terrestre
<b>UC</b>	Unidade de conservação
<b>VM</b>	Viés Médio

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	viii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. A Mata Atlântica .....	3
2.2. Dossel Florestal.....	4
2.3. Temperatura do Dossel Florestal.....	5
2.4. Sensor MODIS.....	6
2.4.1. Produto MOD11.....	7
3 METODOLOGIA .....	9
3.1. Caracterização da Área de Estudo .....	9
3.2. Base de dados.....	11
3.2.1. Produto MODIS .....	11
3.2.2. Temperatura do dossel .....	14
3.2.3. Variáveis meteorológicas.....	15
3.3. Validação dos dados orbitais .....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
4.1. Caracterização das variáveis.....	19
4.1.1. Variáveis meteorológicas.....	19
4.1.2. Temperatura do Dossel .....	20
4.1.3. Temperatura da Superfície Terrestre.....	23
4.2. Validação dos dados orbitais .....	26
5 CONCLUSÃO .....	31

<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>32</b>
----------	---	-----------

# 1 INTRODUÇÃO

Os dosséis florestais são responsáveis por uma parcela significativa das trocas gasosas e de vapor d'água que ocorrem na atmosfera (DIXON et al., 1994), possuindo importante influência no equilíbrio do clima global. A temperatura do dossel é caracterizada como o resultado do balanço de energia da copa, impulsionada pelas condições climáticas, arquitetura da copa e transpiração da planta (SONG et al., 2017). Está intimamente ligada a processos fisiológicos como respiração, evapotranspiração (ÇAMOĞLU, 2013; COLAIZZI et al., 2017), assimilação de CO<sub>2</sub> (GRAY et al., 2016; KIM et al., 2016) e fotossíntese (HELLIKER et al., 2018).

As medições de temperatura de dossel representam uma abordagem propícia para a interpretação e integração de processos bioquímicos, fisiológicos, hidrológicos e biogeoquímicos em florestas (KIM et al., 2016). Dados orbitais de temperatura da superfície terrestre (TST) são utilizados na medição da temperatura do dossel em ecossistemas agrícolas (HEFT-NEAL; LOBELL; BURKE, 2017) e florestais (GOMIS-CEBOLLA; JIMENEZ; SOBRINO, 2018). O sensoriamento remoto no infravermelho termal fornece um método único na aquisição de informações de temperatura da superfície nas escalas regional e global (LI et al., 2014), sendo uma importante ferramenta para a compreensão espacial e temporal desta variável.

Um dos principais instrumentos utilizados na obtenção da temperatura da superfície é o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Os produtos de TST do sensor MODIS (MOD11) abrangem os períodos diurno e noturno e são utilizados em diversos campos científicos. Sun et al. (2014) estimaram a temperatura média do ar a partir da combinação dos dados noturnos e diurnos de temperatura da superfície e dados de índices de vegetação na China. Van Nguyen et al. (2015) utilizaram os dados orbitais de TST para examinar a tendência da temperatura da superfície sob diferentes categorias de uso do solo, no Delta do Rio Vermelho, Vietnã. No Brasil, os produtos de temperatura da superfície terrestre do sensor MODIS foram utilizados na investigação da relação entre a temperatura da superfície e eventos sinóticos (DELGADO et al., 2017), na obtenção do índice de secura da vegetação (SCHIRMBECK; FONTANA; SCHIRMBECK, 2017), na análise de ilhas de calor urbano (GAMARRA; CORRÊA; TARGINO, 2014), entre outros estudos.

Entretanto, dados orbitais de temperatura da superfície terrestre não são amplamente utilizados pelos centros operacionais de tempo e clima através de análises diretas (LI et al., 2014). Este ponto pode ser explicado pelo fato das medições de sensoriamento remoto via infravermelho termal precisarem de correções de emissividade atmosférica e de superfície, que geralmente estão associadas a grandes incertezas, além de fatores como a heterogeneidade espacial da superfície da terra, que dificulta a recuperação e interpretação dos dados (GUILLEVIC et al., 2012). Dessa forma, a validação desses produtos é um passo essencial no estabelecimento de sua aplicabilidade e precisão, podendo ser realizada através da comparação com medições *in situ*, obtidas, por exemplo, por sensores de radiação infravermelha.

Os sensores de radiação infravermelha, também conhecidos como radiômetros, são excelentes para medir a temperatura da superfície em aplicações que exigem extrema precisão e nenhuma interferência do alvo (APOGEE, 2018), sendo utilizados em diversos trabalhos para validação de dados de temperatura da superfície terrestre obtidos por sensoriamento remoto. Li et al. (2014) validaram dados de TST obtidos pelo sensor MODIS através de comparações com medições realizadas em campo por radiômetro infravermelho para uma

área árida no noroeste da China. Os resultados demonstraram que os dados do sensor MODIS subestimam a TST na área estudada. Esse mesmo resultado foi obtido por Pérez-Díaz et al. (2017) para superfície coberta por neve em Caribou, Estados Unidos. Já para área recoberta por floresta, na Amazônia Peruana, foi observado que os dados de TST eram superestimados pelo sensor MODIS (GOMIS-CEBOLLA; JIMENEZ; SOBRINO, 2018).

Em área de Mata Atlântica ainda não foram realizados estudos visando a validação de dados orbitais de TST, ou seja, ainda não existem informações específicas acerca da aplicabilidade do produto MODIS de temperatura da superfície terrestre para essa região. Por se tratar de uma área altamente ameaçada e de relevante interesse à pesquisa científica, e por se conhecer as dificuldades encontradas em expedições à campo para coleta de dados, a validação dos dados orbitais de TST se faz necessária, garantindo assim a sua utilização, e com isso ajudando no entendimento dos processos ecológicos ocorridos nesses locais de forma rápida, sem demandar gastos excessivos e sem impactar negativamente a fauna e flora local. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi validar os dados de temperatura da superfície terrestre do produto MOD11A2 V006 a partir de dados de temperatura da superfície do dossel obtidos por sensor de radiação infravermelha instalado em área de floresta atlântica no Parque Nacional do Itatiaia.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. A Mata Atlântica

A Mata Atlântica, hoje um dos biomas mais ameaçados do mundo, originalmente era uma floresta vasta e densa, que se estendia de forma contínua do nordeste do Brasil até o leste da Argentina e Paraguai, chegando a apresentar, em algum momento do passado, pontos de conexão com a Floresta Amazônica (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2003).

O domínio Mata Atlântica é composto por formações florestais nativas, como Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual; e ecossistemas associados como as restingas, manguezais, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste (MMA, 2019a).

Caracterizada pela alta diversidade e alto grau de endemismo, a Mata Atlântica é considerada o quinto *hotspot* de biodiversidade mais rico em espécies endêmicas do mundo (MYERS, N., R.A. MITTERMEIER, C.G. MITTERMEIER, 2000; MITTERMEIER, R.A., TURNER, W.R., LARSEN F.W., BROOKS T.M., 2011). Calcula-se que exista nesse bioma cerca de 20.000 espécies vegetais, sendo 8.000 delas endêmicas (MITTERMEIER et al., 2005). A enorme biodiversidade da Mata Atlântica resulta, em grande parte, da ampla gama latitudinal compreendida, suas variações de altitude e seus diversos regimes climáticos (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2003).

Seu histórico de degradação tem início com a chegada dos portugueses a esse território, no século XVI, agravada principalmente pela extração descontrolada de pau-brasil. Estima-se que em 1588 as quase 5.000 toneladas de pau-brasil que passaram pela alfândega portuguesa, somadas ao montante movimentado pelo tráfico clandestino de madeira, afetaram 6.000 km<sup>2</sup> de Mata Atlântica (DEAN, 1996).

Nos períodos subsequentes, sucessivos ciclos econômicos como da cana-de-açúcar, café e mais recentemente a pecuária, mantiveram a prática de derrubada e conversão da floresta. Segundo o Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica (SOS MATA ATLÂNTICA, 2019), no período de 1985 até 2018 o total de desflorestamento identificado foi de quase dois milhões de hectares. Como consequência, hoje restam apenas 16,2 milhões de hectares de floresta nativa, o que representa 12,4% da área original (SOS MATA ATLÂNTICA, 2019).

Apesar dos dados alarmantes, pode-se observar uma melhora tímida nos índices de desmatamento. Dos 17 estados que compõem a Mata Atlântica, 9 estão no nível denominado “desmatamento zero”, ou seja, apresentaram desflorestamento abaixo de 100 hectares entre os anos de 2017 e 2018. Entre eles o Estado do Rio de Janeiro que desmatou 18 ha neste período (SOS MATA ATLÂNTICA, 2019).

Contudo, atualmente não é só o desmatamento que ameaça a biodiversidade da Mata Atlântica. No contexto das mudanças climáticas, o aumento da temperatura média do planeta e a alteração do balanço hídrico podem causar modificações nos limites dos biomas e na distribuição e sobrevivência de espécies dentro destes (CORDEIRO; SOUZA; MENDOZA, 2008).

Um estudo realizado através de modelagem preditiva mostrou que em um cenário otimista, que prevê um aumento médio da temperatura terrestre em até 2°C, a área de ocorrência potencial de algumas espécies arbóreas da Mata Atlântica poderá ser reduzida em 25%. Já em um cenário pessimista, com aumento da temperatura na ordem dos 4°C, a perda de área chegaria a 50% (COLOMBO, 2007).

Em outro estudo, a partir do prognóstico do estado da vegetação da Mata Atlântica para 10 anos (2014 a 2023), de Oliveira Souza et al. (2018) verificaram tendência de decréscimo da cobertura florestal na maioria dos estados que compõem a Mata Atlântica, indicando tendência de desertificação no Bioma.

Diante de tantas ameaças fica evidente a necessidade de se intensificar os esforços de preservação e conservação das áreas remanescentes desse bioma. Em toda a área de abrangência da Mata Atlântica são encontradas 1.364 Unidades de Conservação (UC) totalizando 106.670,22 ha de área protegida (MMA, 2019b). Embora corresponda a apenas 9,54% da área total remanescente, essas áreas representam grande importância na manutenção da Mata Atlântica, funcionando como mantenedora da diversidade gênica desse bioma.

## **2.2. Dossel Florestal**

O dossel florestal é o estrato mais alto da floresta e possui um papel muito importante na manutenção da biodiversidade e no fornecimento de serviços ecossistêmicos (OZANNE et al., 2003). É um dos habitats terrestres mais ricos em espécies e também um dos mais ameaçados (STORK, 1988), visto que os organismos que vivem nesse ambiente são mais susceptíveis a distúrbios antrópicos (CASTELLETTA; SODHI; SUBARAJ, 2000).

Segundo Gandolfi; Joly; Rodrigues (2007) os dosséis florestais funcionam como um “filtro de biodiversidade” ao criar e manter “microsítios” debaixo das copas proporcionando, assim, o estabelecimento de condições ideais para a regeneração natural das florestas.

Os dosséis também tem grande importância quanto a manutenção do equilíbrio do clima global (DIXON et al., 1994; LOWMAN, 2009). As copas das árvores representam a interface direta entre a floresta e a atmosfera, onde ocorrem importantes trocas gasosas e de vapor d’água (DIXON et al., 1994).

Parte do vapor d’água atmosférico é fornecida pela cobertura florestal através dos processos evaporativos resultantes da interceptação e evapotranspiração (CALDER, 2001). Na interceptação uma parcela da chuva é retida pelo dossel e evapora de volta para a atmosfera antes de chegar ao solo (FERREIRA; LUIZÃO; DALLAROSA, 2005). Na evapotranspiração a água da chuva que chega ao solo retorna para a atmosfera através da evaporação direta do solo e pela transpiração da planta (ALLEN et al., 1998).

Dessa forma, os dosséis são responsáveis por devolver parte da água da chuva para a atmosfera em forma de vapor d’água, que depois volta a precipitar (FERREIRA; LUIZÃO; DALLAROSA, 2005), representando um papel crucial no padrão de chuva local e regional. A partir dos processos de interceptação e transpiração os dosséis também contribuem para a regulação da variação da temperatura do ar ao longo do dia (SÁ et al., 2012).

O dossel florestal também exerce uma grande influência sobre o ciclo do carbono (OZANNE et al., 2003). O carbono é encontrado naturalmente na atmosfera e é essencial para o aquecimento e manutenção da vida na Terra (MARTINS et al., 2003). Porém, desde a revolução industrial, as concentrações de carbono na atmosfera, principalmente na forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vem aumentando de forma preocupante, contribuindo para o desequilíbrio climático global (PACHECO; HELENE, 1990).

As trocas de CO<sub>2</sub> entre a biosfera terrestre e a atmosfera ocorrem principalmente pela fotossíntese e a respiração das plantas (MARTINS et al., 2003). A vegetação é considerada um dos mais importantes reservatórios terrestres de CO<sub>2</sub> do planeta (MACHADO, 2005). Acredita-se que aproximadamente 40% da massa seca de uma planta consiste de carbono fixado na fotossíntese (DIAS-FILHO, 2006). Através do processo da fotossíntese são

retirados por ano cerca de 100 gigatoneladas de dióxido de carbono da atmosfera (PACHECO; HELENE, 1990).

Por esse motivo, estudos apontam que a manutenção das florestas já existentes e a recomposição florestal representam formas eficazes de redução da concentração de carbono na atmosfera (CHANG, 2002; DIAS-FILHO, 2006), sendo então importantes ferramentas para desacelerar, ou até evitar, o aumento da temperatura terrestre.

Entender as interações entre a biosfera e atmosfera é fundamental para avaliar o impacto das mudanças ambientais na Terra. A redução da área de dossel, por exemplo, interfere no fluxo de carbono, aumenta a temperatura da superfície terrestre, diminui a evapotranspiração, a precipitação e a umidade relativa (CALDER, 2001; HAN; XU, 2013; LEJEUNE et al., 2015; CAI et al., 2019), causando impactos não só ambientais como também econômicos e sociais.

### **2.3. Temperatura do Dossel Florestal**

A radiação solar é a energia essencial para a manutenção da vida na Terra. Da radiação solar incidente em uma superfície vegetada, parte é refletida, outra parte é transmitida para as camadas mais baixas do dossel, e a terceira parte é absorvida pelas folhas, contribuindo assim para o seu aquecimento (MOREIRA, 2007).

A temperatura da superfície do dossel, representada pela média da temperatura das folhas (FUCHS, 1990), é um dos indicadores das interações ocorridas entre a biosfera e o ambiente, pois integra todos os mecanismos de absorção e dissipação de energia que atuam na zona do dossel florestal (GATES, 1964).

A temperatura do dossel varia em resposta da radiação solar recebida pelo dossel que é determinada pela topografia e atributos da vegetação como biomassa, espécies e status de água da planta. É influenciada ainda por características morfológicas como tamanho e formato das folhas, arquitetura da copa, e altura, densidade e rugosidade do dossel (LEUZINGER; KO, 2007).

Através da temperatura do dossel, é possível inferir sobre alguns processos fisiológicos da planta, já que atividades metabólicas como fotossíntese, transpiração e respiração são influenciadas diretamente pela temperatura foliar.

A fotossíntese é um processo muito sensível à temperatura. O aumento excessivo da temperatura foliar pode causar danos a nível enzimático, desnaturando as enzimas envolvidas no processo de fixação de CO<sub>2</sub> e na cadeia transportadora de elétrons (LAW; CRAFTS-BRANDNER, 1999; WISE et al., 2004) Devido a ação enzimática, a fotossíntese possui uma temperatura ótima para ocorrer (HSIAO, 1973).

A temperatura pode ainda afetar a fotossíntese de uma forma mais indireta. Com o aumento da temperatura foliar, a taxa máxima de assimilação de carbono pode ser inibida por diminuir a condutância estomática (HSIAO, 1973).

A transpiração é um mecanismo importante para a manutenção térmica da planta. Assim, quando a água se torna limitante e o processo de fechamento dos estômatos é acionado a fim de diminuir a transpiração, a temperatura foliar se eleva, podendo chegar a níveis prejudiciais ao metabolismo da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004). Dessa forma é possível monitorar o status de água da planta através do monitoramento da temperatura do dossel (JACKSON et al., 1981).

A temperatura do dossel pode ser estimada por meio de sensores de radiação infravermelha. Para análises pontuais esses sensores podem ser utilizados acoplados a torres micrometeorológicas. Já para a aquisição de informações de temperatura do dossel nas escalas

regional e global são utilizados dados de temperatura da superfície terrestre coletados através de sensoriamento remoto na faixa do infravermelho termal, representando uma importante ferramenta para a compreensão espacial e temporal desta variável.

## 2.4. Sensor MODIS

A partir da necessidade de compreender a dinâmica do planeta como um todo, a comunidade científica, liderada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), buscou formas de coletar informações a nível global com uma maior precisão e repetitividade, de maneira a representar cada região da superfície terrestre, oceanos e atmosfera em um amplo espectro de energia eletromagnética, surgindo assim o projeto *Earth Observing System* (EOS) financiado pelo programa da NASA *Earth Science Enterprises* (ESE) (LATORRE et al., 2003).

O projeto EOS compreendia o lançamento de uma série de satélites de observação da Terra, com o desenvolvimento de algoritmos para gerar produtos de dados derivados desses satélites, e um sistema de dados avançado projetado para apoiar a produção, arquivamento e disseminação desses produtos (JUSTICE et al., 2002). A partir desse projeto foram desenvolvidos os satélites TERRA e AQUA, lançados em dezembro de 1999 e maio de 2002, respectivamente. Um dos principais instrumentos acoplados a esses satélites é o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS).

A qualidade de um sensor geralmente é especificada pela sua capacidade de obter medidas detalhadas da energia eletromagnética, estando relacionada com a capacidade do sensor de distinguir objetos (resolução espacial); com a largura espectral onde o sensor opera (resolução espectral); e a capacidade do sensor em detectar e registrar diferenças na energia refletida e/ou emitida pelos objetos que compõem a cena (resolução radiométrica) (MORAES, 2002). A resolução temporal também é uma característica importante dos sensores, estando relacionado ao tempo que o sistema sensor leva para captar novamente uma mesma cena.

O sensor MODIS dispõe de 36 bandas espectrais, com alta sensibilidade radiométrica, resolução espacial variando de 250 a 1.000 metros, e tempo de revisita de 1 a 2 dias. As principais características do sensor MODIS podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Principais características do sensor MODIS

Tamanho	1,0 x 1,6 x 1,0 m
Peso	228,7 Kg
Órbita	Heliossíncrona, altitude de 705 Km.
Alcance espectral	36 bandas entre 0.4-14.4 $\mu\text{m}$
Resolução espacial	250m - bandas 1-2 500m - bandas 3-7 1000 - bandas 8-36
Resolução radiométrica	12 bits
Cobertura de repetição	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Área imageada	2.330km
Passagem no Equador	TERRA - 10:30h AQUA - 13:30h

Fonte: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

O sensor MODIS abrange faixas do espectro eletromagnético que vão do visível ao infravermelho termal, sendo as bandas 1 a 7 (0,6 a 2,155  $\mu\text{m}$ ) direcionadas para as aplicações terrestres, as bandas 8 a 16 (0,4 a 0,87  $\mu\text{m}$ ) para as observações oceânicas, as bandas 17, 18 e 19 (0,89 a 0,96  $\mu\text{m}$ ) para as medições atmosféricas e as bandas 20 a 36 (3,66 a 9,88  $\mu\text{m}$ , exceto a 26) cobrem a porção termal do espectro (LATORRE et al., 2003).

Todos os produtos são disponibilizados de forma gratuita pela NASA e já corrigidos para efeitos atmosféricos. São fornecidos em formato HDF (*Hierarchy Data Format*), com projeção sinusoidal, e dividido em quadrantes denominados de *tiles* de 1.200 x 1.200 km. Os produtos MODIS são nomeados de forma que se possa diferenciar o tipo de dado disponibilizado, a temporalidade do mesmo e a sua procedência, sendo o prefixo MOD referente aos produtos oriundos do sensor MODIS acoplado à plataforma TERRA e MYD referente aos dados oriundos da plataforma AQUA.

Os diferentes produtos MODIS fornecem diversas informações acerca da atmosfera, superfície terrestre, criosfera e oceanos. Os produtos voltados para o estudo da porção continental da superfície terrestre podem ser verificados na Tabela 2.

Tabela 2: Produtos MODIS para superfície terrestre

Aplicação	Produto
Balanço energético	MOD09 - Reflectância de superfície
	MOD11 - Temperatura da superfície da Terra e emissividade
	MOD43 - BRDF/Albedo
	MOD10 - Cobertura de neve
	MOD29 - Extensão de gelo na superfície do mar
Vegetação	MOD13 - Índices de vegetação
	MOD15 - Índice de área foliar (LAI) e Fração Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR)
	MOD17 - Fotossíntese líquida e produtividade primária
Cobertura terrestre	MOD12 - Cobertura da terra e mudança na cobertura da terra
	MOD14 - Anomalias termais, fogo e queima de biomassa
	MOD44 - Conversão da cobertura vegetal

Adaptada de LATORRE et al. (2003).

#### 2.4.1. Produto MOD11

O produto MOD11 é um produto MODIS que fornece dados sobre temperatura da superfície terrestre (TST) e emissividade. Atualmente na sua sexta versão, é produzido como uma série de nove produtos com diferentes características (Tabela 3).

Tabela 3: Produtos MOD11

Produto	Nível	Dimensões	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Projeção
MOD11_L2	L2	2030/2040 linhas por 1354 pixels por linha	1km (no Nadir)	Swath (scene)	Sem projeção
MOD11A1	L3	1200 linhas por 1200 colunas	1km	Diária	Sinusoidal
MOD11B1	L3	200 linhas por 200 colunas	6km	Diária	Sinusoidal
MOD11B2	L3	200 linhas por 200 colunas	6km	Composição de 8 dias	Sinusoidal
MOD11B3	L3	200 linhas por 200 colunas	6km	Mensal	Sinusoidal
MOD11A2	L3	1200 linhas por 1200 colunas	1km	Composição de 8 dias	Sinusoidal
MOD11C1	L3	360° por 180° (global)	0,05° por 0,05°	Diário	Geográfica
MOD11C2	L3	360° por 180° (global)	0,05° por 0,05°	Composição 8 dias	Geográfica
MOD11C3	L3	360° por 180° (global)	0,05° por 0,05°	Mensal	Geográfica

Fonte: WAN (2013).

Para estimar a temperatura da superfície, o sensoriamento remoto na faixa do infravermelho termal (TIR) se baseia no fato de que todo corpo com temperatura acima do zero absoluto ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) emite energia na forma de radiação eletromagnética, sendo essa energia proporcional a sua temperatura e emissividade. Os sensores na faixa do infravermelho termal medem então a radiação emitida pelos alvos, e encontram a temperatura da superfície por intermédio da Lei de Stefan-Boltzmann (1).

$$R = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

Em que  $R$  é a irradiância emitida ( $\text{Wm}^{-2}$ );  $\varepsilon$  é a emissividade do alvo (adimensional);  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ), e  $T$  é a temperatura do alvo.

Os produtos de TST do sensor MODIS são gerados a partir do uso dos algoritmos “*generalized split-window algorithm*” (WAN; DOZIER, 1996) e “*day/night algorithm*” (WAN; LI, 1997). Para recuperar a emissividade e a temperatura espectral da superfície são utilizados dados diurnos e noturnos em sete bandas do infravermelho termal (20, 22, 23, 29, 31 e 32), temperatura do ar e vapor d’água, provenientes do produto MOD07\_L2 (perfil atmosférico) e parâmetros de reflectância bidirecional (BRDF) do produto MOD43B1C (WAN, 2013).

O produto MOD11A2 é desenvolvido a partir da média dos valores diários de TST (produto MOD11A1) recuperados pelo algoritmo *generalized split-window* em condição de céu limpo (definido pelo produto MOD35 - máscara de nuvem) em um período de 8 dias. Esse produto é disponibilizado contendo *layers* com dados da temperatura da superfície terrestre diurna e noturna, controle de qualidade (QC), hora da observação, ângulo da visada, cobertura por nuvens e dados de emissividade das bandas 31 e 32 (Tabela 4).

Tabela 4: *Layers* do produto MOD11A2

Layer	Descrição	Unidade	Fator de escala
LST_Day_1km	TST diurna com resolução espacial de 1km	K	0.02
QC_Day	Controle de Qualidade dos dados diurnos	-	-
Day_view_time	Horário da observação da TST diurna	Hrs	0.1
Day_view_angle	Ângulo zenital de visada da TST diurna	Graus	1.0
LST_Night_1km	TST noturna com resolução espacial de 1km	K	0.02
QC_Night	Controle de Qualidade dos dados noturnos	-	-
Night_view_time	Horário da observação da TST noturna	Hrs	0.1
Night_view_angle	Ângulo zenital de visada da TST noturna	Graus	1.0
Emis_31	Banda 31 de emissividade	-	0.002
Emis_32	Banda 32 de emissividade	-	0.002
Clear_day_cov	Cobertura de céu limpo na observação diurna	-	0.0005
Clear_night_cov	Cobertura de céu limpo na observação noturna	-	0.0005

Adaptada de WAN (2013).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1. Caracterização da Área de Estudo

Este trabalho foi conduzido no Parque Nacional do Itatiaia (PNI), primeira Unidade de Conservação (UC) de proteção integral do Brasil, constituído em 14 de junho de 1937. O PNI está localizado na Serra da Mantiqueira, abrange os municípios de Bocaina de Minas e Itamonte, no Estado de Minas Gerais (MG), e os municípios de Itatiaia e Resende, no Estado do Rio de Janeiro (RJ) (BARRETO et al., 2013) (Figura 1).

Compreende uma área de 28.086,0 hectares, apresentando relevo montanhoso com grandes afloramentos rochosos e altitudes variando de aproximadamente 540,0 m a 2.791,55 m no seu ponto culminante, o Pico das Agulhas Negras, quinto mais alto do país (BARRETO et al., 2013).

De acordo com a nova classificação de Köppen para o Brasil (ALVARES et al., 2013) o parque possui cinco domínios climáticos, sendo eles: úmido tropical sem estação seca com verão quente (Cfa); úmido tropical sem estação seca com verão temperado (Cfb); úmido tropical com inverno seco e verão quente (Cwa); úmido tropical com inverno seco e verão temperado (Cwb) e úmido tropical com inverno seco e verão curto e fresco (Cwc) (Figura 1).

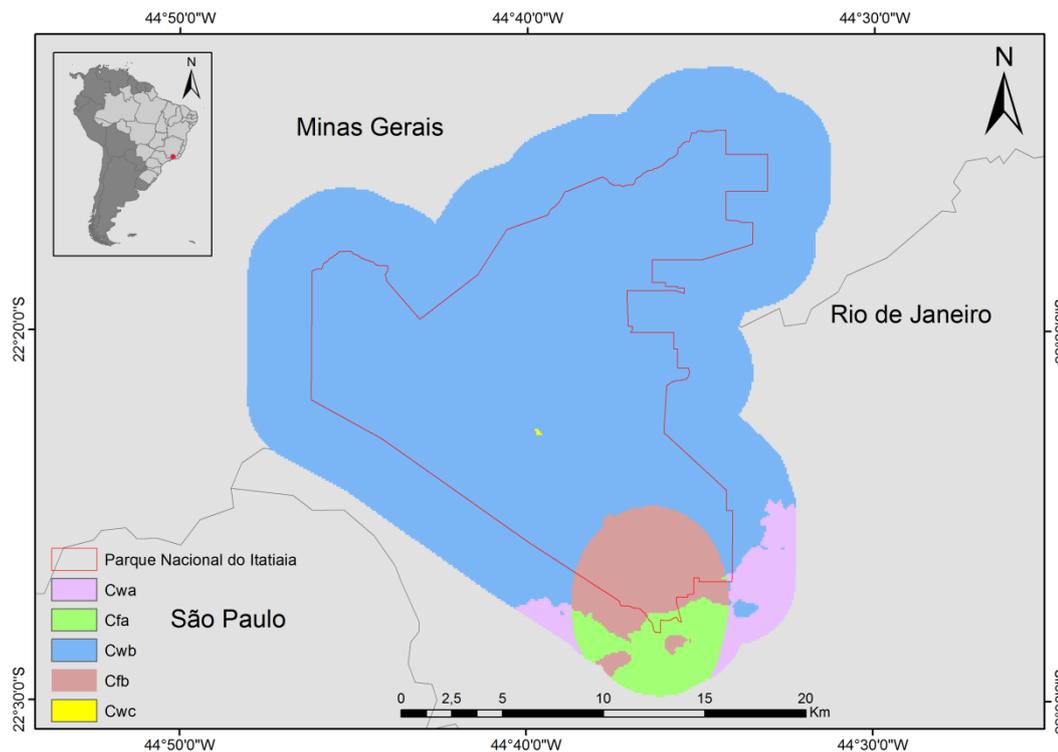


Figura 1: Localização Geográfica da área de estudo e domínio climático de Köppen (Cwa) úmido tropical com inverno seco e verão quente, (Cfa) úmido tropical sem estação seca com verão quente, (Cwb) úmido tropical com inverno seco e verão temperado, (Cfb) úmido tropical sem estação seca com verão temperado e (Cwc) úmido tropical com inverno seco e verão curto e fresco.

A precipitação média anual é de 215,0 mm e de 149,0 mm, nas estações Agulhas Negras e Parque Itatiaia, respectivamente. As chuvas ficam mais escassas do final de abril até outubro, sendo que as mínimas pluviométricas ocorrem em junho e agosto com médias abaixo de 50,0 mm. Nos meses de junho e julho, a umidade relativa do ar não ultrapassa a média de 70,0%. A umidade máxima absoluta ocorre em dezembro, com 83,0%, e a mínima em junho, com 62,0%, e a média é de 75,2% (BARRETO et al., 2013).

O PNI está integralmente inserido no Bioma Mata Atlântica abrangendo formações vegetais da Floresta Ombrófila Densa, delimitada pelas faixas altimétricas submontana (de 100,0 a 600,0 m), montana (de 600,0 a 2000,0 m) e alto montana (acima de 2000,0 m) (IBGE, 2012). Conforme Delgado et al. (2018), considerando um buffer de 3 km, além das áreas de floresta, no parque ocorrem ainda outras 5 diferenciações de uso e ocupação do solo, classificadas a partir de imagens de alta resolução IKONOS (1 m - Pancromático e 4 m – Multispectral) de julho de 2011 (HIPARC, 2011) (Figura 2 e Tabela 5).

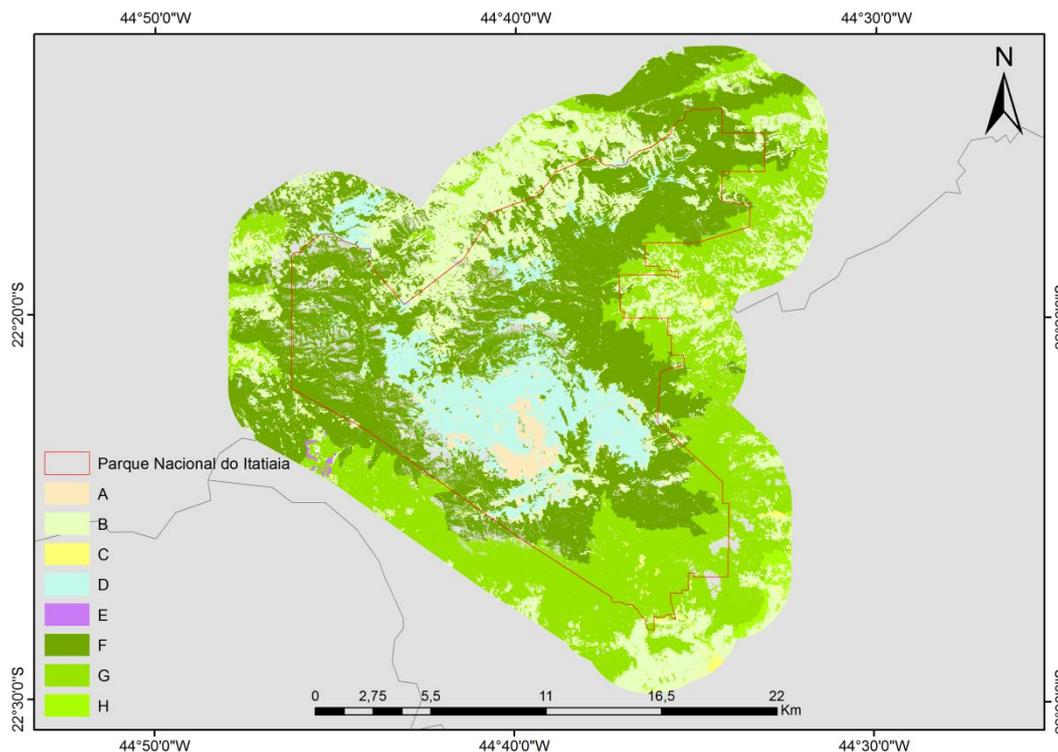


Figura 2: Uso e ocupação do solo (A) Afloramento Rochoso, (B) Agricultura, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (E) Áreas de plantação (F) Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Montana e (H) Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana.

Tabela 5: Classes de uso e cobertura do solo, abreviação e área de abrangência.

Uso e Cobertura do solo	Abreviação	Área (km <sup>2</sup> )	%
Afloramento rochoso	A	11,23	2,0
Agricultura	B	125,15	22,4
Área Urbana	C	2,97	0,5
Campos de altitude	D	51,49	9,2
Áreas de plantação	E	0,56	0,1
Floresta ombrófila densa alto-montana	F	208,64	37,4
Floresta ombrófila densa montana	G	154,86	27,8
Floresta ombrófila densa sub-montana	H	3,11	0,6
Total		558,01	100

## 3.2. Base de dados

### 3.2.1. Produto MODIS

Foram utilizados dados diurnos e noturnos de Temperatura da Superfície Terrestre provenientes do produto MOD11A2 V006 (WAN, 2013), produzido e disponibilizado pela NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>). O produto MOD11A2 é formado a partir da média de todas as observações de TST em condição de céu limpo do produto MOD11A1 em um período de 8 dias, e foi escolhido por fornecer imagens com menor número de pixels inválidos por contaminação de nuvens. Possui resolução espacial de 1 km x 1 km, em um *tile* de 1200 km X 1200 km. O período analisado foi de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2018,

sendo utilizadas 92 imagens do produto MOD11A2, tile h13v11.

Os arquivos são disponibilizados em *Raster* no formato HDF e em projeção sinusoidal. Para adquirir as imagens dos servidores da NASA e fazer a conversão de projeção cartográfica para UTM WGS 84 e de formato de arquivo para GEOTIFF foi utilizado o pacote MODISsp (BUSETTO; RANGHETTI, 2016), no software R. Adicionalmente, utilizando o software ArcGis 10.5, os arquivos foram convertidos para valores biofísicos (através de multiplicação pelo fator de escala 0,02) em graus Celsius.

Algumas imagens apresentaram pixels sem valor por causa da contaminação por nuvens. Para o preenchimento dessas falhas foi utilizado o método de interpolação por Krigagem Ordinária. Para isso todas as imagens originais foram recortadas, resultando em imagens de 245 x 137 pixels, estando a área do Parque Nacional do Itatiaia ao centro. Para essas imagens foram ajustados e testados os modelos teóricos exponencial (2), esférico (3) e gaussiano (4), e verificado o Grau de Dependência Espacial (GDE) (5) utilizando a metodologia proposta por Cambardella et al. (1994), onde: GDE com valores  $\leq 25\%$  os dados possuem forte dependência espacial; GDE entre 25 e 75% mostram moderada dependência espacial; GDE  $\geq 75\%$  possuem fraca dependência espacial e GDE igual a 100% a variável é espacialmente independente.

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad (2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[ 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \text{ se: } h < a \quad (3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \text{ se: } h \geq a$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right] \quad (4)$$

$$\text{GDE} = \frac{C_0}{C_0 + C} \times 100 \quad (5)$$

em que:  $\hat{\gamma}(h)$  = semivariância;  $C_0$  = efeito pepita;  $C_0 + C$  = patamar;  $C$  = contribuição;  $a$  = alcance;  $h$  = distância.

Após a verificação do GDE optou-se pela utilização do modelo exponencial, visto que o mesmo apresentou os menores valores dentre os modelos testados, ou seja, os dados apresentaram maior dependência espacial (Tabela 7).

Tabela 6: Grau de dependência espacial (GDE) dos modelos geoestatísticos. (continua)

Dia Astronômico do Ano	TST Diurna			TST Noturna		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano	Esférico	Exponencial	Gaussiano
1	27.8	9.1	36.4	14.7	9.2	20.9
9	50.7	31.0	58.6	0.0	0.0	7.8
17	43.7	20.2	44.8	27.6	16.3	42.6
25	49.1	23.1	54.2	22.5	12.6	36.4
33	13.9	2.2	27.1	17.3	3.1	28.8

Tabela 6: Grau de dependência espacial (GDE) dos modelos geoestatísticos. (continuação)

Dia Astronômico do Ano	TST Diurna			TST Noturna		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano	Esférico	Exponencial	Gaussiano
41	17.7	5.7	30.7	22.8	16.2	33.6
49	15.5	0.0	28.1	0.0	0.0	10.9
57	25.7	6.8	36.6	0.0	0.0	2.2
65	18.0	4.7	30.6	14.0	3.3	26.7
73	28.9	21.0	41.1	19.4	3.4	27.9
81	6.9	0.0	20.5	21.4	9.7	34.2
89	39.6	17.8	47.2	27.1	7.1	35.1
97	12.0	0.9	25.4	29.9	19.5	43.4
105	6.8	0.0	20.3	24.7	13.1	36.3
113	6.2	0.0	20.2	15.6	5.3	29.0
121	21.4	4.8	30.4	15.6	6.0	29.3
129	10.3	1.0	23.5	26.7	13.5	38.0
137	6.9	6.9	20.5	3.5	0.0	12.2
145	6.3	0.0	19.9	19.0	8.0	32.5
153	10.9	6.0	17.8	23.1	14.7	34.5
161	28.0	12.8	38.8	35.5	25.0	45.2
169	5.7	0.0	19.0	16.7	7.6	28.7
177	14.7	0.9	24.2	8.5	1.9	20.1
185	9.9	0.2	23.0	9.8	3.5	21.8
193	8.6	0.0	21.9	9.0	3.4	20.0
201	5.2	0.0	19.0	15.7	7.5	27.3
209	21.3	7.2	32.3	18.1	9.4	29.4
217	10.4	0.0	23.8	14.4	5.0	26.6
225	8.0	0.0	21.7	23.9	11.1	35.5
233	18.7	4.1	31.1	20.0	10.1	31.4
241	8.1	0.0	21.5	16.8	7.1	28.5
249	12.9	2.2	26.1	11.7	0.0	24.3
257	8.6	0.4	21.7	21.2	7.0	32.7
265	8.0	0.0	21.5	24.5	5.7	34.1
273	23.8	5.3	31.9	6.8	2.3	18.9
281	18.2	0.9	30.5	18.4	5.5	30.3
289	17.0	4.8	29.4	18.8	7.6	31.1
297	8.8	0.0	22.5	29.4	13.4	39.5
305	20.5	19.0	29.5	25.1	12.4	36.0
313	11.3	1.9	24.6	14.7	2.3	27.4
321	5.5	0.0	18.8	33.7	17.0	43.2
329	26.0	9.3	36.8	21.1	7.0	31.7
337	11.4	1.7	24.5	41.0	24.6	49.5
345	4.7	0.0	18.0	29.8	11.3	42.3
353	24.4	12.2	36.0	4.6	0.0	17.3
361	5.5	0.0	18.8	34.9	19.2	44.9

Por fim, foi delimitada uma grade de 5 x 5 pixels ao redor da área da medição *in situ* (torre micrometeorológica) e extraída a média dos valores de TST contidas nessa área para

posterior validação (Figura 3). As imagens noturnas correspondentes aos dias astronômicos 009, 049, 057 e 353 foram excluídas da análise por causa do baixo número de pixels válidos, o que prejudicou a interpolação dos dados.

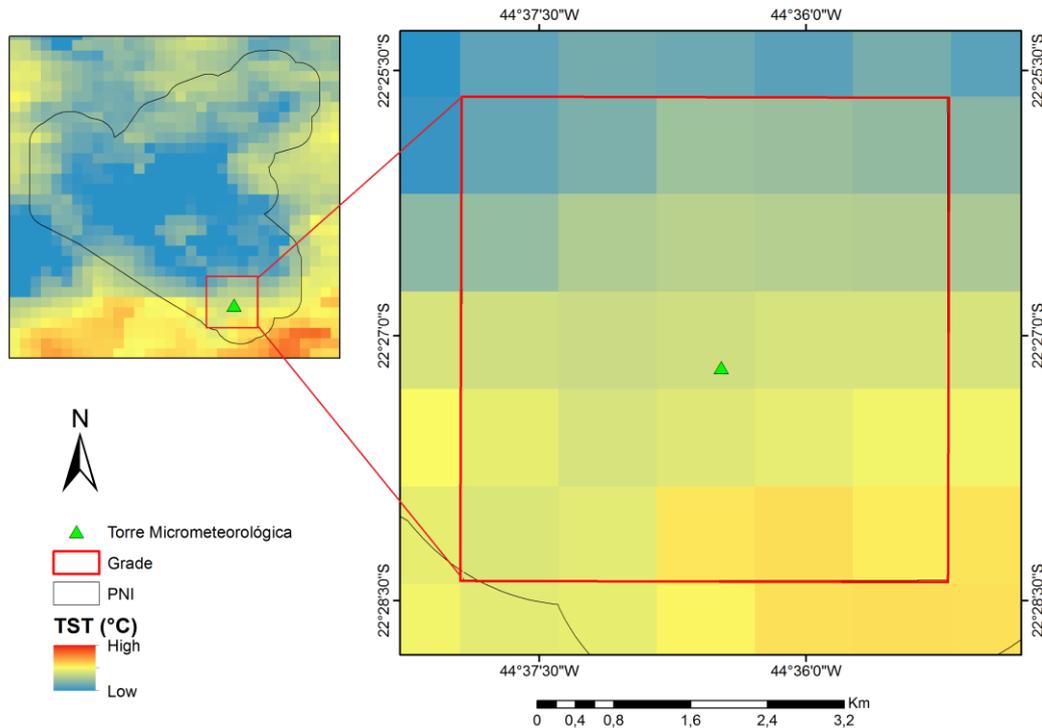


Figura 3: Área delimitada para extração dos valores de TST.

Os dados do produto MOD11A2 também foram utilizados para caracterizar a temperatura da superfície terrestre do Parque Nacional do Itatiaia. Para tanto foi calculada a média mensal através da ferramenta *Raster Calculator* do software ArcGis 10.5. Posteriormente os dados de TST por classe de uso do solo foram extraídos utilizando a ferramenta *Zonal Statistics as Table*. As áreas de plantação foram excluídas dessa análise pois compreendem a apenas 0,56km<sup>2</sup> da área total do PNI, não sendo possível extrair a TST da mesma visto que a sua área total é menor do que a resolução espacial do produto MOD11A2, que é de 1km<sup>2</sup>.

### 3.2.2. Temperatura do dossel

Os dados de temperatura do dossel foram coletados por um sensor de radiação infravermelha, acoplado à torre micrometeorológica localizada na parte baixa do Parque Nacional do Itatiaia. Instalada em 2015 e em funcionamento desde 2017, a torre tem altura de 30 metros, ao longo da qual foram acoplados sensores utilizados nesta e em outras pesquisas. A torre está inserida em uma área predominantemente de Floresta Ombrófila Densa Montana, sob as coordenadas geográficas 22°27'10.83"S e 44°36'28.51"W (Figura 4).

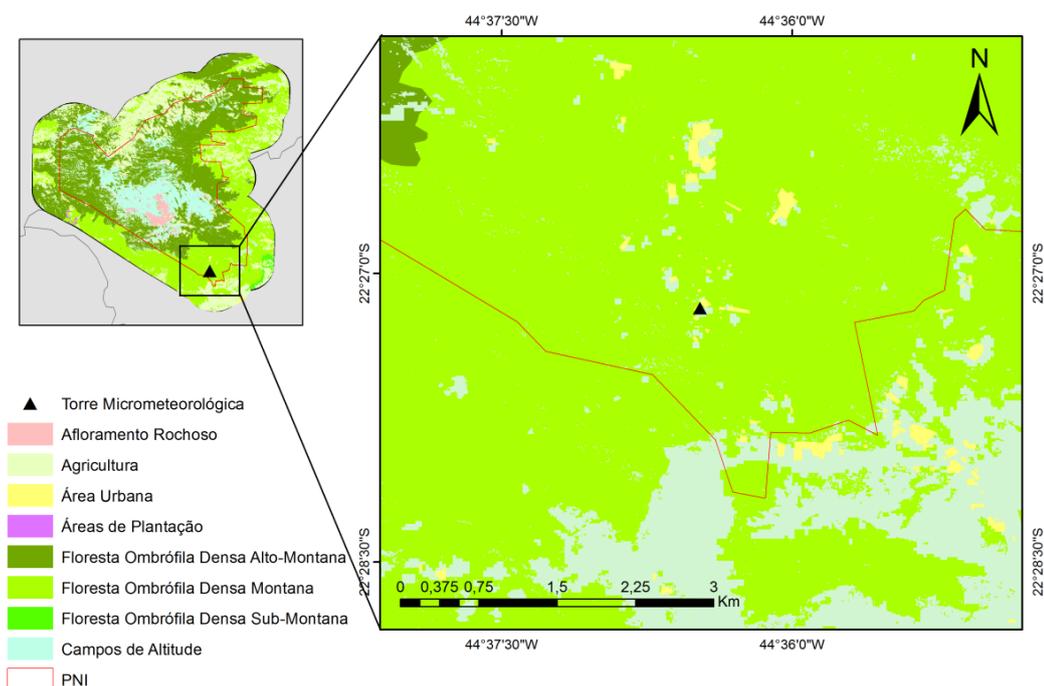


Figura 4: Localização Geográfica da Torre Micrometeorológica.

O sensor de radiação infravermelha utilizado foi o *Infrared Radiometer* modelo SI-111 da marca *Apogee*, instalado a 27,5 metros de altura, acima do dossel da vegetação mais próxima. O aparelho determina a temperatura de um objeto remotamente de modo passivo através da medição das ondas eletromagnéticas emitidas na faixa do infravermelho, e possui um raio de abrangência de até 1 km. O SI-111 contém um termopile, que mede a temperatura da superfície, e um termistor, que mede a temperatura do corpo do sensor. O datalogger usa uma equação para corrigir o efeito da temperatura do corpo do sensor na temperatura do alvo. As leituras corrigidas produzem uma precisão absoluta de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , em temperaturas entre  $-30$  a  $+65^{\circ}\text{C}$ .

Os dados da temperatura do dossel foram coletados em escala horária, de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2018, totalizando 8.760 medições. Foram selecionadas para a comparação com os dados orbitais as temperaturas captadas próximas aos horários de passagem do satélite (aproximadamente 10h e 23h) e realizada a média dessas observações em um intervalo de 8 dias, coincidindo assim com o mesmo período de medições do sensor MODIS. Dessa forma, para cada imagem do sensor MODIS foi obtido um valor correspondente de Temperatura do Dossel coletado pelo Sensor de Radiação Infravermelha instalado na Torre Micrometeorológica.

A caracterização desta variável foi realizada por meio de boxplot produzido pelo pacote *ggplot2* (WICKHAM, 2016) no software R. Foi considerado período diurno (AM) o intervalo entre 06h e 17h, e o período noturno (PM) entre as 18h e 05h. Para indicar o estresse hídrico da vegetação foi calculada a diferença horária entre a temperatura do dossel e do ar, apresentada através de gráfico de linha produzido no software R.

### 3.2.3. Variáveis meteorológicas

Além do sensor de radiação infravermelha a torre micrometeorológica do PNI conta ainda com outros 5 sensores (Figura 5: Torre Micrometeorológica do PNI e aparelhos acoplados (A.) torre, (B.) sensor de radiação infravermelha, (C.) sensor de temperatura do ar e umidade, (D.) sensor de vento, (E.) sensor de fluxo de calor do solo e (D.) datalogger. 5). São dois sensores de medição de temperatura do ar e umidade relativa, modelo HC2S3 da empresa *Campbell Scientific*, protegidos por escudos de radiação solar modelo 41003 da empresa *Young*, posicionados a 2 e 10 metros de altura. Um sensor *Gill WindSonic* para medições de velocidade e direção do vento, instalado à altura de 10 metros. Dois sensores do modelo HFP01 da empresa *Hukseflux* para medição do fluxo de calor do solo, estando enterrado um em área sombreada e outro a pleno sol. Todos os dados coletados são armazenados no *datalogger* CR3000 da empresa *Campbell Scientific*.

Para este trabalho foram utilizados dados de Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), Umidade Relativa do ar (%) e Direção ( $^{\circ}$ ) e Velocidade do vento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), coletados pelos sensores acoplados à torre micrometeorológica do Parque. Os dados foram disponibilizados em escala horária, sendo então convertidos em média diária, separados entre período diurno e noturno. A temperatura e umidade relativa do ar foram caracterizadas por meio de boxplot produzidos pelo pacote *ggplot2* (WICKHAM, 2016) no software R. Já para os dados de velocidade e direção do vento foi utilizado o software livre WRPLOT VIEW 8.0.2, por meio do qual foi construída a rosa dos ventos.

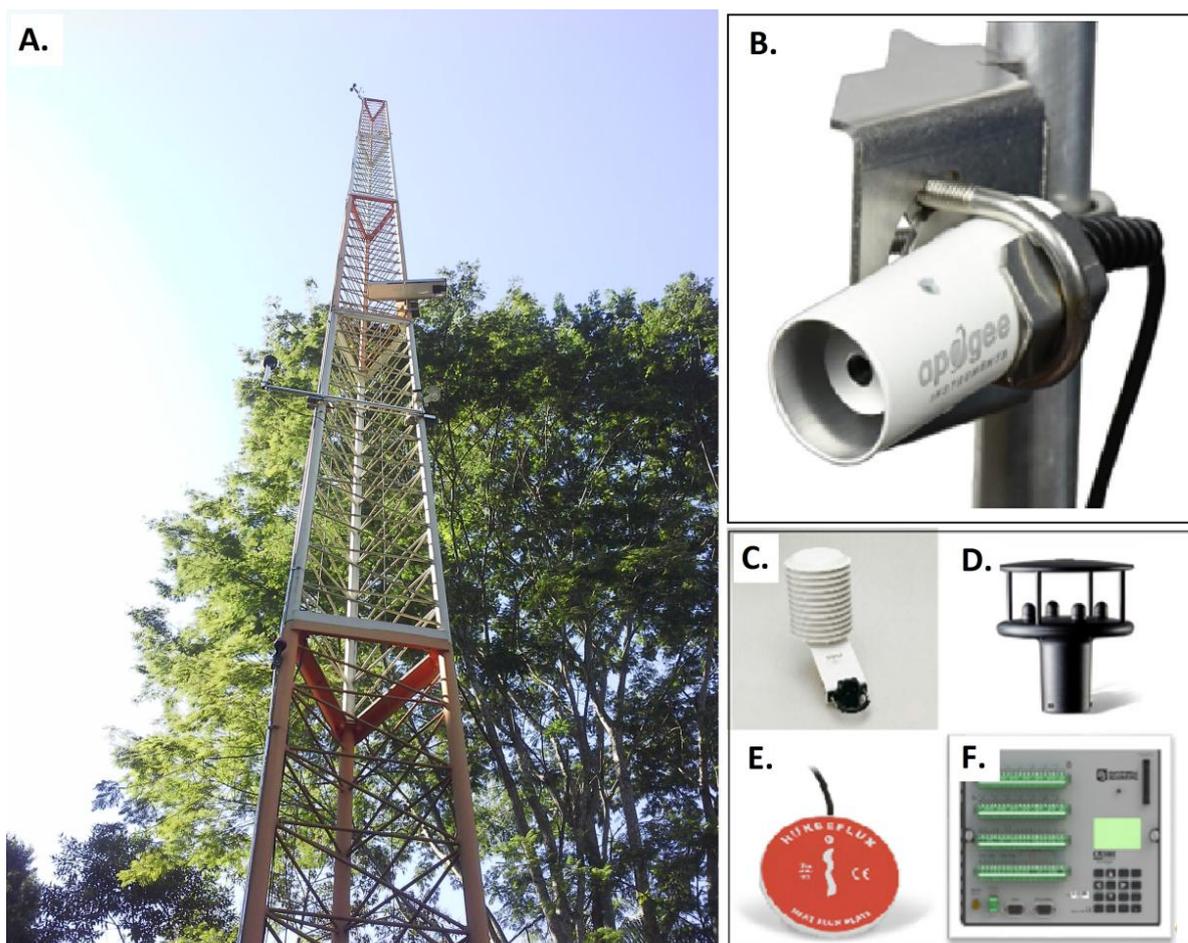


Figura 5: Torre Micrometeorológica do PNI e aparelhos acoplados (A.) torre, (B.) sensor de radiação infravermelha, (C.) sensor de temperatura do ar e umidade, (D.) sensor de vento, (E.) sensor de fluxo de calor do solo e (F.) datalogger.

### 3.3. Validação dos dados orbitais

Para a validação do produto MOD11A2 foi realizada a análise comparativa entre os dados de temperatura da superfície terrestre obtidos através do sensor MODIS e os dados da temperatura do dossel obtido pelo sensor de radiação infravermelha SI-111. Para isso foi aplicada uma regressão linear simples, utilizando como variável dependente a TST proveniente do Produto MOD11A2 e como variável independente a temperatura do dossel proveniente do sensor SI-111. Para uma melhor análise, os dados foram separados por trimestres climáticos, sendo: janeiro, fevereiro e março (JFM), abril, maio e junho (AMJ), julho, agosto e setembro (JAS) e outubro, novembro e dezembro (OND).

O modelo geral de regressão é dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (6)$$

em que, Y indica a variável dependente;  $\beta_0$  é o coeficiente angular;  $\beta_1$  é o coeficiente linear; x representa a variável independente e  $\varepsilon$  representa o erro.

Para determinar o grau de correlação entre os dados foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (r), expresso pela equação 6.

$$r = \sqrt{r^2} \quad (7)$$

em que  $r^2$  representa o coeficiente de determinação calculado na regressão linear.

Os valores do coeficiente de correlação encontrados foram classificados de acordo com COHEN (1988) (Tabela 7).

Tabela 7: Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Índice de correlação (r)	Classificação
0,0 a 0,1	Muito baixo
0,1 a 0,3	Baixo
0,3 a 0,5	Moderado
0,5 a 0,7	Alto
0,7 a 0,9	Muito alto
0,9 a 1,0	Quase perfeito

Os erros associados aos dados foram avaliados através do cálculo do viés médio (VM) (8) e da raiz quadrática do erro médio (REM) (9).

$$VM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{oi}) \quad (8)$$

$$REM = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{oi})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Por fim, foi calculado o índice de concordância desenvolvido por Willmott (1981) que quantifica matematicamente a dispersão dos dados em relação ao método considerado padrão. O índice de Willmott (d) é expresso pela equação a seguir:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (X_{ei} - X_{oi})^2}{\sum (|X_{ei} - \bar{X}_o| + |X_{oi} - \bar{X}_o|)^2} \right] \quad (10)$$

em que  $X_{ei}$  representa os dados estimados (produto MOD11A2) e  $X_{oi}$  representa os dados observados (temperatura do dossel coletado pelo sensor SI-111).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização das variáveis

#### 4.1.1. Variáveis meteorológicas

O comportamento temporal das variáveis meteorológicas mensuradas durante o ano de 2018 no Parque Nacional do Itatiaia é apresentado nas Figura 7 e 7.

A temperatura do ar média anual foi de 23,23°C, sendo média de 24,40°C para o período diurno e 22,05°C no período noturno. Considerando a média mensal, os valores variaram de 21,09°C (JUL) a 27,01°C (DEZ) no período diurno e de 18,70°C (JUL) a 23,98°C (OUT) no período noturno. A diferença de temperatura entre os períodos diurno e noturno foi mais acentuada no mês de dezembro (3,34°C). Pode-se observar que a temperatura do ar acompanhou a sazonalidade climática da região, apresentando menores valores na época seca (abril a setembro) e maiores valores na época chuvosa (outubro a março).

A umidade relativa do ar apresentou média anual de 88,55%. No período diurno a umidade relativa média foi de 84,68%, sendo o menor valor médio observado em setembro (79,01%) e o maior em junho (88,69%), ambos no período seco.

A umidade relativa do ar apresentou os maiores valores durante o período da noite, com média anual de 92,43%. No geral os valores médios mensais noturnos foram elevados, variando de 87,70% em julho, estação seca, a 94,61% em outubro, início da estação chuvosa.

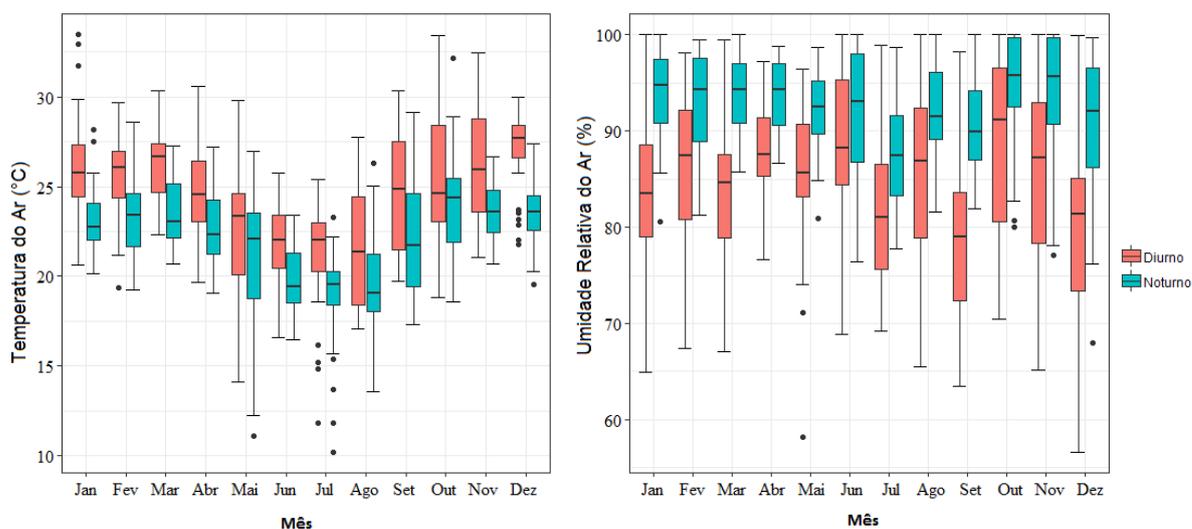


Figura 7: Boxplot das variáveis meteorológicas.

Em relação à intensidade do vento, a média mensal variou de 0,48 ms<sup>-1</sup> (MAR) a 0,72 m s<sup>-1</sup> (NOV) considerando o período diurno. Enquanto no período noturno a variação ficou entre 0,48 m s<sup>-1</sup> em fevereiro e 0,67 ms<sup>-1</sup> em novembro. A média anual ficou na faixa de 0,6 ms<sup>-1</sup> para ambos os períodos, sendo assim sua intensidade classificada como bafagem (light air - intensidade 1) pela escala de Beaufort (WMO, 2008). Analisando a direção do vento, percebe-se maior ocorrência na direção sudeste (SE) para os dados diurnos, sinalizando a atuação do sistema de brisa marítima. Já para o período noturno a direção predominante foi nordeste (NE), influenciado pelo sistema de brisa montanha-vale (Figura7).

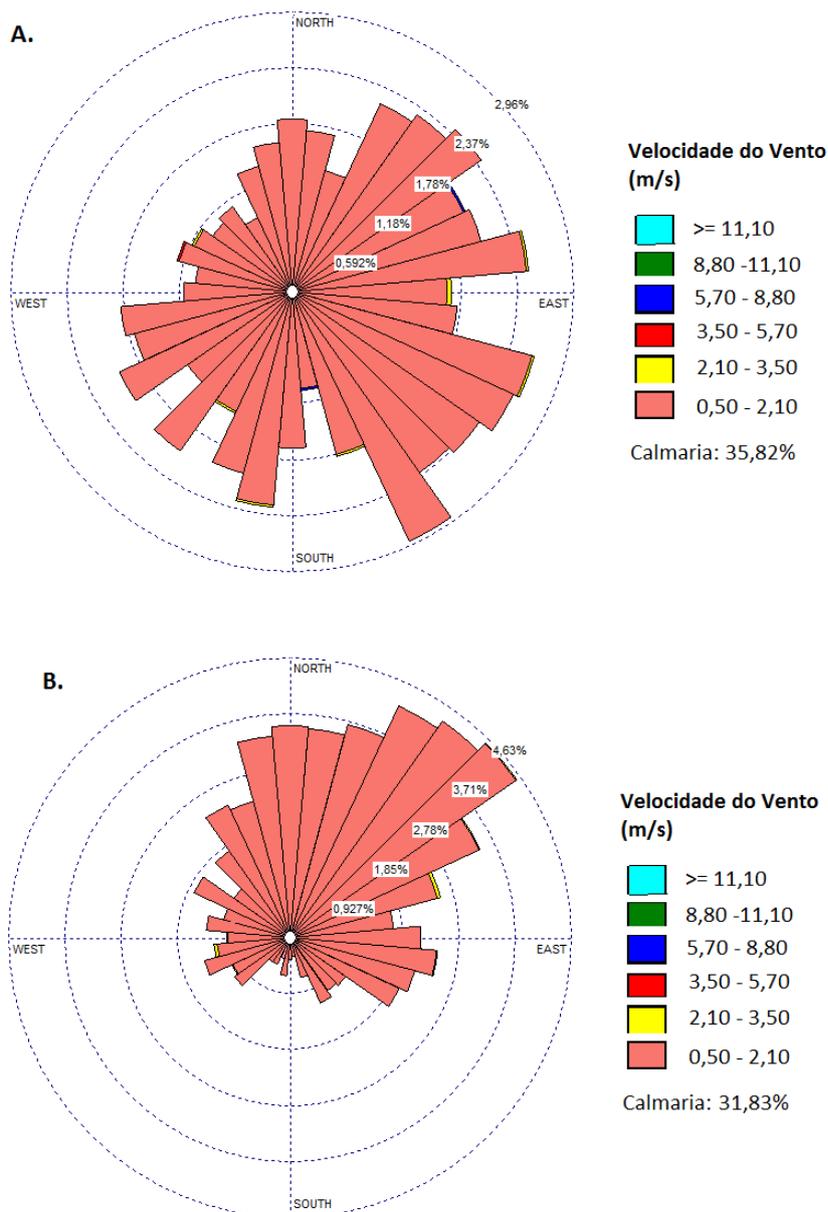


Figura 7: Rosa dos ventos da estação micrometeorológica do PNI para os períodos (A.) diurno (B.) noturno.

#### 4.1.2. Temperatura do Dossel

A temperatura do dossel, coletada pelo sensor de radiação infravermelha SI-111, apresentou valor médio anual de 18,42°C, sendo média de 19,74°C no período diurno e 17,10°C no período noturno.

Analisando os dados mensais, a temperatura média do dossel variou de 16,29°C no mês de agosto a 23,03°C no mês de dezembro para o período diurno, e de 14,06°C em julho a 19,70°C em março para o período noturno. A variação ao longo do ano também acompanhou a sazonalidade da região, apresentando valores mais baixos durante a estação seca e mais elevados na estação chuvosa (Figura 8).

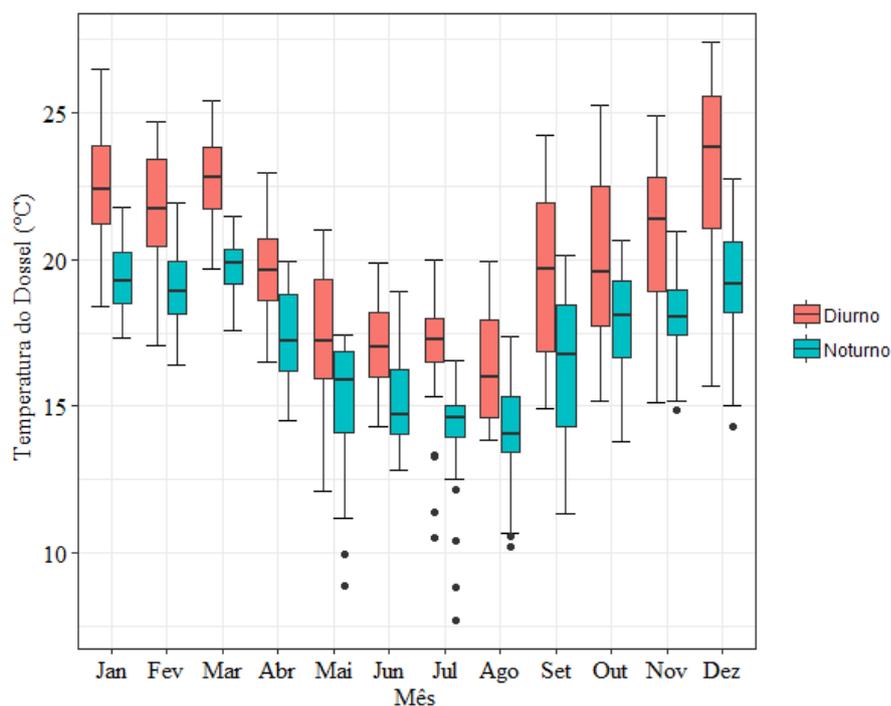


Figura 8: Boxplot da temperatura do dossel mensal.

A temperatura do dossel máxima registrada no ano de 2018 foi de 31,83°C, ocorrida às 15h do dia 18 de dezembro. Algumas pesquisas realizadas em florestas tropicais mostraram que a temperatura ótima da fotossíntese ocorre entre 20°C e 36°C, indicando que quando os valores de temperatura foliar ultrapassam essa faixa o processo de fixação de carbono pela planta começa a diminuir (GRAHAM et al., 2003; TRIBUSY, 2005; FELSEMBURGH, 2009; MARENCO et al., 2014). No PNI a temperatura do dossel florestal permaneceu dentro da faixa ótima de temperatura da fotossíntese em 30,48% do tempo no período analisado.

A menor temperatura do dossel registrada foi de 5,21°C, ocorrida às 07h do dia 12 de julho. Esta data apresentou a menor média diária do ano para essa variável, com 9,10°C. A maior média diária da temperatura do dossel foi de 25,09°C, no dia 18 de dezembro.

Na Figura 9 é possível observar a variação da temperatura do dossel ao longo do dia e fazer uma comparação com as demais variáveis coletadas pela torre micrometeorológica do PNI. A temperatura do dossel possui um comportamento crescente a partir das 06h, atingindo o seu ponto máximo às 15h. A temperatura do dossel segue uma curva diurna, com as temperaturas se elevando devido ao aumento da radiação solar e da temperatura do ar. Nos períodos de maiores valores da temperatura do dossel a condição local encontrada foi de temperatura do ar elevada e baixa umidade relativa e velocidade do vento.

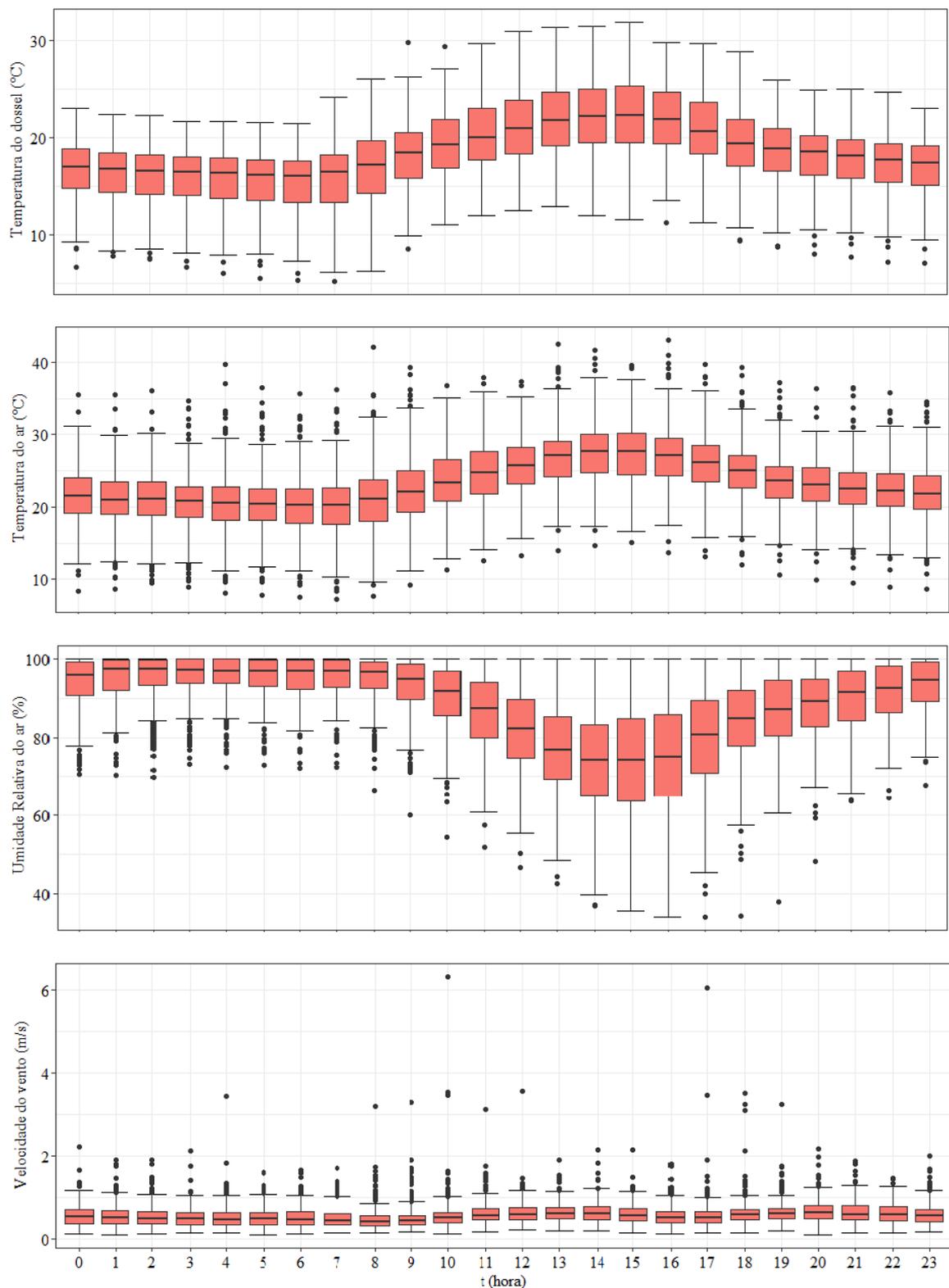


Figura 9: Variação horária das variáveis micrometeorológicas.

A temperatura do dossel esteve em média  $4,76^{\circ}\text{C}$  abaixo da temperatura do ar. Em condições normais os dosséis apresentam temperatura próxima ao do ar, se aquecendo

significativamente em condições de restrição hídrica (SCHERRER; BADER; KÖRNER, 2011). Dessa forma, a diferença média entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar pode ser utilizada como indicador de estresse hídrico das plantas (KEENER; KIRCHER, 1983; DUFFKOVÁ, 2006; DEJONGE et al., 2015). O resultado negativo apresentado na Figura 10 indica que o potencial de estresse hídrico na área estudada é mínimo.

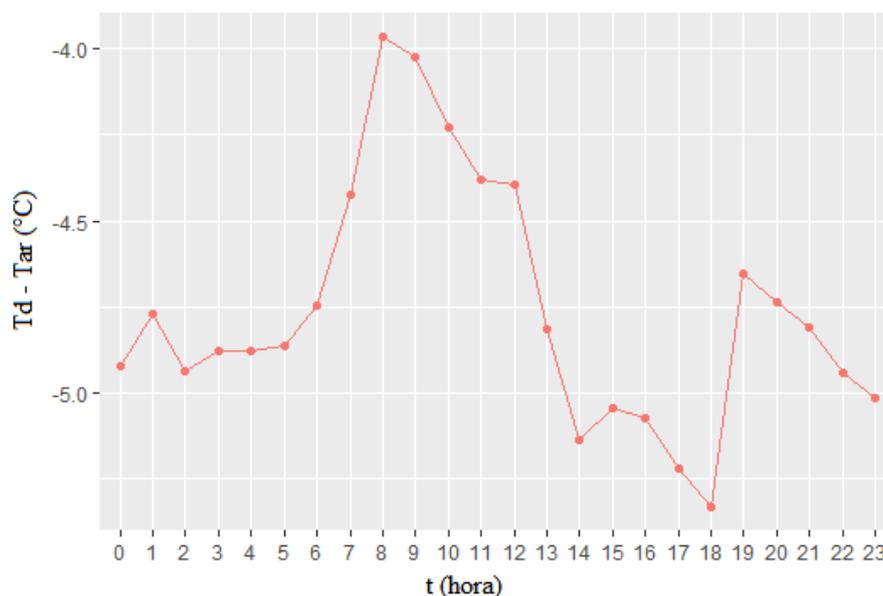


Figura 10: Diferença entre temperatura do dossel (Td) e temperatura do ar (Tar).

#### 4.1.3. Temperatura da Superfície Terrestre

A temperatura da superfície terrestre (TST) no Parque Nacional do Itatiaia apresentou média anual de 20,26°C no período diurno e 12,26°C no período noturno. Como apresentado na Figura 11, as temperaturas mais elevadas ocorreram na parte sul do Parque, correspondente à parte baixa do PNI, o que evidencia o efeito da altitude no resultado da TST. Khandan et al. (2018), em estudo sobre temperatura da superfície máxima no Irã, observou que NDVI (Índice de Vegetação por Diferença de Normalizada) e altitude apresentaram as maiores correlações com a TST observada.

Maior, junho e julho foram os meses com menores valores médios de TST em ambos os períodos, sendo respectivamente, 17,30°C, 17,39°C e 17,24°C no período diurno e 10,23°C, 10,26°C e 10,58°C no período noturno (Tabela 8 e Figura 11).

A maior média de TST foi no mês de dezembro, com 23,26°C, no período diurno, enquanto no período noturno o mês de março apresentou a maior média, com 14,91°C. A diferença entre as temperaturas diurna e noturna foi mais acentuada no mês de novembro, onde a média diurna foi de 21,77°C e a noturna de 10,64°C.

A alta dispersão dos dados é justificada pela grande heterogeneidade da paisagem do Parque, que apresenta 8 diferenciações de uso e cobertura do solo e alta amplitude altitudinal.

Tabela 8: Estatística descritiva da TST mensal.

Período		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Diurno	Min	15.61	16.77	17.61	14.67	13.41	13.55	12.61	14.20	16.97	17.82	15.43	18.38
	Max	29.90	28.71	28.89	26.19	23.90	22.63	22.70	25.45	28.96	28.59	30.99	32.49
	Média	21.37	21.50	21.99	18.88	17.30	17.39	17.24	18.54	21.32	22.58	21.77	23.26
	Desvio	2.56	2.40	2.19	2.31	2.00	1.84	1.95	2.07	2.29	2.10	2.92	2.66
	CV%	11.98	11.17	9.95	12.23	11.55	10.56	11.31	11.14	10.74	9.31	13.43	11.43
Noturno	Min	9.89	9.56	9.59	6.85	5.52	5.31	5.43	6.49	8.07	8.45	5.83	9.20
	Max	21.97	22.23	21.27	17.91	15.43	15.53	16.04	15.82	16.15	17.14	14.76	17.16
	Média	14.77	14.54	14.91	12.04	10.23	10.26	10.58	10.95	11.87	12.93	10.64	13.42
	Desvio	2.42	2.71	2.58	2.62	2.26	2.23	2.38	2.27	1.76	1.62	1.69	1.84
	CV%	16.38	18.64	17.30	21.76	22.09	21.73	22.50	20.73	14.83	12.53	15.88	13.71

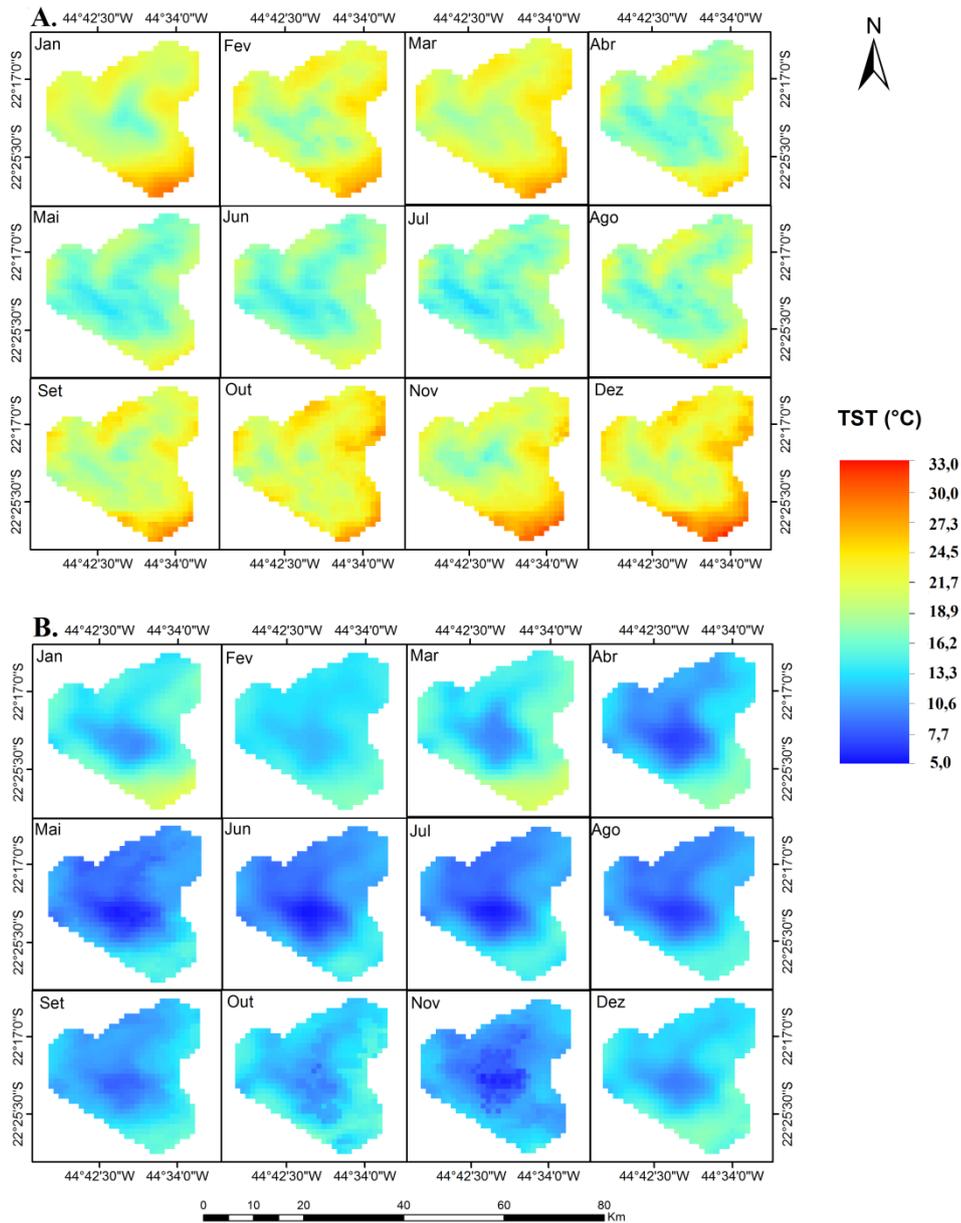


Figura 12: Variação mensal da TST (A) diurna, (B) noturna.

A TST por uso e cobertura do solo foi analisada considerando 7 das 8 classes identificadas no Parque, sendo excluída dessa análise as áreas de plantação por possuir área total menor do que a área mínima captada pelo sensor (Tabela 10 e Figura 12).

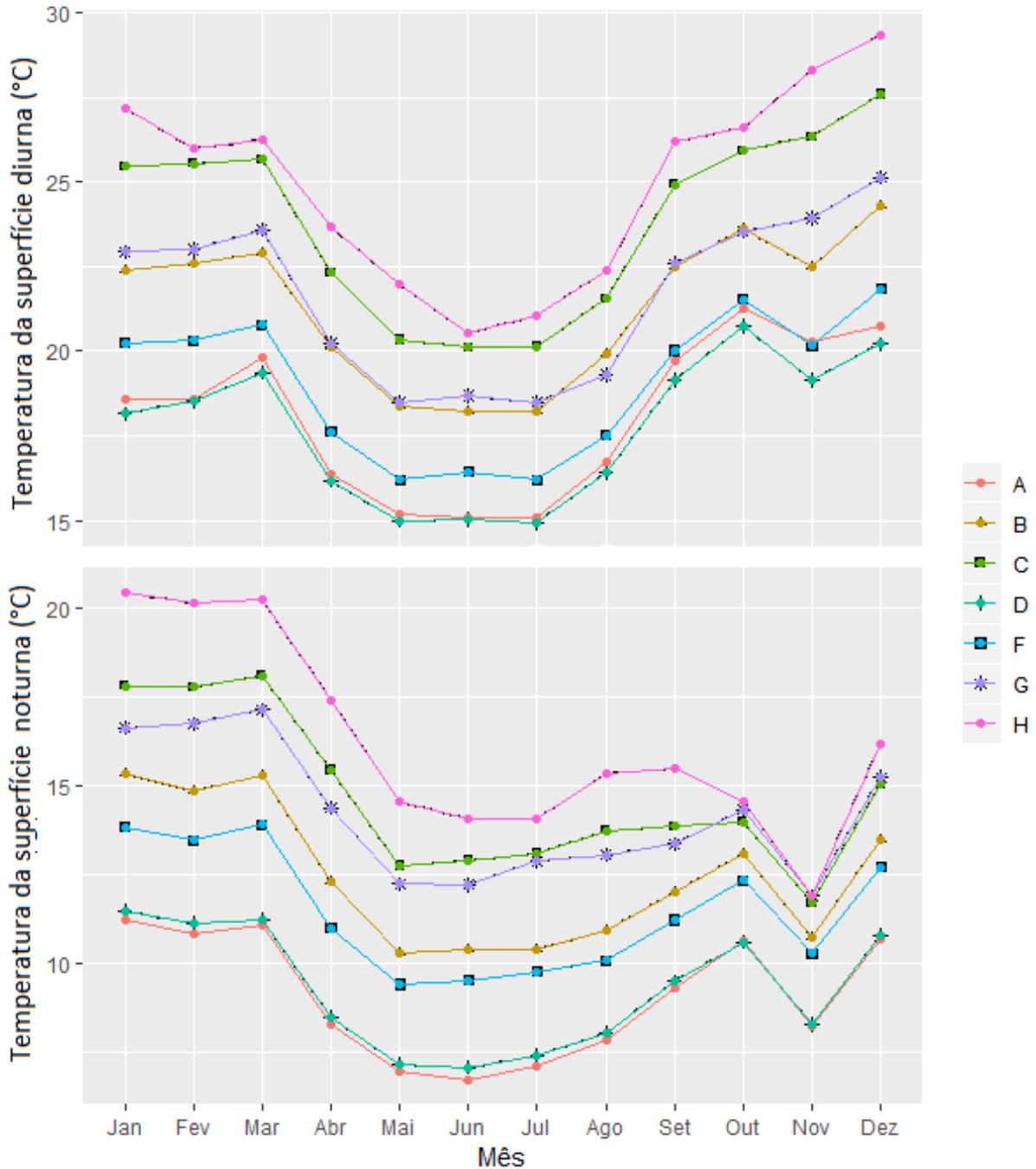


Figura 12: Temperatura da Superfície Terrestre por uso e cobertura do solo. (A) Afloramento Rochoso, (B) Agricultura, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (F) Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Montana e (H) Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana.

As classes campos de altitude e afloramentos rochosos apresentaram os menores valores de TST, sendo respectivamente 17,74°C e 18,12°C no período diurno e 9,29°C e 9,10°C no período noturno. Essas classes ocorrem no topo das montanhas do PNI, onde não tão raro são observadas temperaturas abaixo de 0°C e geadas (AXIMOFF; NUNES-FREITAS; BRAGA, 2016; MATOS; ROSADO, 2019).

Os maiores valores de TST foram observados nas classes floresta ombrófila densa sub-montana e área urbana. No geral a temperatura da superfície em áreas urbanizadas tende a ser maior do que em áreas naturais (HAN; XU, 2013; MADANIAN; SOFFIANIAN, 2018). As superfícies encontradas nessas áreas são em grande maioria impermeáveis, materiais com essa característica possuem alta capacidade de armazenar energia e geram maiores temperaturas (MOGHBEL; SHAMSIPOUR, 2019). Segundo Imhoff et al. (2010), a área de superfície impermeável é a principal responsável pelo aumento da TST nas cidades.

Já as altas temperaturas encontradas na classe de floresta ombrófila densa sub-montana pode ser explicada pela localização geográfica da mesma, estando toda a área concentrada na parte baixa do Parque. As diferenças nas TSTs das três classes de florestas evidenciam o efeito da altitude sobre a temperatura da superfície, visto que a classe alto montana, que ocorre em áreas acima dos 2000 m de altitude, apresentou a menor média entre as três classes em ambos os períodos (19,09°C e 11,47°C), sendo seguida pela classe montana (21,66°C e 14,18°C) e por fim a classe sub-montana (24,95°C e 16,21°C).

No geral os valores médios de TST foram menores na estação seca para todas as classes de uso e cobertura do solo em ambos os períodos, apesar das classes área urbana, floresta ombrófila densa montana e floresta ombrófila densa sub-montana apresentarem no período noturno a menor média mensal no mês de novembro.

Tabela 9: Estatística descritiva da TST por classe e uso do solo (A) Afloramento Rochoso, (B) Agricultura, (C) Área urbana, (D) Campos de altitude, (F) Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana, (G) Floresta Ombrófila Densa Montana e (H) Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana.

Período		A	B	C	D	F	G	H
Diurno	Min	15.08	18.21	20.10	14.93	16.21	18.48	20.56
	Max	21.24	24.28	27.59	20.74	21.83	25.13	29.34
	Média	18.12	21.31	23.82	17.74	19.07	21.66	24.95
	STD	2.32	2.20	2.73	2.12	2.12	2.44	2.92
	CV%	12.78	10.34	11.48	11.95	11.11	11.25	11.71
Noturno	Min	6.74	10.30	11.72	7.10	9.43	11.91	11.93
	Max	11.25	15.33	18.11	11.49	13.92	17.14	20.44
	Média	9.10	12.43	14.69	9.29	11.47	14.18	16.21
	STD	1.74	1.95	2.17	1.71	1.71	1.88	2.78
	CV%	19.15	15.72	14.78	18.42	14.90	13.24	17.17

#### 4.2. Validação dos dados orbitais

A Figura 13 apresenta o comportamento mensal da temperatura do dossel observada (SI-111) e estimada (MOD11A2) para o ano de 2018 no PNI. Observa-se que em ambos os períodos a temperatura acompanha a sazonalidade da região, apresentando valores menores na época seca (abril a setembro) e maiores na época chuvosa (outubro a março). Um comportamento mais atípico foi observado para a TST do mês de novembro no período

noturno, onde a temperatura estimada pelo produto MOD11A2 apresentou a menor média do ano.

Para o período diurno os dados estimados de TST foram maiores que os dados coletados pelo sensor SI-111, enquanto no período noturno foi apresentado comportamento inverso. Os valores do viés médio (VM) (Tabela 10) confirmam a tendência do produto MOD11A2 superestimar a temperatura do dossel no período diurno (valores positivos variando de 1.56°C a 3.57°C) e subestimar no período noturno (valores negativos variando de -0.18°C a -4.22°C).

Resultado semelhante ao encontrado neste estudo foi observado por GOMIS-CEBOLLA; JIMENEZ; SOBRINO (2018), onde os dados diurnos de temperatura da superfície proveniente do sensor MODIS superestimaram a temperatura do dossel de uma área de floresta densa na Amazônia peruana, apresentando valor de VM acima dos 3°C.

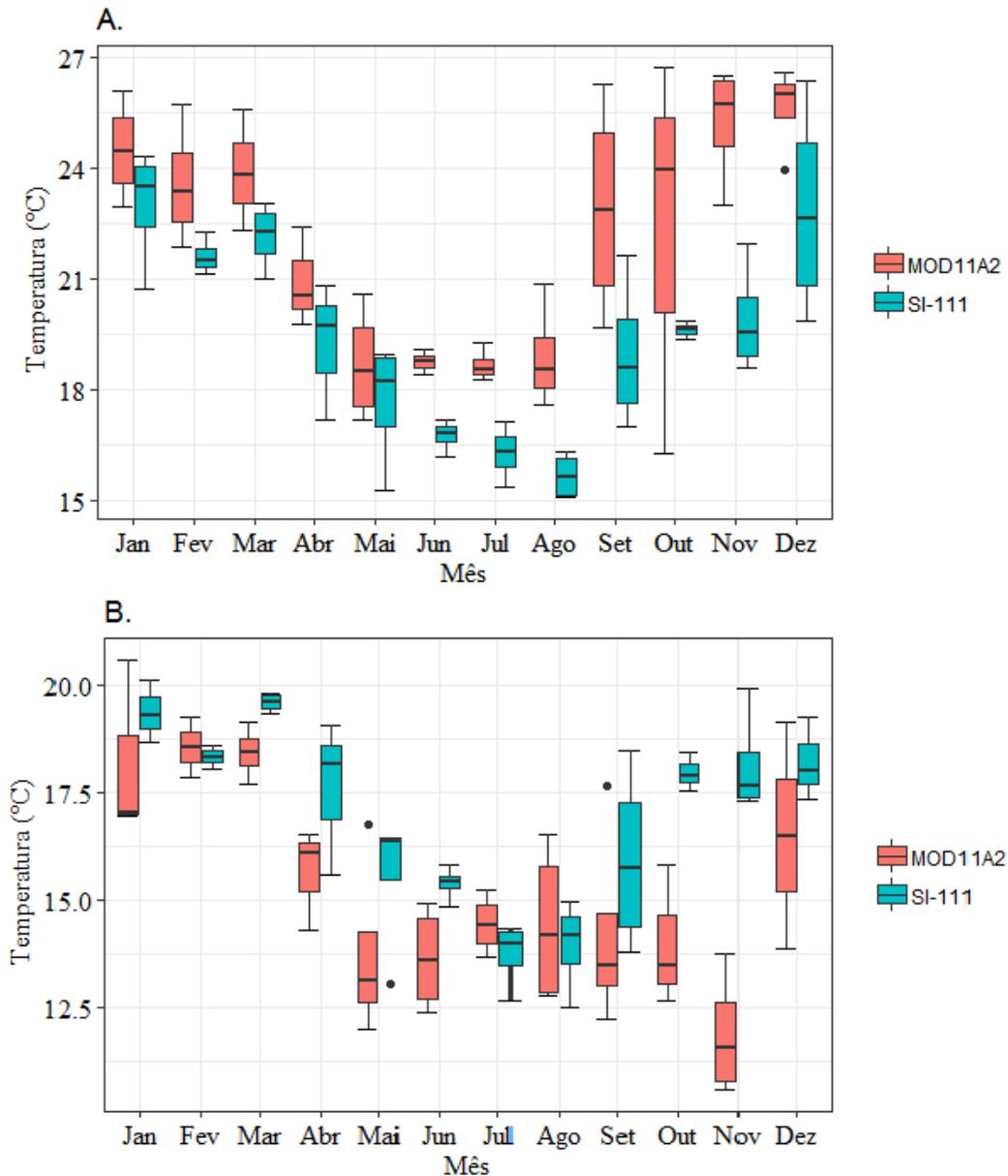


Figura 13: Boxplot da TST mensal derivada do sensor SI-111 e do produto MOD11A2 (A.) Diurna, (B.) Noturna.

Tabela 10: Análise estatística entre a temperatura do dossel coletada pelo sensor SI-111 e a TST estimada pelo produto MOD11A2 para o ano de 2018 no PNI.

Período	Estação do ano	N	r	VM (°C)	REM (°C)	d
Diurno	JFM	12	0.52	1.74	2.12	0.56
	AMJ	11	0.74	1.56	1.90	0.70
	JAS	12	0.86	3.18	3.46	0.64
	OND	11	0.11	3.67	5.06	0.41
Noturno	JFM	9	-0.51	-0.85	1.58	0.11
	AMJ	11	0.43	-1.83	2.48	0.51
	JAS	12	0.05	-0.18	2.19	0.46
	OND	10	-0.07	-4.22	5.00	0.18

N = tamanho da amostra; r = coeficiente de correlação; VM = viés médio; REM = erro quadrático médio; d = índice de Willmott.

A temperatura do dossel foi melhor estimada no período diurno, onde foram encontrados os maiores valores dos índices de correlação de Pearson e de concordância de Willmott (Tabela 10). Os trimestres correspondentes à estação seca apresentaram correlação muito alta entre os dados estimados e observados, sendo 0.74 para os meses de abril a junho e 0.86 para os meses de julho a setembro. Esse mesmo período apresentou também os maiores valores do índice de concordância de Willmott (0.70 e 0.64, respectivamente).

No período noturno o produto MOD11A2 não apresentou um bom desempenho para a estimativa da TST do PNI, principalmente no período chuvoso, apresentando correlação negativa e baixo índice de concordância nos meses de janeiro a março (-0,51 e 0,11) e de outubro a dezembro (-0,07 e 0,18). Contudo, o menor valor do REM encontrado nessa análise foi observado na estação chuvosa durante o período noturno (1.58°C nos meses de janeiro a março). Apesar do baixo valor do erro, os resultados dos índices de correlação de Pearson e concordância de Willmott apontam o desempenho insuficiente da estimativa da TST para esse período.

Já para o período seco a correlação foi muito baixa para os meses de julho a setembro (0,05) e moderada para o período de abril a junho (0,43), com o índice de concordância de Willmott variando de 0,46 a 0,51 e REM de 2,19C a 2,48°C, respectivamente.

A dispersão da temperatura da superfície observada pelo sensor SI-111 e estimada pelo produto MOD11A2 para os períodos diurno e noturno pode ser observada na Figura 14.

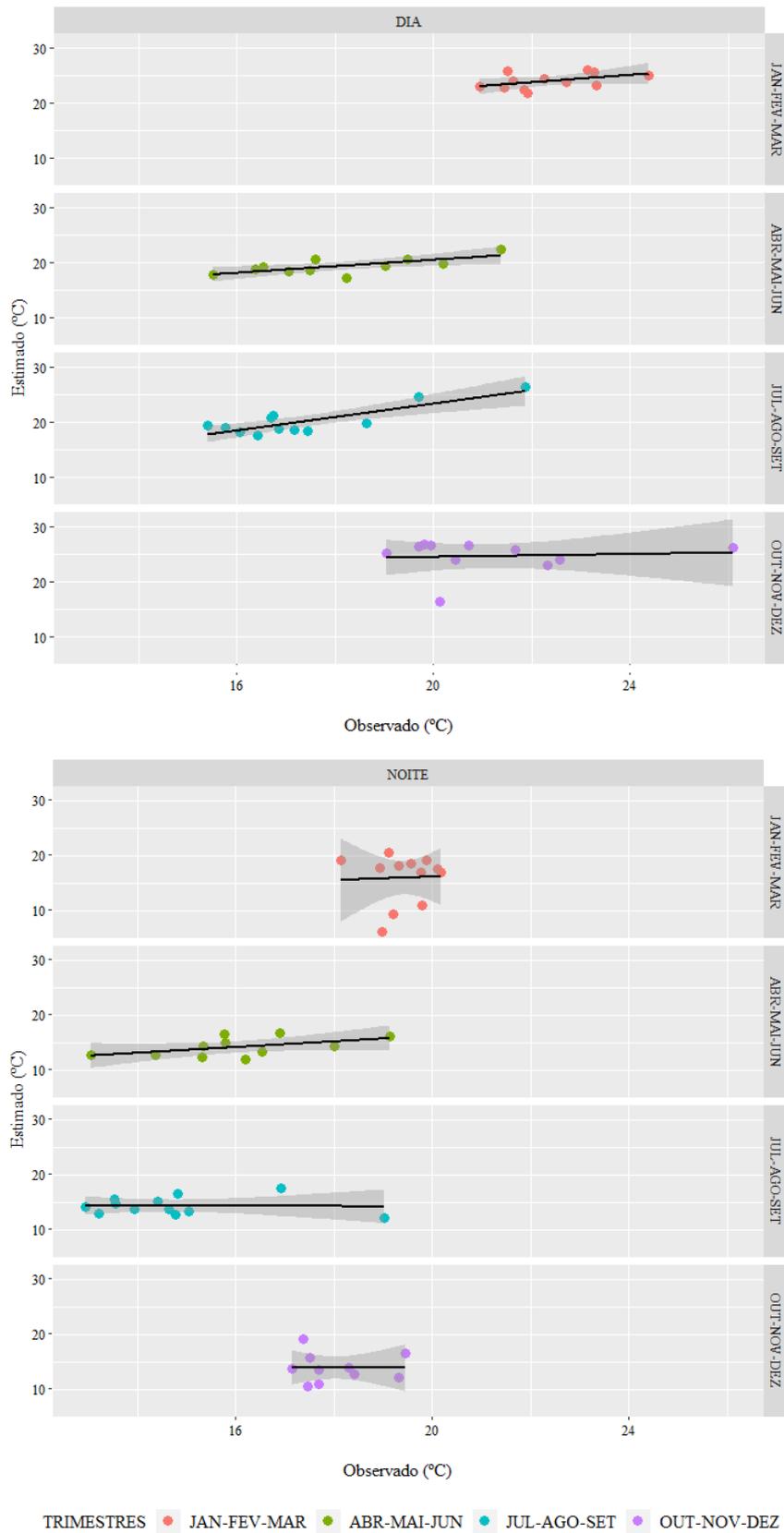


Figura 14: Dispersão dos dados diurnos e noturnos observados pelo sensor SI-111 em função dos estimados pelo produto MOD11A2.

No geral, os meses correspondentes a estação chuvosa tiveram um desempenho mais baixo, sendo a pior estimativa da TST ocorrida nos meses de outubro a dezembro em ambos os períodos, onde foi observada baixa correlação entre os dados observados e estimados (0.11 e -0.07), erro quadrático médio elevado (5.06°C e 5.00°C) e índice de concordância de Willmott baixo (0.41 e 0.18).

Através da análise dos dados de controle de qualidade das imagens utilizadas, observou-se que as imagens diurnas apresentaram na área amostrada 20.06% de pixels com boa qualidade a mais do que as imagens noturnas. Da mesma forma, as imagens dos meses correspondentes ao período seco apresentaram 25.57% de pixels com boa qualidade a mais do que as imagens correspondentes a estação chuvosa (Figura 15).

Dessa forma é possível afirmar que o produto MOD11A2 apresentou uma menor eficiência em condições atmosféricas mais úmidas, onde a maior quantidade de pixels de baixa qualidade e sem valor interferiu diretamente na estimativa da TST. A interferência da quantidade de vapor d'água atmosférico na estimativa da TST por sensoriamento remoto também foi observada por outros autores (COLL; WAN; GALVE, 2009; LI et al., 2014).

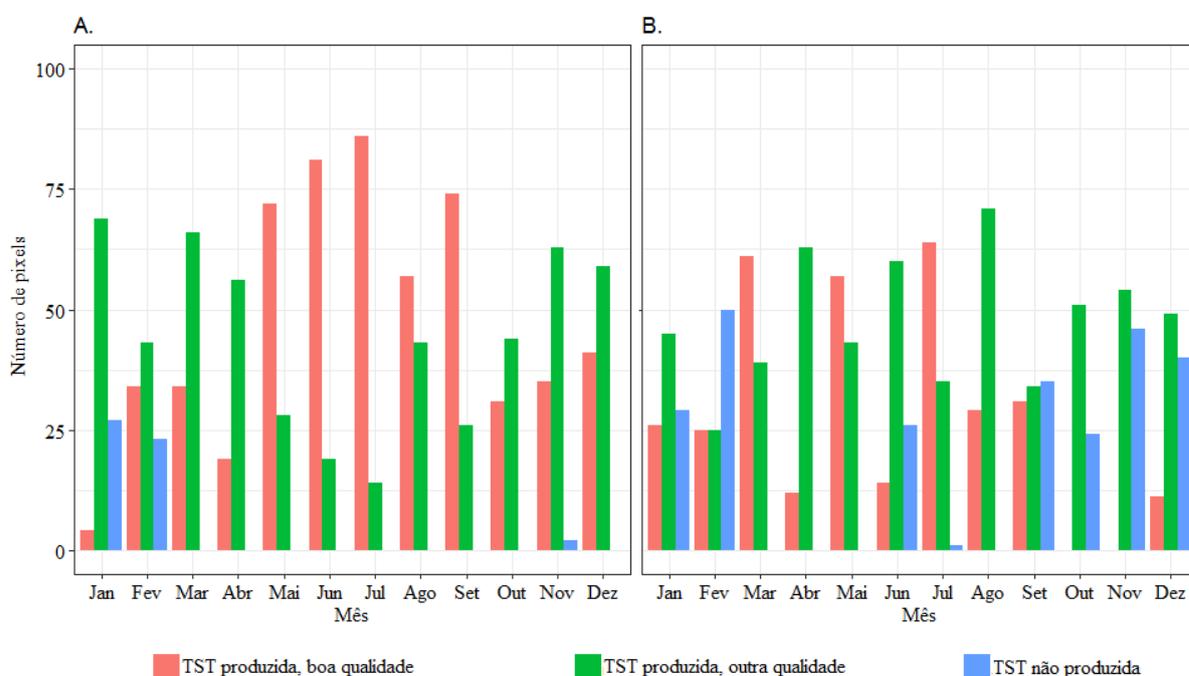


Figura 15: Qualidade dos pixels da amostra para os períodos (A.) diurno, (B.) noturno.

É válido mencionar que áreas espacialmente heterogêneas não são ditas como ideais para a realização da validação de dados orbitais de temperatura da superfície terrestre, principalmente aqueles com resolução espacial de 1km ou mais (COLL; WAN; GALVE, 2009). Essas áreas apresentam grande variabilidade espacial da TST, o que interfere nos resultados da avaliação. Contudo, é necessário que seja feita a validação desses dados em diferentes classes de uso e cobertura do solo, como na área de floresta atlântica utilizada nesse estudo, para que seja possível inferir sobre a aplicabilidade desses produtos em diversos ambientes.

## 5 CONCLUSÃO

A variação dos padrões mensais da temperatura do ar e do dossel coletados pelos instrumentos acoplados à Torre Micrometeorológica do Parque Nacional do Itatiaia caracteriza bem a distinção entre os períodos chuvoso e seco. Contudo, a umidade relativa do ar é elevada em todas as épocas do ano, principalmente durante o período noturno.

A temperatura da superfície terrestre é mais elevada na parte baixa do Parque Nacional do Itatiaia, o que evidenciou o efeito da altitude nos valores da TST. Os menores valores de TST no PNI são observados nos meses de maio, junho e julho, tanto no período diurno quanto noturno.

Dentre as formas de uso e ocupação do solo classificadas no PNI os campos de altitude e afloramentos rochosos apresentam os menores valores de TST. Os maiores valores são observados nas áreas de floresta ombrófila densa sub-montana e área urbana.

A temperatura do dossel é superestimada pelo produto MOD11A2 no período diurno e subestimada no período noturno. O produto MOD11A2 apresenta melhor estimativa da temperatura do dossel durante o dia e nos meses correspondentes a estação seca, indicando que esse produto possui limitações para estimar a temperatura da superfície em condições atmosféricas de maior umidade.

Vale ressaltar que os resultados apresentados neste trabalho se referem a uma área de floresta atlântica, com cobertura do solo e condições atmosféricas específicas, assim, para avaliar a aplicabilidade do produto MOD11A2 em outros tipos de ambientes se faz necessário estudos adicionais em áreas e condições atmosféricas diferentes às apresentadas nesse trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: v. 56
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- APOGEE. **Infrared Radiometers**. Disponível em: <<https://www.apogeeinstruments.com/infraredradiometer/>>. Acesso em: 15 jul. 2018.
- AXIMOFF, I.; NUNES-FREITAS, A. F.; BRAGA, J. M. A. Regeneração natural pós-fogo nos campos de altitude no Parque Nacional do Itatiaia , Sudeste do Brasil. **Oecologia Australis**, v. 20, n. 2, p. 62–80, 2016.
- BARRETO, C.G., CAMPOS, J.B., ROBERTO, D.M., ROBERTO, D.M., TEIXEIRA, N., ALVES, G.S.G., COELHO, W. **Plano de manejo Parque Nacional do Itatiaia**. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/pm\\_parna\\_itatiaia\\_enc1.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/pm_parna_itatiaia_enc1.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2018.
- BUSETTO, L.; RANGHETTI, L. MODIS<sub>tsp</sub> : an R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. **Computers and Geosciences**, v. 97, p. 40–48, 2016.
- CAI, X. et al. Improving Representation of Deforestation Effects on Evapotranspiration in the E3SM Land Model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 8, p. 2412–2427, 2019.
- CALDER, I. R. Canopy processes: implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources. In: **Tropical Forest Canopies: Ecology and Management**. 69. ed. Dordrecht: Springer, 2001. p. 203–214.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Sciety of america Journal**, v. 58, p. 1501–1511, 1994.
- ÇAMOĞLU, G. The effects of water stress on evapotranspiration and leaf temperatures of two olive (*Olea europaea* L.) cultivars. **Zemdirbyste-Agriculture**, v. 100, n. 1, p. 91–98, 2013.
- CASTELLETTA, M.; SODHI, N. S.; SUBARAJ, R. Heavy Extinctions of Forest Avifauna in Singapore : Lessons for Biodiversity Conservation in Southeast Asia. **Conservation Biology**, v. 14, n. 6, p. 1870–1880, 2000.
- CHANG, M. Sequestro de Carbono Florestal: oportunidades e riscos para o Brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, n. 102, p. 85–101, 2002.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- COLAIZZI, P. D. et al. Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers

- aboard center pivots. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 173–189, 2017.
- COLL, C.; WAN, Z.; GALVE, J. M. Temperature-based and radiance-based validations of the V5 MODIS land surface temperature product. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1–15, 2009.
- COLOMBO, A. F. **Consequencias potenciais das mudanças climáticas globais para espécies arbóreas da Mata Atlântica**. Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- CORDEIRO, S. A.; SOUZA, C. C. DE; MENDOZA, Z. M. S. H. Florestas brasileiras e as mudanças climáticas. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 11, 2008.
- DE OLIVEIRA SOUZA, T. C. et al. Spectral trend of vegetation with rainfall in events of El Niño-Southern Oscillation for Atlantic Forest biome , Brazil. **Environ Monit Assess**, v. 190, n. 688, 2018.
- DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.
- DEJONGE, K. C. et al. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agricultural Water Management**, v. 156, p. 51–62, 2015.
- DELGADO, R. C. et al. Synoptic events associated with the land surface temperature in Rio de Janeiro. **Biosci. J.**, v. 33, n. 2012, p. 1038–1047, 2017.
- DELGADO, R. C. et al. Seasonality of gross primary production in the Atlantic Forest of Brazil. **Global Ecology and Conservation**. v. 14, 2018.
- DIAS-FILHO, M. B. A fotossíntese e o aquecimento global. **Embrapa Amazônia Oriental. Documentos**, 234., p. 24, 2006.
- DIXON, R. K. et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v. 263, n. 5144, p. 185–190, 1994.
- DUFFKOVÁ, R. Difference in Canopy and Air Temperature as an Indicator of Grassland Water Stress. **soil & Water Res.**, v. 1, n. 4, p. 127–138, 2006.
- FELSEMBURGH, C. A. **Respostas fotossintéticas à variação da temperatura foliar do dossel na flona do Tapajós - PA**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo., 2009.
- FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; DALLAROSA, R. L. G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 1, p. 55–62, 2005.
- FUCHS, M. Infrared Measurement of Canopy Temperature and Detection of Plant Water Stress \*. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, p. 253–261, 1990.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atla dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: Período 2017 -2018**. São Paulo: Fundação SOSMata Atlântica/Instituto Nacional

de Pesquisas Espaciais, 2019. 68p.

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. DE G. **The Atlântic Forest of South america: Biodiversity Status, Threats, and Outlook**. Washington, DC: CABS and Island Press, 2003.

GAMARRA, N. L. R.; CORRÊA, M. DE P.; TARGINO, A. C. DE L. Utilização de sensoriamento remoto em análises de albedo e temperatura de superfície em londrina - PR: Contribuições para estudos de ilha de calor urbana. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 537–550, 2014.

GANDOLFI, S.; JOLY, C. A.; RODRIGUES, R. R. Permeability - impermeability : Canopy trees as biodiversity filters. **Sci. Agric.**, v. 64, n. 4, p. 433–438, 2007.

GATES, D. M. Leaf temperature and transpiration. **Agronomy Journal**, v. 56, p. 273–277, 1964.

GOMIS-CEBOLLA, J.; JIMENEZ, J. C.; SOBRINO, J. A. LST retrieval algorithm adapted to the Amazon evergreen forests using MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, n. November 2017, p. 401–411, 2018.

GRAHAM, E. A. et al. Cloud cover limits net CO<sub>2</sub> uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy seasons. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 100, n. 2, p. 572–576, 2003.

GRAY, S. B. et al. Intensifying drought eliminates the expected benefits of elevated carbon dioxide for soybean. **Nature Plants**, v. 2, n. 9, p. 1–8, 2016.

GUILLEVIC, P. C. et al. Land surface temperature product validation using NOAA's surface climate observation networks-scaling methodology for the visible infrared imager radiometer suite (VIIRS). **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 282–298, 2012.

HAN, G.; XU, J. Land Surface Phenology and Land Surface Temperature Changes Along an Urban – Rural Gradient in Yangtze River Delta , China. **Environmental Management**, v. 52, p. 234–249, 2013.

HEFT-NEAL, S.; LOBELL, D. B.; BURKE, M. Using remotely sensed temperature to estimate climate response functions. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 1, p. 014013, 2017.

HELLIKER, B. R. et al. Assessing the interplay between canopy energy balance and photosynthesis with cellulose  $\delta^{18}O$ : large - scale patterns and independent ground - truthing. **Oecologia**, v. 187, n. 4, p. 995–1007, 2018.

HIPARC. Projeto IKONOS – Itatiaia. Processamento Digital de Imagens. **Relatório Técnico**, p. 36, 2011.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. **Plant Ecology**, v. 24, p. 519–570, 1973.

IMHOFF, M. L. et al. Remote Sensing of Environment Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. **Remote Sensing of Environment**, v.

114, n. 3, p. 504–513, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. **IBGE**, p. 271, 2012.

JACKSON, R. D. et al. Temperature as a Crop Water Stress Indicator. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1133–1138, 1981.

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

KEENER, M. E.; KIRCHER, P. L. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. **Agric. Meteorol.**, v. 28, p. 339–349, 1983.

KHANDAN, R. et al. Characterization of maximum land surface temperatures in 16 years from MODIS in Iran. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 450, 2018.

KIM, Y. et al. Canopy skin temperature variations in relation to climate, soil temperature, and carbon flux at a ponderosa pine forest in central Oregon. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 226–227, n. August, p. 161–173, 2016.

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

LAW, R. D.; CRAFTS-BRANDNER, S. J. Inhibition and Acclimation of Photosynthesis to Heat Stress Is Closely Correlated with Activation of Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase / Oxygenase. **Plant Physiology**, v. 120, p. 173–181, 1999.

LEJEUNE, Q. et al. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes , circulation , surface temperature and precipitation. **Clim. Dyn.**, v. 44, p. 2769–2786, 2015.

LEUZINGER, S.; KO, C. Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 146, p. 29–37, 2007.

LI, H. et al. Evaluation of the VIIRS and MODIS LST products in an arid area of Northwest China. **Remote Sensing of Environment**, v. 142, p. 111–121, 2014.

LOWMAN, M. D. Canopy research in the twenty-first century: a review of Arboreal Ecology. **Tropical Ecology**, v. 50, n. 1, p. 125–136, 2009.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005.

MADANIAN, M. et al. Analyzing the effects of urban expansion on land surface temperature patterns by landscape metrics : a case study of Isfahan city , Iran. **Environ Monit Assess**, v. 190, n. 189, 2018.

MARTINS, C. R. et al. Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: A Importância da Química da Atmosfera. **Química Nova na Escola**, n. 5, p. 28–41, 2003.

MATOS, I. S.; ROSADO, B. H. P. Como as plantas dos campos de altitude enfrentam a seca? Desvendando a importância da diversidade funcional e dos eventos de neblina. **Boletim do Parque Nacional do Itatiaia**, v. 30, 2019.

MITTERMEIER, R.A., TURNER, W.R., LARSEN F.W., BROOKS T.M., G. C. Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots. In: Zachos F., Habel J. (eds) Biodiversity Hotspots. In: ZACHOS, F.; HABEL, J. (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 3–22.

MITTERMEIER, R. A. et al. **Hotspots revisited: earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions**. Washington: CEMEX, 2005.

MMA, M. DO M. A.-. **Mata Atlântica**. Disponível em: <[https://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica\\_emdesenvolvimento](https://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica_emdesenvolvimento)>. Acesso em: 6 out. 2019a.

MMA, M. DO M. A.-. **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs>>. Acesso em: 6 out. 2019b.

MOGHBEL, M.; SHAMSIPOUR, A. A. Spatiotemporal characteristics of urban land surface temperature and UHI formation : a case study of Tehran , Iran. v. 137, n. 3–4, p. 2463–2476, 2019.

MORAES, E. C. DE. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias da Aplicação**. Viçosa: UFV, 2007, 320p.

MYERS, N., R.A. MITTERMEIER, C.G. MITTERMEIER, G. A. B. D.-F. & J. K. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853–858, 2000.

OZANNE, C. M. P. et al. Biodiversity Meets the Atmosphere : A Global View of Forest Canopies. **Science**, v. 301, n. July, p. 183–186, 2003.

PACHECO, M. R. P. DOS S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>. **Estud. Av.**, v. 4, n. 9, p. 204–220, 1990.

PÉREZ-DÍAZ, C. L. et al. Evaluation of MODIS land surface temperature with in-situ snow surface temperature from CREST- SAFE. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 15–16, p. 4722–4740, 2017.

SÁ, M. O. et al. Estudo do clima e interações entre a floresta e a atmosfera, no Parque Nacional do Pico da Neblina, São Gabriel da Cachoeira, AM. In: **Desvendando as fronteiras do conhecimento na região amazônica**. p. 347.

SCHERRER, D.; BADER, M. K.; KÖRNER, C. Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1632–1640, 2011.

SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J. TVDI as an indicator of water status in spring-summer crops in Rio Grande do Sul State , Brazil. **Agrometeoros**, v. 1, p. 373–381, 2017.

SONG, Q. H. et al. Comparison of infrared canopy temperature in a rubber plantation and tropical rain forest. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 10, p. 1885–1892, 2017.

STORK, N. E. Insect diversity : facts , fiction and speculation \*. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 35, p. 321–337, 1988.

SUN, H. et al. Estimating mean air temperature using MODIS day and night land surface temperatures. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 118, n. 1–2, p. 81–92, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TRIBUSY, E. S. **Variações da temperatura foliar do dossel e o seu efeito na taxa assimilatória de CO<sub>2</sub> na Amazônia Central**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005.

VAN NGUYEN, O. et al. Temporal change and its spatial variety on land surface temperature and land use changes in the Red River Delta, Vietnam, using MODIS time-series imagery. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 7, p. 464–475, 2015.

WAN, Z. MODIS Land Surface Temperature Products Users Guide. n. December, 2013.

WAN, Z.; DOZIER, J. A Generalized Split- Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 892–905, 1996.

WAN, Z.; LI, Z. A Physics-Based Algorithm for Retrieving Land-Surface Emissivity and Temperature from EOS / MODIS Data. **IBGE**, v. 35, n. 4, p. 980–996, 1997.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York: Springer, 2016.

WILLMOTT, C. J. ON THE VALIDATION OF MODELS. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1 jul. 1981.

WISE, R. R. et al. Electron transport is the functional limitation of photosynthesis in field-grown Pima cotton plants at high temperature. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, p. 717–724, 2004.

WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. n. 8 Geneva: 2008.