

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

**TESE**

**Soluções para os efeitos das mudanças climáticas no Estado do Rio de Janeiro baseado em dados climáticos e produtos orbitais: Uma abordagem inovadora**

**Raquel de Oliveira Santos**

**2022**



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

**SOLUÇÕES PARA OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO**  
**ESTADO DO RIO DE JANEIRO BASEADO EM DADOS CLIMÁTICOS E**  
**PRODUTOS ORBITAIS: UMA ABORDAGEM INOVADORA**

**RAQUEL DE OLIVEIRA SANTOS**

*Sob a Orientação do Professor*

**Rafael Coll Delgado**

Tese submetida como requisito para  
obtenção do grau de **Doutora em Ciências**,  
no Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais e Florestais, Área de  
Concentração em Conservação da Natureza.

Seropédica, RJ

Agosto de 2022

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

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

d151s de Oliveira Santos , Raquel, 1987-  
SOLUÇÕES PARA OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO  
ESTADO DO RIO DE JANEIRO BASEADO EM DADOS CLIMÁTICOS  
E PRODUTOS ORBITAIS: UMA ABORDAGEM INOVADORA / Raquel  
de Oliveira Santos . - SAO GONCALO, 2022.  
104 f.

Orientador: Rafael Coll Delgado .  
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio  
de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais e Florestais, 2022.

1. Mata Atlântica . 2. Incêndios Florestais . 3.  
Modelagem Futura . 4. Sensoriamento Remoto . 5.  
Mudanças Climáticas . I. Coll Delgado , Rafael , 1978  
, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais e Florestais III. Título.

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

**RAQUEL DE OLIVEIRA SANTOS**

Tese submetida como requisito para a obtenção do grau de **Doutor (a) em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza

**TESE APROVADA EM 26/08/2022.**

---

Rafael Coll Delgado. Dr. UFRRJ.  
(Orientador)

---

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ

---

Douglas da Silva Lindemann. Dr. UFPEL

---

Rafael de Ávila Rodrigues. Dr. UFG

---

Sady Júnior Martins da Costa de Menezes. Dr. UFRRJ



Emitido em 2022

**TERMO Nº 1031/2022 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 27/09/2022 08:14 )*

MARCOS GERVASIO PEREIRA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)  
Matrícula: 1060711

*(Assinado digitalmente em 26/09/2022 14:24 )*

RAFAEL COLL DELGADO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptCAmb (12.28.01.00.00.00.00.29)  
Matrícula: 1872560

*(Assinado digitalmente em 27/09/2022 10:18 )*  
SADY JUNIOR MARTINS COSTA DE MENEZES

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptCMA (12.28.01.00.00.00.18)  
Matrícula: 1931586

*(Assinado digitalmente em 27/09/2022 13:44 )*

DOUGLAS DA SILVA LINDEMANN  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 009.216.190-14

*(Assinado digitalmente em 27/09/2022 16:10 )*

RAFAEL DE ÁVILA RODRIGUES  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 053.648.536-40

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número:  
**1031**, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **26/09/2022** e o código de verificação: **34da725c25**

## **DEDICO**

*A Gabriela Vieira (in memoriam), minha melhor amiga, que tanto me incentivou a prosseguir no doutorado, infelizmente não pode me ver chegar nesse glorioso dia, pois se tornou uma das tantas vítimas do Covid-19, essa vitória é sua também. “O que é o luto, se não o amor que perdura?”*

*Aos meus pais, Jayme Célio F. Santos e Tânia Regina A. O. Santos pelo que sou.*

## **OFEREÇO**

*Ao Iuri Pereira da Silva, meu marido.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida, “Ora, a fé é o firme fundamento das coisas que se esperam, e a prova das coisas que se não veem” Filipenses 4:13.

A busca da realização desse sonho começou cinco anos atrás no processo de seleção de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF). Durante esse processo evolui muito, não só como profissional, mas principalmente como ser-humano. O curso de doutorado já é um processo difícil e solitário, faze-lo a distância em virtude do período pandêmico, exigiu de mim uma força que não vem naturalmente, eu precisei aprender a depender de Deus e a rede maravilhosa de apoio que ele enviou.

Aos meus pais *Jayme Célio F. Santos e Tânia Regina A. O. Santos e as minhas irmãs, Priscila O.S e Damaris O.S*, por todo apoio e amor que vocês sempre dispensaram a mim, sem vocês eu não conseguiria, me acolheram nos meus piores dias e cuidaram com tanto amor, obrigada por nunca me deixaram desistir de mim mesma e do meu sonho.

Ao meu marido *Iuri Pereira da Silva*, por estar sempre ao meu lado, incentivando, encorajando, ajudando e também por toda compreensão e amor doados a mim, principalmente por entender todos esses anos de ausência para poder concluir esse ciclo.

A minha família por toda preocupação, torcida e orações a mim dedicadas, em especial, ao meu sogro *Francisco* por cuidar de mim quando tive Covid-19 e ser um bom amigo.

A todos meus amigos de vida hoje e sempre, distantes ou pertos, citar nomes aqui, seria injusto, entretanto não posso deixar de agradecer em especial as minhas amigas do laboratório LSRACA *Maria Lucia, Carolina de Jesus e Regiane Vilanova*, por não medirem esforços para me ajudar em cada etapa dessa tese, as amigas eternas do F1-36, a *Taiana Scheiner, Camila Caetano, Mara Lucia, Joyce, Ludmila e Monique* por horas de conversas via Skype no período de pandemia e intercessões, *Natalia Frasson, Sho, Layzza, Danielle, Marina e Mailson*, por me receberem em suas casas em diferentes períodos dessa jornada em Seropédica e serem apoios constantes nesses anos.

Ao meu orientador prof. *Rafael Coll Delgado*, não consigo achar uma palavra para externar com grande é a minha gratidão. Obrigada por todo conhecimento profissional, amizade, apoio, críticas construtivas e ensinamentos de vida transmitidos. Foi um grande

ciclo de amizade construído desde o mestrado e que se encerra agora no doutorado, mas que certamente levarei para vida toda, sou grata a Deus por ter tido você em minha vida.

A UFRRJ por meio do PPGCAF pela oportunidade de participar deste excelente curso, com a presença e convivência com professores amigos e altamente capacitados.

À CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade de estudo e toda a estrutura oferecida para minha formação acadêmica desde a graduação.

Aos professores *Douglas da Silva Lindemann, Rafael de Ávila Rodrigues e Sady Júnior Martins Costa de Menezes*, por aceitarem o convite para fazer parte da banca avaliadora e se mostrarem dispostos a acrescentar e lapidar o trabalho, em especial ao *Marcos Gervasio Pereira* por ter me escutado e acolhido em 2019 na sua sala, quando tive uma crise de ansiedade, saiba que me ajudou muito.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho e que me apoiaram nesta importante etapa da minha vida.

À sociedade civil, sem a qual não poderíamos estudar e ter pesquisadores capacitados, que através da ciência tornou possível, a criação da vacina contra covid-19, que ajudou a salvar vida e nós permitiu ter esperança para os dias mais sombrios que vivemos na história da humanidade.

Por fim, agradeço a imensa oportunidade que me foi dada pela vida e a mim mesma por não desistir de me tornar uma pesquisadora e fazer alguma diferença nesse planeta. Todas as lágrimas, medos, dores e inquietudes, convergiram para o que sinto hoje, um imenso orgulho de mim mesma e desse trabalho. O que molda você como pesquisador não é apenas seus resultados, publicações e números, tudo isso faz parte da obra e tem seu grande mérito, mas o importante é a sua contribuição para humanidade, evolução pessoal e desafios vencidos ao longo da trajetória. Eu sou grata porque a trajetória durante o doutorado me transformou em uma pessoa melhor, que seja o sonho desse título concretizado, só o início da transformação, que almejo levar através da educação, nos locais onde Deus me enviar.

*“É justo que muito custe o que muito vale”*

**Santa Teresa de Jesus**

## **BIOGRAFIA**

Raquel de Oliveira Santos, filha do Dr. Jayme Célio Furtado dos Santos e Tânia Regina Amaral de Oliveira Santos, nasceu no dia 7 de julho de 1987, na cidade de São Gonçalo, Rio de Janeiro.

Em setembro de 2007, iniciou o curso de graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com período sanduiche na Universidade de Santiago de Compostela, Espanha, através do programa Ciência sem Fronteiras, graduando-se em maio de 2014.

Em março de 2015, iniciou o curso de Pós-Graduação ao nível de Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais, com área de concentração em Conservação da Natureza, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, apresentando a dissertação para obtenção do título de *Magister Scientiae* em defesa pública em 22 de fevereiro de 2017.

Em março de 2018, iniciou o curso de Pós-Graduação ao nível de Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais, com área de concentração em Conservação da Natureza, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, apresentando a tese para obtenção do título de *Doctor Scientiae* em defesa pública em 26 de agosto de 2022.

## RESUMO GERAL

DE OLIVEIRA SANTOS, Raquel. **Soluções para os efeitos das mudanças climáticas no Estado do Rio de Janeiro baseado em dados climáticos e produtos orbitais: Uma abordagem inovadora.** 2022. – 103 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2022.

A floresta tropical do bioma mata atlântica estão entre as áreas mais importantes e de maior biodiversidade do mundo. Elas servem como reduto para uma variedade de espécies endêmicas da fauna e flora de diferentes domínios florestais. Por isso, é o único bioma brasileiro que tem sua própria Lei 11.428/ 2006 de proteção ambiental. Apesar disso, continua sendo intensamente desmatada, do que resta de apenas doze por cento da sua floresta primária. Essa degradação insustentável ocorre principalmente pela expansão das atividades agrícolas e pastoril, provocando o aumento dos incêndios florestais e a emissão dos gases do efeito estufa. A falta de fiscalização, cumprimento da lei ambiental e políticas públicas socioambientais voltadas para a manutenção e conservação das áreas florestais, só fortalece esse cenário catastrófico que a humanidade vive na atualidade. Nas últimas décadas, pesquisas têm sido feitas para monitorar e quantificar essas perdas e entender melhor os diversos mecanismos que podem ajudar na recuperação da Mata Atlântica frente as mudanças climáticas. Por exemplo, estudos sobre desastres hidrometeorológicos, monitoramento de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, incêndios florestais, emissão de carbono, bem como na elaboração de novas abordagens que sejam eficientes para mitigação desses impactos. Com o propósito de combater a degradação do bioma mata atlântica, este estudo investiga diferentes ferramentas para propor soluções eficazes de manter-se em pé e produtiva os diferentes ecossistemas do bioma da Mata Atlântica, diante das intervenções humanas e alterações climáticas severas. A tese foi dividida em dois capítulos, onde o primeiro avaliou o estado de seca da vegetação para doze usos e cobertura da terra para o estado do Rio de Janeiro (SRJ), também se verificou correlações positivas e negativas desse índice com outras variáveis como, temperatura do ar, chuva, umidade do solo, focos de incêndio, carbono e GPP. Ainda neste capítulo, foi aplicado o *Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)* na série do *the normalized multi-band drought index (NMDI)* para simulação futura da seca dos diferentes uso e cobertura do terreno, o que nos permitiu verificar como será o comportamento deles no futuro, ano de 2030. Além disso, os resultados mostraram

um decréscimo nos valores de NMDI para o período considerado seco no Estado do Rio de Janeiro (SRJ), principalmente para as classes de pastagem e savana, que apresentaram maiores fontes de calor. Baseado nos resultados do primeiro capítulo e na inquietude científica de propor soluções para o problema da mata atlântica no que concerne o monitoramento da vulnerabilidade da pastagem, já que se apresenta no cenário atual como um dos piores problemas regionais no enfrentamento das mudanças climáticas, propôs-se o segundo capítulo dessa tese. No segundo capítulo, foram utilizados dados de sensoriamento remoto, com objetivo de propor a utilização de uma nova ferramenta para o monitoramento da degradação da pastagem no Estado do Rio de Janeiro em função da variabilidade climática. Além disso, foram utilizados dados de chuva e temperatura média do ar do passado e para o futuro em diferentes cenários (SSP1.2.6 e SSP5.8.5), acrescentando-se que, aplicou-se a metodologia ARIMA para inferir sobre os níveis da degradação da pastagem na projeção futura. Os resultados indicam as áreas em que a degradação da pastagem futura no SRJ se intensificou com o aumento da temperatura e redução da chuva. O bioma mata atlântica é uma área de extrema importância para conservação da biodiversidade mundial, os resultados encontrados nesta pesquisa podem auxiliar diferentes órgãos ambientais nas metas de combate ao enfrentamento das mudanças climáticas. Inquestionavelmente, indicamos a necessidade de adoção de políticas públicas para recuperação e proteção dessas áreas das perturbações antrópicas e das mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** mata atlântica, incêndios florestais, modelagem futura, sensoriamento remoto, mudanças climáticas.

## ABSTRACT

DE OLIVEIRA SANTOS, Raquel. **Solutions to the effects of climate change in the State of Rio de Janeiro based on climate data and orbital products: An innovative approach.** 2022. – 103 p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forestry Sciences). Forestry Institute, Federal Rural University of Rio de Janeiro, RJ, 2022.

The tropical forests of the Atlantic Forest biome are among the most important and most biodiverse areas in the world. They serve as a stronghold for a variety of endemic species of fauna and flora from different forest domains. Therefore, it is the only Brazilian biome that has its own Law 11,428/2006 on environmental protection. Despite this, it continues to be heavily deforested, with only twelve percent of its primary forest remaining. This unsustainable degradation occurs mainly due to the expansion of agricultural and pastoral activities, causing an increase in forest fires and the emission of greenhouse gases. The lack of inspection, compliance with environmental law and socio-environmental public policies aimed at the maintenance and conservation of forest areas only strengthens this devastating scenario. In recent decades, research has been carried out to monitor and quantify these losses and better understand the various mechanisms that can help the Atlantic Forest to recover from climate change. Study on hydrometeorological disasters, monitoring extreme weather events such as droughts and floods, forest fires, carbon emissions, as well as developing new approaches that are efficient to mitigate these impacts. This study investigates mechanisms to propose solutions to keep the different ecosystems of the Atlantic Forest biome standing and productive, in the face of human interventions and severe climate change, combining, analyzing and making future projections of different types of tools to be used in the region. Of the Atlantic Forest in the State of Rio de Janeiro. The thesis was divided into two chapters, where the first evaluated the dry state of vegetation for twelve uses and land cover for the state of Rio de Janeiro, positive and negative correlations of this index with other variables such as air temperature were also verified. rain, soil moisture, fires, carbon and GPP. Also in this chapter, the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) was applied in the series of the normalized multi-band drought index (NMDI) to simulate the future drought of different land use and land cover, which allowed us to verify how they will behave. In the future, year 2030. In addition, the results showed a decrease in NMDI values for the period considered dry in the State of Rio de Janeiro (SRJ), mainly for the classes of pasture and savanna, which presented higher heat sources. Based on the results of the first

chapter and the scientific concern to propose solutions to the problem of the Atlantic Forest, the second chapter was proposed. In the second chapter, remote sensing data were used, in order to propose the use of a new tool for monitoring pasture degradation in the State of Rio de Janeiro as a function of climate variability. Past and future rainfall and average air temperature data were also used in different scenarios (SSP1.2.6 and SSP5.8.5), in addition to that, the ARIMA methodology was applied to infer about the levels of pasture degradation in the future projection. The results indicate the areas where the degradation of future pasture in the SRJ intensified with the increase in temperature and reduction of rainfall. The Atlantic Forest biome is an area of extreme importance for the conservation of global biodiversity. The results found in this research indicate the need to adopt public policies to protect this area from human disturbances and climate change.

**Keywords:** Atlantic Forest, forest fires, future modeling, remote sensing, climate change.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: NMDI classification by land cover classes.....	17
Tabela 2: Mann-Kendall and Pettitt trend analysis for a 2001-2019 time series. ....	20
Tabela 3: NMDI classification by use and future land cover classes. ....	24
Tabela 4: Avaliação da condição da cobertura vegetal utilizando o índice de degradação VC.....	54
Tabela 5. Análise da tendência de Mann-Kendall de todas as variáveis do estudo para área de pastagem.....	58
Tabela 6:Desempenho estatístico da modelagem ARIMA.....	67
Tabela 7: Valores da cobertura vegetal (vc) por estação seca e chuvosa .....	67
Tabela 8:Valores da cobertura (vc) por estação seca e chuvosa.....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo focada em usos e ocupações do solo (MCD12Q1) para o Estado do Rio de Janeiro. ....	8
Figura 2. Fluxograma geral da metodologia.....	12
Figure 3. Spatial distribution of the meteorological variables rain, temperature anomaly and soil water (Reanalysis 2) for the State of Rio de Janeiro during the period from 2001 to 2019. ....	14
Figura 4. Temporal distribution of carbon emissions in the State of Rio de Janeiro during the period from 2001 to 2019 .....	15
Figure 5. Number of fire foci for each use and coverage studied of the MCD12Q1 in the Sstate of Rio de Janeiro. ....	17
Figure 6. Temporal distribution of GPP for each studied use and coverage of MCD12Q1 in the State of Rio de Janeiro.....	18
Figure 7. Temporal distribution of NMDI for each studied use and coverage of MCD12Q1 in the State of Rio de Janeiro.....	18
Figure 8. Spatial analysis for NMDI in 2003 in the State of Rio de Janeiro. ....	19
Figure 9. Spatial analysis of fire foci using a kernel density in 2007 in the State of Rio de Janeiro.....	21
Figura 10. Spatial analysis for the GPP ( $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) in 2011 in the State of Rio de Janeiro.....	22
Figure 11. Spearman is Correlation for all variables and land cover classes in the State of Rio de Janeiro. ....	23
Figure 12. Future scenarios for land cover classes (MCD12Q1), through ARIMA modeling for the NMDI index (2020-2030) in the State of Rio de Janeiro.....	25
Figura 13. Localização da área de estudo de pastagem dentro do ERJ .....	50
Figura 14: Distribuição anual do Enhanced Vegetation Index (EVI) para serie temporal de (2001-2020). ....	57
Figura 15. Distribuição espacial do Enhanced Vegetation Index (EVI) de acordo com o teste de Pettitt (para o ano de 2008) .....	60
Figura 16. Análise do clima passado e futuro para área de pastagem, para chuva (mm) e temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ). Dados gerados a partir do modelo CanESM5.....	61
Figura 17. Análise do clima passado e futuro para área de pastagem, para temperatura média do ar em graus celsius (unidade $^{\circ}\text{C}$ ) na estação seca e chuvosa. Dados gerados a partir do modelo CanESM5.....	62
Figura 18. Análise do clima passado e futuro para área de pastagem, para chuva (mm) na estação seca e chuvosa. Dados gerados a partir do modelo CanESM5. ....	63
Figura 19. Análise boxplot dos focos de calor da série (2001-2020) para área de pastagem no ERJ.....	64
Figura 20. Análise dos focos de calor da série (2001-2020) para área de pastagem no ERJ por estação seca e chuvosa. ....	65
Figura 21. Análise espacial para a Densidade Kernel para o ano considerado pelo teste de Pettitt (para o ano de 2007).....	66
Figura 22. Análise de regressão ( $R^2$ ) e correlação ( $r$ ) dos dados VC simulados e VC observados para uso e cobertura de pastagem d0 SRJ.....	68
Figura 23. Distribuição temporal mensal para cada ano da modelagem futura do VC na área de pastagem para Mata Atlântica para os anos de 2021 a 2040.....	70

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>1.INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>2.MATERIALS AND METHODS.....</b>	<b>8</b>
2.1 Study área .....	8
2.2. Remote sensing data .....	9
2.3. Surface weather data .....	10
2.4. Statistical analysis .....	11
2.5. Present, past and future of NMDI .....	12
2.6. General methodology flowchart .....	12
<b>3.RESULTS .....</b>	<b>13</b>
3.1. Meteorological variables .....	13
3.2. Carbon emission, fire foci and GPP .....	15
3.3. Normalized multi-band drought index (NMDI).....	16
3.4. Mann-Kendall trend test, Pettitt's change point and Correlation Matrix .....	20
3.5. Validation, calibration and future scenarios of ARIMA modeling for NMDI .....	23
<b>4. DISCUSSION.....</b>	<b>26</b>
4.1. Data on fire foci and climate .....	26
4.2. Biophysical data .....	27
4.3. NMDI statistical analysis and ARIMA modeling .....	28
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>30</b>
<b>6. CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT.....</b>	<b>31</b>
6.1. Declaration of competing interest.....	31

6.2. Acknowledgment.....	31
<b>7. REFERENCES .....</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>42</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>43</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>45</b>
<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>2.MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
2.1. Área de Estudo.....	50
2.2 Dados de Sensoriamento Remoto .....	51
2.2.1. Área de Pastagem .....	51
2.2.2. Dados do <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI) .....	51
2.2.3. Focos de Calor.....	52
2.4. Procedimentos para detectar a degradação da vegetação .....	53
2.5. Presente, passado e futuro do VC.....	54
2.6. Análise estatística .....	55
2.6.1. Teste estatístico não paramétrico Mann-Kendall para variáveis EVI e Focos de Calor .....	55
2.6.2. Teste de Pettitt .....	55
2.6.3. Análise estatística da modelagem ARIMA .....	56
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
3.1. Dinâmica da vegetação usando o produto MODIS .....	57
3.1.1. Análise mensal do Mann-kendall para EVI e Focos de Calor.....	58
3.1.2. Análise de Pettitt.....	59
3.2. Clima ( <i>baseline</i> e futuro).....	60
3.3. Análise espacial dos focos de calor .....	64
3.4. Análise de Mann-Kendall e densidade de Kernell dos Focos de calor .....	65
<b>4.DISCUSSÃO .....</b>	<b>71</b>

4.1. Dinâmica espaço-temporal da Pastagem no ERJ .....	71
4.2. Como o clima afeta a pastagem.....	72
4.3. Prognóstico da modelagem ARIMA para predição do VC (2021-2040).....	74
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>
<b>7. AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>84</b>
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>84</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

O Bioma mata atlântica é o resultado de uma rica floresta de milhões de anos, que em poucos séculos devido a intensa exploração, perdeu quase a totalidade da sua floresta original, restando apenas fragmentos de remanescentes originais. Entretanto, ainda possui uma enorme biodiversidade, sendo protegida pela LEI Nº 11.428, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2006. Esse bioma possui uma grande importância global frente ao combate das mudanças climáticas, pois é o segundo bioma mais importante em relação às remoções de gases do efeito estufa.

Decerto, a mata atlântica possui uma biodiversidade única, seu valor é imensurável, as suas florestas desempenham papel importante na regulação do clima, como sumidouro de carbono, na riqueza hídrica das suas bacias-hidrográficas e no solo rico onde é produzido o alimento para milhares de pessoas, serviços ecossistêmicos, que ajudam na manutenção, recuperação ou melhorias das condições ambientais.

Diversas pesquisas têm sido realizadas ao longo dos últimos anos, na tentativa de entender as ferramentas mais eficazes para sua recuperação e mecanismos para o enfrentamento das mudanças climáticas, as intensas transformações do uso e cobertura da terra, os crescentes desastres ligados a eventos extremos, aqui podemos entender, as secas, incêndios, escorregamentos e inundações. Além disso, a floresta sofre com as intensas tentativas políticas de flexibilização da lei ambiental, para exploração das suas áreas protegidas.

É incontestável que existe um grande número de instituições, universidades, ONG's, sociedades civis, públicas e privadas, envolvidas na causa ambiental de proteger a mata atlântica, entretanto, a degradação ambiental tem crescido nos últimos anos por inúmeros motivos, a citar, a expansão dos setores de agropecuária, especulação imobiliária, exploração de recursos minerais e florestais, dentre outros. Com isso, nós vivemos cercados por constantes notícias sobre a ocorrência de incêndios florestais, secas, desastres antrópicos e pandemias causadas pelo desequilíbrio ambiental, como Dengue, Zica.

Entre tantas leituras, artigos científicos, meios de comunicação, relatórios internacionais e nacionais, encontramos diversos cenários que apontam perspectivas ótimas e

pessimistas, que preveem desde a preservação da mata atlântica sendo um grande sumidouro de carbono, até se torna um grande deserto, que vai obrigar a intensas migrações de pessoas e animais para outros locais.

O momento que a humanidade vivência frente as mudanças climáticas, já não nos permiti fazer indagações vazias ou termos respostas sem soluções com alternativas práticas, que nos possibilitem amenizar ou quiçá resolver os diferentes problemas encontradas na mata atlântica.

A Mata Atlântica se estende ao longo de 17 estados brasileiros: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Alagoas, Sergipe, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí, cada um com suas peculiaridades regionais de fauna e flora, com desafios constantes frente ao combate do desmatamento e mudanças climáticas. Seria uma grande utopia como pesquisadora, ambicionar em uma tese de doutorado, trazer propostas ou soluções para todo o bioma. Baseado na realidade da minha experiência pessoal, e convive-o direto dentro dos desafios e oportunidades, que é trabalhar na mata atlântica brasileira do estado do Rio de Janeiro, com sua extensão e grande biodiversidade, essa região foi escolhida para o trabalho da tese. A pesquisa de doutorado está dividido em dois capítulos:

O primeiro capítulo, com título ***“NMDI application to monitor the vegetation of the Atlantic Forest biome, Brazil”***. Utilizando o Índice de seca multibanda normalizado (NMDI), teve como objetivo avaliar a dinâmica espaço-temporal para o passado, presente (2001-2020) e futuro (2021-2030) do Índice de Seca Multibanda Normalizado (NMDI) no Bioma Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro, Brasil, em relação aos incêndios florestais. O artigo foi publicado na revista ***Weather and Climate Extremes (qualis A1), 2021***.

O segundo capítulo, surgiu baseado nos resultados do primeiro capítulo e na inquietude científica de propor soluções para o problema da mata atlântica no que concerne o monitoramento da vulnerabilidade da pastagem no ERJ, já que se apresenta no cenário atual como um dos piores problemas regionais no enfrentamento das mudanças climáticas, propôs-se o segundo capítulo dessa com título ***“Proposta de um índice para o monitoramento das áreas de pastagens na mata atlântica: Soluções para os problemas levantados no último relatório do IPCC”***.

## CAPÍTULO I

### **NMDI application for monitoring different vegetation covers in the Atlantic Forest biome, Brazil <sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> **Artigo publicado:** DE OLIVEIRA, R.S; DELGADO, R.C.; VILANOVA, R.S.; SANTANA, R. O DE.; ANDRADE, C. F.; TEODORO, P.E.; DA SILVA JUNIOR, C.A.; CAPRISTO, S.; GUILHERME, F.; LIMA, M. NMDI application to monitor the vegetation of the Atlantic Forest biome, Brazil. **WEATHER AND CLIMATE EXTREMES JCR**, v. n/a, p. 100329-n/a, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100329>. Formatação de acordo com as normas da revista.

## RESUMO

As mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global têm impactos significativos no bioma Mata Atlântica. Muitos incêndios florestais são causados por eventos de seca extrema, que apresentam um futuro incerto para sua vegetação, e seus riscos associados são sensíveis principalmente em escala local. Nesse contexto, o presente estudo avaliou e correlacionou o índice de seca multibanda normalizado (NMDI) com variáveis biofísicas no período mensal de 2001 a 2019 em 12 classes de cobertura do solo. O modelo Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) foi aplicado à série NMDI e sua capacidade de simular dados da série temporal observada (2001–2019) e do futuro (2020–2030). Os resultados mostraram um decréscimo nos valores de NMDI para o período considerado seco no Estado do Rio de Janeiro (SRJ), principalmente para as classes de pastagem e savana, que apresentaram maiores fontes de calor. A análise não paramétrica foi realizada por meio do teste de Mann-Kendall para todas as variáveis biofísicas. As variáveis umidade do solo e NMDI apresentaram tendências negativas ( $Z = -1,68$  e  $Z = -0,76$ ), enquanto a produtividade primária bruta (PPB) apresentou tendência positiva ( $Z = 1,89$ ). A modelagem ARIMA gerada e validada simulou o índice NMDI e o coeficiente de Willmott ( $d$ ) foi de aproximadamente 1,0 para o período de estudo. A projeção de 10 anos (2020–2030) do NMDI para o SRJ apontou para uma mudança de classe de úmido para seco na área de floresta mista (D) e terra cultivada (L). O modelo ARIMA pode representar o índice de seca na sazonalidade da série para as diferentes classes de vegetação. Esses resultados mostraram que a aplicabilidade do NMDI na previsão de condições de risco de incêndio seria adequada em outras áreas de florestas tropicais, destacando-se principalmente por ser um índice de seca que pode ser utilizado em modelagem futura.

**Palavras-chave:** Índice de Seca, modelagem futura; sensoriamento remoto; desastres ambientais; mudanças climáticas

## ABSTRACT

Climate change due to global warming has significant impacts on the Atlantic forest biome. Many forest fires are caused by extreme drought events, which present an uncertain future for their vegetation, and their associated risks are sensitive mainly at the local scale. In this context, the present study evaluated and correlated the normalized multi-band drought index (NMDI) with biophysical variables in the monthly period from 2001 to 2019 in 12 land cover classes. The Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) model was applied to the NMDI series and its ability to simulate data from the observed time series (2001–2019) and the future (2020–2030). The results showed a decrease in the NMDI values for the period considered dry in the State of Rio de Janeiro (SRJ), mainly for the classes of pasture and savannah, which presented greater sources of heat. The non-parametric analysis was performed using the Mann-Kendall test for all biophysical variables. The variables soil moisture and NMDI showed negative trends ( $Z = -1.68$  and  $Z = -0.76$ ), whereas gross primary productivity (GPP) showed a positive trend ( $Z = 1.89$ ). The generated and validated ARIMA modeling simulated NMDI well and the Willmott coefficient ( $d$ ) was approximately 1.0 for the study period. The 10-year projection (2020–2030) from NMDI for SRJ pointed to a change in class from wet to dry in the mixed forest area (D) and cultivated land (L). The ARIMA model can represent the drought index in the seasonality of the series for the different classes of vegetation. These results showed that the applicability of NMDI in predicting fire risk conditions would be adequate in other areas of tropical forests, standing out mainly for being a drought index that can be used in future modeling.

**Keywords:** drought index, future modeling, remote sensing, environmental disasters, climate change

## 1. INTRODUCTION

The Atlantic Forest is one of the great Brazilian biomes and is considered a biodiversity fire focus in the world, because of its great biodiversity richness and because of the degradation that it has suffered over the years (Bustamante et al., 2019). Its natural forest cover represents 12.4% of the remaining forest and the majority has less than 50 ha (Freitas et al., 2020).

A recurrent threat to this biome and other tropical forests is criminal forest fires and the recurrence of extreme drought events. Mainly due to changes in the local climate (Bittencourt et al., 2020); their occurrence harms local ecology and affects the planet's socio-environmental and financial sectors (Andrade et al., 2019). Human health has also been affected by the toxicity of smoke in the environment, in addition to the deaths caused from the fires themselves (Balch et al., 2017).

Several spectral indices derived from satellites are widely used in research to infer vegetation moisture conditions, detect active fires, and monitor the severity of droughts in forest ecosystems (Swathandran et al., 2019). The NMDI (Wang et al., 2007, Wang et al., 2007) is used in research on the monitoring of forest fire hazards, as it guarantees more accurate assessments of the severity of the effect of drought on vegetation (L Wang and Qu, 2007). Although several studies have shown the influence of drought on the occurrence of fires in the Atlantic Forest, NMDI has not yet been applied in this area.

According to Silva et al. (2020), forest fires are likely to increase, as shown by projections of climate change, intensified mainly by human actions and extreme drought events. These events are likely to intensify several economic, environmental, and especially social impacts, thereby increasing the population vulnerability (Santos et al., 2018).

To help understand the vegetative dynamics and simulate past, present, and future distribution patterns in the face of extreme events, modeling has been used in several studies (Vilanova et al., 2020). Among the models cited and used in the literature, the Autoregressive Integrated Moving Average Model (ARIMA) has been widely used in studies of tropical forests (Villanova et al., 2020; Santana et al., 2020). The model allows the use of data to time series analysis, which helps interpret future processes in vegetation, land use, and land cover (Fashae et al., 2019).

With the current increase in arson and disasters linked to hydrological imbalance, the need for research to monitor the risk of fire in the Atlantic Forest areas is critical.

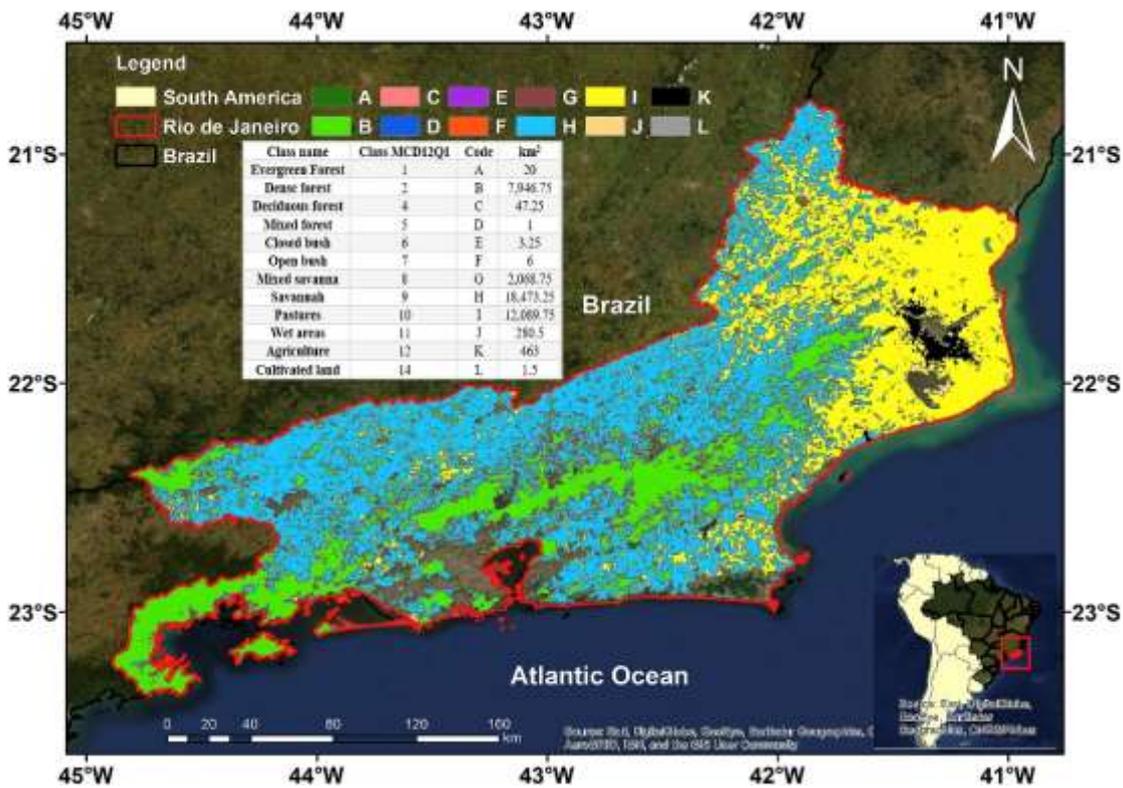
Therefore, it is necessary to have adequate knowledge of biophysical variables and their interactions with a drought index capable of monitoring different forest cover, as the biophysical variables are directly related to forest fire events.

Given this current critical scenario, the environmental monitoring carried out using remote sensing techniques needs to be improved, creating new data that provide useful information for better inspection of the Atlantic forest. However, some questions need to be answered, such as: i. Is NMDI a representative drought index that can be used to monitor forest fires in the Atlantic Forest?; ii. Can it be used as an environmental planning tool for the SRJ?; iii. Which uses were most vulnerable to fires in the past, and which would be most vulnerable in the future?; and iv. Is ARIMA modeling capable of significantly simulating the NMDI series for the future? To answer these questions, this study has aimed to evaluate and correlate the NMDI drought index between 2001 and 2019 with biophysical variables, and in addition, to generate future simulations of this index for the period from 2020 to 2030 through ARIMA modeling in the SRJ, Brazil.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Study área

The State of Rio de Janeiro (SRJ) is located in the southeastern region of Brazil, and its altitude reaches 2 787 m at Pico das Agulhas Negras, located in Itatiaia National Park. The state's area is 43780.172 km<sup>2</sup>, which corresponds to about 0.51% of the Brazilian territory. The climate of SRJ is divided into eight climatic types according to the new Köppen classification for Brazil (Alvares et al., 2013). Twelve classes of vegetation chosen for this study were verified in the state (Fig. 1) (NASA, 2020).



**Figura 1:** Study area focused on land uses and occupations (MCD12Q1) for the State of Rio de Janeiro. As classes de cobertura do solo são: A (Evergreen Forest), B (Dense Forest), C (Deciduous Forests), D (Mixed Forests), E (closed bush), F (open shrubs), G (mixed savanna), H (savannah), I (pasture), J (flooded land), K (agriculture), L (farmland).

## 2.2. Remote sensing data

Data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) product MCD12Q1 with a spatial resolution of 500 m (Sulla-Menashe and Friedl, 2018), version 006, was used. It contains five types of classification, which describe the surface coverage properties derived from observations of the MODIS sensor on board the AQUA and TERRA satellites over a year. The first surface cover scheme identifies 17 classes defined by the International Biosphere Geosphere Program (IGBP), including 11 classes of natural vegetation, 3 classes of urbanized plots, and 3 classes of non-vegetated soil. The Type 1 classification will be used for the year 2016 because it is the most complete and relevant classification in this research. ArcGIS 10.5 software was used to organize the database and prepare thematic maps. This was followed by the conversion from raster to vector and data extraction by product category MCD12Q1, obtaining 12 masks for use and coverage (Fig. 1).

Monthly fire foci observations for the years 2001-2019—were obtained from MODIS sensors (TERRA and AQUA platforms) available on NASA (National Aeronautics and Space Administration). The data are from the Fire Information for Resource Management System (FIRMS) platform: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>. The latest version (v006) of the active fire algorithm (MCD14 - Giglio, 2015) is available from NASA-FIRMS. The MCD14 algorithm generates results with a spatial resolution of 1 km.

The gross primary productivity (GPP) for the land cover classes categories of the SRJ was estimated using images of the MOD17A2H product with a spatial resolution of 500 m. The digital numbers of the images were converted into biophysical values ( $\text{kg C m}^{-2}$ ) through multiplication by the scale factor (0.0001), as described by Heinsch et al. (2003) and Chagas et al. (2019). GPP values were also transformed from the accumulated value every eight days to signify the changes in GPP every eight days and converted from  $\text{kg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  to  $\text{g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ .

Carbon emission data from the atmosphere in fire conditions as produced, validated, and made available by the team that maintains the Global Fire Emissions Database (GFED) project (Van der Werf et al., 2010; Giglio et al., 2019) were extracted for the SRJ. This emission is produced based on the burned area of the MODIS sensor (MCD64A1). The latest version of the database (v006) was used. The product is generated monthly for the entire terrestrial globe at a spatial resolution of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  from 1997

to 2018. As data for the year 2019 was not available on its platform, we did not generate information for that year.

For the calculation of the monthly normalized multi-band drought index (NMDI) during the years 2001–2019, the 8-day MOD09A1 product with 500 m spatial resolution (v006) was used, as proposed by Wang et al. (2007), and the MODIS sensor reflectance bands 2, 6, and 7 were used to calculate the NMDI (Eq. (1)).

$$\text{NMDI: } \frac{R_{0.86\mu\text{m}} - (R_{1.64\mu\text{m}} - R_{2.13\mu\text{m}})}{R_{0.86\mu\text{m}} + (R_{1.64\mu\text{m}} - R_{2.13\mu\text{m}})} \quad (1)$$

where  $R_{0.86\mu\text{m}}$ ,  $R_{1.64\mu\text{m}}$  and  $R_{2.13\mu\text{m}}$  represents the apparent reflectance observed by a satellite sensor in the bands  $R_{0.86\mu\text{m}}$ ,  $R_{1.64\mu\text{m}}$  and  $R_{2.13\mu\text{m}}$ .

On the R studio software, a grid cell composed of NMDI values was generated for data extraction, and at the end of the process, a spreadsheet was generated in CSV of the monthly NMDI values for the period from 2001 to 2019, resulting in different observations for each use and land cover classes. A lower NMDI indicates a high incidence of drought, while a higher NMDI value indicates wet or non-dry conditions (Wang and Qu, 2007, Wang and Qu, 2007). The NMDI index has the following classifications: very dry ( $<0.2$ ), dry ( $<0.4$ ), wet ( $0.4-0.6$ ), and very wet ( $> 0.6$ ) (Wang et al., 2007).

The MODIS HDF files were downloaded from NASA servers using the MODISTsp package (Busetto et al., 2019). The package was also used to reproject the GeoTIFF format and Datum WGS-84. The tiles used to cover the entire SRJ were H13V11 and H14V11, and the product MOD09A1 had a gross total of 1 746 images and MOD17A2H a total of 1 748 images.

### 2.3. Surface weather data

Due to the spatial and temporal limitations of automatic and conventional meteorological stations in the SRJ, data from Reanalysis 2 were used in the NetCDF format. The meteorological variables rainfall (mm), soil moisture (%), and air temperature anomaly ( $^{\circ}\text{C}$ ) in NetCDF format, were obtained from NCEP-DOE Reanalysis2 (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>)

(Kendall, 1975). The  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  scale was used for all data, and the study period comprised a monthly scale from 2001 to 2019.

#### **2.4. Statistical analysis**

The variables of rain, soil moisture, and air temperature anomaly were characterized using the spatial distribution statistics of the meteorological variables. Both statistical analysis and graph generation were performed using R version 4.0.2 (R CORE TEAM, 2020). To analyze the trend of the variables, the Mann-Kendall test was applied to the entire time series ((Mann, 1945); Kendall, 1975). The objective was to verify if there was a significant trend of the data over time and if it had positive or negative characteristics, considering  $\alpha = 5\%$ , the p-value, and the Z index of the test. The (Pettitt, 1979) test was applied to the time series of the biophysical variables, where the main significant changes were identified during the series used (2001–2019) from the main inflection/sign of the extreme years. The maps were specialized for each use and coverage used at SRJ.

After obtaining the fire foci for the year with the greatest inflection point by Pettitt's analysis, their densities within the study region were calculated using the kernel density estimator, present in the Spatial Analyst extension tools of ArcGIS 10.5 software. This method was used to specify fire spots and allow a more precise analysis of the size and concentration of fire occurrence. The data generated for the temporal analysis in Boxplot for the fire foci were all normalized, since there are different land cover classes with very different sizes between them.

A correlation analysis was performed using the Spearman's Correlation using the corrplot the R software library. This correlation matrix was performed between the data of land cover classes and the variables, NMDI, GPP, Fire Foci, soil moisture, and temperature anomaly.

The validations were analyzed for each use and land cover classes simulated by the ARIMA model. For this, the standard error of estimate (SEE), coefficient of determination ( $R^2$ ) was used, and the Willmott agreement index (d) (Willmott et al., 1985) were used.

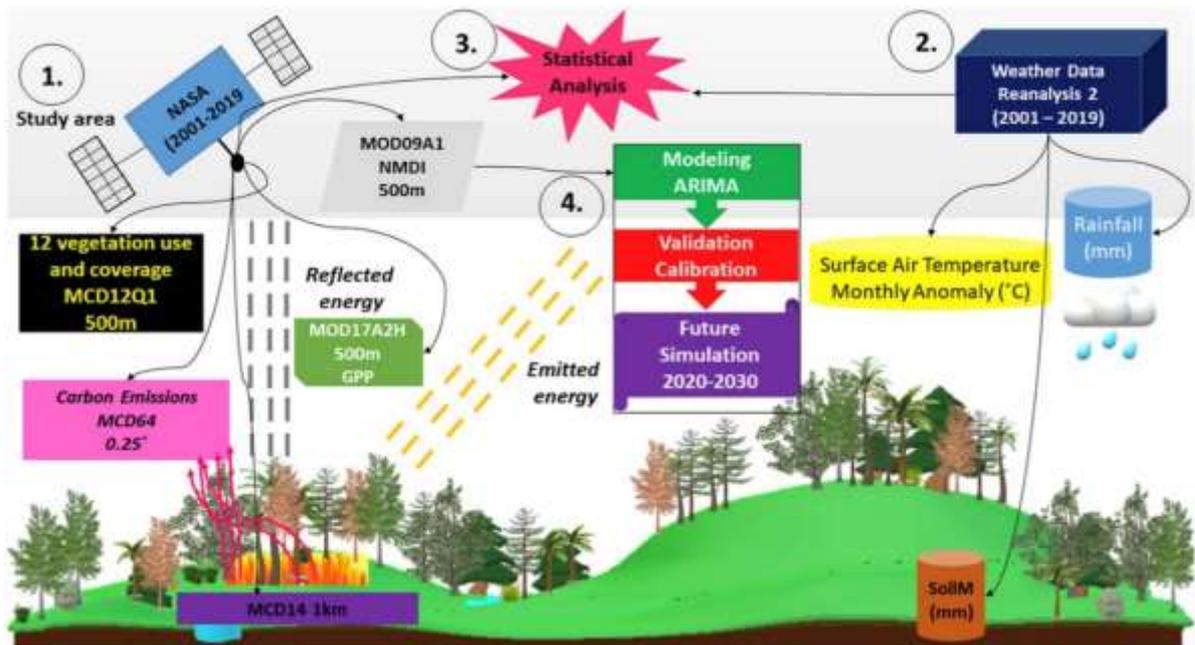
## 2.5. Present, past and future of NMDI

ARIMA (Equation 2) was used to simulate the NMDI index (2020–2030) for the 12 land cover classes.

$$1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i L^i X_t = 1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i \varepsilon_t \quad (2)$$

Where  $L$  is the lag operator, the  $\alpha_i$  are the parameters of the autoregressive part of the model, the  $\theta_i$  are the parameters of the moving average part, and the  $\varepsilon_t$  are error terms. The error terms  $\varepsilon_t$  are generally assumed to be independent, identically distributed variables sampled from a normal distribution with a mean of zero.

## 2.6. General methodology flowchart

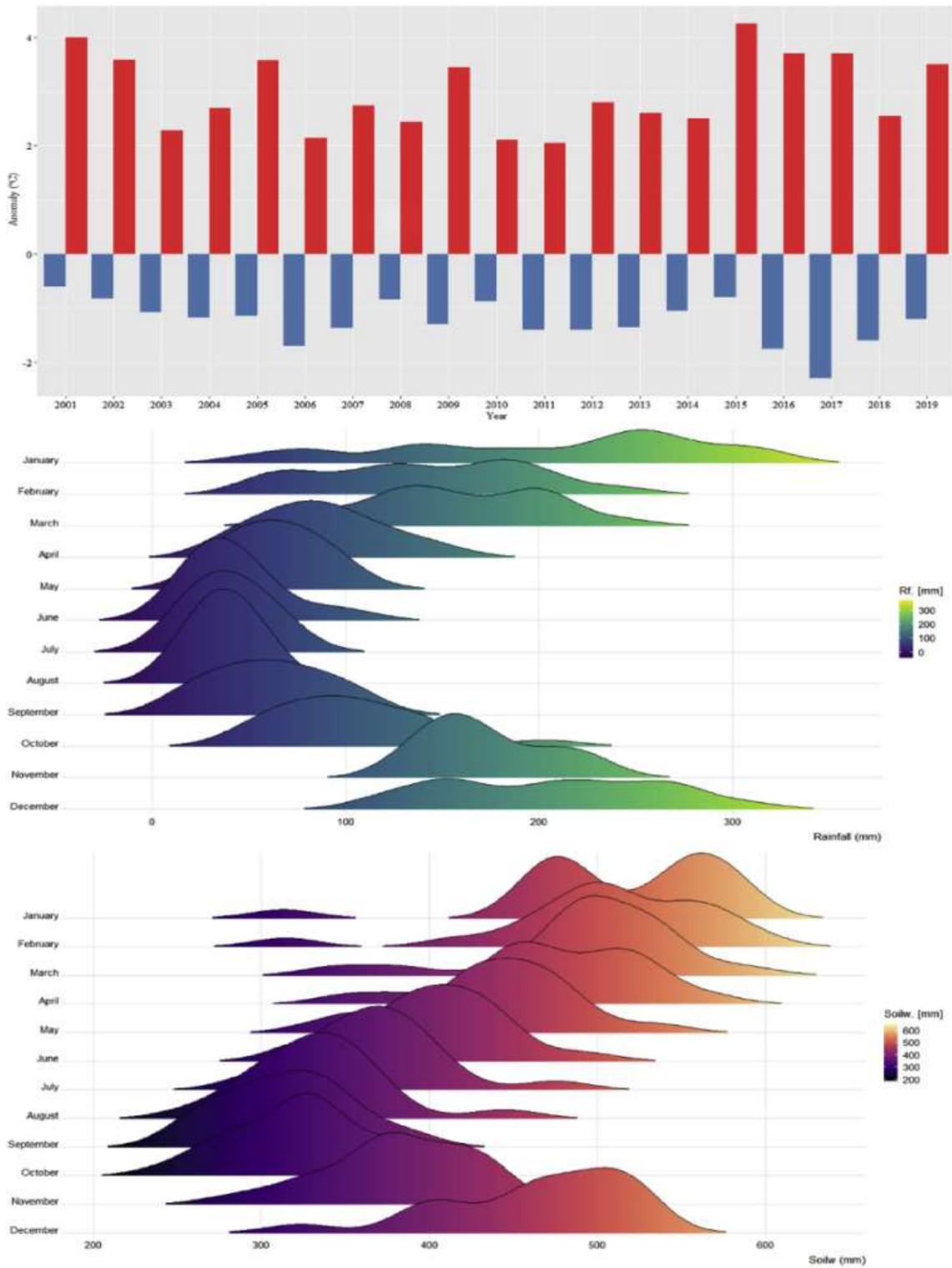


**Figure 2:** General methodology flowchart

### **3. RESULTS**

#### **3.1. Meteorological variables**

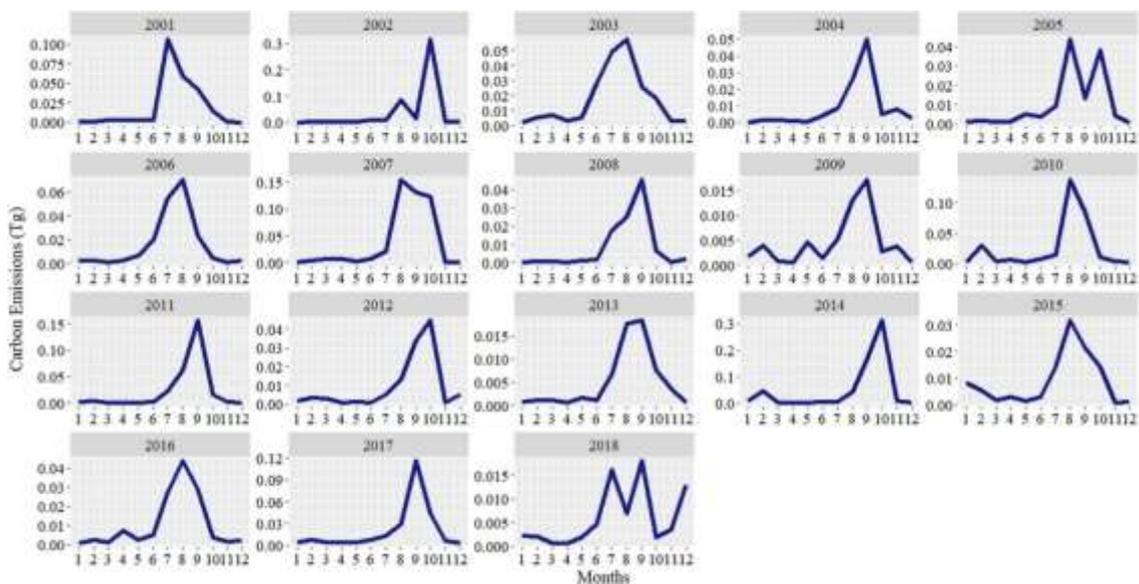
In general, the period with the lowest amount of water in the soil, corresponding to the months of June to October, was the one that contained the highest number of fire foci (Fig.5). Between October and March, there was the highest average rainfall in the evaluated period, with 163.83 mm and the lowest between April and September, with 55.05 mm (Fig. 3). The temperatures with the highest anomalies in the air for the 18-year series of this study occurred in 2001 and 2015 (Fig. 3).



**Figure 3:** Spatial distribution of the meteorological variables rain, temperature anomaly and soil water (Reanalysis 2) for the State of Rio de Janeiro during the period from 2001 to 2019.

### 3.2. Carbon emission, fire foci and GPP

During the period from 2001 to 2019, carbon emissions were observed to vary widely, with the highest emissions in the dry period for all years (Fig.4). The rainy period (November to March), had almost zero carbon emission for the whole series, totaling 1.34 Tg, except in 2014, which presented 0.39 Tg of carbon emissions, and in the year 2002, which presented 0.33 Tg (Fig.4). The dry period (April to October) had the highest carbon emission for the whole series, totaling 2.14 Tg, highlighting the year 2007, which presented the highest sum of carbon 0.31 Tg.



**Figure 4:** Temporal distribution of carbon emissions in the State of Rio de Janeiro during the period from 2001 to 2019

During the analyzed period, the total number of fire foci was 22,157. The land cover classes with the highest occurrence of hot spots were savanna with 11,538, pastures with 6,831, dense forest with 1,647, and agriculture with 1 075. The dry period is the one with the highest occurrence of fire outbreaks for all land cover classes. Generally, this season has long drought periods, low air humidity, and a dry air mass in the southeast region (Clemente et al., 2017).

We observed that the less rainy months in the series were also those with the highest occurrence of fire outbreaks in the SRJ. The month of September, for example,

had the highest occurrences of fires for the use and cover of pasture (1603), savanna (230), and dense forest (484).

Results were contrary to those found for the mixed forest (D), which did not show any fire foci for the analyzed time series. For open shrubs (E) and farmland/natural vegetation mosaics (L), only one fire foci were found for the evaluated period.

The monthly variation of GPP in the different use and coverage of the SRJ is shown in Fig. 6. Increasing values of biomass can be observed from January to March (when it reaches the highest values), while decreasing values in biomass start in the dry period and increase again at the beginning of the rainy season (Fig. 6). Paiva and Fernandes (2016), when investigating the GPP of the Atlantic Forest biome between 2002 and 2011, concluded that the net primary productivity presented for the total of the evaluated period had a minimum value during the winter of 19.6% and a maximum in the transition between spring and summer of 30.1%.

The three land cover classes that presented the highest average GPP values for the rainy season were the forest (B) with  $7.71 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , mixed forest (D) with  $7.50 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , and mixed savanna (G) with  $6.25 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . For the dry season, the uses with the highest values were as follows, forest (B)  $7.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , mixed forest (D) with  $5.93 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and mixed savanna (G)  $6.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Fig. 5). The permanent wet area (J) had the lowest GPP values for the rainy and dry periods of  $2.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and  $1.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectively, in the study series (Fig. 5).

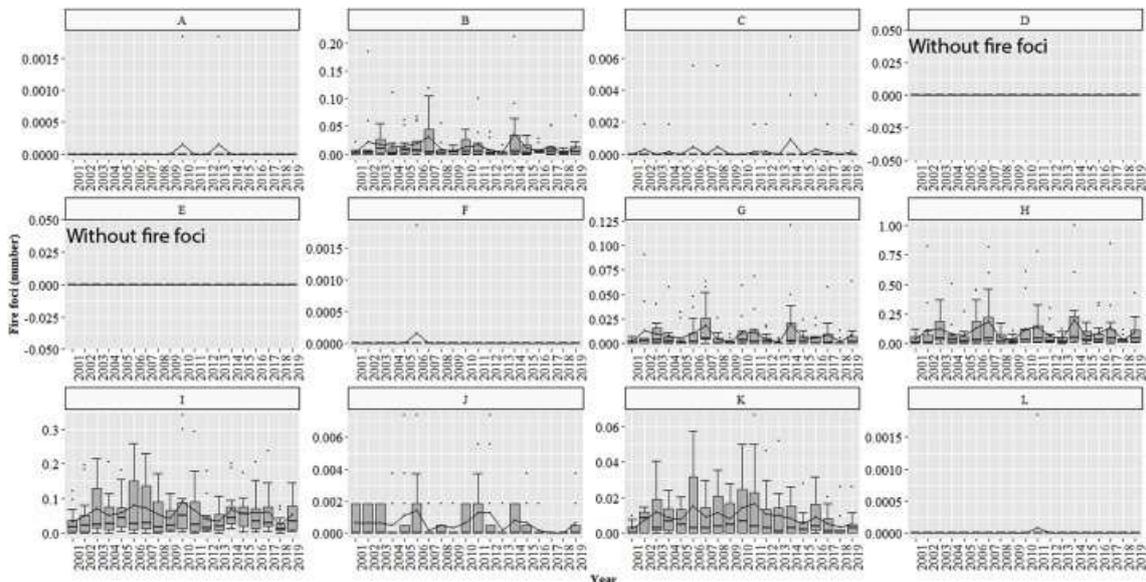
### **3.3. Normalized multi-band drought index (NMDI)**

For the entire study period, NMDI presented the lowest value in the dry period and the highest value in the rainy period. It is noted that for pasture (I) and closed bush (E), the lowest value occurred, indicating drought for the dry season (Table 1). The area had fire foci for the entire study period (Fig.5). In the NMDI temporal and spatial analysis, this scenario (Fig. 7 and Fig. 8), indicates that for the SRJ area, the drought index represents the areas more prone to forest fires.

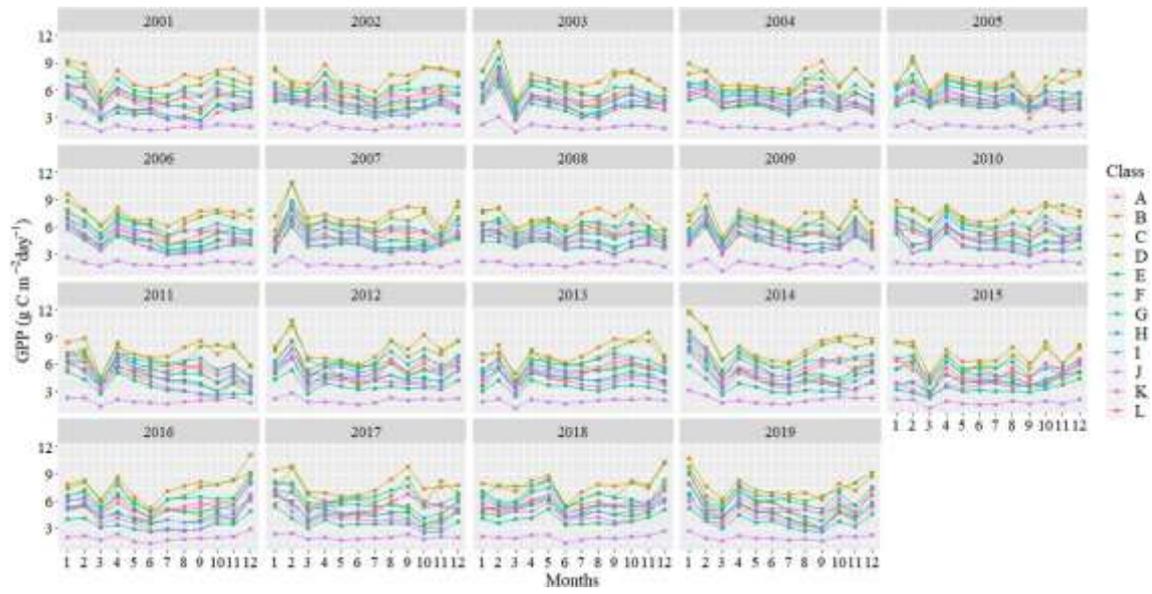
**Table 1:** NMDI classification by land cover classes.

<i>Classificação</i>	<i>NMDI</i>	<i>Class</i>	<i>Seco</i>	<i>Chuvoso</i>
<i>Muito seco</i>	<0.2	A(Floresta perene)	0.48	0.52
<i>Seco</i>	<0.4	B(Floresta densa)	0.49	0.52
<i>Molhado</i>	0.4 – 0.6	C(Floresta decídua)	<b>0.42</b>	<b>0.49</b>
<i>Muito Molhado</i>	>0.6	D(Floresta mista)	0.50	0.51
<i>Muito Seco</i>	<0.2	E (Arbusto fechado)	<b>0.40</b>	<b>0.46</b>
<i>Seco</i>	<0.4	F(Arbusto aberto)	0.46	0.50
<i>Molhado</i>	0.4 – 0.6	G(Savana mista)	0.45	0.49
<i>Muito Molhado</i>	>0.6	H(Savana)	<b>0.41</b>	<b>0.47</b>
<i>Muito Seco</i>	<0.2	I(Pastagens)	<b>0.39</b>	<b>0.44</b>
<i>Seco</i>	<0.4	J(Áreas úmidas)	0.49	0.52
<i>Molhado</i>	0.4 – 0.6	K(Agricultura)	<b>0.44</b>	<b>0.47</b>
<i>Muito Molhado</i>	>0.6	L(Terra de cultivo)	<b>0.52</b>	<b>0.53</b>

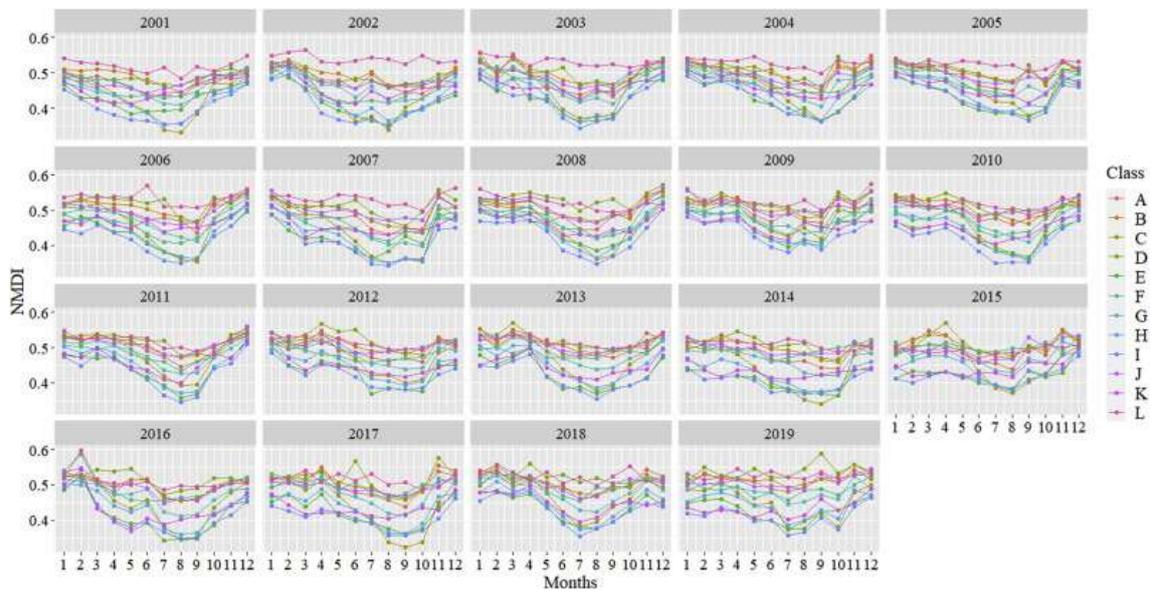
**\*Valores Médios do NMDI para toda a série temporal (2001-2019)**



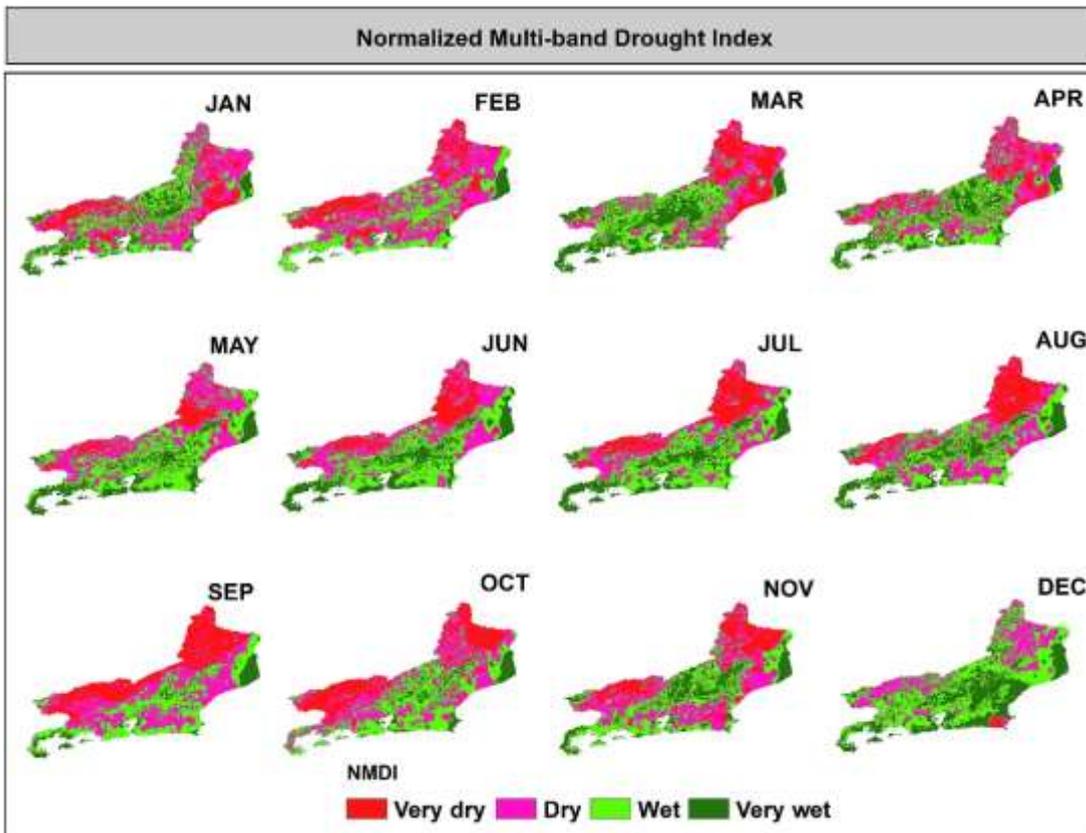
**Figure 5:** Number of fire foci for each use and coverage studied of the MCD12Q1 in the Sstate of Rio de Janeiro.



**Figure 6:** Temporal distribution of GPP for each studied use and coverage of MCD12Q1 in the State of Rio de Janeiro.



**Figure 7:** Temporal distribution of NMDI for each studied use and coverage of MCD12Q1 in the State of Rio de Janeiro.



**Figure 8:** Spatial analysis for NMDI in 2003 in the State of Rio de Janeiro.

Mixed forest (D) and cultivation land/mosaic of natural vegetation (L) presented the highest values (Table 1), indicating the presence of high humidity in these landscapes in both periods. We can also correlate that these two uses and coverage presented none and only one fire foci for the whole series studied (Fig. 5). We were able to deduce that NMDI with a high (wet) value was associated with areas without fire foci (has been associated with areas without fire foci), evidencing its efficiency in indicating dry areas, which consequently presented fire foci in the vegetation.

Generally, for the 12 land cover classes, the NMDI follows a temporality according to the dry and rainy seasons of the SRJ, presenting lower values in the months of June, July, and August and higher values in November, December, January, and February (Fig. 7). Thus, the seasons can be an indicator of the dynamics of vegetation fires in the Atlantic Forest.

### 3.4. Mann-Kendall trend test, Pettitt's change point and Correlation Matrix

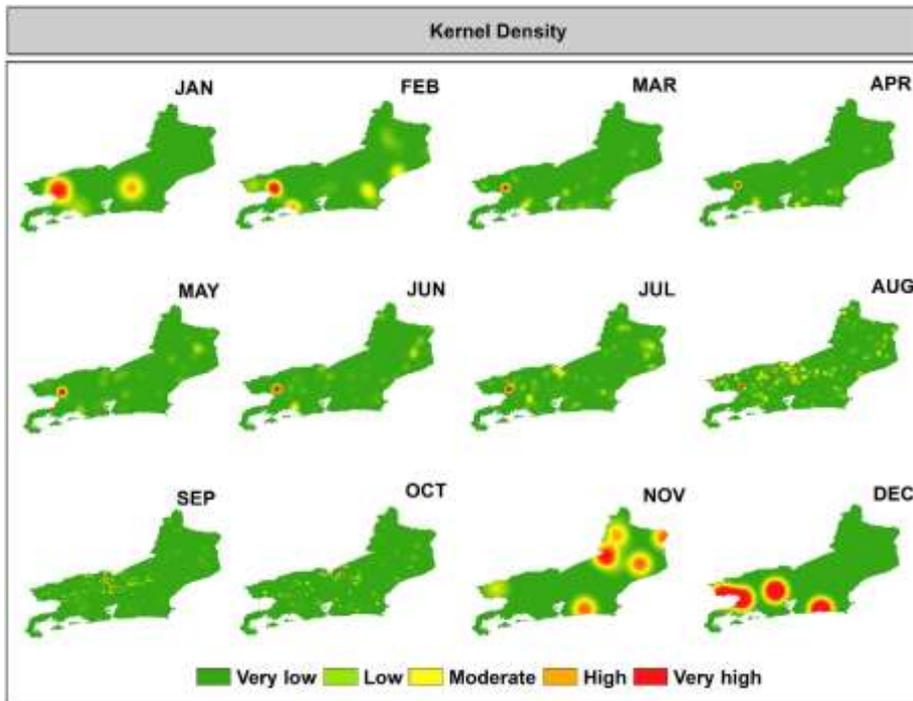
There is a significant trend with decreasing Z ( $-1.61$ ) for water in the soil, decreasing Z ( $-0.76$ ) for NMDI (Table. 2), and a positive trend for GPP with increasing Z ( $+1.89$ ) (Table. 2).

**Tabela 2:** Mann-Kendall and Pettitt trend analysis for a 2001-2019 time series.

Variáveis	Z	p-value	Significant	Análise de Petti
Emission	-0.91	0.36	No	No
Anomaly	1.05	0.29	No	No
Rainfall	-1.33	0.18	No	No
Soil	-1.61	0.0011	Yes	No
Fire	-0.14	0.88	No	2007
GPP	1.89	0.05	Yes	2011
NMDI	-0.76	0.045	Yes	2003

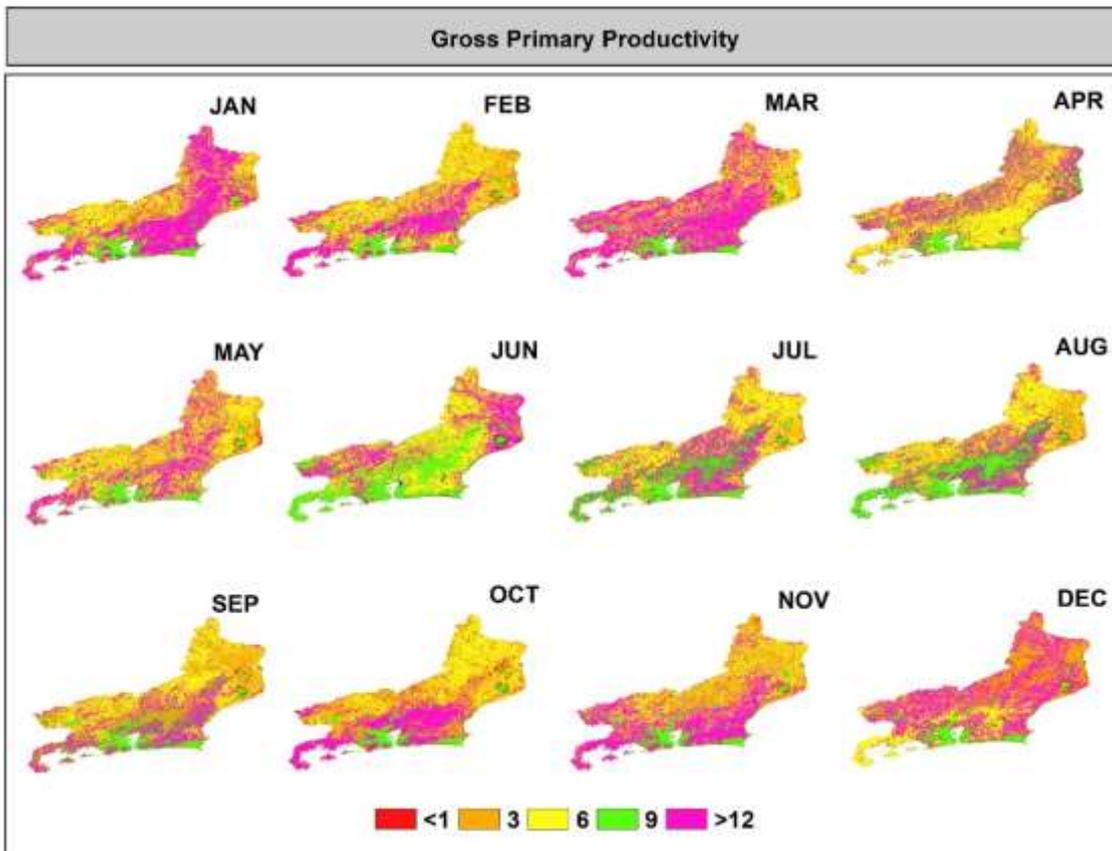
The regions with pasture and agricultural areas had the lowest values of NMDI (Table 1). The northwestern region is primarily composed of grazing land (Fig. 1) and showed low NMDI values (Fig. 7). The southern portion had the highest NMDI value, owing to the wet area (L), corresponding to the mangrove class of the SRJ (Fig. 7).

The kernel density estimate (Table. 2) demonstrated that 2007 was more significant in the time series than any other year (Fig. 9). The core density revealed that the highest (high/medium) concentrations of fire foci were primarily located in the three Central South, Mountainous, and Middle Paraíba map regions (Fig. 9), for all SRJ use and coverage. The green coast region and the north and east of Rio de Janeiro had the lowest values (Fig. 9).



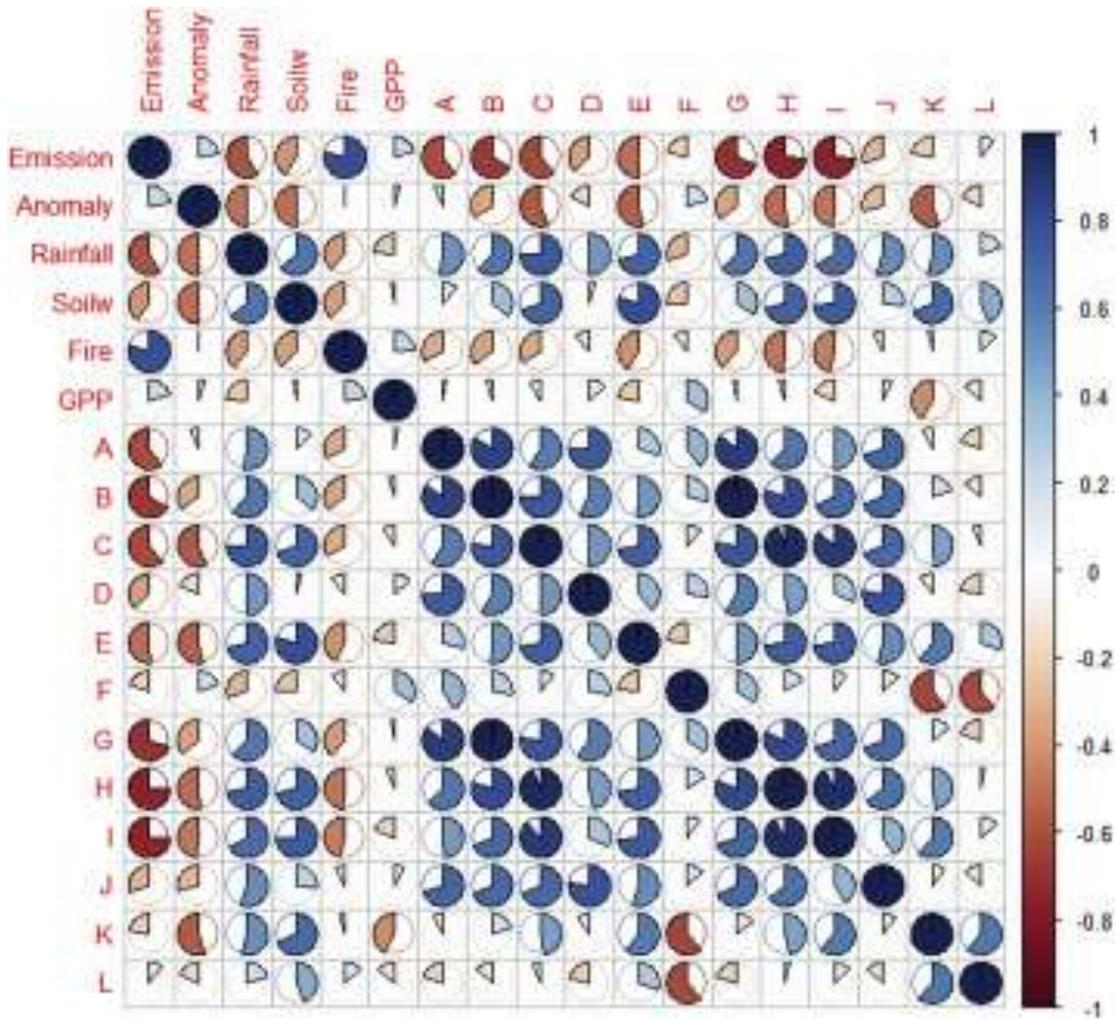
**Figure 9:** Spatial analysis of fire foci using a kernel density in 2007 in the State of Rio de Janeiro.

The estimate of Petti's analysis for the GPP (Table. 2) showed that 2011 was more significant for the time series than any other year (Fig.10), 2011 was strongly influenced by La Niña in southeastern Brazil and the establishment of the South Atlantic Convergence Zone (SACZ).



**Figura 10:** Spatial analysis for the GPP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) in 2011 in the State of Rio de Janeiro.

The result observed in this study indicates a strong negative correlation of NMDI with different land uses, soil cover, and carbon emissions (Fig. 11); the lower the index, the greater the drought, causing greater carbon emission and fire foci. The use and coverage with the lowest drought index are I (pasture)  $\text{NMDI} = 0.39$  (Table. 2), with a correlation of  $-0.74$  for carbon emission and  $-0.46$  for fire foci; E (closed bush)  $\text{NMDI} = 0.40$  with  $-0.6$  for carbon emission and  $0.4$ . The greatest positive correlations of water in the soil were for closed bush ( $0.8$ ), pasture (I) ( $0.74$ ), and savanna (H) with  $0.71$  (Fig. 11).



**Figure 11:** Spearman is Correlation for all variables and land cover classes in the State of Rio de Janeiro.

### 3.5. Validation, calibration and future scenarios of ARIMA modeling for NMDI

By analyzing the observed data and the predictions, it can be seen that the model simulated the NMDI series well, presenting an average Willmott coefficient (d) of 0.99 for the study period, demonstrating the model's ability to express the drought in the vegetation satisfactorily.

It is clear that, for 2008, the data are more grouped and closer to the line. The use E (closed bush) presented a higher  $R^2 = 0.95$  for 2008 and a maximum SEE = 0.04 for the year 2015; use I (pasture) showed a higher  $R^2 = 0.98$  for the year 2008 and a maximum SEE = 0.04 for the years 2012 and 2015. These uses had a greater correlation with the year 2008 of the entire series studied. They are also the uses with lower drought rates

among the classes evaluated in the SRJ (Table. 3), and this year had temperatures exceeding the climatological normal (Infoclima, 2020).

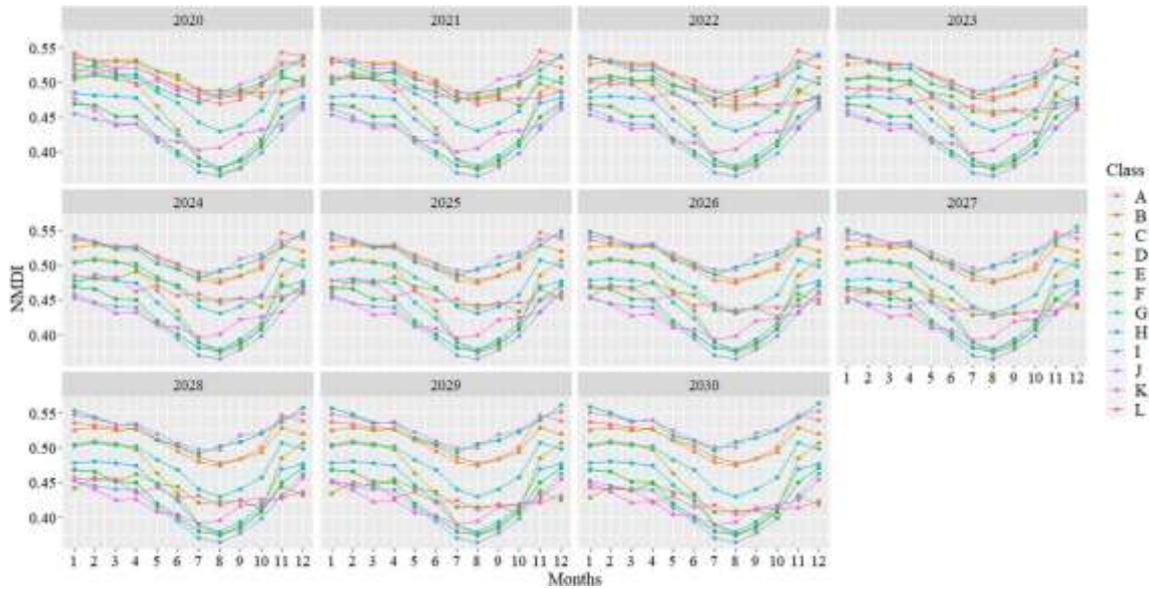
**Tabela 3:** NMDI classification by use and future land cover classes.

<i>Classificação</i>	<i>NMDI</i>	<i>Class</i>	<i>Seco</i>	<i>Chuvoso</i>
<i>Muito seco</i>	<0.2	A(Floresta perene)	0.50	0.53
<i>Seco</i>	<0.4	B(Floresta densa)	0.50	0.52
<i>Molhado</i>	0.4 – 0.6	C(Floresta decídua)	0.43	0.49
<i>Muito Molhado</i>	>0.6	D(Floresta mista)	0.46	0.46
<i>Muito Seco</i>	<0.2	E (Arbusto fechado)	0.41	0.45
<i>Seco</i>	<0.4	F(Arbusto aberto)	0.50	0.53
<i>Molhado</i>	0.4 – 0.6	G(Savana mista)	0.46	0.50
<i>Muito Molhado</i>	>0.6	H(Savana)	0.42	0.47
<i>Muito Seco</i>	<0.2	I(Pastagens)	0.40	0.44
<i>Seco</i>	<0.4	J(Áreas úmidas)	0.51	0.53
<i>Molhado</i>	0.4 – 0.6	K(Agricultura)	0.41	0.44
<i>Muito Molhado</i>	>0.6	L(Terra de cultivo)	0.45	0.46

\*Average NMDI values for the entire time series (2001–2019).

The use D presented a higher  $R^2 = 0.78$  for the year 2007 among the entire series evaluated. It is notable that D had the highest GPP in a year that there was a weak to moderate El Niño, temperatures were above the normal average during the year (Infoclima, 2020), and had a maximum SEE = 0.01 for the entire series.

The use H (savanna) presented a higher  $R^2 = 0.96$  for the year 2015 and a maximum SEE = 0.03 for 2015. As seen in Fig. 12, the ARIMA model was able to represent the seasonality of the future period. The regions with pasture and agriculture areas had the lowest values of future NMDI (Table. 3) (Fig. 12). The grazing class (I) had NMDI values of 0.40 in the dry period and 0.44 in the rainy period (Table 3). This value represents the dry class of the Index (Fig. 8).



**Figure 12:** Future scenarios for land cover classes (MCD12Q1), through ARIMA modeling for the NMDI index (2020-2030) in the State of Rio de Janeiro.

It is possible to associate the change from the wet to dry class in the mixed forest area (D) and cultivation land/mosaic of natural vegetation (L) with the future drought rate (Table. 3). This is due to increasing drier areas in these regions in the SRJ, which may create new areas prone to forest fires. According to the latest report on deforestation in Brazilian biomes, the Atlantic Forest gains 29 ha of deforested land area per day (MapBiomas, 2021). If this persists in the future scenario, forest resources for the next generations will be seriously compromised.

We emphasize that for the future NMDI, there was no drought reduction trend. In the dense forest area (B), the NMDI has a value of 0.50 for the dry period and 0.52 for the wet period (Fig. 11). However, the intensive process of transformation of land use and cover in the Atlantic Forest biome reinforces the need for environmental monitoring by Organs inspection agencies.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Data on fire foci and climate

The results of the increase in the number of fire foci in winter, which comprises most of the dry season in the SRJ, are similar to those found by Andrade et al. (2019). These authors evaluated the distribution of fire foci in the SRJ in different periods, from 1998 to 2019 and all verified a high density of fire foci in the autumn and winter of the SRJ.

The evaluations of this study corroborate those of Clemente et al. (2017), that indicate that the regions with the use and cover of forest (B) and savannah (H) are areas with a greater number of fire foci, probably due to climatic anomalies and anthropogenic actions. These locations have large industrial and agricultural centers, with a high traffic flow owing to the Presidente Dutra Federal Highway (BR-116), which connects the two states with the country's major economic centers (São Paulo and Rio de Janeiro) (Freitas et al., 2020).

When assessing the intensity of the Kernell estimates, the year 2007 had the greatest value (Fig. 8). In that year, the ENSO phenomenon (La Niña of strong magnitude and El Niño) caused intense droughts in the southeastern region (Silva et al., 2020). Andrade et al. (2019) pointed out in their research that human activities associated with meteorological systems could increase the number of fire foci in the Atlantic Forest located in the SRJ. Freitas et al. (2020) demonstrated in their study of the Atlantic Forest of the SRJ, that the occurrence of a strong El Niño event in 2015 tripled the number of fire foci in the forest. This study corroborates those results. In the dry years of 2007, the region was under the strong influence of the El Niño phenomenon, that generated a sharp increase in forest fires in the SRJ.

Notably, the 2007 event resulted in a decrease in rainfall and a temperature anomaly that generated significant carbon emissions in the dry period in the SRJ (Fig. 3). Delgado et al. (2018) found a similar result for the Itatiaia National Park conservation unit and determined that the wetter regions of the Itatiaia National Park (rainy season) allocate more carbon than the drier regions (dry season).

Forest fires play an important role in the global carbon budget and are responsible for the emission of 1–2 Tg C per year (Van der Werf et al., 2010), that represents approximately 10–20% of all emissions (Le Quéré et al., 2016). Fires induced by humans in this biome go back to the 18th and 19th centuries, when fires were used to convert forests into sugar cane and coffee areas for cultivation or cleaning pastures (WWF, 2021). The intense transformation of land cover classes needs to be monitored, since tropical forests are a large reservoir of carbon.

In all land use and cover areas, the mountain regions had many fire foci. This is worrying and sets a precedent for alerting and discussing public environmental policies of the SRJ, as this region has the largest conservation reserves in Rio de Janeiro, such as the Serra dos Órgãos National Park (Santos et al., 2019) and the Itatiaia National Park.

According to Santos et al. (2018), the Serra dos Órgãos National Park has important forest cover, such as the altitude fields, which contain the main springs, a contributor to the main hydrographic regions of the SRJ. Even though it is a conservation unit, the region suffered from the replacement of the forest area with pastures and irregular urban areas.

## **4.2. Biophysical data**

The year with the most significant GPP productivity was 2011. A possible explanation for this is the occurrence of the La Niña phenomenon (CPTEC, 2020), which caused episodes in the Convergence Zone of the South Atlantic (CZSA) and the strong modulation of the Madden-Julian Oscillation (OMJ), creating more intense and persistent rains in the first quarter of (Year of 2011) the SRJ (Infoclima, 2020).

The scientific investigation pointed out that GPP showed a negative correlation with rainfall and soil moisture (Fig. 11).

The study by Delgado et al. (2018) corroborates these results, by recording that the highest values of GPP in the rainy season were associated with the combination of high solar radiation, a high vegetation index, and a high evaporative fraction, all of which are factors present in Rio de Janeiro, especially in summer.

Another important result found here is that the dense forest (use and cover B) presented the highest GPP for the series studied. This vegetation is included in areas of the SRJ where conservation units are found.

The results obtained also agree with Chagas et al. (2019), who demonstrated for the western Amazon that the value of the GPP is substantially higher for the areas that comprise conservation units and have high levels of biodiversity.

In the study by Santana et al. (2020), for the Central Corridor of the Atlantic Forest, the authors found the highest values in the forest class. The authors have also identified a reduction in biomass and GPP over the years. These results indicate the greater need for environmental inspection in the areas of the Atlantic Forest, since, like other tropical forests, this area functions as an important carbon sink (Giardina et al., 2018).

The drought index represents the vegetation humidity for each land cover class, corresponding to them in different ways. The results of Babu et al., 2018 corroborate our research, where the authors evaluated that the coverages related to pasture and agriculture were the ones that burned the most.

Our results reveal a strong relationship between forest cover of pasture, savanna, dense forest, and biophysical variables. According to Braga and Molion, 2019, the characteristics of forest fuels and climatic conditions are the main factors for the beginning and spread of forest fires. Paiva and Fernandes (2016) studied 16 drought indices and concluded that NMDI showed greater relative importance for monitoring long-term meteorological drought in forests.

### **4.3. NMDI statistical analysis and ARIMA modeling**

The spatial distribution of NMDI in the study area in 2003 is shown in Fig. 8. The NMDI was more significant in this period of the study series (2000–2019). This dry period is characterized by its long duration precisely at the time of year when it should rain more in these regions, caused by a strong El Niño effect (NOAA, 2020).

Braga et al. (2018), when studying extreme weather events in Brazil, evaluated the effects of the 2013/2014 El Niño phenomenon in the southeastern region of Brazil. The consequences for the region were vast, including human and animal consumption issues, with negative impacts on agriculture and industries.

The trends revealed by the statistical test showed that the following classes had the lowest drought index: pastures (I), and agriculture (K), primarily for the dry period in the SRJ. The fire foci were greater in the dry period for the pasture and agriculture classes. NMDI is capable of detecting droughts in different classes of land cover classes, which are likely to be conducive to the onset of forest fires.

Wang et al. (2008) investigated NMDI's ability to detect fires in southern Georgia, USA and southern Greece in 2007. The study concluded that NMDI has strong signals corresponding to active fires and accurately identifies active points. These results confirm the data found in this research.

Akther et al. (2011), evaluated the potential of three indices selected by a satellite (MODIS) with an 8-day temporal resolution, including surface temperature ( $T_s$ ), NMDI, and Vegetation Temperature Humidity Index (VTHI) in the prediction of hazardous conditions in the boreal forest regions of Alberta during the 2006–2008 period for Canada. The results found corroborate our data, with the three indices used being able to reasonably predict the danger of fire, and the NMDI having the greatest capacities to do so.

Vilanova et al. (2019) demonstrated that the ARIMA model can be used to forecast droughts. This corroborates our analyzes, since the model estimated through ARIMA was able to represent the seasonality of the future period of the NMDI, demonstrating that there is a vulnerability to vegetation, since extreme drought events intensify the change in the use and coverage of Earth.

According to Bustamante et al. (2019) this intense transformation in land use poses a much greater threat to the flora of the Atlantic Forest than climate change itself. Thus, this must constitute a violation of the law protecting the Atlantic Forest.

Silva et al. (2020) studied all the future and past prognoses for the vegetation of the Atlantic Forest biome using the LULC model. They verified the reduction in

biodiversity and repetition of extreme weather event patterns for the years 2005, 2010, and 2015, when analyzing future vegetation status over 10 years.

Several authors (Souza et al., 2014; Souza et al., 2018; Freitas et al., 2020) found a great vulnerability of the Atlantic Forest biome and a diminished capacity for the future adaptation of vegetation to a new reality owing to the geopolitical units of high demography inserted in priority conservation areas. The results obtained here are relevant to this issue since the lowest values of the drought index were found for savannah cover (H) and forest fire foci (B). We can say that, if protection measures are not applied in the Mata biome, Atlantic Forest cover areas will become savannas and intense drought scenarios and water shortages will intensify in the southeastern region of Brazil.

## 5. CONCLUSION

In the face of a new world scenario subject to global warming, extreme drought climatic conditions estimated by NMDI can serve as a tool for inspecting fire-prone regions and avoiding serious environmental and social damage. As a result, public policies aimed at protecting the environment cannot be relaxed, and it is necessary to strengthen them, especially in the recurring years of events.

The average NMDI values showed moderate drought conditions in most years for the use and coverage of dense forest, pasture. When analyzing the dry period, the index signaled severe droughts in the SRJ associated with extreme weather events. Monitoring NMDI through ARIMA modeling in the State of Rio de Janeiro is an important tool for the seasonal and temporal monitoring of fire-prone areas. The fundamental highlight of this research is the demonstration of a protocol based on the use of MODIS through the orbital product MCD12Q1 to predict forest fire hazard conditions and the implementation of the protocol in the dominant regions of the tropical forest. The NMDI spectral index can be applied in regional or local studies, serving as an environmental planning and monitoring tool for civil defense and other institutions.

## **6. CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT**

Raquel de Oliveira Santos: Conceptualization, Validation, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. Rafael Coll Delgado: Conceptualization, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Project administration. Regiane Souza Vilanova: Writing – original draft, Writing – review & editing. Romário Oliveira de Santana: Writing – original draft. Caio Frossard de Andrade: Writing – original draft, Writing – review & editing. Paulo Eduardo Teodoro: Formal analysis, Writing – review & editing. Carlos Antonio Silva Junior: Formal analysis, Writing – review & editing. Guilherme Fernando Capristo-Silva: Writing – review & editing. Mendelson Lima: Writing – review & editing.

### **6.1. Declaration of competing interest**

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### **6.2. Acknowledgment**

The authors would like to thank NASA for the free availability of the data used. The Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - CAPES for the granting of a doctoral scholarship and the National Institute for Space Research. The CNPq productivity grant process No. 304966/2017-7. Civil society, which allows through its investment, that the public and free university works and produces scientific research, with this we can produce practical and functional knowledge, giving a return to the Brazilian people.

## 7. REFERENCES

Andrade, C. F.; Duarte, J. B.; Barbosa, M. L. F.; Andradre, M. D.; Santos, R. O.; Delgado, R. C.; Pereira, M. G.; Batista, T. S.; Teodoro, P. E. **Fire outbreaks in extreme climate years in the state of Rio De Janeiro, Brazil.** *Land Degradation & Development*, p. n/a-n/a, 2019. <https://doi.org/10.1002/ldr.3327>

Artaxo, P.; Dias, M.A.F.S.; Nagy, L.; Luizão, F.J.; Cunha, H.B.; Quesada, C.A.N.; Marengo, J.A.; Krusche, A. **Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da floresta Amazônica.** *Ciência Cultura*. V.66, n.3, p.41–46, 2014. <http://dx.doi.org/10.21800/S0009-67252014000300014>

Akther, M.S.; Hassan, Q. K. **Remote Sensing-Based Assessment of Fire Danger Conditions Over Boreal Forest.** *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. v.4, n.4, p. 992–999, 2011. <http://doi:10.1109/jstars.2011.2165940>.

Barbosa, M.L.F.; Delgado, R.C.; Teodoro, P.E. **Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought.** *Environ Dev Sustain*. v.21, s/n, p.2707–2720, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0157-4>

Balch, J. K.; Bradley, B. A.; Abatzoglou, J. T.; Nagy, R. C.; Fusco, E. J.; Mahood, A. L. **Human-started wildfires expand the fire niche across the United States.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*. v. 114, n. 11, p. 2946-2951.2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>

Bergamin, R.S.; Bastazini, V.A.G.; Vélez, M. **Linking beta diversity patterns to protected areas: lessons from the Brazilian Atlantic Rainforest.** *Biodivers Conserv* 26, 1557–1568. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1315-y>

Busetto L, Ranghetti L, Wasser L. **MODISStp: A Tool for Automating Download and Preprocessing of MODIS Land Products.** Data. 2019.

Bustamante, M.M.C.; Metzger J.P.; Scariot A.; Bager A.; Turra A.; Barbieri A.; Neves A.; Boesing A.L.; Agostinho A.A.; Marques A.C.; Dias B.; Grelle C.E.V.; Caixeta D.; Sawyer D.; Scarano F.R.; Sousa F.D.R.; Fernandes G.W.; Queiroz H.; Miranda H.S.;

Schongart J.; Quintão J.M.B.; Martinelli L.A.; Gomes L.C.; da Cunha M.C.; Piedade M.T.F.; Sato M.N.; Vale M.M.; Aquino M.F.S.; Vogt N.; May P.; Fearnside P.; Prado R.B; Rodrigues R.R.; Thomaz S.M.; Pivello V.R.; Imperatriz-Fonseca V.L.; Farjalla V.F. **Capítulo 3: Tendências e impactos dos vetores de degradação e restauração da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Embrapa Solos-Capítulo em livro científico (ALICE).** Editora Cubo, São Carlos pp.351. 2019.

Caúla, R. H.; Oliveira-Júnior, J. F.; Gois, G.; Delgado, R. C.; Pimentel, L. C. G.; Teodoro, P. E. **Nonparametric statistics applied to fire foci obtained by meteorological satellites and their relationship to the MCD12Q1 product in the state of Rio de Janeiro, Southeast - Brazil. Land Degradation & Development (Print).** v. n/a, p. n/a-n/a, 2016. <https://doi.org/10.1002/ldr.2574>

Chagas, M. C., Delgado, R. C., de Souza, L. P., de Carvalho, D. C., Pereira, M. G., Teodoro, P. E., & Junior, C. A. S., 2019. **Gross primary productivity in areas of different land cover in the western Brazilian Amazon.** R. Sens. A.: Socie. E. 16, 100259. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100259>

Clemente, S.S; Oliveira Júnior, J.F; Louzada, M.A.P; **Focos de Calor na Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro. Rev. Bras. Meteorologia.** v.32, s/n, p.669-677, 2017a. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324014>

Clemente, S.S; Oliveira Júnior, J.F; Louzada, M.A.P. **Focos de calor do bioma Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro: uma abordagem de gestão e legislação ambiental.** Rev. Ciên. Agroamb. V.15, p.159-174, 2017b. <https://doi.org/10.5327/Z1677-606220172240>

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. Monitoramento dos focos de calor. [http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/v\\_antiga/index\\_old.php](http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/v_antiga/index_old.php). Acessado em: 14 de maio de 2020.

Choi, M.; Jacobs, J. M.; Anderson, M. C.; Bosch, D. D. **Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. Journal of Hydrology.** v.476, s/n, p. 265–273, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.042>

Da Silva, G.C; DE Oliveira, F.V. **Uso e Ocupação do Solo e Cenário Tendencial de Vazões na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba-Brasil (Use and occupation of soil and trends scenarios of flows in the Paranaíba River basin-Brazil)**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 1, p. 139-159, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v.12.1.p.139-159>

Delgado, RC; Pereira, MG; Teodoro, PE, Santos; GL, de Carvalho, D.C; Magistrali, I.C.; Vilanova, R.S, **Sazonalidade da produção primária bruta na Mata Atlântica do Brasil**. Global Ecology and Conservation. 2018. <https://doi.org/doi:10.1016/j.gecco.2018.e00392>.

De Jesus, C. S. L.; Delgado, R. C.; Pereira, M. G.; Souza, L. P; De Silva, J.C. A; Da, Ribeiro, L. P; Batista, T. S.; Teodoro, P. E. **Changes in past global solar radiation based on climate models and remote sensing in the state of Rio de Janeiro, Brazil**. Bioscience Journal, v.34, n.5. 2018 <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n5a2018-39485>

De Marques A.A.B; Schneider, M; Peres, C.A. **Human population and socioeconomic modulators of conservation performance in 788 Amazonian and Atlantic Forest reserves**PeerJ. s/n. 2016. <https://doi.org/10.7717/peerj.2206>

Fashae, A.; Olusola, A.O; Ndubuisi, I.; Udomboso, C.U.; **Comparing ANN and 576 ARIMA model in predicting the discharge of River Opeki from 2010 to 2020 Olutoyin**. 577 River Res. Applic, v.35, p.169–177, 2019. <https://doi.org/10.1002/rra.3391>.

F.A. Heinsch, M. Reeves, P. Votava, S.Y. Kang, C. Milesi, M.S. Zhao, et al. User's Guide, GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products. NASA MODIS land algorithm [online] <http://www.nts.gov/modis/MOD17UsersGuide.pdf>, 2003. Acessado em: 27 Mar 2020.

Favero, E; Diesel, V. **A seca enquanto um hazard e um desastre: uma revisão teórica**. Aletheia, n.27.p. 198-209, 2008. <https://doi.org/11.5012525015>

Fernandes, M. D. C., Coura, P. H. F., Sousa, G. M. D., & Avelar, A. D. S., 2012. **Avaliação geocológica de susceptibilidade à ocorrência de incêndios no estado do**

**Rio de Janeiro, Brasil.** F. Ambie. 18, 299-309.  
<http://dx.doi.org/10.4322/floram.2011.050>

Giardina, F., Konings, A. G., Kennedy, D., Alemohammad, S. H., Oliveira, R. S., Uriarte, M., & Gentine, P. (2018). **Tall Amazonian forests are less sensitive to precipitation variability.** *Nature Geoscience*, 11(6), 405-409. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0133-5>

Giglio L. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision A. 64. 2015.

Gidey, E.; Dikinya, O.; Sebege, R., Segosebe, E.; Zenebe, A. **Analysis of the long-term agricultural drought onset, cessation, duration, frequency, severity and spatial extent using vegetation health index (VHI) in Raya and its environs, northern Ethiopia.** *Environmental Research System.*, v.7, n.13, 2018.  
<https://doi.org/10.1186/s40068-018-0115-z>

Gois, G.; Delgado, R. C.; Júnior, O.J.F.; Teodoro, P. E.; Souza, T. C. O. **EVI2 index trend applied to the vegetation of the state of Rio de Janeiro based on non-parametric tests and Markov chain.** *Bioscience Journal (Online)*. s/n, p. 1049-1058, 2016. <https://doi.org/10.14393/BJ-v32n4a2016-33713>

Hao, C.; Zhang, J.; Yao, F. **Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.35, p. 270–283, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.011>.

Hong, Z.Z; Huai, L.C; Shuanghe, S. **The application of normalized multi-band drought index (NMDI) method in cropland drought monitoring** *Proc. SPIE 7472, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology XI, 74721Q*, s/n, 2009. <https://doi.org/10.1117/12.830557>

Infoclima, **São José dos Campos**, ano 2011, n. 4 Acessado em: 17 Maio 2020.

Jesus, C. S. L.; Delgado, R. C.; Pereira, M. G.; Souza, L. P.; Silva Junior, C. A.; Ribeiro, L. P.; Batista, T. S.; Teodoro, P. E. **Changes In Past Global Solar Radiation Based on Climate Models And Remote Sensing in The State of Rio de Janeiro, Brazil.**

Bioscience Journal , v. 34, p. 1357-1364, 2018. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n5a2018-39485>

Kerbauy, Gilberto Barbante. **Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro:** Guanabara Koogan, 2004.

LABJOR. Laboratório de Biogeografia e Climatologia – UFV. **Os números dos desastres no Brasil, 2011.** Disponível em: Acessado em 7 Maio. 2020.

Lino, C.F.; Simões, L.L. **Avaliação do cumprimento das metas globais e nacionais de biodiversidade 2010 para a Mata Atlântica.** São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da biosfera da mata Atlântica-WWF-Brasil. 2011.

Liu, X.;Zhu, X.; Pan, Y.; Bai, J.; Li, S. **Performance of different drought indices for agriculture drought in the North China Plain.** Journal of Arid Land, v.10, n.4, p.507–516. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0005-2>.

Loveland, T.R; Belward, A.S. **O conjunto de dados globais de cobertura da terra do sistema de dados e informações do programa internacional da biosfera da geosfera (DISCover).** Acta Astronautica, V.41 n.4. p.681–689. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(98\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(98)00050-2)

Machekposhti, K.H; Sedghi, H; Telvari, A; Babazadeh. **Flood Analysis in 678 Karkheh River Basin using Stochastic Model.** Civil Engi. J, v.7, n, 649, p.794-808, 2017. <https://doi.10.21859/cej-030915>.

Martinelli, G; Valente, A.S.M; Maurenza, D; Kutschenko, C; Judice, D.M; Silva, D.S; Fernandez, E.P; Martins, E.M; Barros, F.S.M; Sfair, J.C; Santos Filho; L.A.F; Abreu, M.B., Moraes; M.A., Monteiro, N.P., Pietro, P.V; Fernandes, R.A; Hering, R.L.O; Messina, T; Penedo, T.S.A. **Avaliação de risco de extinção de espécies da flora brasileira.** In: Martinelli, G., Moraes, M.A. (Eds.), Livro vermelho da flora do Brasil. CNC Flora, Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 60–84, 2013.

Medeiros, J.H. **Desconcentração econômica e atratividade regional no estado do Rio de Janeiro entre 2000–2010.** Cadernos do Desenvolvimento Fluminense v.1, p.23-52., 2013. <https://doi.org/10.12957/cdf.2013.9059>

Paiva, C. M; Fernandes, F. R. **Estudo da Produtividade Primária do Bioma Mata Atlântica via Sensoriamento Remoto.** Anuário do Instituto de Geociências, v.38, n.2, p.05-14, 2016. Doi: [http://dx.doi.org/10.11137/2015\\_2\\_05\\_14](http://dx.doi.org/10.11137/2015_2_05_14).

Rahman, M.A., Yunsheng, L., Sultana, N., 2017. **Analysis and prediction of rainfall 718 trends over Bangladesh using Mann–Kendall, Spearman’s rho tests and ARIMA model.** 719 Meteorol. Atmos. Phys, 129:409–424. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0479-4>.

Ribeiro, M.C.; Metzger, J.P.; Martensen, A. C. **The Brazilian Atlantic Forest: How Much is Left, and How is the Remaining Forest Distributed: Implications for Conservation.** In: Biological Conservation.s/n,2009.Doi:142:1141-1153.

Santana, R. O.; Delgado, R. C.; Schiavetti, A. **The past, present and future of vegetation in the Central Atlantic Forest Corridor, Brazil. Remote Sensing Applications: Society and Environment.** v. 19, p. 100357, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100357>

Santos, R. O.; Delgado, R. C.; Pereira, M. G.; Souza, L. P. **Physical attributes of the river basin of Roncador river associated to the landscape change in the municipality of Magé, Rio de Janeiro-Brazil.** Bioscience Journal, v. 34, p. 1146-1155, 2018. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n3a2018-36716>

Santos, R. O; Delgado, R. C; Pereira, M. G; Souza, L. P; Teodoro, P. E; Silva Junior, C. A; Costa, G. G. O. **Space-time variability of the Roncador River basin in te change of land use and cover and its correlation with climatic variables.** Bioscience Journal , v. 35, p. 1033-1042, 2019. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n4a2019-39486>

Santana, C.A.S.; Freitas, W.K.; Magalhães, L.M.S. **Estrutura e similaridade em florestas urbanas na região metropolitana do Rio de Janeiro.** Interciênciav. 40, p. 479–486, 2015. <https://doi.org/33.94000007>

Silva, C. O; Delgado, R. C; Teodoro, P. E; Silva Junior, C. A; Rodriguez, R. A. **Spatially explicit modeling of land use and land cover in the State of Rio de Janeiro-Brazil.** Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. n/a, p. 100303-n/a, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100303>

Souza, T. C. O; Delgado, R. C; Magistrali, I. C; Santos, G. L; Carvalho, D. C; Teodoro, P. E; Silva Junior, C. A.; Caúla, R. H. **Spectral trend of vegetation with rainfall in events of El Niño-Southern Oscillation for Atlantic Forest biome, Brazil.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 190, p. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7060-1>

Sobral, B.S; Oliveira- Júnior, J.F; Gois, G; Pereira Junior, E.R; Terassi, P.M.B; Muniz Junior; J.G.R; Lyra, G.B; Zeri, M. **Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO.** Atmos. Res. V.220, p. 141–154, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.003>

Sun, W; Kooijmans, L.M.J; Maseyk, K; Chen, H; Mammarella, I; Vesala, T; Levula, J; Keskinen, H; Seibt, U. **Soil fluxes of carbonyl sulfide (COS), carbon monoxide, and carbon dioxide in a boreal forest in southern Finland.** Atmos. Chem. Phys. s/n, V. 18, p.1363–1378, 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1363-2018>

Sulla-Menashe, D.; Friedl, M. A.; Krankina, O. N.; Baccini, A.; Woodcock, C. E.; Sibley, A; Elsakov, V. **Hierarchical mapping of Northern Eurasian land cover using MODIS data.** Remote Sensing of Environment, v.115, n.2, 392–403. 2011. <https://doi.org/doi:10.1016/j.rse.2010.09.010>

Sulla-Menashe, D.; Gray, J. M.; Abercrombie, S. P.; Friedl, M. A. **Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product.** Remote Sensing of Environment. v,222, s/n, p.183–194.2019. doi:10.1016/j.rse.2018.12.013

Sulla-Menashe, D.; Friedl, M. A. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) **Product.** USGS: Reston, VA, USA. <491 [https://landweb.modaps.eosdis.nasa.gov/QA\\_WWW/forPage/user\\_guide/MCD12Q1\\_User\\_guide.pdf](https://landweb.modaps.eosdis.nasa.gov/QA_WWW/forPage/user_guide/MCD12Q1_User_guide.pdf)>. 2018. Acessado em: 10 abr 2020.

Scarano, F.R.; Ceotto, P. **Brazilian Atlantic Forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change.** Biodivers. Conserv. V.24, p. 2319– 2331. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0972y>.

Scarano, F.R. **Biomass brasileiros: retratos de um país plural**. Rio de Janeiro: Casa da Palavra, 326p, 2012.

Syphard, A. D., Keeley, J. E., Pfaff, A. H., Ferschweiler, K. **Human presence diminishes the importance of climate in driving fire activity across the United States**. Proceedings of the National Academy of Sciences. v. 114, n. 52, p. 13750-13755, 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713885114>

Swathandran, S; Aslam, M.A.M. **Assessing the role of SWIR band in detecting agricultural crop stress: a case study of Raichur district, Karnataka, India**. Environmental monitoring and assessment, v. 191, n. 7, p. 442, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7566-1>

Tsesmelis, D. E; Oikonomou, P. D; Vasilakou, C. G; Skondras, N. A; Fassouli, V; Alexandris, S. G., Grigg; N. S; Karavitis, C. A. **Assessing structural uncertainty caused by different weighting methods on the Standardized Drought Vulnerability Index (SDVI)**. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, v.33, p. 265–277, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.058>.

Valipour, M. **Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA**. models in the 750 United States. Meteor. Applications, v.22, p.592–598, 2015. <https://doi.10.1002/met.1491>.

Van der Werf, G.R; Randerson, J.T; Giglio, L; Collatz, G.J; Mu, M; Kasibhatla, P.S; Morton, D.C; De Fries, R.S; Jin, Y; Van Leeuwen, T.T. **Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009)**. Atmos. Chem. Phys, s/n, 2010. <https://10.11707–11735>.

Veloso, GA; Ferreira, ME; Ferreira Júnior; Laerte, G; Barbosa, S.B. **Modelando a produtividade primária bruta em pastagens de savana tropical para intensificação da pecuária no Brasil**. Aplicações de Sensoriamento Remoto: Sociedade e Meio Ambiente. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100288>

Vilanova, R. S; Delgado, R. C; Abel, E. L. S; Teodoro, P. E.; Silva Junior, C. A; Wanderley, H. S. ; Silva, G. F. C. **Past and future assessment of vegetation activity for the state of Amazonas-Brazil**. Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. n/a, p. n/a, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100278>

Wang, L.; Qu, J.J. **NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing.** *Geophysical Research Letters*, v.34, p.204-205, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>.

Wang, L.; Qu, J.J.; Xiong, J; Hao, X; Xie, Y; Che, N.A **New Method for Retrieving Band 6 of Aqua MODIS.** *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* v.3, p.267–270, 2007. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.869966>

Wang, L; Qu; J.J.; Hao, X. **Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements.** *Agricultural and forest meteorology*, v. 148, n. 11, p. 1767-1776, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.005>

Wang, W.; Qu, J.J.; Liu, Y.; Hao, X.; Sommers, W. **An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: a preliminary study in the southeastern United States.** *Remote Sensing of Environment*.v.108, n.2, p.163–170, 2007. doi: 10.1016/j.rse.2006.11.009.

Wang, L.; Qu, J. J. **NMDI: a normalized multiband drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing.** *Geophysical Research Letters*, v.34, p.204-205, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>.

Wang, L; Yuan, X. **Two types of flash drought and their connections with seasonal drought.** *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 35, n.2, p. 1478–1490, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00376-018-8047-0>.

Yadav, V. P., Prasad, R., Bala, R., & Vishwakarma, A. K. **An Improved Multi-Index Model for Estimation of Surface Soil Moisture Using Landsat-8 Satellite Data.** 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC). 2019. doi:10.23919/ursiap-rasc.2019.8738399

Yadav, V. P.; Prasad, R; Bala, R; Vishwakarma, A. K. **An Improved Multi-Index Model for Estimation of Surface Soil Moisture Using Landsat-8 Satellite Data.** 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), s/n, 2019. doi:10.23919/ursiap-rasc.2019.8738399

Yang, J; Tian, H; Pan, S; Chen, G; Zhang, B., Dangal, S. **Amazon droughts and forest responses: largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016.** Glob. Change Biol, v.24, p. 1919-1934. .2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14056>.

Yuan, W; Piao, S;Qin, D; Dong, W; Xia, J; Lin, H; Chen, M. **Influence of vegetation growth on the enhanced seasonality of atmospheric CO<sub>2</sub>.** Global Biogeochem. Cycles v.32, p.32–41, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017GB005802>.

## **CAPÍTULO II**

### **PROPOSTA DE UM ÍNDICE PARA O MONITORAMENTO DAS ÁREAS DE PASTAGENS NA MATA ATLÂNTICA: SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS LEVANTADOS NO ÚLTIMO RELATÓRIO DO IPCC**

## RESUMO

A mata atlântica é considerada o bioma de maior biodiversidade do mundo, sendo considerado um *hotspot* brasileiro. Nas últimas décadas, principalmente devido à expansão de pastagens para criação bovina e incêndios florestais, esse bioma foi intensamente degradado, perdendo a quase totalidade do que resta da sua vegetação original. Neste contexto, este estudo teve como objetivo geral propor a utilização de uma nova ferramenta para o monitoramento da degradação da pastagem no Estado do Rio de Janeiro em função da variabilidade climática. A imagem do MCD12Q1 foi baixada no *software* R e de suas respectivas bibliotecas. Destarte, através da ferramenta *extract by mask* do *software*, realizamos o recorte de imagens MODIS das áreas de pastagem (8, 9, 10, 12 e 14). Já no que tange as classes, estas foram transformadas para *shape* e mescladas em um único arquivo. Para calcular o índice de cobertura da vegetação (VC), que indica a degradação da pastagem, utilizamos produtos relacionados ao índice de vegetação (MOD13Q1); visando prever a degradação futura da pastagem através do VC recorremos a ferramenta da modelagem (a saber, *Autoregressive Integrated Moving Average*) ARIMA. Saliente-se ainda que os elementos meteorológicos de chuva e temperatura do ar foram obtidos a partir do modelo climático CanESM5 na plataforma WorldClim, em antagônicos cenários (SSP1-2.6 e SSP5-8.5). No computo dos dados de focos de calor, utilizamos as técnicas de sensoriamento remoto – principalmente o sensor de produto MODIS MCD14DL (TERRA/AQUA). Ao analisar os resultados apresentados na tese, notamos que no período compreendido entre 2001 a 2020, a estação seca apresentou o (VC = 56.81%) e, por conseguinte a estação chuvosa (VC= 59.77%), o que nos permite enquadrá-las na categoria “degradada”. O modelo ARIMA, em nosso estudo, foi capaz de prever a sazonalidade do VC prospectivamente, ou seja, para área de pastagem em período futuro (2021-2040); a média anual do período futuro para estação seca apresentou (VC = 50.49%) e para estação chuvosa teve valor de (VC= 52.02%). A análise não paramétrica foi realizada por meio do teste de Mann-Kendall mensal para as variáveis, focos de calor e (*Enhanced Vegetation Index*) EVI, ambas apresentaram tendência significativa positiva nos seguintes meses, o mês de janeiro para os focos de calor com ( $Z= 2.37$ ); e os meses de junho e julho ( $Z= 3.38$  e  $Z= 3.12$ ), respectivamente, para o EVI. Nossos resultados simulados pela modelagem ARIMA futura e os dados simulados pelo modelo climático CanESM5 alertam para intensa vulnerabilidade da degradação da pastagem. Caso não sejam efetivados os acordos firmados na COP 26; caso não reconheçamos a imprescindibilidade em alcançarmos o marco de 1,5 ° da

redução da temperatura até 2050; e, caso não germine no seio da humanidade um olhar ambientalista e sustentável que rivalize com a saga tirânica do grande capital: vivenciamos irremediavelmente a intensificação na perda de biodiversidades e, quiçá, a dor na perda de milhares de milhões de vidas humanas. Nesse contexto insere-se esta pesquisa, no seu intuito em contribuir com os debates em torno das iniciativas locais que objetivem minimizar as catástrofes climáticas. Por conseguinte, em nível de conclusão, julgamos traduzir-se “a utilização do índice de monitoramento VC” em ferramenta consistente à ser utilizado por órgãos ambientais fiscalizadores no cumprimento das metas de emissão de carbono zero até 2030.

**Palavras-chave:** Cobertura do Solo, Mudanças Climáticas, Mata Atlântica, Índice de Vegetação, Simulação Futura

## ABSTRACT

The Atlantic Forest is considered the most biodiverse biome in the world, being considered a Brazilian hotspot. In the decades, mainly due to past expansion to the creation of forest fires, this bio has been intensively degraded, the last almost all of what remains of its original creation. In this context, this study had as general objective the use of a new degradation in the state of Rio de Janeiro, in function of the objective tool for the possibility of study. The MCD12Q1 image was downloaded from the R software and its respective libraries. Thus, using the software's extract by mask tool, we cut out MODIS images from the pasture areas (8, 9, 10, 12 and 14). As for the classes, they were transformed to shape and merged into a single file. To calculate the vegetation degradation index (VC) we used the products related to the vegetation index of (MOD13Q); prediction predict future pasture degradation through VC we resort to ARIMA modeling (namely Autoregressive Integrated Moving Average). It should also be noted that the meteorological elements of rainfall and temperature were obtained from the CanESM5 climate model on the WorldClim platform, in antagonistic scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-8.5). In computing the data of hotspots, we use remote sensing techniques – especially the product sensor MODIS MCD14DL (TERRA/AQUA). When analyzing the results presented in the thesis, we noticed that in the period of the sequence in 2020, the dry season presented the (VC = 56.71%) and therefore allows the lasvosa season (VC = 59.77%), which allows us to formula-lasvosa category “degraded”. The ARIMA model, in our study, was able to predict the seasonality of the VC prospectively, that is, for the pasture area in the future period (2021-2040); the annual average of the future for the dry season presented (VC = 50.49%) and for the rainy season had a value of (VC = 52.02%). Our results simulated by ARIMA modeling and data simulated by the CanESM5 climate model alert to intense vulnerability of pasture degradation. If the agreements signed at COP 26 are not implemented; if we do not recognize the indispensability of reaching the 1.5° mark of the 2050 temperature reduction; and, do not germinate in the heart of humanity an environmentalist and sustainable look that rivals the tyrannical saga of big capital: we are irremediably experiencing the intensification of the loss of biodiversity and, perhaps, the pain of the loss of billions of human lives. In this context, the research is inserted, in order to contribute to the debates around local initiatives that minimize climate catastrophes in this sense. Therefore, at the conclusion level, we believe that “the use of VC monitoring content” has been translated into a

consistent tool to be used by inspection bodies in meeting the 2030 zero carbon emission environmental targets.

**Keywords:** Land Cover, Climate Change, Atlantic Forest, Vegetation Index, Future Simulation

## 1. INTRODUÇÃO

A substituição da vegetação por áreas de pastagem é um problema recorrente em vários biomas do mundo (Latawiec et al., 2014, ABIEC, 2022). Áreas de pastagens quando intensamente degradadas são abandonadas e novas áreas florestais são convertidas em pastagem (Santos et al., 2021). Esse processo leva a perda da biodiversidade e gera problemas de ordem socioambiental e econômica.

No que tange especificamente ao Bioma Mata Atlântica verificamos:

- Alto nível de degradação, devido ao longo histórico de desmatamento (Olexa et al., 2014, Dias et al., 2011). Tal cenário, culminou na preservação de apenas 12% da floresta primária (Andrade et al., 2019, Santos et al., 2019, Jesus et al., 2022). Essa conversão da floresta tem gerado a emissão dos gases do efeito estufa, efeito esse liderado pelos setores de energia (37%), agropecuária (32%) e uso da terra e floresta (17%) (Rosa et al., 2021, SOSMA,2022).
- Diminuição da sua respectiva biodiversidade (Delgado et al.,2022). O Bioma Mata Atlântica abriga várias espécies de animais, espécies nativas, ecossistemas próprios e mesmo depois de ser quase que totalmente devastado, de serem criadas leis específicas de proteção, ainda sofre uma grande pressão para a conversão de novas áreas (Santos et al., 2022).
- Aumento da vulnerabilidade das populações que vivem nesses locais e dependem da floresta para sobreviver (Santana et al., 2022), afetando seus modos de vidas tradicionais, causando extinção de espécies da fauna e flora, além do assoreamento de lagos e rios.

Dessa forma, julgamos haver absoluta plausibilidade em se considerar a Mata Atlântica como um dos ecossistemas mundialmente prioritários para restauração florestal, bem como reconhece-la estratégica na elaboração das políticas públicas do Brasil no que concerne ao enfrentamento das mudanças climáticas. (Rosa et al., 2021).

Com relação as mudanças climáticas, inúmeras tem sido as discussões fomentadas por diversos setores da sociedade civil, e em especial pela comunidade científica (Silva et al., 2020). Não obstante, a adoção de medidas em acordos entre governos sem a consecutiva operacionalização das políticas adotadas, somada aos impactos resultantes

da mudança acelerada do clima nas últimas décadas, promoveram uma mudança na pauta central de instituições e grupos envolvidos.

De acordo com os resultados fornecidos pelo Sexto relatório do IPCC (AR6) e o debate na Conferência das Partes (COP 26), apontam através do cenário socioeconômico do SSP1-2.6, que o aumento da temperatura da superfície da terra 1,5° já está acontecendo (AR6, 2021, p. 17) e os seus efeitos já podem ser notados, principalmente nos países com índice de desenvolvimento mais baixo.

Dentre as ações que podem ser realizadas para amenizar os efeitos dos desastres ambientais, destacamos: *i.* O monitoramento da dinâmica da paisagem futura através de modelos matemáticos (Andrade et al., 2020); *ii.* Diferentes metodologias, como a modelagem estatística (Vilanova et al., 2021); *iii.* O monitoramento ambiental por índices de seca (Delgado et al., 2022) e *iv.* Distintos modelos climáticos do IPCC, através dos novos cenários chamados caminhos Socioeconômicos compartilhados (SSPs) lançados no último AR6 WorldClim, 2021(Santana et al., 2022).

Dito isto, focalizaremos a seguir um modelo privilegiado nesta tese: A modelagem (*Autoregressive Integrated Moving Average*) ARIMA. Tal ferramenta utiliza, de maneira prospectiva, dados passados para prever o futuro da dinâmica da paisagem (Delgado et al., 2022, Jesus et al., 2022, Vilanova et al., 2019). Em nível de exemplificação, aludimos a um estudo realizado no corredor central da mata atlântica, no qual estudiosos utilizaram a modelagem (ARIMA) para analisar a condição passada, presente e futura de diferentes usos e coberturas da vegetação. Os autores em seu estudo obtiveram a compreensão de que a modelagem ARIMA oportunizou excelente precisão, para as simulações futuras na dinâmica da vegetação no bioma mata atlântica (Santana et al.,2020).

Cumpramos ainda destacar uma outra ferramenta utilizada no Brasil: o índice de cobertura da vegetação (VC). Este, permite avaliar o nível de degradação da paisagem; no estudo realizado por Santos et al. (2021) para o estado de Goiás, na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pandeiros, Brasil, fora utilizado o VC para avaliar os diferentes níveis de degradação da paisagem. Os autores concluíram que o VC é uma ferramenta adequada para ser utilizada no monitoramento de degradação da paisagem, seja no Brasil, seja no mundo (Gao, 2006, Santos et al., 2021).

Por conseguinte, do acima exposto, algumas indagações se nos apresentam: (1). O monitoramento da degradação da paisagem pelo índice VC serve como uma abordagem

inovadora para o monitoramento da degradação das pastagens no Bioma Mata Atlântica? (2). É possível caracterizar a dinâmica e o padrão espacial futuro do estado de degradação da pastagem no (Estado do Rio de Janeiro) SRJ com a modelagem ARIMA? (3). Qual a tendência do clima para área de pastagem no SRJ?

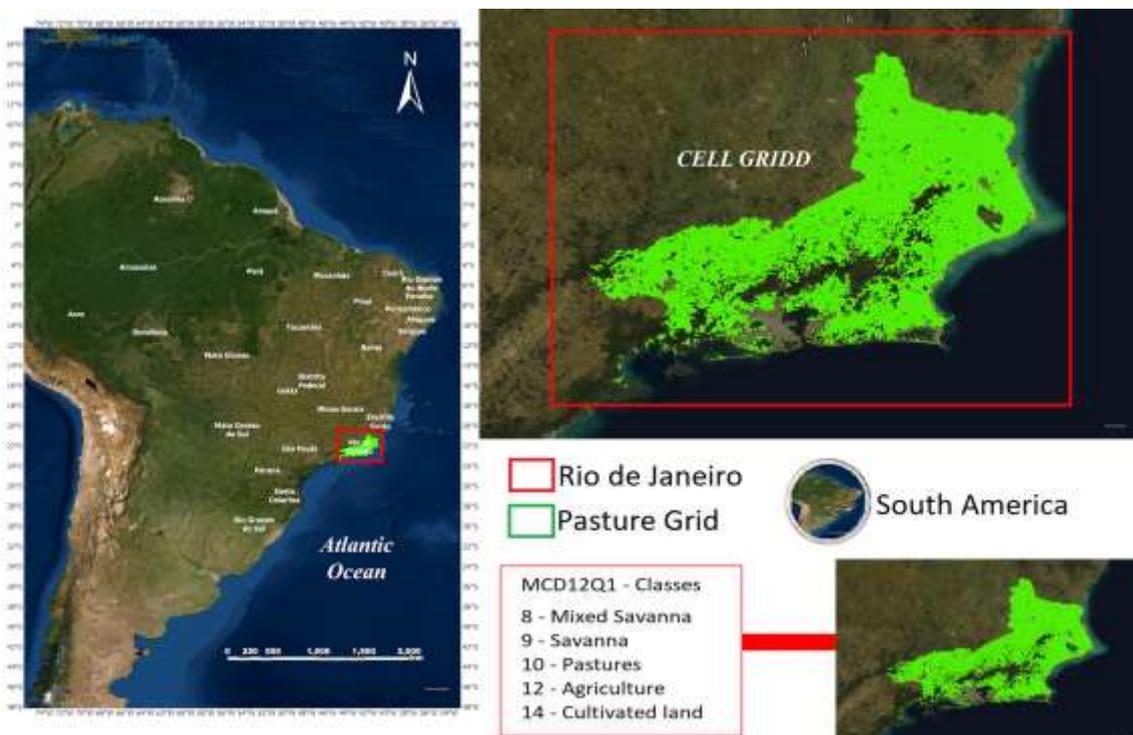
*Para responder a essas questões, este estudo tem como objetivo avaliar a degradação da pastagem por meio do VC para o período de 2001 a 2021, e aplicação do modelo ARIMA para simulação das séries futuras de VC*

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudo

O SRJ localiza-se na região Sudeste do Brasil e sua altitude alcança até 2.787 m no Pico das Agulhas Negras, localizado no Parque Nacional do Itatiaia. A área do estado é de 43.696,054 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). Com uma população estimada em mais de 17 milhões de pessoas (MAPBIOMAS, 2022), limita-se ao norte e noroeste com Minas Gerais, a sudoeste com São Paulo, ao leste e sul com o Oceano Atlântico e a nordeste com o Espírito Santo (IBGE, 2019).

O clima do Estado do Rio de Janeiro é dividido em 8 tipos climáticos de acordo com a nova classificação de Köppen para o Brasil (Alvares et al., 2013). O SRJ tem um clima diverso em diferentes regiões devido à sua posição geográfica, os sistemas meteorológicos variam desde escala local, mesoescala e grande escala. São verificadas diferentes classes de uso e cobertura da terra no SRJ, a classe de interesse para este estudo é a pastagem, que ocupa 40% da mata atlântica (MapBiomas, 2022) (Fig.13).



**Figura 13:**Localização da área de estudo de pastagem dentro do ERJ

## **2.2 Dados de Sensoriamento Remoto**

### **2.2.1. Área de Pastagem**

Foi utilizado dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) produto MCD12Q1 com resolução espacial de 500 metros (Sulla-Menashe and Friedl, 2018) e versão 006. Ele contém 5 tipos de classificação, que descrevem as propriedades de cobertura da superfície derivadas de observações do sensor MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA ao longo de um ano. O primeiro esquema de cobertura de superfície identifica 17 classes definidas pelo Programa Internacional de Geosfera da Biosfera (IGBP), que inclui 11 classes de vegetação natural, 3 classes de parcelas urbanizadas e 3 classes de solo não vegetado. A classificação Tipo 1 será utilizada para o ano de 2019, por ser a classificação mais completa, recente e de interesse desta pesquisa.

O *software* ArcGIS 10.5 foi utilizado para a organização do banco de dados e a elaboração de mapas temáticos. A imagem do MCD12Q1 foi baixada do *software* R, além disso suas bibliotecas, através da ferramenta (*extract by mask*) do *software*, então foi realizado o recorte de imagens MODIS das áreas de pastagem (8, 9,10, 12 e 14), que são o uso e cobertura de interesse do estudo na qual será avaliado a intensidade da sua degradação, as classes foram transformadas para *shapefile* e mescladas, em um único arquivo denominado de pastagem (Fig.13). A imagem do polígono de pastagem (MCD12Q1\_RJ\_2019) com resolução espacial de 500m foi transformada para pontos utilizando-se a ferramenta (*extract values to point*), obtendo-se assim uma célula de (*grid\_point*), com total de 37088 pontos, identificados por coordenadas geográficas.

### **2.2.2. Dados do *Enhanced Vegetation Index* (EVI)**

A vulnerabilidade da vegetação foi determinada a partir do produto do sensor (MODIS) MOD13A3 obtido a bordo do satélite TERRA entre 2001 a 2020, de janeiro a dezembro para cada imagem, com resolução temporal de 16 dias e uma resolução espacial de 1km. O (*Enhanced Vegetation Index*) EVI do MOD13A3 foi usado para avaliar a dinâmica da vegetação (Huete et al., 2002; Didan et al., 2015), além disso, para uma melhor avaliação, os dados de EVI foram separados por estação seca (abril até setembro) e estação chuvosa (outubro até março).

### 2.2.3. Focos de Calor

Observações mensais de focos de calor para os anos 2001-2020 foram obtidas do sensor MODIS (plataformas TERRA e AQUA). Os dados do produto MCD14, referente aos focos de calor, foram extraídos, em arquivo *shapefile*, para a área de pastagem, na plataforma *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS): (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>). Foram utilizados os focos da coleção mais recente (v006) do algoritmo de fogo ativo (MCD14 –Delgado et al., 2022). O algoritmo MCD14 gera resultados com resolução espacial de 1 km. O (*Fire Map*) FIRMS permite navegar interativamente no arquivo completo de detecções de incêndios ativas globais do MODIS e VIIRS. Dados de incêndio quase em tempo real estão disponíveis em aproximadamente 3 h após a passagem do satélite e imagens em 4 a 5 h.

Além disso, para uma melhor avaliação, os dados de focos de calor foram separados por estação seca (abril até setembro) e estação chuvosa (outubro até março).

### 2.3. Dados climáticos

O conjunto de dados climáticos para o presente e futuro, foram obtidos para a máscara de *grid* da área de pastagem do SRJ. Ou seja, consistem em dados climáticos mensais de temperatura média do ar (°C) e chuva (mm), em resolução espacial de 30 segundos (1km<sup>2</sup>) do banco de dados WorldClim v2.1 (<http://www.worldclim.org/bioclim>) HIJAMANS et al. (2005).

Os dados futuros têm a mesma resolução espacial e referem-se aos (cenários socioeconômicos) SSP1-2.6 e SSP5-8.5, que são projeções das mudanças climáticas futuras com baixa e alta força radiativa do *Canadian Earth System Model version 5* (Can-ESM5) para 2021-2040.

O cenário SSP1-2.6 é o cenário mais otimista com uma projeção de um mundo cada vez mais sustentável no qual os recursos naturais são preservados, as desigualdades de renda são reduzidas, o consumo e o uso de energia são utilizados de forma consciente. Por outro lado, o cenário e SSP5-8.5 é o mais pessimista, o seu desenvolvimento é baseado nos combustíveis fósseis com as maiores emissões e os maiores valores de

aumento da temperatura global (IPCC, 2021). Esses dados foram extraídos usando o *software* R versão 4.0.2, usando as bibliotecas *readxl*, *raster*, *rgdal*, *maptools* e *RSAGA*.

Os cenários foram calculados mensalmente de janeiro até dezembro, para cada um dos dados climáticos (chuva e temperatura média) e separados para estação seca e chuvosa, além disso, foi realizada a diferença entre o clima futuro dos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 e o clima considerado “baseline” no *software* Excel, para ambas as variáveis meteorológicas utilizadas.

#### **2.4. Procedimentos para detectar a degradação da vegetação**

Para a análise da vulnerabilidade da degradação da pastagem, os valores de EVI foram utilizados para obter a cobertura vegetal (VC) da pastagem do ERJ, pixel da imagem, de acordo com a (Equação.1) (Gao et al., 2006, Santos et al.,2021):

$$VC = \frac{EVI_{min} - EVI_{max}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \times 100\% \quad (1)$$

Em que,  $EVI_{min}$  = menor valor de EVI encontrado entre pixels representativos de áreas com solo exposto; e  $EVI_{max}$ = maior valor de EVI encontrado entre os pixels da área de vegetação (Tabela. 4).

Os dados do VC foram separados pela estação seca e chuvosa, para uma análise comparativa mais detalhada do nível de degradação da pastagem em cada uma das estações.

**Tabela 4:** Avaliação da condição da cobertura vegetal utilizando o índice de degradação VC

VC	Classe de degradação da vegetação
VC>90%	vegetação não degradada
75%>VC≤ 90%	vegetação levemente degradada
60%>VC≤ 75%	vegetação moderadamente degradada
30%>VC≤ 60%	vegetação degradada
VC<30%	vegetação altamente degradada

**Fonte:** Adaptado de Santos et al. (2021)

## 2.5. Presente, passado e futuro do VC

O *Autoregressive Integrated Moving Average Model* (ARIMA) (Equação.2) foi utilizado para obter dados futuros (2021–2040) do VC de acordo com os métodos propostos por Santos et al. (2021).

$$1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i L^i X_t = 1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i \epsilon_t \quad (2)$$

Onde  $L$  é o operador lag, os  $\alpha_i$  são os parâmetros da parte autorregressiva do modelo, os  $\theta_i$  são os parâmetros da parte da média móvel e os  $\epsilon_t$  são os termos de erro. Os termos de erro  $\epsilon_t$  são geralmente assumidos como variáveis independentes, identicamente distribuídas, amostradas de uma distribuição normal com média zero. Os dados foram processados no (R Core Team, 2022) com os pacotes “*MASS*”, “*Forecast*” e “*tseries*”. O pacote “*Forecast*” foi usado para produzir o modelo, além disso a função “*forecast (number of period)*” do pacote “*forecast*” foi usado para prognose do VC futuro (2021–2040).

Para entender os diferentes efeitos da degradação da pastagem futura, os dados passado e futuro do VC foram analisados para estação seca e chuvosa. Para validação do desempenho do modelo foi feita a estatística da análise de regressão e correlação dos dados do VC simulado e observado.

## **2.6. Análise estatística**

### **2.6.1. Teste estatístico não paramétrico Mann-Kendall para variáveis EVI e Focos de Calor**

A análise estatística quanto as gerações de gráficos da pesquisa foram realizadas no R versão 4.0.5 (R CORE TEAM, 2022). Para analisar a tendência das variáveis, aplicou-se o teste de Mann-Kendall para toda a série temporal mensal no período de 2001-2020 (Mann, 1945; Kendall, 1975).

O teste de Mann-Kendall ( $\alpha = 0,05$ ) contribui para a decisão entre aceitação e rejeição de  $H_0$  (hipótese de estabilidade dos dados) em favor de  $H_1$  (hipótese de presença de tendência nos dados). O sinal da estatística  $Z$  indica se a tendência é crescente ( $Z > 0$ ) ou decrescente ( $Z < 0$ ). Com isso, o objetivo foi verificar se havia uma tendência significativa nos dados ao longo do tempo e se eles apresentavam características positivas ou negativas, considerando o valor  $p$  ( $\alpha = 0,05$ ) e o índice  $Z$  do teste.

### **2.6.2. Teste de Pettitt**

O teste de Pettitt (Pettitt,1979) identifica se a série de dados é homogênea ou se há alguma quebra abrupta na média da série. O nível de significância utilizado para o teste foi de 5%. Esse teste foi aplicado à série temporal das variáveis biofísicas, onde foram identificadas as principais mudanças significativas durante a série utilizada (2001–2020) a partir da principal inflexão/sinal dos anos extremos. Os mapas foram espacializados para o uso e cobertura de pastagem no SRJ.

### **2.6.3. Densidade de Kernel**

Diferentes estudos utilizam a densidade de Kernel para estimar a densidade do fogo (Barbosa et al., 2021, Santos et al., 2021, Delgado et al., 2022). Por isso, foi feita a extração dos focos de calor para o ano com maior ponto de inflexão pela análise de Pettitt nesta pesquisa, suas densidades dentro da região de estudo foram calculadas utilizando o estimador de densidade kernel, presente nas ferramentas de extensão *Spatial Analyst* do *software* ArcGIS 10.5. Este método foi utilizado para especificar focos de incêndio e permitir uma análise mais precisa do tamanho e concentração da ocorrência do fogo.

A metodologia e as classes de densidade foram realizadas de acordo com o estudo de Delgado et al. (2022). Na qual, as densidades obtidas foram divididas em cinco classes de acordo com sua concentração, e cada classe foi associada a uma cor correspondente a muito baixa (verde escuro), baixa (verde), moderada (amarelo), alta (laranja) e muito alto (vermelho).

### 2.6.3. Análise estatística da modelagem ARIMA

Foram realizadas validações da modelagem ARIMA, para tanto, utilizou-se o coeficiente de correlação ( $r$ ), o erro padrão de estimativa (EPE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e também foi calculado e avaliado o índice de concordância de Willmott ( $d$ ) (Willmott et al., 1985). Os valores do coeficiente de Willmott variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita.

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (3)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (6)$$

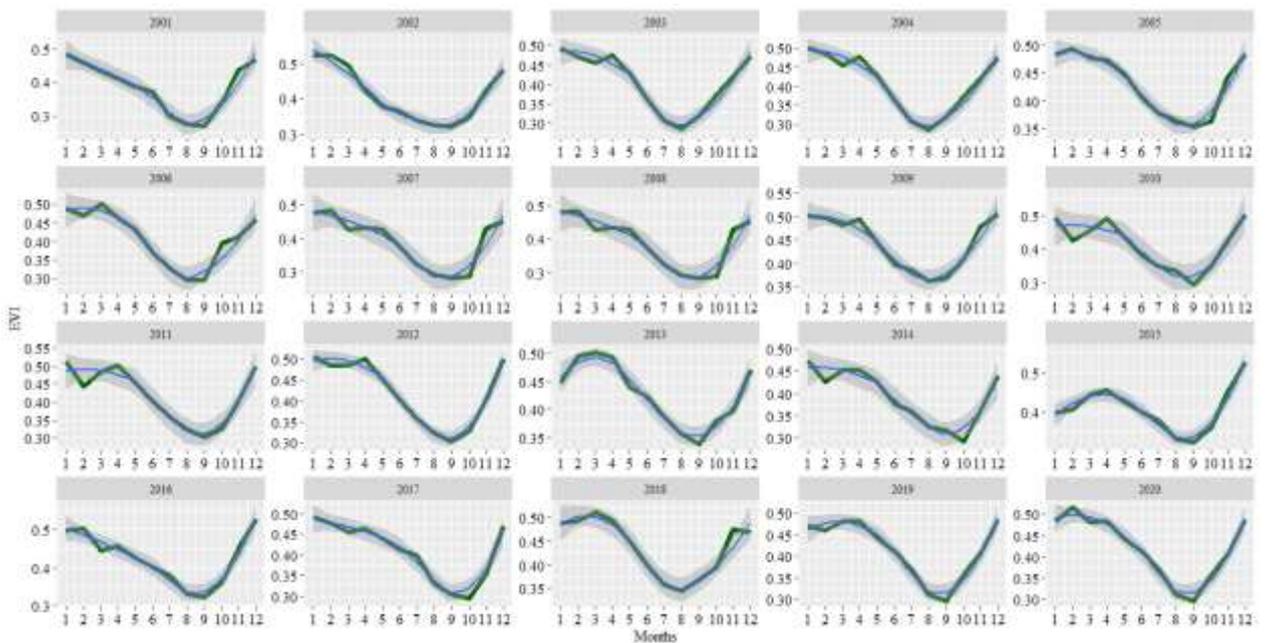
em que, o valor observado do VC na  $i$ -ésima observação,  $O$  média dos valores observados na  $i$ -ésima observação e  $n$  o número de amostras e  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $P_i$  é o valor estimado de  $F$  na  $i$ -ésima observação.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Dinâmica da vegetação usando o produto MODIS

Os menores valores de EVI foram encontrados na estação seca, nos anos 2001, 2007 e 2008 (Fig.14), com o mesmo valor (0.35) e os maiores valores foram encontrados no período chuvoso em 2009 e 2002, respectivamente, (0.48) e (0.47). Entre os meses analisados para toda a série de (2001-2021), os meses de dezembro e janeiro apresentaram ambos, os maiores valores médios de EVI, com o mesmo valor de (0.48), enquanto agosto e setembro apresentaram os menores valores médios de EVI para toda a série, com os seguintes valores de (0.32 e 0.31).

Em quase todos os anos analisados, os maiores valores de EVI foram encontrados na estação chuvosa. Esses valores diminuem até atingir o auge da estação seca agosto e setembro e aumentam novamente nos meses de novembro e dezembro (Fig.14). No período analisado (2001-2020), o ano de 2001 apresentou a maior redução da cobertura vegetal para estação seca de toda a série (2001-2020) e também o menor valor de EVI para os meses de agosto e setembro (0.27) da série toda de estudo (Fig.14).



**Figura 14:** Distribuição anual do Enhanced Vegetation Index (EVI) para serie temporal de (2001-2020).

### 3.1.1. Análise mensal do Mann-kendall para EVI e Focos de Calor

Os focos de calor apresentaram tendência positiva no mês de janeiro com significância  $Z= (2.37)$ , este resultado aponta para um aumento dos focos de calor durante este período. Os meses de fevereiro até dezembro não apresentaram tendência significativa (Tab.5).

Em relação ao EVI, somente junho e julho apresentaram tendência positiva significativa (Tab.5), com valores de  $Z= 3.38$  e  $Z= 3.12$  (Tab.5), respectivamente. Este resultado aponta para um crescimento da vegetação durante este período. Os outros meses não apresentaram significância (Tab.5).

**Tabela 5.** Análise da tendência de Mann-Kendall de todas as variáveis do estudo para área de pastagem.

Meses	EVI (zmk)	p-value	Fire (zmk)	p-value
<b>Janeiro</b>	-1.52	0.13	<b>2.37 *</b>	<b>0.01*</b>
<b>Fevereiro</b>	0.16	0.87	1.07	0.28
<b>Março</b>	0.84	0.40	-1.24	0.21
<b>Abril</b>	1.62	0.10	-0.13	0.89
<b>Mai</b>	1.62	0.10	0.32	0.74
<b>Junho</b>	<b>3.38*</b>	0.00	-0.09	0.92
<b>Julho</b>	<b>3.12*</b>	0.00	0.51	0.60
<b>Agosto</b>	1.49	0.13	-1.07	0.28
<b>Setembro</b>	0.58	0.56	0.77	0.43
<b>Outubro</b>	0.00	1.00	-0.35	0.72
<b>Novembro</b>	-1.04	0.30	-0.22	0.82
<b>Dezembro</b>	0.78	0.43	-0.39	0.69

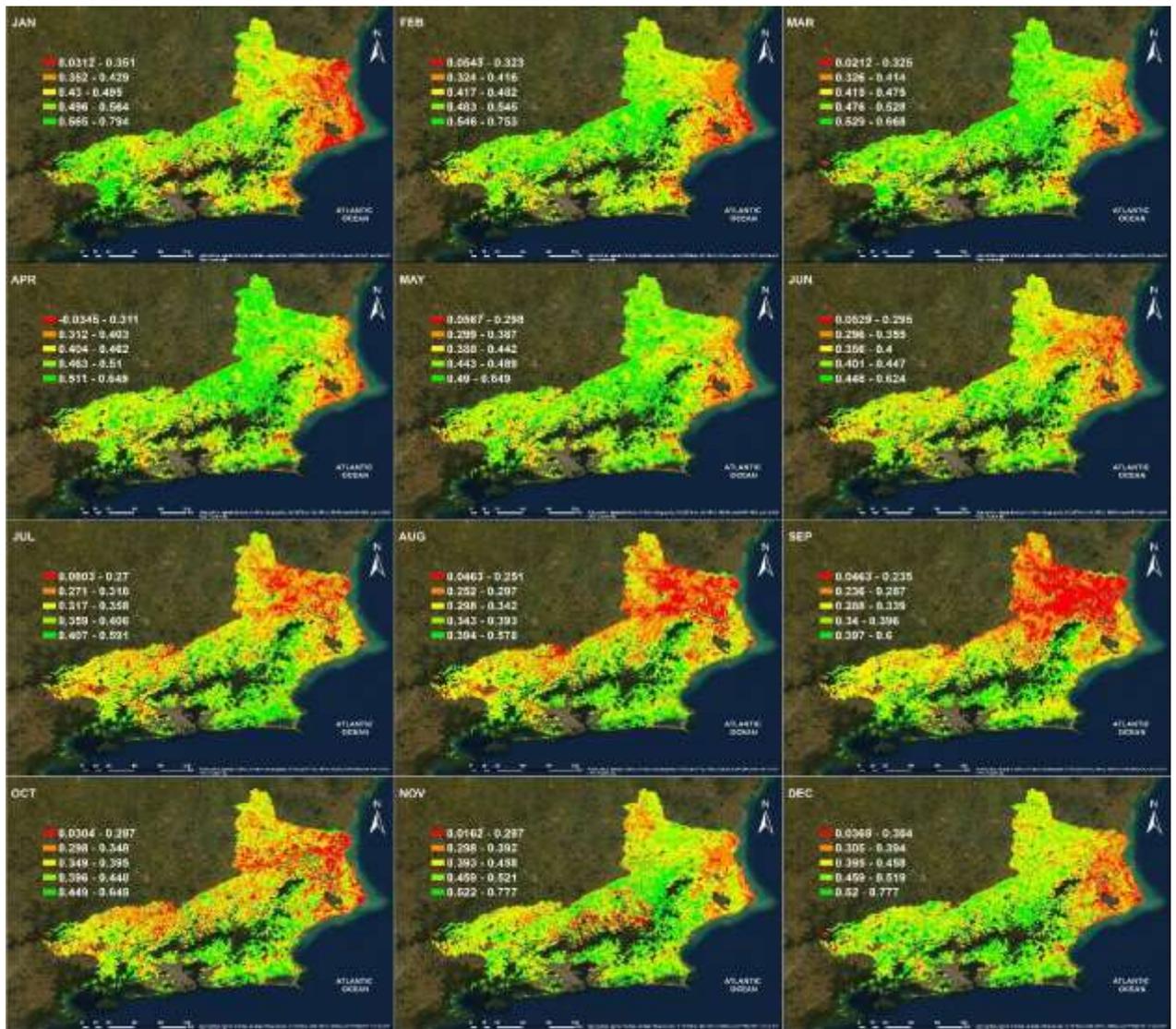
**Legenda – zmk** = análise estatística do teste de Mann-Kendall. **Valor p = \*** tendência estatisticamente significativa  $p\text{-value}= 0.05$ .

### **3.1.2. Análise de Pettitt**

O ano considerado de maior ponto de inflexão pelo teste estatístico de Pettitt foi o ano de 2008, para a variável EVI, sendo este ano escolhido para a representação espacial do índice EVI (Fig.15).

A análise espacial do EVI para o ERJ (Fig.15), indica que durante os meses (janeiro, fevereiro, março, abril, maio, novembro e dezembro) foram observadas maiores áreas de tonalidade verde, e depois entre os meses de (junho a outubro) foram observadas maiores áreas de tonalidade alaranjada e vermelha, principalmente na região noroeste e norte do mapa, indicando maior perigo para perda de biomassa (Fig. 15).

Os mapas no período entre julho e outubro apresentaram as maiores áreas com valores baixos de EVI, que pode ser notado de forma especializada no mapa (Fig. 15), o mês de outubro também apresenta valores baixos de EVI, indicando uma possível duração do período seco (Fig.15).



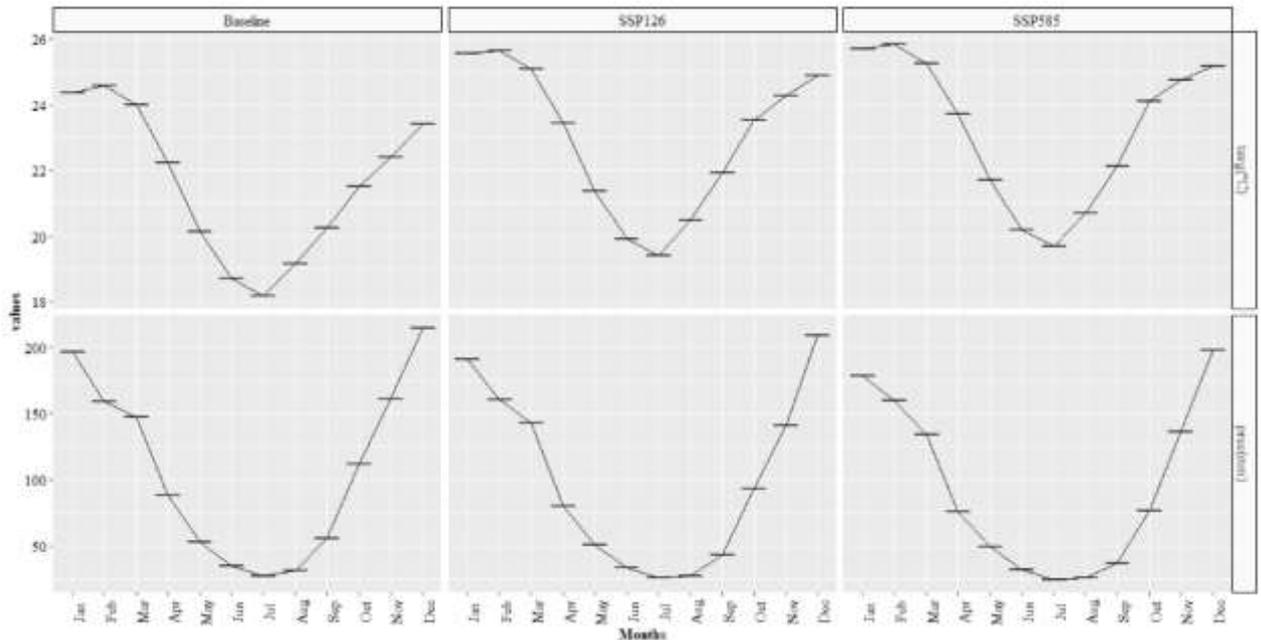
**Figura 15:** Distribuição espacial do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) de acordo com o teste de Pettitt (para o ano de 2008)

### 3.2. Clima (*baseline* e futuro)

A análise climatológica da temperatura do ar (Fig.16) durante o clima considerado “*baseline*” indica uma temperatura média de 21.57°C. A maior temperatura média mensal foi registrada no mês de fevereiro e a menor em julho (24.56°C e 18.16 °C, respectivamente). Para o cenário SSP1-2.6, é registrado aumento 1.38 °C na temperatura média do ar, para área de pastagem, além disso é registrado aumento da temperatura para todos os meses do cenário SSP1-2.6 (Fig.16).

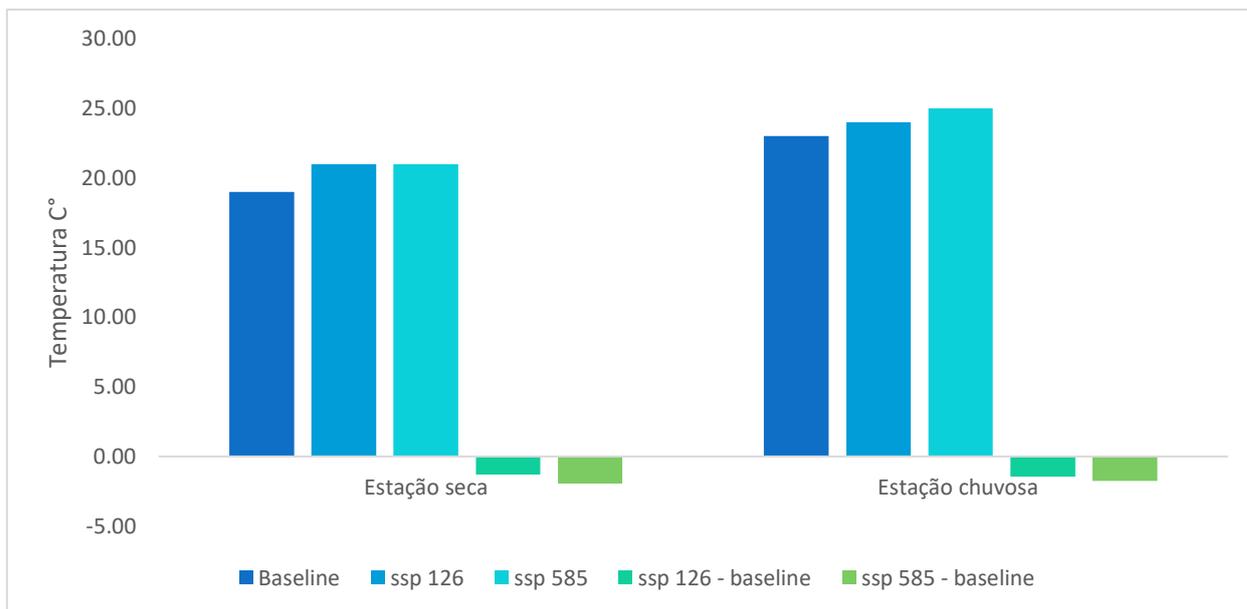
A análise climatológica da temperatura do ar (Fig.16), para o cenário SSP1-2.6, indica uma temperatura média do ar na área de pastagem será de 21.08°C para estação

seca e 24.83°C para estação chuvosa, considerando a temperatura no “baseline”, de 19.77°C para estação seca e 23.77°C para estação chuvosa. Esses valores representam um aumento de 1.31°C para estação seca e 1.46°C estação chuvosa na temperatura média do ar (Fig.17). A maior temperatura média mensal nesse clima para o cenário SSP1-2.6 foi registrada no mês de fevereiro e a menor em julho (25.65°C e 19.39°C, respectivamente).



**Figura 16:**Análise do clima passado e futuro para área de pastagem, para chuva (mm) e temperatura média do ar (°C). Dados gerados a partir do modelo CanESM5.

A análise climatológica da temperatura do ar (Fig.16) para o cenário SSP4-8.5 indica uma temperatura média de 23.24°C. A maior temperatura média mensal foi registrada no mês de fevereiro e a menor em julho (25.83°C e 19.69°C). A análise climatológica da temperatura do ar (Fig.16) para o cenário SSP4-8.5, indica que a temperatura média do ar na área de pastagem será de 21.74°C para estação seca e 25.13°C para estação chuvosa, considerando a temperatura no “baseline”, de 19.77°C para estação seca e 23.77°C para estação chuvosa. Esses valores representam um aumento de 1.97°C para estação seca e 1.77°C estação chuvosa na temperatura média do ar (Fig.17).



**Figura 17:** Análise do clima passado e futuro para área de pastagem, para temperatura média do ar em graus celsius (unidade °C) na estação seca e chuvosa. Dados gerados a partir do modelo CanESM5.

A maior temperatura média mensal para o cenário SSP4-8.5 foi registrada no mês de fevereiro e a menor em julho (25.24°C e 19.69°C, respectivamente). Os valores no gráfico são médias mensais, a parte superior representa a temperatura média e a inferior a chuva (Fig.16).

As chuvas na área de pastagem do SRJ apresentaram um valor médio de 106.68 mm no clima “baseline”. O mês de dezembro para o período “baseline” é o mais chuvoso com um total de 214.76mm e o mês de julho é o de menor chuva com 27.04mm (Fig. 16).

As chuvas na área de pastagem do ERJ apresentaram um valor médio de 99.91 mm no cenário SSP1-2.6. O mês de dezembro para o esse cenário é o mais chuvoso com um total de 209.14 mm e o mês de julho é o de menor chuva com 25.85 mm (Fig. 16).

As chuvas na área de pastagem do ERJ apresentaram um valor médio de 94.01 mm no cenário SSP5-8.5. O mês de dezembro para o esse cenário é o mais chuvoso com um total de 197.92 mm e o mês de julho é o de menor chuva com 24.25 mm (Fig. 16).

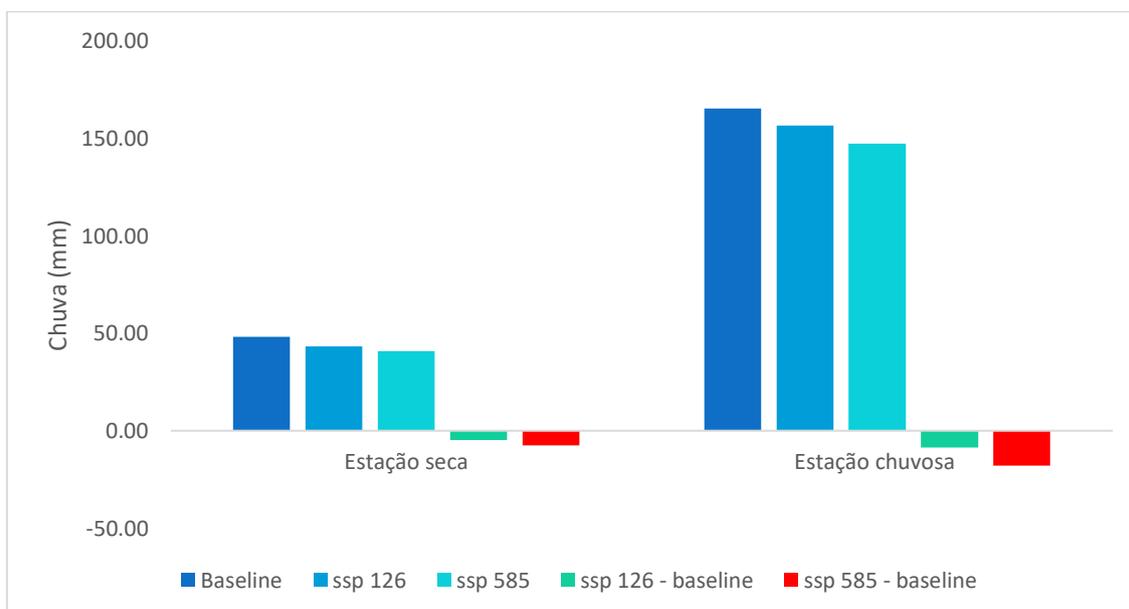
Quando comparamos o cenário SSP1-2.6 com o período “baseline” observamos uma redução da chuva na pastagem do ERJ, sendo uma redução de -6.71 mm (Fig.18). Nesse cenário a redução da chuva é registrada em todos os meses, destacamos que o mês

de novembro a redução será de -19.61 mm, quando comparado ao mês de novembro da baseline (Fig.16).

Para o cenário SSP5-8.5, as reduções de chuva são mais acentuadas quando comparado com período baseline, com uma redução média anual de 12.67 mm. O mês de outubro também apresentou a maior redução mensal nesse cenário com decréscimo de -35.30 mm em relação ao período “baseline” (Fig.16).

A análise climatológica da chuva (mm) (Fig. 18) para o cenário SSP1-26 indica que a chuva média na área de pastagem será de 43.34 mm para estação seca e 156.57mm para estação chuvosa, considerando a chuva no “baseline”, de 48.20mm para estação seca e 165.16mm para estação chuvosa. Esses valores representam uma diminuição de 4.87mm para estação seca e 8.68mm na estação chuvosa quando comparamos o período ssp1.2.6 com a “baseline” (Fig.18).

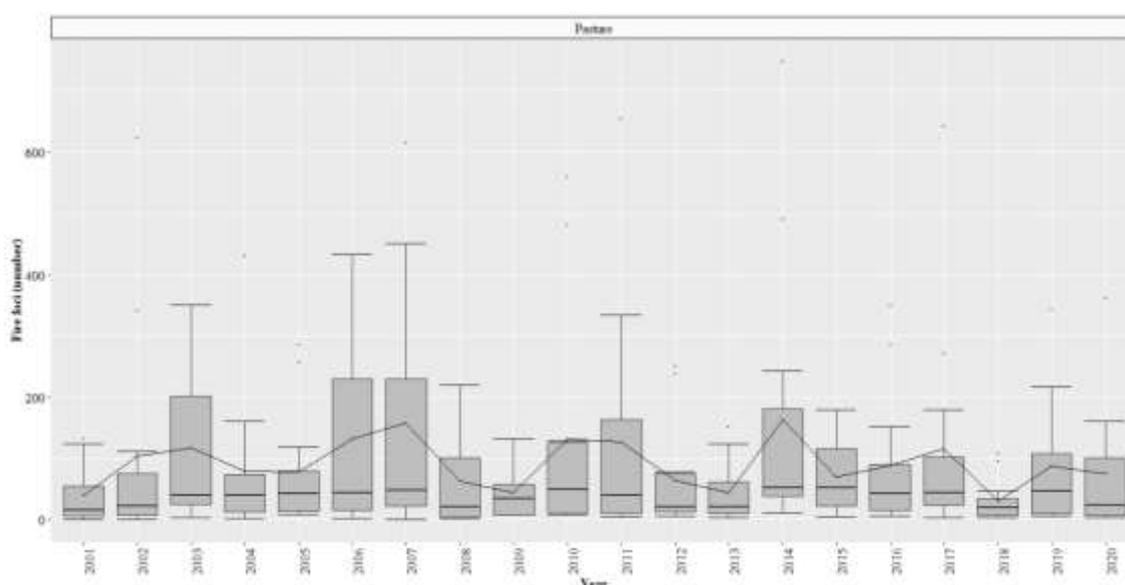
A análise climatológica da chuva (mm) (Fig. 18) para o cenário SSP5-8.5 indica que a chuva média na área de pastagem será de 40.75 mm para estação seca e 147.27mm para estação chuvosa, considerando a chuva no “baseline”, de 48.20mm para estação seca e 165.16mm para estação chuvosa. Esses valores representam uma diminuição de 7.46mm para estação seca e 17.89 mm na estação chuvosa quando comparamos o período SSP5-8.5 com a “baseline” (Fig.18).



**Figura 18:**Análise do clima passado e futuro para área de pastagem, para chuva (mm) na estação seca e chuvosa. Dados gerados a partir do modelo CanESM5.

### 3.3. Análise espacial dos focos de calor

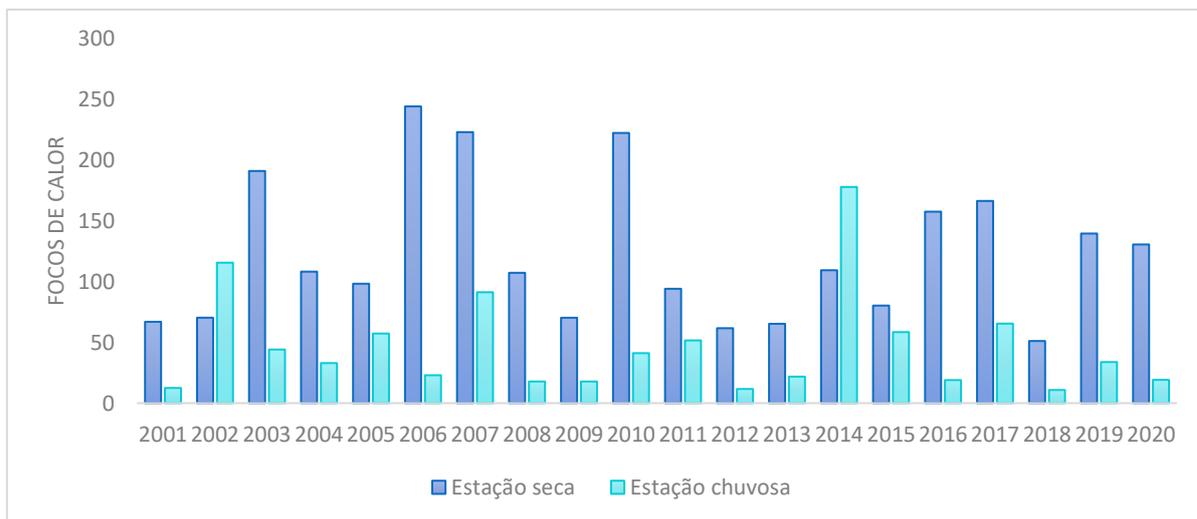
Durante o período analisado de 2001 a 2020, o total de focos de calor foi de 21.723 mil. Os anos com maiores focos de calor foram 2007 e 2008 (Fig.19). A estação seca apresentou a maior média dos focos de calor com valor de 2.459 para a série total, em comparação com a estação chuvosa que apresentou a média de 924 focos de calor (Fig.20).



**Figura 19:** Análise boxplot dos focos de calor da série (2001-2020) para área de pastagem no ERJ

A estação seca apresentou os maiores focos de calor para toda a série temporal (Fig.19). Exceto, para os anos de 2002 e 2014 que os maiores focos de calor ocorreram na estação chuvosa, com os seguintes valores médios, respectivamente, 116 e 178 (Fig.19). Ao avaliarmos o período seco para toda a série (2001 a 2020), o ano de 2006 apresentou o maior número de focos de calor com valor de 244 e o ano de 2018 apresentou o menor número com valor de 51 focos de calor (Fig.20).

Ao avaliarmos o período chuvoso para toda a série (2001 a 2020), o ano de 2014 apresentou o maior número de focos de calor com valor de 178 e o ano de 2018 apresentou o menor número com valor de 11 focos de calor (Fig.20).

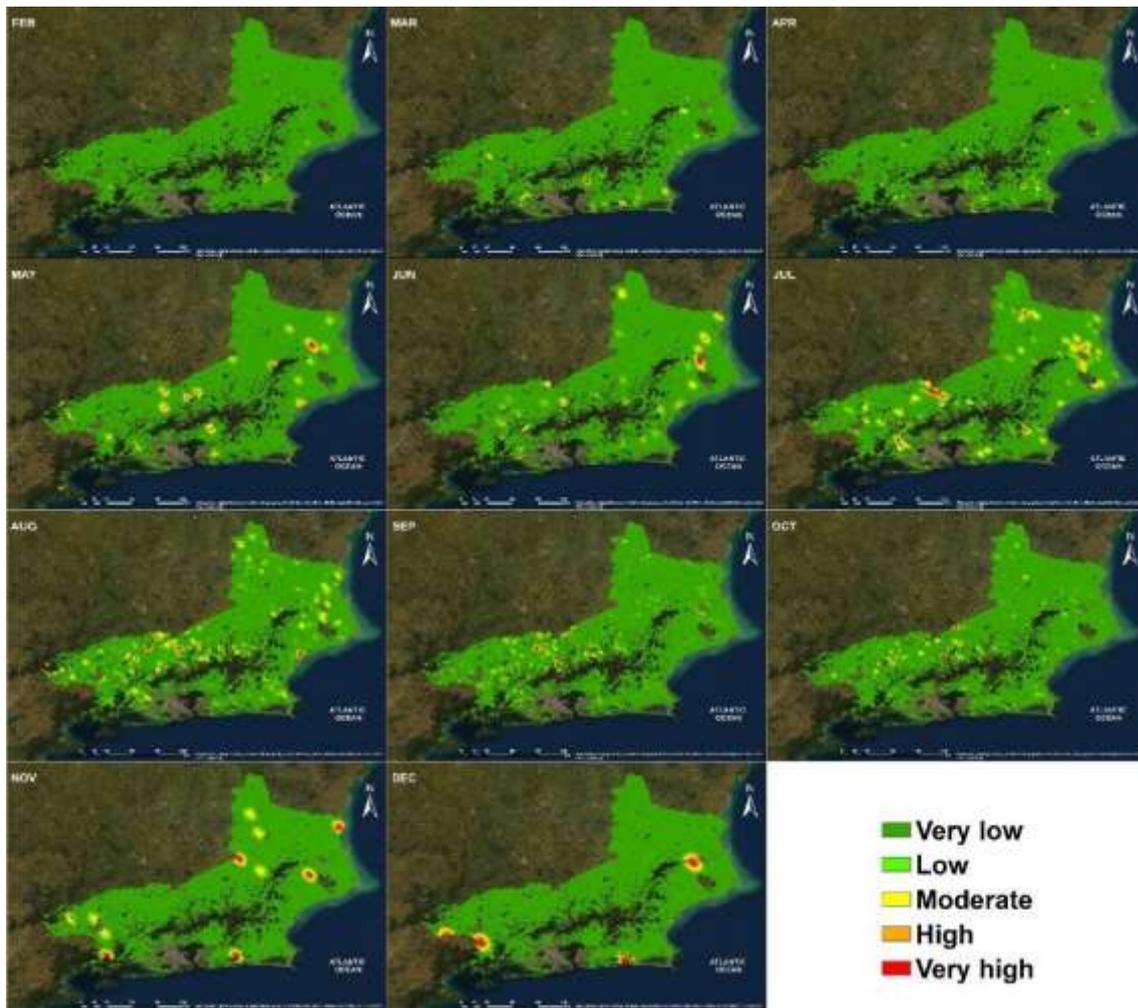


**Figura 20:** Análise dos focos de calor da série (2001-2020) para área de pastagem no ERJ por estação seca e chuvosa.

### 3.4. Análise de Mann-Kendall e densidade de Kernell dos Focos de calor

Na análise de tendência pelo teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall mensal para toda a série (2001 a 2020) para ( $p\text{-value} < 0.5$ ), somente janeiro apresentou tendência significativa crescente com valor de  $Z = 2.37$  (Tab.5).

Na Figura 21, vê-se a densidade de Kernell, em regiões com cores mais intensas, ou seja, áreas de alta densidade, há maior concentração de focos de calor, enquanto regiões de baixa densidade indicam concentrações mais baixas. Os meses com a maior densidade de Kernell estão concentrados no período seco (junho, julho, agosto e setembro) meses (Fig. 21). Destaca-se que não ocorreu focos de calor nesse ano corrente para o mês de janeiro, por isso na imagem não está representado esse mês (Fig.21).



**Figura 21:** Análise espacial para a Densidade Kernell para o ano considerado pelo teste de Pettitt (para o ano de 2007).

### 3.5. Validação da modelagem ARIMA (VC)

Para avaliar o desempenho do modelo foi feito o cálculo das estatísticas (Tab.6). Os resultados foram de concordância perfeita, com coeficientes de Willmot próximos a (0.9) para toda o período da série avaliado, indicando que há correlação perfeita entre o valor estimado e observado.

O coeficiente de determinação foi bom, apontando que o modelo explica (73 %) da variável estimada. O EPE apresentou um resultado satisfatório, evidenciando que o modelo erra pouco ao estimar o índice VC (Tab.6). O EPE maior foi para o ano de 2015 com valor de 6.88 e o menor foi para o ano de 2007 valor de 2.86.

A validação do desempenho do modelo foi feita através da estatística da análise de regressão e correlação dos dados do VC simulado e observado (Fig.22).

Observando os gráficos de resíduos e coeficientes de determinação anuais (Fig. 22) é possível avaliar que de forma geral os valores de  $r^2$  foram satisfatórios, exceto por alguns anos baixos, como 2003 e 2013, com valores, respectivos de  $r^2 = 0,08$  e  $r^2 = 0,05$ . Por outro lado, o ano de 2007 apresentou os maiores valores de correlação, onde  $r^2 = 0,80$ .

**Tabela 6:** Desempenho estatístico da modelagem ARIMA

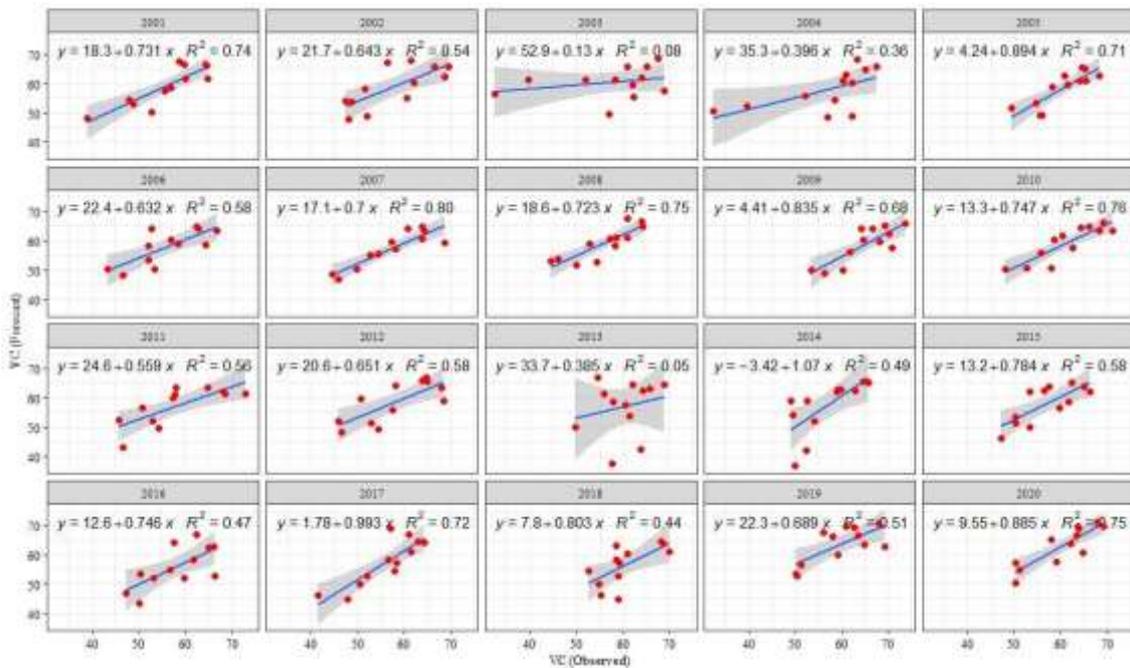
<b>r</b>	0.56
<b>r<sup>2</sup></b>	0.73
<b>EPE</b>	4.61
<b>d</b>	1.00

A média anual do período de 2001 até 2020, da estação seca apresentou (VC = 56.81%), e para estação chuvosa teve valor de (VC= 59.77%). A categoria da cobertura da pastagem na estação seca de toda a série, se enquadra na classe vegetação degradada, exceto nos anos 2009, 2013 e 2018, que está na classe vegetação moderadamente degradada (Tab.7). Destaca-se que é a estação chuvosa que apresenta os maiores valores de VC da pastagem (Tab.7), com a classificação degradada para todos os anos.

**Tabela 7:** Valores da cobertura vegetal (vc) por estação seca e chuvosa

VC	Ano									
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Estação seca</b>	51.87	52.31	52.35	52.35	59.06	53.95	55.35	55.35	62.76	59.37
<b>Estação chuvosa</b>	61.2	61.62	58.15	58.85	56.68	67.14	63.27	58.39	58.03	59.23
	Ano									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Estação seca</b>	58.02	58.02	61.23	55.55	56.36	56.36	56.47	60.67	59.35	59.35
<b>Estação chuvosa</b>	57.55	57.64	59.80	55.57	60.17	59.72	61.35	61.24	61.62	58.15

De toda a série na estação chuvosa o ano de 2006, é que apresenta o maior VC da série com valor (67.14%) e o ano de 2001, o que apresentou menor valor de VC da série toda na estação seca, com valor (51.87%).



**Figura 22:** Análise de regressão ( $R^2$ ) e correlação ( $r$ ) dos dados VC simulados e VC observados para uso e cobertura de pastagem do SRJ.

### 3.6. Modelagem ARIMA futura para predição do VC

O modelo ARIMA foi capaz de prever a sazonalidade do VC para área de pastagem para um período futuro (2021-2040) (Fig.23), a média anual do período futuro para estação seca apresentou VC = 50.49%, e para estação chuvosa teve valor de VC= (52.02%). Além disso, para todo o período futuro (2021-2040), a degradação da pastagem vai aumentando ao longo dos anos para ambas as estações seca e chuvosa.

Ao avaliarmos a série toda o ano de 2021 foi o que apresentou o maior valor de VC para estação seca e chuvosa, respectivamente, 51.63% e 53.77% (Tab.8) e o ano de 2040 foi o que apresentou o menor valor de VC para estação seca e chuvosa, respectivamente, 49.87% e 51.35% (Tab.8) (Fig.23).

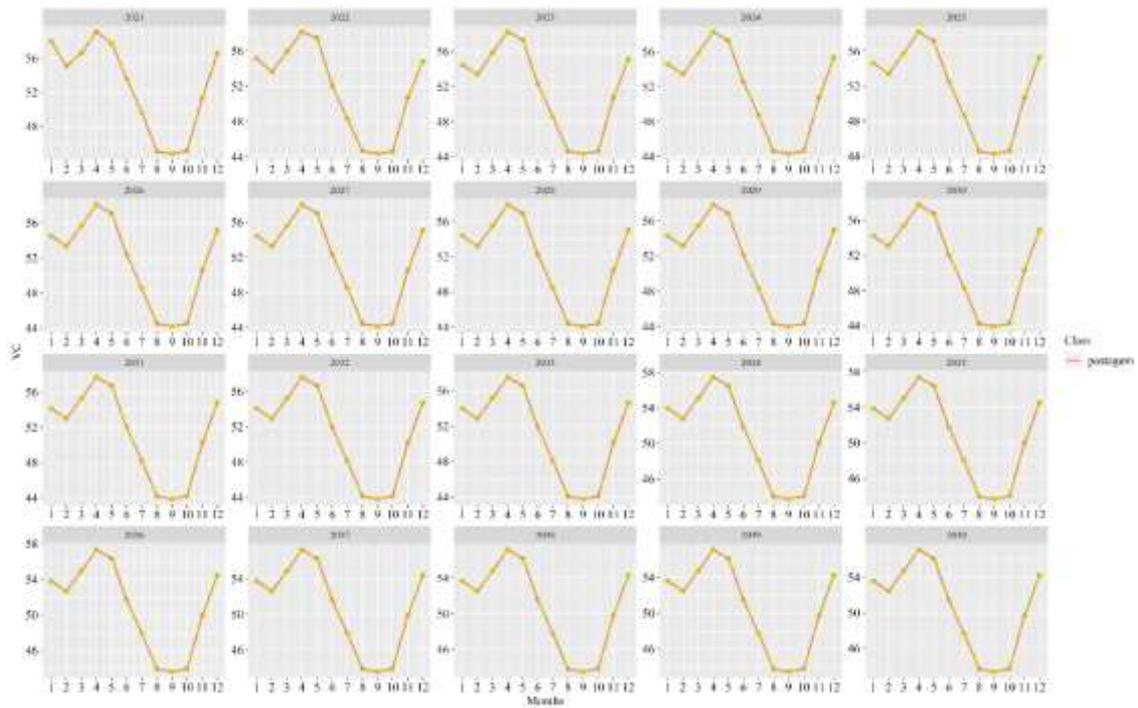
**Tabela 8:** Valores da cobertura (vc) por estação seca e chuvosa

<b>Anos</b>	<b>Estação Seca</b>	<b>Estação Chuvosa</b>
<b>2021</b>	51.63	53.77
<b>2022</b>	50.83	52.45
<b>2023</b>	50.89	52.35
<b>2024</b>	50.93	52.41
<b>2025</b>	50.87	52.38
<b>2026</b>	50.78	52.29
<b>2027</b>	50.71	52.21
<b>2028</b>	50.64	52.14
<b>2029</b>	50.57	52.07
<b>2030</b>	50.5	52
<b>2031</b>	50.44	51.93
<b>2032</b>	50.37	51.87
<b>2033</b>	50.3	51.8
<b>2034</b>	50.24	51.73
<b>2035</b>	50.18	51.67
<b>2036</b>	50.11	51.6
<b>2037</b>	50.05	51.54
<b>2038</b>	49.99	51.47
<b>2039</b>	49.93	51.41
<b>2040</b>	49.87	51.35

Para toda a projeção futura de 19 anos, a área de pastagem estará dentro da classe degradada, atingindo os piores valores na estação seca (Fig.23). O VC apresenta as estações seca e chuvosa bem definidas, ao chegar no final de junho o VC diminuí acentuadamente até o final da estação seca; destaca-se que outubro já é considerado um mês chuvoso, entretanto apresenta os valores mais baixos de VC (Fig.23), ademais é o mês com os valores mais baixos de EVI em outubro (Fig.14) e com as maiores reduções de chuva para os cenários socioeconômicos do IPCC.

Ao comparar esses dados com os valores dos anos anteriores (Fig.23), isto foi observado que o valor médio anual do VC diminuiu de 59.77% (passado) para 52.02%

(futuro) no período chuvoso. Apresentando a mesma tendência na estação seca, valor médio anual do VC diminuiu de 56.80% (passado) para 50.49% (futuro).



**Figura 23:** Distribuição temporal mensal para cada ano da modelagem futura do VC na área de pastagem para Mata Atlântica para os anos de 2021 a 2040.

## 4.DISSCUSSÃO

### 4.1. Dinâmica espaço-temporal da Pastagem no ERJ

Os resultados desse estudo mostraram uma redução da cobertura da vegetação observada no bioma mata atlântica para área de pastagem no período analisado de 2001 a 2020 (Fig. 14), destaca-se que é possível observar neste estudo, que as áreas mais críticas de redução da vegetação estão localizadas a norte e noroeste no mapa (Fig.15). Os resultados encontrados por Santos et al. 2021 corroboram com os resultados dessa pesquisa, de acordo com o autor, essas são áreas que sofrem com grande pressão antrópica com a substituição das áreas florestais para abertura de novas áreas de pastagem e área agrícola.

Neste estudo, notamos que as áreas de maior perda de biomassa, são regiões com forte presença antrópica. De acordo com dados do WWF BRASIL.2018, a mata Atlântica é habitada por 70% da população brasileira (WWF BRASIL, 2018), sendo a população estimada do ERJ 17.463.349 habitantes, além disso é o bioma mais fragmentado (Rosa et al., 2021) e ameaçado do país (SOS Mata Atlântica e INPE, 2021).

No Bioma mata atlântica no ERJ, as práticas de queima são muito comuns em atividades de desmatamento para abertura de novas pastagem, as áreas concentradas especializadas para o de 2008 (Fig.15) mostram regiões onde a atividade pastoril é altamente concentrada. Os resultados obtidos por Jesus et al. (2021) corroboram com nossa análise, o autor ainda trata que à perturbação antrópica do ambiente natural no ERJ, está estruturado em uma configuração para a abertura de novas áreas de pastagens e agricultura, resultando no abandono e aumento de muitas áreas improdutivas.

Santana et al. (2020) ao estudar a dinâmica da vegetação do corredor central da mata atlântica através do EVI para o período de (2001 a 2016), encontrou resultados semelhantes neste estudo, apontando para o aumento da pressão antrópica sobre área florestal e conversão de novas áreas em pastagens, para estação seca. É importante destacar que as queimadas na estação seca (abril-setembro) são quase totalmente antropogênicas, uma vez que no ERJ predomina a pratica da pastagem extensiva e de baixo custo (Rosa et al., 2021).

Nesta pesquisa é possível observar o aumento gradativo da redução do índice EVI (Fig.14), diversos autores como (Santana et al., 2016, Santana et al., 2020, Freitas et al.,

2020) estudaram o índice EVI para a mata atlântica apontando a mesma tendência para vegetação.

Nossos resultados apontaram que as regiões mais degradadas estão a nordeste e norte do ERJ (Fig.15), em seu trabalho, Jesus et al. (2022), ao estudar o índice F obteve resultados semelhantes neste estudo, para mesma região com predominância de alta degradação no ERJ, apontando também, aumento gradativo de incêndios, que foram associados à ocorrência de eventos extremos, principalmente a La Niña.

Silva et al. (2020) também identificaram em seus estudos o efeito do fenômeno La Niña na Amazônia ocidental no Acre, ao avaliar a dinâmica do fogo em eventos climáticos extremos do ENOS. Os pesquisadores empregaram produtos de sensoriamento remoto de áreas queimadas, EVI, produtos de chuva e densidade de grãos para espacializar os focos de incêndio. A maior área queimada registrada durante o estudo foi durante o período La Niña, com um total de 296 km.

De acordo com Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica (2022), o aumento do desmatamento da vegetação nativa da mata atlântica mantém o bioma em um alto grau de ameaça e risco. Santos et al. (2021) ao estudar a degradação da vegetação, para o período (2001-2018) na região do cerrado brasileiro encontrou para o ano (2008) uma alta degradação da vegetação, sobre efeito influência do fenômeno La Niña. Resultado em concordância com esta pesquisa que processo de degradação da vegetação (teste de Pettitt).

#### **4.2. Como o clima afeta a pastagem**

Nossos resultados apontaram que o período seco é marcado pela diminuição da biomassa vegetal (Tab.7), sendo intensificado por processos climáticos com redução de chuvas (Fig.16), aumento da temperatura do ar (Fig.16) e aumento dos focos de calor (Fig. 19), concordando com os resultados de Jesus et al. (2022) que observaram clima mais seco e propício a incêndio florestal na estação seca, e Santos et al. (2021), que em seus estudos encontraram maior concentração de focos de calor na estação seca (abril-setembro).

Parente et al. (2018) ao utilizar o índice de degradação da pastagem para todos os biomas brasileiros, concluíram que esse efeito se acentua no período seco, e com isso

ocorre o aumento das áreas de pastagem severa pelo bioma mata atlântica, estes resultados corroboram com esse estudo, pois na estação seca são encontrados os valores mais baixos de VC, que significam uma alta degradação da pastagem.

Santos et al. (2021) ao aplicar a modelagem ARIMA para estudar a dinâmica da vegetação de 12 usos e coberturas da terra no ERJ, concluíram que às áreas de pastagem e agrícolas foram as áreas mais degradadas e que apresentavam alta vulnerabilidade, neste estudo ainda apontaram para a conversão do uso e cobertura da terra de áreas úmidas em áreas de pastagem.

O resultado da pesquisa demonstra a condição crítica das áreas de pastagem para os próximos 20 anos (Fig.23), ao traçarmos uma analogia dos cenários socioeconômicos do clima SSP1. 2.6 e SSP5.8.5 IPCC (Fig.16), que apontam uma redução de chuvas e aumento da temperatura, através desse resultado, podemos inferir que haverá aumentos da duração e período de secas, ocasionado maior recorrência de incêndios florestais. Não obstante, diversos estudos comprovam que já vivemos os efeitos do cenário SSP1. 2.6 (Kamal et al., 2021, IPCC, 2021, Delgado et al., 2022).

Santana et al. (2021) ao estudar o corredor central da mata atlântica concluíram que as categorias de Agricultura e Florestas foram as categorias de uso e cobertura da terra com a maior concentração de focos de fogo durante o período de estudo. Devido à expansão das áreas agrícolas e de pastagens, a tendência de diminuição da vegetação e aumento da população no Corredor central da Mata Atlântica (CCMA) indica que suas áreas florestais ficarão mais suscetíveis a incêndios florestais. Este estudo corrobora com os resultados aqui encontrados, pois mostram uma redução acentuada da chuva em até 18 mm para o cenário socioeconômico SSP4.8.5 e aumento da temperatura em 2°C para área de pastagem.

Apesar das legislações ambientais brasileiras e a norma técnica da Guia de Requisitos e Procedimentos Básicos para Combate a Incêndios Florestais – Prática Recomendada PR 1014, tratarem sobre a proibição ou técnicas de queima prescrita, que deveriam funcionar como mecanismos legislativos para diminuir ou acabar com o aumento de incêndios florestais e áreas queimadas. Todavia, os resultados dessa pesquisa apontam claramente que os números de focos de calor só aumentam (Fig.19) e áreas queimadas (MapBiomias, 2022), com números maiores para estação chuvosa nos anos de 2002 e 2014 (Fig.19), além disso, pela análise de Mann-kendall, janeiro apresenta dados

significativos crescentes de focos de calor para o mês de janeiro pelo teste de Mann-Kendall (Tab. 5), mês este que é considerado, estação chuvosa para o ERJ. Mormente, com estes resultados apontados nessa pesquisa e a corroboraram de outros estudos (MapBiomass, 2022, Santana et al., 2019, Jesus et al., 2022, Delgado et al., 2022, Teodoro et al., 2022); sinalizamos que o número de incêndios florestais e áreas degradadas da pastagem no bioma mata atlântica continuam a aumentar, bem como o avanço do período de estiagem nas estações consideradas chuvosas.

#### **4.3. Prognóstico da modelagem ARIMA para predição do VC (2021-2040)**

Os resultados da modelagem futura ARIMA do VC, indicam uma tendência para o aumento da degradação da pastagem ao longo dos anos simulados futuros. Resultado semelhante de Jesus et al. (2022) ao avaliar o modelo ARIMA na identificação do perigo de incêndios florestais no ERJ, através do índice de perigo de incêndios florestais (F).

Nossos resultados futuros indicam um aumento do período seco no mês de outubro, áreas de pastagem que poderiam funcionar como sumidouro de carbono, fazendo o Brasil atingir as metas futuras propostas no acordo do plano ABC da agricultura de baixo carbono e redução de 100% do desmatamento zero (SEEG, 2021), segue no caminho oposto.

Delgado et al. (2022) ao pesquisarem a modelagem futura dos biomas da América do Sul, apontaram em alerta a vulnerabilidade dos biomas sul-americanos, corroborando com nossos resultados que novas ações precisam ser tomadas, para não alcançarmos o cenário SSP5-8.5. De acordo com Salazar et al. 2015 a América do Sul vem sendo convertida para outro tipo de uso da terra com perdas da sua área florestal em áreas degradadas de pastagem e agricultura, o que desencadeia diversos problemas sociais, ambientais e econômicos no Brasil (Jesus et al., 2022, Teodoro et al., 2022).

Aqueles resultados indicados por Salazar et al. 2015, são claramente, os descobertos neste estudo, pois a diminuição do VC na área de pastagem pode levar a diversos problemas socioambientais no País, quando traçamos uma analogia, com os resultados dos cenários futuros do IPCC com diminuição de chuvas e aumento da temperatura para área de pastagem (Fig.16), logo, denunciemos que nestas regiões de pastagem devem ser implantadas com base em práticas produtivas a recuperação de

pastagens, principalmente para pecuaristas que as utilizam como fonte de renda para suas famílias, torna-se uma necessidade emergente.

De acordo com Santos et al. (2019), regiões do bioma mata atlântica, são altamente vulneráveis às mudanças climáticas e conseqüentemente redução da produtividade dessas pastagens. Quando percebemos semelhança entre os resultados apontados nesta pesquisa pela modelagem ARIMA do índice de cobertura (VC) proposto para monitoramento do bioma mata atlântica e os resultados dos cenários do IPCC, percebe-se urgência nas medidas que devem ser tomadas para o cumprimento das metas da agenda de 2030. Esses resultados tornam evidentes, as tendências do último resultado do IPCC, onde as estimativas sugeriram para um aumento contínuo das catástrofes ambientais (Clemente et al., 2017; Teodoro et al., 2022).

Os índices de vegetação são ferramentas importantes para avaliar a degradação da pastagem (Pereira et al., 2018, Santos et al., 2022). É importante definir cenários do que ocorrerá nestas áreas. Com base no conhecimento da degradação da pastagem. O modelo ARIMA foi capaz de prever este comportamento, com os valores estimados na calibração do modelo (Fig.22) e na estimativa de dados futuros (Fig.23) apresentando índices estatísticos que confirmam a aplicabilidade do modelo para a análise dinâmica do VC.

## 5. CONCLUSÕES

1. Os valores médios de VC apresentaram condição de degradação para a maioria dos anos, quando analisado o período seco, o índice mostrou secas severas na região. O índice provou ser uma ferramenta forte na detecção da degradação da pastagem.

2. O modelo ARIMA aplicado à série VC de 2001 a 2020 foi capaz de expressar satisfatoriamente a condição da degradação da pastagem para o período, mostrando sua capacidade de prever a futuro da série temporal VC. A análise detalhada de Mann-Kendall mensal para VC mostra um resultado negativo tendência na degradação da pastagem para o ERJ.

3. A tendência futura para área de pastagem é o aumento das secas no ERJ que devem se intensificar com o aumento da temperatura e redução da chuva podendo comprometer principalmente o sustento dos pequenos pecuaristas e na conversão de novas áreas em pastagem destruir os remanescentes florestais da Mata Atlântica que são fonte de diferentes serviços ecossistêmicos.

Cabe ressaltar que, devido a aplicabilidade, facilidade, acesso aos dados públicos e a utilização da metodologia empregada como forma de ferramenta, o índice de cobertura (VC) pode ser aplicado no monitoramento do bioma mata atlântica, tornando-se um diferencial em relação a outros índices empregados na literatura.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. Perfil da Pecuária no Brasil; Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes: Lima, Brasil, 2020. Accessed on: 19 July 2022.

Atlântica, SOS Mata Atlântica. INPE. Atlas Dos Remanescentes Florestais Da Mata Atlântica, 2019-2020. 2021, p. <http://mapas.sosma.org.br/>. Accessed on: 10 May 2022.

Azevedo, T.R. SEEG Initiative Estimates of Brazilian Greenhouse Gas Emissions from 1970 to 2015. *Scientific Data*, 0 (5), 2018, 1–43, doi:10.1038/sdata.2018.45.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Moraes, J.L., Sparovek, G., 2013. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* 22 (6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Anderson, L.O. 2019. Conceptual model of disaster risk management and warning system associated with wildfires and public policy challenges in Brazil. *Territorium: Revista Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança* 26 (26), 43–61. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_26-1\\_4](https://doi.org/10.14195/1647-7723_26-1_4).

Andrade, C.F., Duarte, J.B., Barbosa, M.L.F., Andrade, M. D. De Oliveira, R.O., Delgado, R.C., Pereira, M.G., Batista, T.S., Teodoro, P.E., 2019. Fire outbreaks in extreme climate years in the State of Rio de Janeiro, Brazil. *Land Degrad. Dev.* 30 (11), 1379–1389. <https://doi.org/10.1002/LDR.3327>.

Andrade, C.F., Delgado, R.C., Barbosa, M.L.F., Teodoro, P.E., Junior, C.A. da S., Wanderley, H.S., Capristo, S.G.F., 2020. Fire regime in Southern Brazil driven by atmospheric variation and vegetation cover. *Agric. For. Meteorol.* 295, 108194 <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET2020.108194>.

AR6.IPCC,2021.Disponívelem:[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Headline\\_Statements.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Headline_Statements.pdf). Accessed on: 20 July 2022.

Barbosa, M.L.F., Delgado, R.C., C., Teodoro, P.E., Silva Junior, C.A., Wanderley, H.S., Capristo-Silva, G.F., 2021. Recent Trends in the Fire Dynamics in Brazilian Legal Amazon: Interaction between the ENSO Phenomenon, Climate and Land Use. *Environmental Development*. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100648>.

Brancalion, P.H.S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F.S.M., Almeyda Zambrano, A.M., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J.L., Strassburg, B.B. N., Wilson, S., Chazdon, R.L., 2019. Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Sci. Adv.* 5 (7), eaav3223 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223>.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novack, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Knopka, A.E., 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1240–1248.

CEPERJ. 2021. Estado do Rio de Janeiro e seu Ambiente. Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. [https://www.ceperj.rj.gov.br/?page\\_id=260](https://www.ceperj.rj.gov.br/?page_id=260). Accessed on: 5 April 2022.

Clemente, S., Oliveira, J. F., Passos, L.M.A. 2017. Focos de Calor na Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32 (4), 669–677. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324014>.

Delgado, R.C., DE Santana, R.O., Gelsleichter, Y.A., Pereira, M.G. Degradation of South American biomes: What to expect for the future? *Environmental Impact Assessment Review*, 0 (96), p. 106815, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106815>.

De Oliveira Souza, T.C., Delgado, R.C., Magistrali, I.C., dos Santos, G.L., de Carvalho, D.C., Teodoro, P.E., da Silva Júnior, C.A., Caúla, R.H., 2018. Spectral trend of vegetation with rainfall in events of El Niño-Southern ~ oscillation for Atlantic forest biome, Brazil. *Environ. Monit. Assess.* 190 (11) <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7060-1>.

Dias Filho, M.B. Degradação de Pastagens: Processos, Causas e Estratégias de Recuperação. *MBDF*, V.4, p. 204. 2017.

Dos Santos, J.F.C., Gleriani, J.M., Velloso, S.G.S., de Souza, G.S.A., do Amaral, C.H., Torres, F.T.P., Medeiros, N.D.G., dos Reis, M., 2019. Wildfires as a major challenge for natural regeneration in Atlantic Forest. *Sci. Total Environ.* 650, 809–821. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.09.016>.

FAO - Food and Agriculture Organization, 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper: No. 56. FAO. Accessed on: 9 november 2021.

Freitas, W.K., Gois, G., Pereira, E.R., Oliveira Junior, J.F., Magalhaes, L.M.S., Brasil, F.C., Sobral, B.S., 2020. Influence of fire foci on forest cover in the Atlantic Forest in Rio de Janeiro, Brazil. *Ecol. Indicat.* 115 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106340>.

Gao, Q., Li, Y., Wan, Y., Lin, E.; Xiong, W., Jiangcun, W., Wang, B.; Li, W. Grassland degradation in Northern Tibet based on remote sensing data. *J. Geogr. Sci.* 2006, 16, 165–173.

Guedes, P., Fernando, L., Voivodic, M, 2021. “Reverse the Tipping Point of the Atlantic Forest for Mitigation.” *Nature Climate Change*, 11 (5), Springer US, 364–65, doi:10.1038/s41558-021-01035-4.

Guidotti, V, 2017. Números Detalhados Do Novo Código Florestal e Suas Implicações Para o PRAs. *Sustentabilidade Em Debate*, 5 (0), 1–10, doi:10.13140/RG.2.2.23229.87526.

IBGE, 2019. Panorama Brasil - Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/panorama>. Accessed on: 21 november 2021.

IBGE. Pesquisa Pecuária Municipal. 2020. Available online: [Sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2019](https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2019). Accessed on: 10 July 2022.

IPCC, 2021. Climate change 2014: AR6 synthesis report. In: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Issues 1–151. [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf).

Jesus, C. S. L., de, Delgado, R.C., Pereira, M.G., Souza, L. P. Junior, C.A.S., Ribeiro, L.P., Batista, T.S., Teodoro, P.E., 2018. Changes in past global solar radiation based on

climate models and remote sensing in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Biosci. J.* 1357–1364 <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n5a2018-39485>.

Júnior, C.M.S., Siqueira, J.V., Sales, M.H., Fonseca, A.V., Ribeiro, J.G., Numata, I., Cochrane, M.A., Barber, C.P., Roberts, D.A., Barlow, J., 2013. Ten-year Landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon. *Rem. Sens.* 5, 5493–5513. <https://doi.org/10.3390/rs5115493>.

Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London, p. 120p.

Latawiec, A., Strassberg, B., Valentim, J., Ramos, F., & Alves-Pinto, H. (2014). Intensificação dos sistemas de produção pecuária: Sinergias e riscos socioeconômicos e ambientais no Brasil. *Animal*, 8 (8), 1255-1263. doi:10.1017/S1751731114001566.

Lima, M., Santana, D. C., Maciel Junior, I. C., Costa, P. M. C., Oliveira, P. P. G., Azevedo, R. P., Silva, R. S., Marinho, U. F., Silva, V., Souza, J. A. A., Rossi, F. S., Delgado, R. C., Ribeiro, L. P., Teodoro, P. E., Silva Junior, C. A. The New Transamazonian Highway?: BR-319 and Its Current Environmental Degradation. *Sustainability*, (14), 1-15, 2022. [10.3390/su14020823](https://doi.org/10.3390/su14020823)

Machado-Silva, F., Liberati, R., Melo de Lima, T.F., Bittencourt Peixoto, R., de Almeida França, J.R., Avelar, F.M.M, M., Lemos, M., Santos, F., Abrantes Rodrigues, J., Camara, C.C., 2020. Drought and fires influence the respiratory diseases hospitalizations in the Amazon. *Ecol. Indicat.* 109 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105817>.

Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13 (3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>.

Olexa, E.M., Lawrence, R.L, 2014. Performance and effects of land cover type on synthetic surface reflectance data and NDVI estimates for assessment and monitoring of semi-arid rangeland. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 30 (1), 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.008>

Oliveira, D.C. Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil. 2018. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. doi:10.11606/T.11.2018.tde-17072018- 184226. Acesso em: 10 July 2022.

Pereira, R.M.S., Wanderley, H.S., Delgado, R.C., 2021. Homogeneous regions for rainfall distribution in the city of Rio de Janeiro associated with the risk of natural disasters. *Nat. Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05056-2>.

Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistic* 28 (2), 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>.

Rosa, Marcos R., et al. “Hidden Destruction of Older Forests Threatens Brazil’s Atlantic Forest and Challenges Restoration Programs.” *Science Advances*, 1 (7), 2021, p. eabc4547.

Santana, R.O., Delgado, R.C., Schiavetti, A., 2020. The past, present and future of vegetation in the Central Atlantic Forest Corridor, Brazil. *Remote Sens. Appl.: Society and Environment* 20. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100357>.

Santos, J.F., Soares, R.V., Batista, A.C., 2006. Perfil dos incêndios florestais no brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. *Floresta* 36, 93–100. <https://revistas.ufpr.br/index.php/floresta/article/viewFile/5510/4040>.

Santos, G. L., Pereira, MARCOS G., Delgado, R. C., Magistrali, I. C., Silva, C. G., Oliveira, C. M. M., Laranjeira, J. P. B., Silva, T. P. 2021. Degradation of the Brazilian Cerrado: Interactions with human disturbance and environmental variables. *Forest Ecology and Management*, 1 (482), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118875>

Santos, R.O., Delgado, R.C., Vilanova, R.S., Santana, R.O., Andrade, C.F., Teodoro, P.E., Silva Júnior, C.A., Capristo-Silva, G.F., Lima, M., 2021. NMDI application for monitoring different vegetation covers in the Atlantic Forest biome, Brazil. *Weather Climate Extremes* 33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100329>.

Santos, C.O., Vinícius, V.M., Leandro, L. P., Alexandre, S.P., Laerte, G.F. 2022. Avaliando a Dinâmica Espacial e Qualitativa de Muro a Muro das Pastagens Brasileiras 2010–2018, com base na Análise do Landsat Data Archive" *Sensoriamento Remoto* 14, (4): 1024. <https://doi.org/10.3390/rs14041024>.

Sharples, J.J., McRae, R.H.D., Weber, R.O., Gill, A.M., 2009. A simple index for assessing fire danger rating. *Environ. Model. Software*, 24 (6), 764–774. <https://doi.org/10.5380/rf.v36i1.5510>.

Silva, R., Pereira, J., Borges, L., 2017. Paisagem como retrato do desenvolvimento social, economico e ambiental de uma sociedade: o caso de Ouro Preto, MG. *Adv. Forestry Sci., Barros*, 167–174. ISBN: 2357-8181.

Silva, C. de O., Delgado, R.C., Teodoro, P.E., Silva Junior, C.A., Rodrigues, R. de A., 2020. Spatially explicit modeling of land use and land cover in the State of Rio de Janeiro-Brazil. *Remote Sens. Appl.: Society and Environment*, 1 (18), 100303. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2020.100303>.

Silva Junior, C.A., Teodoro, P.E., Delgado, R.C., Pereira, L., Teodoro, R., Lima, M., Pantaleao, A., Rojo, F.H., Brito, A. G., Oliveira, T.G., Azevedo, S., Capristo, T.S., G., Arvor, D., Facco, C.U., 2020. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Sci. Rep.* 123, 16246. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>.

Syphard, A.D., Keeley, J.E., Pfaff, A.H., Ferschweiler, K., 2017. Human presence diminishes the importance of climate in driving fire activity across the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 114 (52). <https://doi.org/10.1073/pnas.1713885114>.

Teodoro, P.E., Da Silva Junior, C.A.N., Delgado, R.C., LIMA, M., Teodoro, L.P.R., Baio, F.H.R., De Azevedo, G.B., DE Oliveira, S.A., Glauce, T., De Andrea, P.A., Capristo, G.F., Facco, C.A. Twenty-year impact of fire foci and its relationship with climate variables in Brazilian regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 0 (194), 90-100, 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09702-x>

Tito, T.M., Delgado, R.C., Carvalho, D. C. de, Teodoro, P.E., Almeida, C. T. de, Junior, C.A. da S., Santos, E. B. dos, da S Júnior, L.A.S., 2020a. Assessment of evapotranspiration estimates based on surface and satellite data and its relationship with El Nino–Southern Oscillation in the Rio de Janeiro State. *Environ. Monit. Assess.* 7 (7), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S10661-020-08421-Z>, 192, 192.

Vieira, B.C., Gramani, M.F., 2015. Serra do Mar: the most “Tormented” relief in Brazil. *Landscapes and Landforms of Brazil* 285–297. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_26).

Vilanova, R.S., Delgado, R.C., da Silva Abel, E.L., Teodoro, P.E., Silva Junior, C.A., Wanderley, H.S., Capristo, S.G.F., 2020. Past and future assessment of vegetation activity for the State of Amazonas-Brazil. *Remote Sens. Appl.: Society and Environment* 17, 100278. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2019.100278>.

Wanderley, H.S., Fernandes, R.C., Luiz De Carvalho, A., 2019. Mudança térmica na cidade do Rio de Janeiro e o desvio ocasionado durante um evento de El Nino intenso. *Revista Brasileira de Geografia Física* v 12, 1291–1301.

Xavier, A.C., King, C.W., Scanlon, B.R., 2016. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *Int. J. Climatol.* 36 (6), 2644–2659. <https://doi.org/10.1002/JOC.4518>.

## **7. AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer à NASA pela disponibilidade gratuita dos dados usados. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES para a concessão de bolsa de doutorado. A sociedade civil, que permite através do seu investimento, que a universidade pública e gratuita trabalhe e produza pesquisa científica, com isso podemos produzir conhecimento prático e funcional, dando um retorno ao povo brasileiro.

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O Bioma Mata Atlântica com seus diferentes ecossistemas florestais é uma área de extrema importância para conservação da biodiversidade regional e mundial, para manutenção de serviços ecossistêmicos e preservação de uma variedade de espécies de flora e fauna endêmicas da Mata Atlântica. Contudo, os resultados encontrados indicam que a área do ERJ apresenta forte ocorrência de perturbações antrópicas com alteração do uso e cobertura da terra, tais como queimadas e focos de calor. Dentre as diferentes classes de uso e cobertura da terra no ERJ a Agricultura, pastagem e floresta são as que apresentam maior ocorrência de fogo;

Os resultados encontrados a partir da modelagem espacial do NDMI indicam que para os 12 diferentes uso e cobertura da terra estudo é a pastagem e a savana as áreas mais secas e mais propensa a ocorrência de incêndios florestais. A projeção futura do NDMI para o período de 2021-2030 indica que a conversão de áreas úmidas em zonas secas deve ficar mais acentuadas, consideradas que essas áreas são locais de mangue e esse ecossistema abriga grande quantidade de carbono estocado. O governo brasileiro precisa urgentemente promover políticas públicas fortes para proteger esse ecossistema não apenas por sua grande biodiversidade, mas também pela sustentabilidade para as futuras gerações;

A modelagem temporal do VC permitiu identificar que a degradação da pastagem apresentou decréscimo ao longo dos anos (2001-2020) e a tendência futura (2021 a 2040) é que a redução continue principalmente nas áreas de noroeste e norte do ERJ. As projeções futuras também indicam aumento da temperatura média do ar e redução das chuvas no ERJ. As áreas prioritárias para conservação de espécies no ERJ, são as áreas

protegidas de floresta, que também ficarão mais secas caso não se diminuam a ocorrência de incêndios florestais;

É inestimável as ferramentas apresentadas neste trabalho, pois estes ajudam a entender melhor os efeitos do clima e degradação antrópica sobre a vegetação, além de mostrar a importância da conservação e recuperação de nossas florestas e apontar investimentos políticos para tornar as áreas degradadas mais produtivas, tornando isso uma chave estratégica para alcançarmos as metas da agenda de 2030 regional para o ERJ sobre a mudanças climáticas;

O que torna a ciência fascinante, dinâmica, desafiadora e o estímulo de constantemente perguntas para melhorarmos o mundo a nossa volta, para essa geração e as futuras. Perante o exposto, sugerimos o desenvolvimento de novas pesquisas em diferentes escalas espaciais e temporais para melhorar a compreensão dos processos antrópicos (agricultores e pecuaristas) e climáticos, como eventos ENOS, a nível regional no ERJ e na Mata Atlântica para melhorar direcionar os acordos internacionais e nacionais da mudança do clima.