



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/06.24.14.27-TDI

## EXPOSIÇÃO A INCÊNDIOS FLORESTAIS EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE USO SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA

Ana Larissa Ribeiro de Freitas

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pela Dra. Liana Oighenstein  
Anderson, aprovada em 28 de  
maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/44TSK2L>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/06.24.14.27-TDI

## EXPOSIÇÃO A INCÊNDIOS FLORESTAIS EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE USO SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA

Ana Larissa Ribeiro de Freitas

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pela Dra. Liana Oighenstein  
Anderson, aprovada em 28 de  
maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/44TSK2L>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Freitas, Ana Larissa Ribeiro de.

F884e      Exposição a incêndios florestais em unidades de conservação de uso sustentável na Amazônia / Ana Larissa Ribeiro de Freitas. – São José dos Campos : INPE, 2021.  
xxii + 112 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/06.24.14.27-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.  
Orientadora : Dra. Liana Oighenstein Anderson.

1. Unidades de conservação. 2. Exposição ao fogo. 3. Incêndios florestais. 4. Uso e cobertura da terra. 5. Secas. I.Título.

CDU 630\*43(811)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE ANA LARISSA RIBEIRO DE FREITAS**  
**BANCA Nº 140/2021, REG 134300/2019**

No dia 28 de maio de 2021, às 14h00min, por Teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestra em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: “EXPOSIÇÃO A INCÊNDIOS FLORESTAIS EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE USO SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA”**

Eu, Maria Isabel Sobral Escada, Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA, em nome de todos os membros, com o consentimento dos mesmos.

**Membros da Banca**

Dra. Maria Isabel Sobral Escada - Presidente - INPE  
Dra. Liana Oighenstein Anderson - Orientador - CEMADEN  
Dra. Joice Nunes Ferreira - Membro Externo - EMBRAPA  
Dr. Dárlison Fernandes Carvalho de Andrade - Membro Externo - ICMBio  
Dr. João Bosco Coura dos Reis - Membro Externo - CEMADEN



Documento assinado eletronicamente por **Maria Isabel Sobral Escada, Tecnologista**, em 08/06/2021, às 14:30 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7468520** e o código CRC **CCE6B92F**.



*“O que ela [vida] quer da gente é coragem”.*

*Guimarães Rosa*





## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, como em todos os momentos da minha vida, agradeço a Deus, no qual eu sempre encontro as forças e fé necessárias para passar pelos desafios bem como compartilho as conquistas e felicidades.

Aos meus pais, “Leda” e Manoel, que às suas maneiras contribuíram para o meu Ser. Meus amados irmãos, Simone, Ariadney, Thiago, Lucas e Maria pelo vínculo de amor e confiança, amo nossos momentos. Às minhas avós Cacilda e Mariinha pelas orações diárias, carinho e amor que destinam a mim e ao alicerce das minhas famílias, amo vocês.

Aos pais que a vida me deu, pela criação, amor e cuidados nos meus primeiros anos Fátima e Joaquim (*in memoriam*). Meus irmãos de amor que me deram a honra de ser sua caçula, e aos meus muitos sobrinhos, em especial, Estefani, que está sempre comigo.

Quando o INPE não passava de um sonho distante e impossível, agradeço aos meus amigos que estiveram (estão) comigo, olho para vocês e vejo como tenho sorte, em especial minha irmã Lisandra. Aos meus professores da Geografia UFC Vlândia, “Cacau” e Jeovah muito obrigada por acreditarem em mim, e contribuírem diretamente e de diferentes maneiras para a pesquisadora que eu sonho em ser.

À minha orientadora Dra. Liana Anderson, agora o INPE é uma realidade, obrigada pela oportunidade de trabalhar com um exímio exemplo de mulher multitarefas, sensibilidade e dedicação. Agradeço aos membros da banca Dra. Isabel Escada, Dra. Joice Ferreira, Dr. Dárlison Andrade e Dr. João dos Reis pelas contribuições e disponibilidade.

Aos colegas e amigos da SER-19 por todos os momentos que compartilhamos juntos e distantes, guardo vocês com muito carinho. Em especial à Danielle, Raíssa, Stella, Leandro, Bruno, Edson, Tati e Gabriel, que sorte a minha ter vocês. Agradeço aos companheiros do TREESLab pelas diversas partilhas de seus conhecimentos, sempre com inspirações e incentivos. Pela ajuda nos momentos de dificuldade, durante toda a caminhada, em códigos e texto, meu muito obrigada ao Vinicius, Celso, Igor, Daniel, João, Arian e Fábio.

À minha amiga e “irmã gêmea” Cândida, ainda não sei como pessoas tão diferentes conseguem ter uma sintonia tão boa, que de fato temos. Agradeço por todas as trocas de felicidades e preocupações nessa trajetória que só começou.

Agradeço ao INPE e aos docentes do SERE/INPE pelos muitos conhecimentos compartilhados e os demais colaboradores, em especial e com carinho a Talita e Ercília, pela troca e apoio nesses tempos difíceis.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (processo 88887.334448/2019-00). Ao Programa de Bolsas Funbio – Conservando o Futuro (2019)

do Fundo Brasileiro para a Biodiversidade em parceria com o Instituto Humanize pelo recurso para atividades de campo (processo 089/2019). Ao Projeto SEM-FLAMA: Soluções para reduzir os impactos socioambientais do fogo EM FLOrestas AMAzônicas de Uso Sustentável (processo CNPq n. 441949/2018-5), pela participação na equipe de pesquisa, trabalho de campo e conhecimentos compartilhados.

Às gestoras das UCs Jackeline Nóbrega e Léia Soares por toda atenção e contribuição para esta pesquisa. Aos membros das comunidades que compartilharam um pouco de suas experiências e vivências.

## RESUMO

A dinâmica dos incêndios tem sido intensificada nas últimas décadas na região do Baixo Tapajós devido à atuação de processos de desmatamentos, extremos climáticos e utilização do fogo na manutenção das áreas agropecuárias. A região abrange duas Unidades de Conservação de Uso Sustentável (UCs) - a Floresta Nacional do Tapajós (FLONA) e a Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns (RESEX) - nas quais, devido ao aumento de escapes do fogo durante o manejo da terra e à pressão do entorno, as populações têm enfrentado desafios para preservar os modos de vida tradicionais e promover a conservação das florestas. Esta pesquisa teve como objetivo analisar dados ambientais e de gestão territorial para entender a interação entre estes processos e construir o Índice de Exposição a Incêndios Florestais (IEif) para quantificar as diferentes pressões impostas nas UCs em decorrência do fogo. Para isto, delimitaram-se quatro objetivos específicos: i) determinar as dinâmicas espaço-temporais associadas aos focos de calor entre 2003 e 2019; ii) identificar e quantificar as alterações na paisagem e como esta influencia e é influenciada pelo fogo; iii) caracterizar os padrões espaço-temporais das variáveis meteorológicas e suas relações com a ocorrência de focos de calor na área de estudo; e, iv) integrar os produtos dos objetivos anteriores para construir o IEif para o ano de 2019. A recorrência de focos de calor obtida na área de estudo foi de até 17 anos, principalmente na zona de amortecimento da FLONA, área com maior densidade de estradas. Após a ocorrência dos focos de calor na floresta primária, dois processos foram observados: o primeiro refere-se à regeneração natural, posto que no local não houve conversão da floresta para outra classe de uso até o final da série estudada. O segundo processo é a mudança da cobertura da terra após o registro de foco de calor no local. Caso a conversão ocorra nos primeiros anos, acredita-se que o fogo tenha tido papel fundamental para a alteração acontecer. No entanto, quando a mudança leva mais tempo para ocorrer, de 8 a 16 anos, acredita-se que o fogo tenha sido um agente de degradação pontual, e que a área foi submetida a um desmatamento, perdendo a característica de floresta. A ocorrência de focos de calor aumenta quando o acumulado de precipitação em 15 dias é menor do que 30 mm e é mais associada a temperaturas entre 30°C e 34°C no dia de seu registro. As regiões que apresentam maior IEif indicam áreas de maior exposição a incêndios florestais. Os valores mais altos - acima de 0,8 - são observados principalmente na área de entorno da FLONA e na RESEX ao longo das margens dos rios Arapiuns e Tapajós. Estas áreas com alta exposição a incêndios florestais recobrem uma região de 2.775 km<sup>2</sup> no entorno da FLONA e de 440 km<sup>2</sup> na RESEX. A aplicação da abordagem desenvolvida nesta pesquisa é útil para indicar onde e como ocorrem as interações mútuas entre focos de calor, paisagem, uso e cobertura da terra, comportamento climático e a gestão territorial. A metodologia desenvolvida nesta dissertação pode potencialmente ser replicada para as demais UC da Amazônia a fim de subsidiar o entendimento e estratégias de gestão da ameaça do fogo. Ressalta-se a importância do esforço para a utilização de uma abordagem integrada para a geração de produtos que possam auxiliar no subsídio ao planejamento e gestão territorial destas UCs frente às pressões internas e externas. Uma vez que a construção de políticas públicas a partir da integração entre populações, especialistas e tomadores de decisão tem potencial para a definição de estratégias efetivas de conservação socioambiental a longo prazo.

Palavras-chave: Unidades de Conservação. Exposição a Incêndios Florestais. Uso e Cobertura da Terra. Secas.



# EXPOSURE TO FOREST FIRES IN SUSTAINABLE USE CONSERVATION UNITS IN THE AMAZON

## ABSTRACT

The dynamics of fires have been intensified in recent decades in the Lower Tapajós region, eastern Brazilian Amazonia, due to the deforestation processes, climatic extremes and the use of fire in the maintenance of agricultural areas. The study region of this research encompasses two Sustainable Use Conservation Units (CUs) - the Tapajós National Forest (FLONA) and the Tapajós-Arapiuns Extractive Reserve (RESEX) - in which, due to increased fire escapes during land management and pressure from the surroundings, populations have faced challenges to preserve traditional ways of life and promote forest conservation. This research aimed to analyze environmental and territorial management data to understand the interaction between these processes and build the Forest Fire Exposure Index (IEif) to quantify the different pressures imposed by fires. For this, four specific objectives were delimited: i) to determine the spatiotemporal dynamics associated with hotspots between 2003 and 2019; ii) to identify and quantify changes in the landscape and how it influences and is influenced by fire; iii) to characterize the spatiotemporal patterns of meteorological variables and their relationship with the occurrence of hotspots in the study area; and, iv) to integrate the products of the previous objectives to build the IEif for the year 2019. The recurrence of hotspots obtained in the study area was up to 17 years, mainly in the FLONA buffer zone, an area with high density of roads. After the occurrence of hotspots in the primary forest, two processes were observed: the first refers to natural regeneration, since there was no conversion of the impacted forest to another land use until the end of the series studied. The second process is the change of land cover after the hotspot detection. If the conversion occurred in the first years of the time series, it is believed that fire played a fundamental role in making the change happen. However, when the change takes longer to occur, from 8 to 16 years, it is believed that fire was an agent of punctual degradation, and that the area was subjected to deforestation, losing the characteristic of a forest. The occurrence of hotspots increases when the accumulated rainfall in 15 days is less than 30 mm and is more associated with temperatures between 30°C and 34°C on the day of its detection. Regions with higher IEif indicate areas of greater exposure to fire. The highest values - above 0.8 - are observed mainly in the area surrounding FLONA and RESEX along the Arapiuns and Tapajós rivers banks. These areas with high exposure to fire cover a region of 2,775 km<sup>2</sup> around FLONA and 440 km<sup>2</sup> at RESEX. The application of the approach developed in this research is useful to indicate where and how the mutual interactions between hotspots, landscape, land use and cover, climatic behavior and territorial management occur. The methodology developed in this dissertation can potentially be replicated to other PAs in the Amazon in order to support understanding and fire threat management strategies. The importance of the effort to use an integrated approach for the generation of products that can help subsidize the planning and territorial management of these UCs in the face of internal and external pressures is highlighted. Since the construction of public policies based on the integration of populations, specialists and decision makers has the potential to define effective long-term socio-environmental conservation strategies.

Keywords: Conservation Units. Exposure to Forest Fires. Land Use and Land Cover. Dried.



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1: Estrutura de perguntas norteadoras dos objetivos da pesquisa. ....	4
Figura 2.1 - Modelo conceitual de exposição a incêndios florestais. ....	5
Figura 2.2 - Condições de ocorrência de incêndios em florestas tropicais.....	7
Figura 2.3: Áreas queimadas sobrepostas por focos de calor (2003-2019).....	10
Figura 3.1: Mapa de localização das Unidades de Conservação. ....	20
Figura 3.2: Classes de uso e cobertura da terra e área da idade da vegetação secundária em 2019. ....	22
Figura 3.3: Zoneamento e entorno das UCs. ....	26
Figura 3.4: Etapas metodológicas utilizadas para a análise da dinâmica espaço-temporal da ocorrência de incêndios na área de estudo. ....	28
Figura 3.5: Paisagem, mudanças de uso-cobertura e comportamento dos focos de calor .....	29
Figura 3.6: Exemplo do procedimento metodológico para obtenção do tempo de permanência e transição da classe após a degradação por fogo. ....	30
Figura 3.7: Procedimentos de obtenção do padrão desmatamento e dinâmica do fogo. ....	32
Figura 3.8: Etapas metodológicas para determinar o padrão meteorológico e sua relação com a dinâmica do fogo.....	33
Figura 3.9: Procedimento para o cálculo do Índice de Exposição a Incêndios Florestais.....	35
Figura 4.1: Gráfico de ocorrência temporal de focos de calor (2003-2019). ....	39
Figura 4.2: Horários de registros dos focos de calor (2003-2019). ....	40
Figura 4.3: <i>Boxplot</i> de intensidade dos focos de calor. ....	41
Figura 4.4: Mapa do número de anos com recorrência de focos de calor na célula.....	42
Figura 4.5: Número de células para cada recorrência anual de focos de calor para a área de estudo. ....	43
Figura 4.6: <i>Heatmap</i> de anomalia positiva mensal de focos de calor na área de estudo entre 2003 e 2019. ....	44
Figura 4.7: <i>Heatmap</i> de anomalia positiva mensal de focos de calor no interior das UCs entre 2003 e 2019. ....	45

Figura 4.8: Comportamento espaço-temporal das anomalias anuais positiva de foco de calor. ....	46
Figura 4.9: Comportamento espaço-temporal das anomalias médias anuais de foco de calor. ....	47
Figura 4.10: Padrão temporal de permanência das classes no local após a ocorrência de foco de calor acumulado por classe. ....	51
Figura 4.11: Acumulado de focos de calor por idade da vegetação secundária no ano de registro. ....	52
Figura 4.12: Dinâmica temporal de transição acumulada de cobertura após degradação por fogo. ....	53
Figura 4.13: Padrão anual de distribuição espaço-temporal da transição de floresta primária após a ocorrência de focos de calor. ....	54
Figura 4.14: Padrão global da relação entre as métricas de estrutura de paisagem e intervalo do percentual de floresta na célula (2003-2019). ....	55
Figura 4.15: Exemplos de diferentes configurações de habitat por intervalo de percentual de floresta primária na célula em 2019. ....	56
Figura 4.16: Ocorrência anual de focos por percentual de floresta primária na célula. .	57
Figura 4.17: Relação entre % de floresta, nº médio de manchas e área média das manchas na célula e as características dos focos de calor. ....	58
Figura 4.18: Relação entre as métricas de paisagem e as características dos focos de calor. ....	59
Figura 4.19: Densidade de estradas e a ocorrência, intensidade e recorrência dos focos de calor. ....	59
Figura 4.20: Mapa de desmatamento acumulado na área de estudo (2005-2019). ....	61
Figura 4.21: Padrão anual de ocorrência de foco de calor em relação ao desmatamento. ....	62
Figura 4.22: Padrão mensal de ocorrência de foco de calor áreas de alertas de desmatamento. ....	64
Figura 4.23: Gráfico de associação entre precipitação, temperatura e ocorrência de focos de calor. ....	66
Figura 4.24: Precipitação no dia, 7 dias e 15 dias antes do registro do foco de calor. ...	67
Figura 4.25: Temperatura no dia, 7 dias e 15 dias antes do registro do foco de calor. ..	68



Figura 4.26: Déficit hídrico espacial e temporal na área de estudo (2003 - 2019).....	69
Figura 4.27: Anomalia temporal de precipitação, temperatura de superfície e ocorrência de focos de calor. ....	71
Figura 4.28: Distribuição das anomalias anuais médias de precipitação. ....	73
Figura 4.29: Distribuição das anomalias anuais médias de temperatura de superfície. .	75
Figura 4.30: Mapa Síntese do IEif da RESEX. ....	77
Figura 4.31: Mapa Síntese do IEif da FLONA.....	79
Figura 4.32: Exemplos das contribuições dos índices para compor o IEif. ....	81



## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
Tabela 2.1: Características de sensores utilizados na detecção de focos de calor.....	9
Tabela 3.1: Dados de sensoriamento utilizados para acessar as variáveis da pesquisa..	24
Tabela 3.2: Exemplo de tabela de atributos.....	27
Tabela 3.3: Adequação da legenda. ....	29
Tabela 3.4: Métricas de paisagem utilizadas nesta pesquisa e respectivas descrições...	31
Tabela 3.5: Componentes do índice de exposição a incêndios florestais (IEif). ....	34
Tabela 3.6: Descrição das atribuições de pesos para as zonas das UCs.....	37
Tabela 4.1: Matriz de transição entre as classes dos anos de 2003 e 2019. ....	49
Tabela A.1: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor na FLONA.	102
Tabela A.2: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor no entorno da FLONA. ....	103
Tabela A.3: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor na RESEX.	104
Tabela A.4: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor no entorno da RESEX. ....	105
Tabela A.5: Transição das classes após a ocorrência do foco de calor na FLONA. ....	106
Tabela A.6: Transição das classes após a ocorrência do foco de calor na RESEX.....	107
Tabela A.7: Transição das classes após a ocorrência do foco de calor no entorno da FLONA. ....	109
Tabela A.8: Transição das classes após a ocorrência do foco de calor no entorno da RESEX. ....	111



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
DETER	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
FLONA	Floresta Nacional do Tapajós
FRP	Potência Radiativa do Fogo
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IEif	Índice de Exposição a Incêndios Florestais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LOESS	Locally Weighted Scatterplot Smoothing
MapBiomass	Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil
MCWD	Maximum Cumulative Water Deficit
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
OBE	Objetivo Específico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNPCT	Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais
PPCDAm	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
RESEX	Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SisArp	Sistema de Informações de Áreas Protegidas
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
UCs	Unidades de Conservação
UNISDR	Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres é uma iniciativa das Nações Unidas
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
ZA	Zona de Amortecimento



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Exposição socioambiental .....	5
2.2 Sensoriamento remoto na detecção de incêndios florestais .....	7
2.3 Reflexos das dinâmicas territorial e da paisagem no comportamento dos incêndios florestais .....	10
2.4 Padrão climático como mecanismo de aumento da ameaça de ocorrência de incêndios florestais .....	14
2.5 Unidades de conservação .....	18
2.5.1 Unidades de conservação de uso sustentável.....	18
<b>3 MATERIAL E MÉTODO .....</b>	<b>20</b>
3.1 Área de estudo.....	20
3.2 Dados de sensoriamento remoto e socioambientais .....	24
3.2.1 Dados de sensoriamento remoto .....	24
3.2.2 Dados Socioambientais .....	26
3.3 Procedimentos metodológicos.....	27
3.3.1 Análise da dinâmica espaço-temporal dos focos de calor .....	27
3.3.2 Mudanças de uso e cobertura da terra, alterações na paisagem e a interação com a dinâmica dos incêndios florestais .....	28
3.3.3 Condições meteorológicas e a dinâmica dos incêndios florestais .....	33
3.3.4 Construção do índice de exposição a incêndios florestais .....	34
3.3.4.1 Construção dos indicadores simples .....	35
3.3.4.2 Construção dos indicadores compostos.....	36
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
4.1 Dinâmica espaço-temporal das características de focos de calor.....	39
4.2 Dinâmica da paisagem: relação com os focos de calor .....	48
4.2.1 Mudanças de uso e cobertura, padrões de paisagem e focos de calor .....	48
4.2.2 Padrão de desmatamentos e alertas .....	60
4.3 Comportamento meteorológico: relação com os focos .....	65

4.4 Índice de exposição a incêndios florestais (IEif) .....	76
<b>5 DISCUSSÃO.....</b>	<b>82</b>
5.1 Gestão territorial.....	82
5.2 Contexto socioambiental .....	83
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE A - DINÂMICA ANUAL DA INTERAÇÃO ENTRE FOCO DE CALOR COM USO E COBERTURA DA TERRA.....</b>	<b>102</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A redução da cobertura florestal de 4,1% foi identificada na escala global entre 2001 e 2018 (WADE et al., 2020). Segundo os autores, áreas não manejadas (arbustos ou capoeiras) e pastagens são as principais coberturas que ocupam essas áreas, o que evidencia o papel da agricultura como fator de perda florestal, principalmente ao longo das estradas e assentamentos antrópicos. Dentre os fatores de degradação, os incêndios florestais tiveram a maior contribuição em áreas impactadas, principalmente em 2016.

Na Amazônia, as Unidades de Conservação (UCs) têm desempenhado um importante papel na manutenção dos serviços ambientais e no clima (NOGUEIRA et al., 2018). As avaliações dos resultados da conservação dessas áreas são importantes para auxiliar no planejamento de intervenções mais eficazes e adequadas para sua gestão (GELDMANN et al., 2013; TABOR et al., 2018). Esta condição é evidenciada no cenário global quando observadas as altas taxas de desmatamento encontradas nas UCs que não apresentam gestão ativa em relação às áreas com gestão (WADE et al., 2020).

As taxas de desmatamento, as mudanças no uso e na cobertura da terra e a fragmentação florestal observadas nas últimas três décadas refletem a atuação dessas atividades antrópicas no bioma. Somente no Estado do Pará foram desmatados mais de 63 mil km<sup>2</sup> entre 2004 e 2019 (INPE, 2021a), e identificada a conversão de mais de 150 mil km<sup>2</sup> de florestas primária e secundária em áreas de atividade agropecuária entre 1985 e 2019 (MAPBIOMAS, 2021).

Os processos de desmatamento na Amazônia mostravam-se diretamente acoplados às ocorrências do fogo até meados da década passada (ARAGÃO et al., 2008). No entanto, as modificações do uso e na cobertura da terra levaram a um grau de desacoplamento destes processos (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010), uma vez que há uso do fogo nas áreas manejadas. No entanto, em anos de extremos climáticos, como as secas de 1997/98, 2005, 2010 e 2015/16, observa-se o aumento da ocorrência de incêndios florestais (NEPSTAD et al., 1999; ZENG; MARIOTTI; WETZEL, 2005; ARAGÃO et al., 2007, 2018; MEIR et al., 2008; ANDERSON et al., 2015, 2018). Assim, o desmatamento e o fogo são processos conjugados, sendo que, em anos de maiores taxas de desmatamento, há o aumento da ocorrência de queimadas e incêndios florestais, assim como em anos de

secas extremas, quando há maior susceptibilidade ao alastramento do fogo em áreas agropecuárias e em florestas.

Entende-se, assim, que a integridade da floresta é ameaçada tanto pelos processos de desmatamento quanto por atividades que causam degradação florestal. Para determinar os impactos acarretados pela degradação, é importante considerar as dimensões espacial e temporal (FERREIRA et al., 2015). A intensidade da degradação vai depender da extensão e frequência do distúrbio, embora os níveis de perturbação aceitáveis sejam pouco conhecidos.

No Brasil existiram iniciativas para a preservação e proteção da fauna e flora, e para garantir a segurança dos modos de vida. Cita-se, dentre outras, a Lei nº 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e institui o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que objetiva a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental e ainda assegurar condições de desenvolvimento socioeconômico. Tais legislações nacionais contribuem para minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais das mudanças de uso, de cobertura da terra e das alterações climáticas, as quais são também abrangidas por iniciativas globais, tais como o Marco de Sendai e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS.

Apesar da existência de mecanismos e informações que contribuem para a preservação das áreas de floresta na Amazônia, ainda se observam crescentes ocorrências de incêndios, como na região do Baixo Tapajós (WITHEY et al., 2018). Os autores identificaram quase 10 mil km<sup>2</sup> de área queimada em floresta primária e 200 km<sup>2</sup> em floresta secundária durante o *El Niño* de 2015/16. A prática de uso do fogo é tradicionalmente aplicada na manutenção das áreas de agropecuária, por ser um método rápido, barato e compatível com a capacidade técnica da população (JOLLY et al., 2015; CARMENTA et al., 2013; CARMENTA; COUDEL; STEWARD, 2019).

Percebe-se que as mudanças nas configurações ambientais estão afetando a percepção das comunidades quanto à flamabilidade das florestas, uma vez que as medidas comumente tomadas para evitar o escape do fogo, como aceiros, não têm tido a mesma eficiência para evitar novos incêndios (SPINOLA et al., 2020). Duas UCs estão inseridas neste contexto, a Floresta Nacional do Tapajós e a Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns, que tiveram, respectivamente, 14% e 28% de suas áreas afetadas durante o *El Niño* de 2015/16

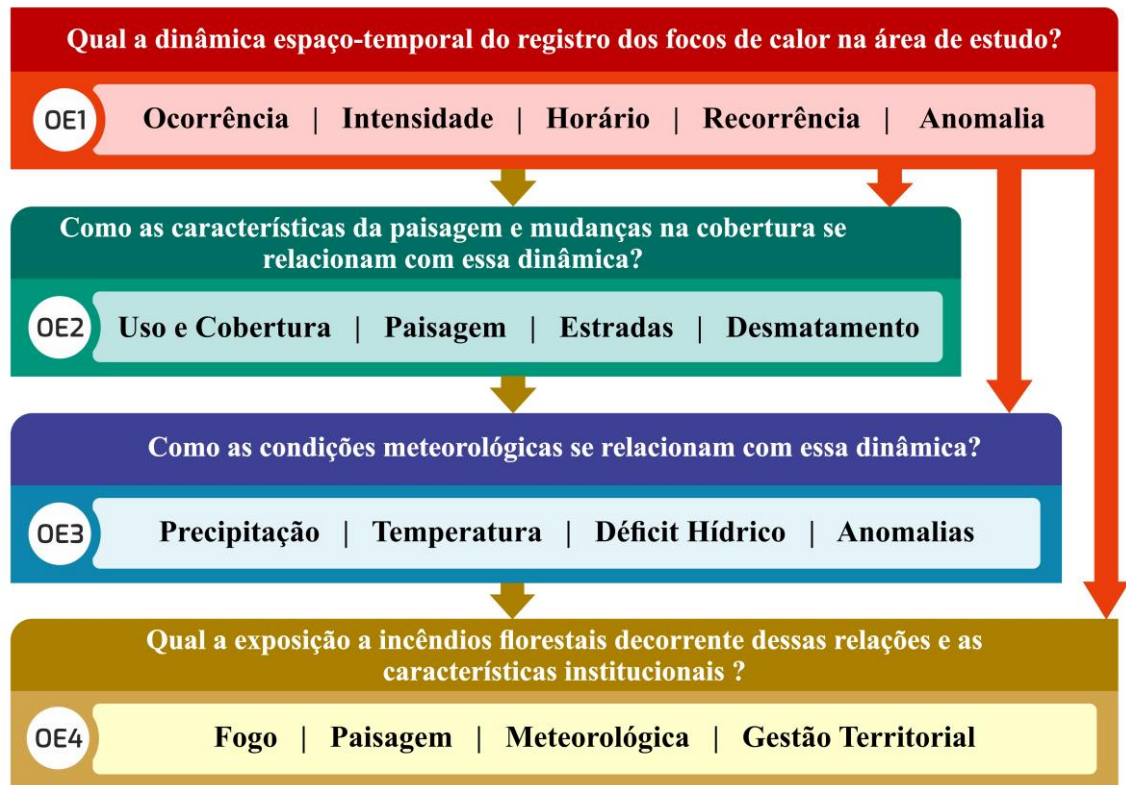
(WITHEY et al., 2018). As consequências desses incêndios em florestas tropicais para os aspectos sociais têm sido pouco exploradas pela literatura, que tem grande parte das análises associadas a características físico-naturais, embora a ação humana seja a responsável pelas ignições (CARMENTA; COUDEL; STEWARD, 2019; ZENG; MARIOTTI; WETZEL, 2005; ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010).

Assim, entende-se que é fundamental identificar as características espaço-temporais dos elementos expostos (ex.: floresta, áreas produtivas e habitacionais) e as pressões a que foram submetidos, como a intensificação de secas e a ocorrência de incêndios para a caracterização das ameaças, neste estudo as ameaças são representadas pelos incêndios florestais. Nesta pesquisa objetivou-se utilizar análises de dados ambientais e de gestão territorial para construir o Índice de Exposição a Incêndios Florestais (IEif) na Floresta Nacional do Tapajós e na Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns, visando quantificar as diferentes pressões impostas em decorrência do fogo (Figura 1.1). Os produtos resultantes desta pesquisa têm potencial para subsidiar estratégias de prevenção e monitoramento a fim de mitigar os impactos negativos associados ao uso do fogo.

A pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas, correspondentes aos objetivos específicos: i) determinar as dinâmicas espaço-temporais associadas aos focos de calor entre 2003 e 2019; ii) identificar e quantificar as alterações na paisagem e como esta influencia e é influenciada pelo fogo; iii) caracterizar os padrões espaço-temporais das variáveis meteorológicas e suas relações com a ocorrência de focos de calor na área de estudo; e, iv) integrar os produtos dos objetivos anteriores para construir o IEif para o ano de 2019.

Este documento está organizado em oito Seções. No Capítulo 2 encontra-se o referencial teórico, onde os temas vulnerabilidade ambiental, detecção de incêndios, processos associados a mudanças no uso e cobertura da terra, comportamento climático e a caracterização da área de estudo são abordados. No Capítulo 3 encontram-se descritos os materiais e métodos utilizados na caracterização dos processos associados aos temas apresentados, bem como a construção do Índice de Exposição a Incêndios Florestais. Nos Capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados destes procedimentos, a discussão e a conclusão. Após as referências utilizadas, é apresentado o Apêndice A com as tabelas completas resultantes das interações entre foco de calor e o dado de uso e cobertura da terra utilizado.

Figura 1.1: Estrutura de perguntas norteadoras dos objetivos da pesquisa.



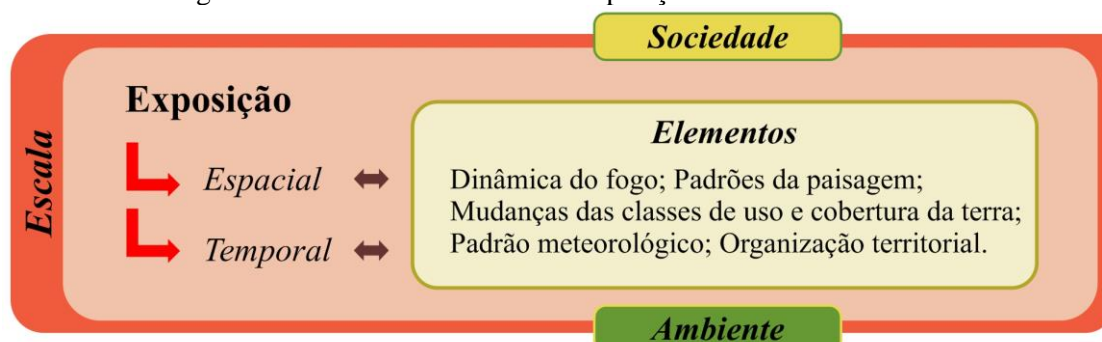
Fonte: Produção da Autora.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Exposição socioambiental

A exposição socioambiental desenvolvida nesta pesquisa é definida pela interação entre a dinâmica espaço-temporal das características dos focos de calor registrados (ameaça) com os desmatamentos e mudanças de uso e de cobertura da terra ao longo dos anos em uma determinada escala (Figura 2.1). Nesse contexto ocorrem alterações na estrutura da paisagem, como o aumento da fragmentação das florestas, tornando-as mais suscetíveis à atuação das secas, logo, mais expostas à ameaça do fogo. Considerou-se fundamental a inserção de organização e gestão como elementos da exposição que determinam as áreas, atividades e procedimentos que podem ser utilizados no território. Os estudos que basearam o desenvolvimento desta definição estão postos a seguir.

Figura 2.1 - Modelo conceitual de exposição a incêndios florestais.



Fonte: Adaptado de Tedim e Carvalho (2013).

O IPCC (2012) fornece uma discussão metodológica que indica como as dimensões da exposição podem ser exploradas em contextos específicos. A abordagem relaciona a exposição a um determinado evento ou processo com o tipo e intensidade de ameaças a que o sistema é exposto. Quando as populações ocupam áreas onde a exposição a eventos é impossível de evitar, o planejamento do uso da terra e as decisões de localização podem ser acompanhados de outros métodos para prevenir ou mitigar os riscos (UNISDR, 2009; ICSU-LAC, 2010a, b).

Apesar de a determinação do risco para o IPCC (2012) estar direcionada a uma escala territorial maior (países), os aspectos previstos para as dimensões institucionais e de governança são aplicáveis em outros tipos de territórios (ex.: Unidades de Conservação). Nesta interface são considerados os conjuntos de regras e normas que regem os territórios e a gestão dos recursos, posto que é no território que ocorre a interação entre o social e o

ambiental que pode ou não levar à exploração sustentável (ADGER, 2000). Três décadas de mudanças na prática de governança ambiental contribuíram para a conscientização sobre a importância de uma gestão ambiental integrada, prevenindo o risco e incorporando o conhecimento local ao científico, estimulando uma cogestão dos recursos naturais (UNEP, 2007; KARLSSON, 2007; PLUMMER, 2006; MCCONNELL, 2008).

Dentre os desafios identificados pelo IPCC (2012), ressalta-se a necessidade de melhores dados e métodos para aumentar o conhecimento da exposição e da vulnerabilidade, principalmente ao considerar as escalas de tempo. Um exemplo é a dinâmica da exposição a uma determinada ameaça, que pode mudar tanto sazonalmente como dentro de dias e semanas, de acordo com o tipo de perigo a que a área seja exposta. Esta pesquisa representa, assim, um esforço para o desenvolvimento de uma metodologia para quantificar a exposição no contexto da ocorrência de escapes de fogo em Unidades de Conservação da Amazônia. Para isso foram avaliadas metodologias já consolidadas sobre o risco de incêndios florestais em outros contextos, que estão descritas a seguir.

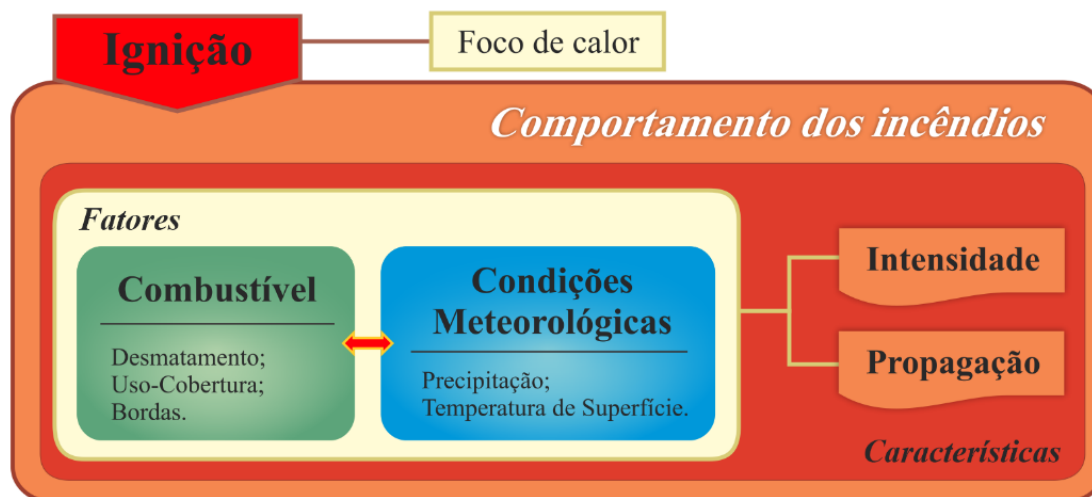
Tedim e Carvalho (2013) elaboraram um modelo conceitual para o risco de incêndios florestais dentro do escopo do projeto MOVE - *Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe*. Para as autoras, a exposição é a primeira componente, por representar a interface onde se processa a interação entre os fenômenos naturais (fogo) e os sistemas socioecológicos. A exposição é considerada no projeto como um dos componentes da vulnerabilidade, onde os elementos são determinados a partir do que a sociedade valoriza. Complementarmente, a exposição possui uma dimensão temporal, já que a duração do contato com o fogo de uma determinada intensidade influencia na sua severidade (SAPOUNTZAKI et al., 2009).

Tedim et al. (2014) determinaram a vulnerabilidade a incêndios florestais e erosão costeira em Portugal a partir de indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Os indicadores de exposição relacionam-se a presença humana, vegetação e à distância potencial para os efeitos do fogo. Os autores identificaram a importância da avaliação da exposição aos incêndios para a construção da gestão estratégica de combustível, planejamento de resposta a emergências e ainda as necessidades de prevenção e preparação.

## 2.2 Sensoriamento remoto na detecção de incêndios florestais

Para fundamentar este estudo, foram realizados levantamentos de metodologias, componentes e indicadores que utilizam o Sensoriamento Remoto para determinar as condições associadas à ocorrência de incêndios florestais. Idealiza-se que a ignição, em consonância com fatores da paisagem e climáticos, influencia a intensidade e propagação do fogo, e determina o comportamento dos incêndios (Figura 2.2). Para Sapountzaki et al. (2009), a ignição é um fenômeno provocado, na maioria das vezes, pela ação antrópica, com subsequente intensificação decorrente da atuação dos processos naturais. Dentre os fatores que influenciam as ignições na Amazônia, estão: bordas florestais (ALENCAR et al. 2004), proximidade de estradas principais e densidade das vias (CARDOSO et al. 2003; COSTA, 2017).

Figura 2.2 - Condições de ocorrência de incêndios em florestas tropicais.



Fonte: Adaptação Tedim e Carvalho (2013).

As análises sobre os efeitos da ocorrência de incêndios florestais na Amazônia, embora amplamente discutidas, estão em constante aperfeiçoamento, com resultados que variam de acordo com a escala espaço-temporal de estudo. Um dos componentes utilizados nas avaliações da ocorrência de incêndios são os dados de focos de calor, que contribuem para a definição de sazonalidade, frequência e variação anual de queima (ROSAN; ANDERSON; VEDOVATO, 2017; ANDERSON et al., 2005). Os focos de calor são anomalias termais que ocorrem na superfície da terra, associados ao fogo ativo. Um detalhamento técnico sobre os focos de calor é apresentado mais adiante no texto.

A dinâmica do fogo no longo prazo tem sido obtida através de análises que utilizam dados de focos de calor. Aragão et al. (2008) utilizam oito anos destes dados para produzir o padrão da sazonalidade do fogo em relação à precipitação e à ocorrência de desmatamento. Os autores identificaram que os incêndios em áreas desmatadas contribuíram com 60% dos focos de calor que ocorreram em 2005, ano em que a Amazônia registrou um episódio particular de seca. Além disso, estes dados são utilizados para avaliar a efetividade das políticas públicas de combate a incêndios em UCs. Ramos; Fonseca; Morello (2016) avaliaram biênios anteriores e posteriores à formação dos brigadistas, utilizando métricas como a densidade de focos de calor registrados nas UCs brasileiras em comparação com seus entornos.

Anderson et al. (2015) estimaram a extensão das áreas queimadas e da emissão de carbono das florestas na Amazônia Legal Brasileira por meio da utilização de dados de foco de calor. Os autores identificaram o potencial do uso dos dados de focos de calor para avaliações iniciais de ocorrência de incêndios em grandes regiões devido à alta resolução temporal e ao baixo esforço computacional e tempo de processamento necessário.

Adicionalmente, a área queimada, que representa a extensão das áreas afetadas pelo fogo, pode ser mapeada utilizando-se diversas metodologias aplicadas aos dados derivadas de sensores remotos (PESSÔA et al., 2020). Os autores consideram que produtos de área queimada são adequados para dimensionar a emissão de carbono pelo fogo, devido à possibilidade de estimar a extensão, a localização e a cobertura da terra afetada durante uma queimada ou um incêndio florestal. No entanto, esta avaliação deve considerar a dimensão da área de estudo, pois foram identificadas subdetecções nos produtos operacionais globais para áreas de florestas e, portanto, uma subestimativa das emissões de carbono. Estas limitações fazem com que, apesar de serem dados espacialmente explícitos, a quantificação e o diagnóstico de áreas afetadas pelo fogo sejam pouco precisos.

Os focos de calor consistem em detecções por sensores da radiação emitida por materiais em chamas na faixa de energia infravermelha (0,75 a 1000  $\mu\text{m}$ ). Essa medida é influenciada por características das superfícies além da temperatura, como a emissividade (INPE, 2021c). Quando um *pixel* é identificado como foco de calor, tendo em vista a temperatura elevada ser considerada anômala em relação aos demais *pixels*, são



realizados processamentos adicionais para garantir que a informação esteja associada a ocorrência do fogo. Tal procedimento é necessário porque mesmo calçadas, ruas, tetos metálicos, dentre outros, atingem temperaturas entre 70°C e 120°C (INPE, 2021c). Existem diferentes sensores que operam na faixa do infravermelho e possuem capacidade de obter os dados de focos de calor. As descrições de alguns dos que foram utilizados nesta pesquisa estão a seguir.

Os produtos derivados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) que se encontra a bordo dos satélites Terra e Aqua (Tabela 2.1) são resultado de um algoritmo que verifica se existe uma anomalia radiativa no *pixel* a partir da energia emitida principalmente na faixa termal média (GIGLIO, 2013). A detecção realizada pelo sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), a bordo do *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (NPP), resulta de um crescimento ao longo da varredura do sensor, do tamanho do *pixel*, que é significativamente reduzido em comparação com o observado em sensores sem um esquema de agregação semelhante, como MODIS ou *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo dos satélites *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA) (WOLFE et al., 2013).

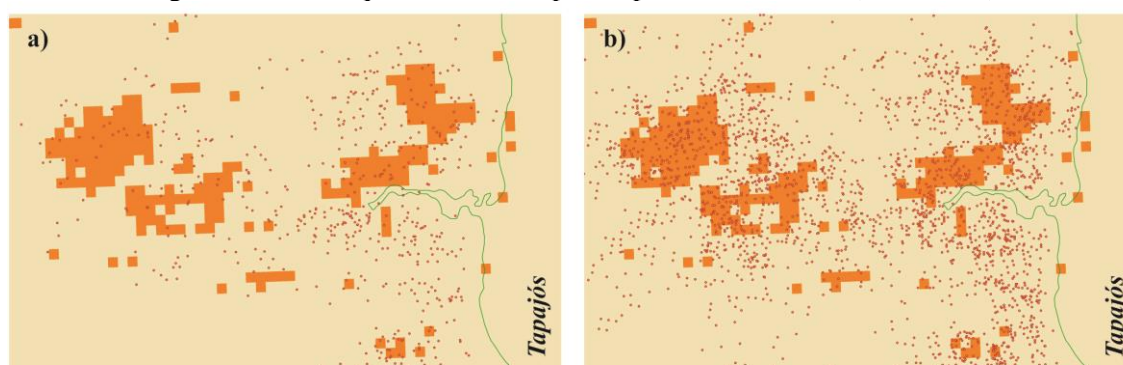
Tabela 2.1: Características de sensores utilizados na detecção de focos de calor.

Sensor	Bandas utilizadas para detecção de fogo	Resolução espacial	Resolução temporal
<b>MODIS</b>	Bandas 21 e 22: 3,929 - 3,989 $\mu\text{m}$	1 km	1-2 dias
<b>AVHRR</b>	Banda 3: 3,7 $\mu\text{m}$	1,1 km	12 horas
<b>VIIRS</b>	Banda moderada 13: 3,973 - 4,128 $\mu\text{m}$	750 m	Diário

Fonte: Produção da Autora.

A subdetecção da área queimada derivada do sensor MODIS, produto MCD64A1, com 500 m de resolução espacial, foi analisada preliminarmente nesta pesquisa, comparando-se com as ocorrências de focos de calor para a área da RESEX Tapajós-Arapiuns. Observa-se uma diferença na distribuição das áreas queimadas em relação aos focos de calor registrados pelos satélites que estiveram em operação durante todo o período da série (Figura 2.3a). Observa-se ainda que, se utilizados os focos de calor derivados de todos os sensores que estiveram em operação durante algum período na série, o número e horários de observações aumentam, logo a subdetecção da área queimada fica mais evidente (Figura 2.3b).

Figura 2.3: Áreas queimadas sobrepostas por focos de calor (2003-2019).



O dado de área queimada utilizado é o MCD64A1 derivado dos sensores MODIS. a) são os focos de calor registrados pelos sensores em atividade durante toda a série (Terra e Aqua); b) são todos os focos registrados por satélites que operaram em diferentes momentos da série.

Fonte: Produção da Autora.

### 2.3 Reflexos das dinâmicas territorial e da paisagem no comportamento dos incêndios florestais

As estratégias geopolíticas empregadas na ocupação e para a integração da Amazônia ao restante do país, iniciadas na primeira metade do século XX, associadas aos interesses econômicos regionais e ao acesso ao crédito, contribuíram para décadas de mudanças intensas nesta região (BECKER, 1997, 2005; CASTRO, 2005; REYDON; FERNANDES; TELLES, 2020). Identificam-se processos como o aumento do desmatamento e mudanças nas classes de uso e cobertura da terra que causaram impactos negativos no ambiente. Dentre os impactos, citam-se aumento da fragmentação da paisagem, maior atuação do efeito de borda, emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera, dentre outros (HEINRICH et al., 2020; SILVA JUNIOR et al., 2020a).

Para desacelerar o aumento das taxas de desmatamento, foram implementadas algumas iniciativas públicas, a citar o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm). O PPCDAm foi instituído através do Decreto Federal s/n, de 3 de julho de 2003, para concretizar os esforços do governo federal frente à necessidade de diminuir as taxas de desmatamento na Amazônia. Essa medida teve como objetivo promover políticas públicas destinadas à contenção do desmatamento na Amazônia por meio de ações de monitoramento, controle e fiscalização.

Dentre as políticas empregadas no comando e controle do desmatamento têm-se a atuação da polícia federal, recuperação de áreas desmatadas, criação de unidades de conservação

e certificação de terras nativas (MMA, 2018). Essa iniciativa, em sinergia com outras políticas públicas existentes, contribuiu para o alcance de mais de 75% de redução na taxa anual de desmatamento, passando de 27.772 km<sup>2</sup> em 2004 para 6.624 km<sup>2</sup> em 2017. Apesar da efetividade, é preciso considerar que algumas implementações dependem da estabilidade político-institucional do país (REYDON; FERNANDES; TELLES, 2020). O *policy brief* de Rajão et al. (2021) associa o recente aumento nas taxas de desmatamento a possíveis causas derivadas da questão política do país. Os autores identificaram a redução no número de autos de infração por desmatamento ilegal na Amazônia, explicada em parte pelas restrições orçamentárias e, em 2020, pela pandemia de COVID-19.

Após meados da década passada, a ocorrência do fogo que era majoritariamente associado aos processos de desmatamento passou a se dar mesmo em áreas onde o desmatamento não aumentou, mas decorrente do uso do fogo para o manejo nas áreas antropizadas (ARAGÃO et al., 2008; ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010). Assim, a diminuição das taxas de desmatamento não representa uma diminuição direta da ocorrência de queimadas e incêndios florestais, uma vez que outros processos socioambientais, como o manejo da pastagem e de áreas agrícolas, o escape do fogo para áreas de bordas de florestas ou aumento do número de pontos de ignição do fogo na extensão territorial da Amazônia contribuem para a ocorrência e o comportamento dos eventos de incêndios.

O monitoramento realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instituição vinculada ao poder executivo federal, possui dois produtos oficiais utilizados para detecção do desmatamento em áreas de florestas primárias, sendo eles o Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) e o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER). O PRODES obtém incrementos e estima taxas anuais de desmatamento por corte raso utilizando imagens de satélite (INPE, 2021b). O DETER é uma ferramenta de alerta rápido, que auxilia o órgão ambiental executor a identificar possíveis atividades irregulares e a fiscalizar os desmatamentos.

Desde a criação do sistema DETER, sua metodologia vem sendo adaptada visando incorporar novos sensores e tipos de detecções de processos associados à degradação florestal para subsidiar os órgãos responsáveis na fiscalização e controle destas atividades (INPE, 2021b). O primeiro produto do DETER, disponibilizado entre 2004 e 2017,

utilizava imagens MODIS de 250 m de resolução espacial e não discriminava os alertas, que podiam ser associados à degradação ou ao corte raso, e a menor área mapeada era de 25 ha. O produto atualmente operacional, desenvolvido desde agosto de 2015 para a Amazônia brasileira, resulta dos sensores *Advanced Wide Field Sensor (AWIFS)*, no satélite *Indian Remote Sensing Satellite (IRS)* 56 m de resolução, e *Wide Field Camera (WFI)*, a bordo do satélite *China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS-4)*. Esta nova metodologia mapeia áreas maiores que 3 ha e discrimina classes de degradação e corte raso.

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), junto a agências de fiscalização dos estados do Pará, Amazonas e Rondônia, tem desenvolvido desde 2019 o DETER intenso (INPE, 2021d). Para isso, utilizam-se os dados dos satélites CBERS-4 (sensores: WFI e *Multispectral Camera - MUX*), Landsat 8 (sensor: *Operational Terra Imager - OLI*), Sentinel 2 (sensor: *MultiSpectral Instrument - MSI*) e Sentinel 1 (banda C), que permitem uma resolução temporal de um a dois dias, com 1 ha de área mínima mapeada e as mesmas classes mapeadas no DETER. Esse produto é disponibilizado para sete áreas prioritárias, onde há uma maior intensidade de desmatamento.

A classificação de uso e cobertura da terra produzida pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias) é uma metodologia automática de classificação de imagens dos satélites Landsat (MAPBIOMAS, 2021). O dado disponibilizado gratuitamente apresenta um produto de uso e cobertura da terra a partir da década de 80 e passa por constantes ajustes em sua metodologia, que atualmente está na 5ª coleção. Apesar da identificação de desacordos na identificação de algumas classes de uso da terra no MapBiomias, quando comparados à interpretação visual (NEVES et al., 2020), identifica-se que este produto satisfaz aos requisitos técnicos de validação, pois apresentou 87,7% de precisão global para a classificação em todo o Brasil e mais de 95% para a Amazônia, com 8,6% de discordância de alocação e 3,7% da área desacordo.

Mais de três décadas de informações de cobertura da terra do MapBiomias revelam a perda de mais de 71 milhões de hectares de vegetação natural no Brasil, convertidos principalmente para atividades agropecuárias (SOUZA et al., 2020). Apesar de não possuir a classe de vegetação secundária, o resultado encontrado pelos autores revela que

mais de 86 milhões de hectares de vegetação nativa estão passando por algum nível de recuperação.

Para fazer distinção entre florestas (primárias e secundárias), recentemente Silva Júnior et al. (2020b) disponibilizaram um *script* para processamento em nuvem no *Google Earth Engine* do produto do MapBiomas que permite identificar o momento/ano em que a floresta passa por uma transição de cobertura e posteriormente volta a ser classificada como floresta. Nesta etapa, o *pixel* recebe um novo valor com a idade da floresta que possibilita determinar as áreas de vegetação secundária. Os autores identificaram mais de 148 mil quilômetros de vegetação secundária na Amazônia entre 1986 e 2018.

Com o desmatamento e a dinâmica de mudanças de uso e cobertura da terra ocorrendo simultaneamente, há uma alteração na configuração das paisagens no bioma. Nesse processo, há uma fragmentação da cobertura de floresta primária que resulta em uma diminuição do tamanho das manchas e em um aumento no número destas e das áreas de borda (FAHRIG, 2003). Além disso, há uma redução das áreas centrais de florestas (*core*) e o aumento da quantidade de borda, tornando as áreas mais suscetíveis a impactos socioambientais (LAURANCE et al., 2017; SILVA JUNIOR et al., 2018).

Alguns estudos avaliam os efeitos de ameaças - como a ocorrência de queimadas - que atuaram nestas áreas de contato entre uso antrópico e as bordas de florestas, analisando seus impactos à medida que se adentra para o interior da floresta. Laurance et al. (2017) identificaram que, quando os efeitos alcançam até 300 m da borda para o interior da floresta, isto irá resultar em uma alta mortalidade de árvores. Assim, essa métrica foi utilizada para determinar a área *core* desta pesquisa, uma vez que não é esperado esse tipo de comportamento mais intenso para UCs. A aplicação dessas métricas é apontada por Pereira et al. (2001) como um procedimento confiável para a caracterização do arranjo espacial da paisagem e de sua composição, bem como de sua relação com a ocorrência de incêndios florestais.

Outra perspectiva associada ao tipo de cobertura da terra, são as características estimadas da matéria orgânica acima do solo para cada classe. Por exemplo, as áreas de borda de floresta apresentam uma maior mortalidade de árvores, o que gera acúmulo de material combustível para o fogo, influenciando a própria intensidade do mesmo (KEELEY, 2009). A energia radiativa emitida pela chama é a métrica mais facilmente mensurável

em estudos de sensoriamento remoto dos impactos do fogo (WOOSTER et al. 2003; DENNISON et al. 2006).

Essa métrica, conhecida como Potência Radiativa do Fogo (FRP no inglês, referente a *Fire Radiative Power*), não é totalmente explicada pelas avaliações atuais, que tentam relacionar a potência da chama ao tipo de material combustível que está sendo queimado. Um exemplo é a variação do FRP da taxa de queima de 10 kg s<sup>-1</sup> de biomassa em florestas nativas norte americanas em comparação à encontrada na savana africana, com 22 MW e 27 MW, respectivamente (FREEBORN et al., 2008; WOOSTER et al., 2005). O esperado nestes casos era que o FRP emitido na floresta fosse maior do que na savana, devido à característica lenhosa da matéria orgânica encontrada na floresta, a mesma que é encontrada na Amazônia, onde o aumento na intensidade média do fogo ocorre conforme o maior percentual de cobertura florestal (SCHROEDER et al., 2010).

#### **2.4 Padrão climático como mecanismo de aumento da ameaça de ocorrência de incêndios florestais**

As mudanças climáticas têm sido avaliadas e discutidas nas últimas décadas na comunidade científica internacional dando evidências de que o aumento das temperaturas e alterações em sua amplitude têm gerado o aumento na frequência e magnitude dos extremos climáticos (MEEHL et al. 2000; IPCC, 1999, 2007, 2012). A seca, segundo Cunha et al. (2019), é definida como um período prolongado com duração entre meses e anos, em que a precipitação é inferior à média histórica, o que resulta em escassez de água. Na Amazônia, as secas estão associadas aos processos anômalos que ocorrem nos oceanos Atlântico, Pacífico Norte e Atlântico Norte (ARAGÃO; SILVA JUNIOR; ANDERSON, 2020).

Aragão et al. (2018) identificaram que a atuação da Oscilação Multidecadal Atlântica (AMO) foi fortemente correlacionada à ocorrência das secas severas de 2005 e 2010, enquanto a seca de 2015/16 ocorreu com o aquecimento anômalo simultâneo dos oceanos Pacífico Norte e Atlântico Norte, identificado pelos índices *El Niño* multivariado (MEI) e Oscilação Decadal do Pacífico (PDO). A AMO e a PDO, segundo os autores, influenciam de maneira similar no padrão de distribuição de chuvas na Amazônia, resultando na anomalia negativa de chuva no sudoeste amazônico, enquanto o MEI é responsável pelo mesmo comportamento para as regiões norte, central e sudeste.

Além disso, os fatores associados às secas, como a ocorrência de chuva abaixo da média na transição da estação chuvosa para a estação seca e, durante a estação seca, associados ao aumento da persistência de pastagens e desmatamento, intensificam a ocorrência de queimadas (ARAGÃO et al. 2018; ARAGÃO; SILVA-JUNIOR; ANDERSON, 2020). O aumento da frequência de secas pode levar a uma maior flamabilidade da floresta, de forma que o escape do fogo se propague mais profundamente e torne-se o principal agente de transformação do bioma (ARAGÃO et al., 2007; ALENCAR et al., 2011; MORTON et al., 2013; MCRAE; SHARPLES, 2015).

No entanto, não são somente alterações nos padrões de chuvas que têm sido observado. Os modelos desenvolvidos pelo IPCC (2007) estimam um aumento de 0,3°C por década nas temperaturas da Amazônia para as primeiras três décadas do século XXI. Ximenes, Amaral e Valeriano (2012) utilizaram o modelo ETA para identificar as regiões mais suscetíveis ao aumento de temperatura entre 1960 e a simulação realizada para 2010.

As emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas à queima de combustíveis fósseis pelas atividades antrópicas foram de 7 Gt/ano ao final do século XX, uma taxa anual 70 vezes maior do que a de emissão natural (ROHDE; PHILOMENA, 1998). No Brasil, diferentemente de países desenvolvidos e de países de economia emergente, mais de 80% das emissões de CO<sub>2</sub> em 1994 tinham relação direta ou indireta com a agricultura (NOBRE, 2008). Segundo o autor, em 1994, devido ao desmatamento, o país teve a mais alta emissão de CO<sub>2</sub> *per capita* entre os países em desenvolvimento, de mais de 1,5 toneladas por ano. Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), nos últimos anos têm sido quantificados aumentos na emissão por desmatamento na Amazônia, que em 2018 causou a emissão bruta de 499 MtCO<sub>2</sub> contra 454 MtCO<sub>2</sub> em 2017 (SEEG, 2019).

Recentemente foram iniciados experimentos para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes dos incêndios florestais, as quais, devido às incertezas em quantificar a regeneração das áreas queimadas e sucessão de vegetação, ainda não são contabilizadas no (SEEG, 2020). Em 2019, o SEEG estimou o aumento de 87% de emissão de CO<sub>2</sub> por fogo em relação a 2018, com 517 milhões de toneladas, dos quais 50% tiveram origem na Amazônia. Outras abordagens que estimam a emissão decorrente do fogo nas florestas

mostram a influência do padrão climático sob o processo, com o fogo sendo intensificado em períodos de extremos climáticos de secas (DIAZ et al., 2002; ARAGÃO et al., 2018).

A emissão por queimadas de partículas e gases traços, que absorvem o calor irradiado pela terra, pode acarretar alterações no ciclo hidrológico da região amazônica, onde são observados a diminuição do regime de chuvas e prolongamento da estação seca (SILVA DIAS, 2006; COSTA; PAULIQUEVIS, 2009). Estes eventos extremos de seca vêm sendo quantificados nos últimos anos, a partir de diferentes técnicas e variáveis e possuem significativa importância para o entendimento de como a sociedade e o ecossistema respondem a tais alterações.

Gatti et al. (2021) identificaram uma tendência de aquecimento médio anual de  $1,02 \pm 0,12^{\circ}\text{C}$  para a Amazônia entre 1979 e 2018, que é ainda mais intensa, de  $1,37 \pm 0,15^{\circ}\text{C}$ , para os meses da estação seca (agosto, setembro e outubro). A precipitação média anual encontrada não mudou significativamente ( $27 \pm 68$  mm;  $P = 0,69$ ), mas, assim como para a temperatura, a precipitação é mais alterada nos meses da estação seca, diminuindo em até 17%. Nas avaliações preliminares, a área de estudo durante a série temporal obteve um aquecimento médio anual de  $0,05^{\circ}\text{C}$  e de  $1,33^{\circ}\text{C}$  para os meses da estação seca, que também apresenta uma diminuição de 25% na precipitação nesse período.

Um dado importante para caracterizar os padrões de precipitação é o produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS V.2) (ANDERSON et al. 2018; MU; BIGGS; SHEN, 2020). A metodologia utilizada incorpora informações continuamente registradas por estações meteorológicas e imagens de satélite com 5 km de resolução espacial e calibradas com o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (FUNK et al., 2015). Esse dado foi avaliado para a Amazônia brasileira em relação aos dados obtidos por estações pluviométricas entre 1981 e 2017 por Cavalcante et al. (2020). Segundo os autores, os valores médios mensais obtidos pelo CHIRPS são semelhantes aos das estações, embora tendam a subestimar os meses mais chuvosos, condição que também é encontrada em índices extremos de precipitação, o que não prejudica o propósito do dado: o registro homogêneo temporal da precipitação.

Com base nesses dados, Anderson et al. (2018) identificaram diferentes padrões de distribuição de eventos de secas na Amazônia entre 1986 e 2016. De acordo com os autores, 2015/16 foi o momento da série em que a maior área do bioma esteve sob atuação



de seca severa e extrema, concentrada na região centro-ocidental, com cerca de 46%. As ocorrências de anomalias de déficit hídrico significativo ( $< -2.57$ ;  $p < 0.01$ ) se repetiram por até cinco anos em um mesmo local, principalmente na porção centro-norte e oeste.

A metodologia proposta por Aragão et al. (2007) para determinar o déficit hídrico, calculado assumindo-se que isso ocorre quando a chuva mensal é inferior à média da evapotranspiração da floresta, estimada em média de 100 mm por mês, é uma forma de determinar sua intensidade e duração (Equação 2.1). De forma complementar, Aragão et al. (2007) também utilizaram o *Maximum Cumulative Water Deficit* (MCWD), que é o valor mínimo acumulado do déficit hídrico ao longo do tempo (Equação 2.2).

$$A_{i,j} = (V_{i,j} - X_{i,j})/Y_{i,j} \quad (2.1)$$

onde:  $A_{i,j}$  representa a anomalia do pixel na posição  $i,j$ ;  $V_{i,j}$  corresponde ao valor do pixel na posição  $i,j$ ;  $X_{i,j}$  é a média temporal do pixel na posição  $i,j$  e  $Y_{i,j}$  o desvio padrão da média temporal do pixel na posição  $i,j$ .

$$\begin{aligned} & \text{If } WD_{n-1}(i,j) - E(i,j) + P_n(i,j) < 0; & (2.2) \\ & \text{then } WD_n(i,j) = WD_{n-1} - E(i,j) + P_n(i,j); \\ & \text{else } WD_n(i,j) = 0 \end{aligned}$$

onde:  $WD$  corresponde ao valor de déficit hídrico para cada mês  $n$  do pixel na posição  $i,j$ ;  $E_{i,j}$  é referente ao valor de evapotranspiração do pixel na posição  $i,j$ ; e  $P_{i,j}$  é o valor da precipitação no pixel na posição  $i,j$ .

Para determinar as condições de incêndios e secas na região do Baixo Tapajós, Hendrix (2018) utilizou dados de temperatura de superfície e métricas de alerta precoce (EWMs), a citar: autocorrelação, tempo de retorno, assimetria, curtose, variância e heterocedasticidade condicional. As métricas apresentaram uma precisão de 73% e permitiram a caracterização da resiliência da floresta, à medida que o ecossistema se aproxima do limite para uma transição crítica.

Um exemplo deste dado é derivado do sensor MODIS, obtido por um algoritmo que recupera a temperatura de superfície através de pares de observações diárias (diurnas e noturnas) do satélite *Aqua* com 1 km de resolução (WAN; HOOK; HULLEY, 2015). As passagens deste satélite identificam as temperaturas máximas e mínimas no dia, devido à presença de nuvens. A média de *pixels* válidos na composição noturna de oito dias é de 67,48%, frente aos 81,05% da composição diurna (ARAI et al., 2011). Desta forma, os produtos derivados da passagem do dia são mais indicados para avaliações com o dado

de temperatura de superfície. Em adição, os autores não identificam prejuízos às análises temporais em decorrência das falhas identificadas.

As mudanças no regime de chuvas e temperatura alteram a produção primária líquida (NPP) e respiração heterotrófica (NEPSTAD et al., 1999; ZENG; MARIOTTI; WETZEL, 2005), contribuindo para a inflamabilidade da vegetação. Portanto, pode-se concluir que, além dos fatores climatológicos, que aumentam a probabilidade de os incêndios escaparem de áreas abertas para florestas adjacentes, a contribuição da modificação da paisagem, cujo desmatamento leva a formação de bordas de florestas, fragmentação, presença de florestas queimadas, derrubadas e vegetação secundárias, aumenta a susceptibilidade da floresta ao fogo, quando comparado com grandes blocos contínuos de florestas primárias não perturbadas (ARAGÃO et al., 2018).

## **2.5 Unidades de conservação**

Nesta seção explicam-se as definições da legislação que versa sobre Unidades de Conservação e as tipologias a que as UCs, foco desta pesquisa, pertencem. Detalha-se o histórico das duas UCs – Floresta Nacional do Tapajós e Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns – para auxiliar no entendimento do contexto social e econômico em que elas estão inseridas. Por fim, apresentam-se as características ambientais e a organização territorial prevista nos seus respectivos planos de manejo.

### **2.5.1 Unidades de conservação de uso sustentável**

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) foi instituído pela Lei nº 9.985/2000, com o objetivo de promover as unidades de conservação para 12 categorias distintas de manejo, distribuídas em dois grupos: Proteção Integral (5 categorias) e Uso Sustentável (7 categorias). Com o primeiro grupo busca a manutenção dos ecossistemas livres de alterações causadas por interferência humana. Com o segundo, objetiva-se compatibilizar as atividades humanas com a necessidade de assegurar a conservação da diversidade biológica e dos ecossistemas.

Mais de 13% do território da Amazônia Legal são demarcados como Unidades de Conservação Federal, totalizando 669.207,75 km<sup>2</sup> (SISARP, 2021). As categorias de Reserva Extrativista (RESEX) e Floresta Nacional (FLONA) são mais numerosas, com 51 e 34 unidades, respectivamente (SISARP, 2021). Seus objetivos estão dispostos nos artigos 17 e 18 do SNUC, da seguinte forma:

Art. 17º A Floresta Nacional é uma área com cobertura florestal de espécies predominantemente nativas e tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas (BRASIL, 2000).

Art. 18º A Reserva Extrativista é uma área utilizada por populações extrativistas tradicionais, cuja subsistência baseia-se no extrativismo e, complementarmente, na agricultura de subsistência e na criação de animais de pequeno porte, e tem como objetivos básicos proteger os meios de vida e a cultura dessas populações, e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais da unidade (BRASIL, 2000).

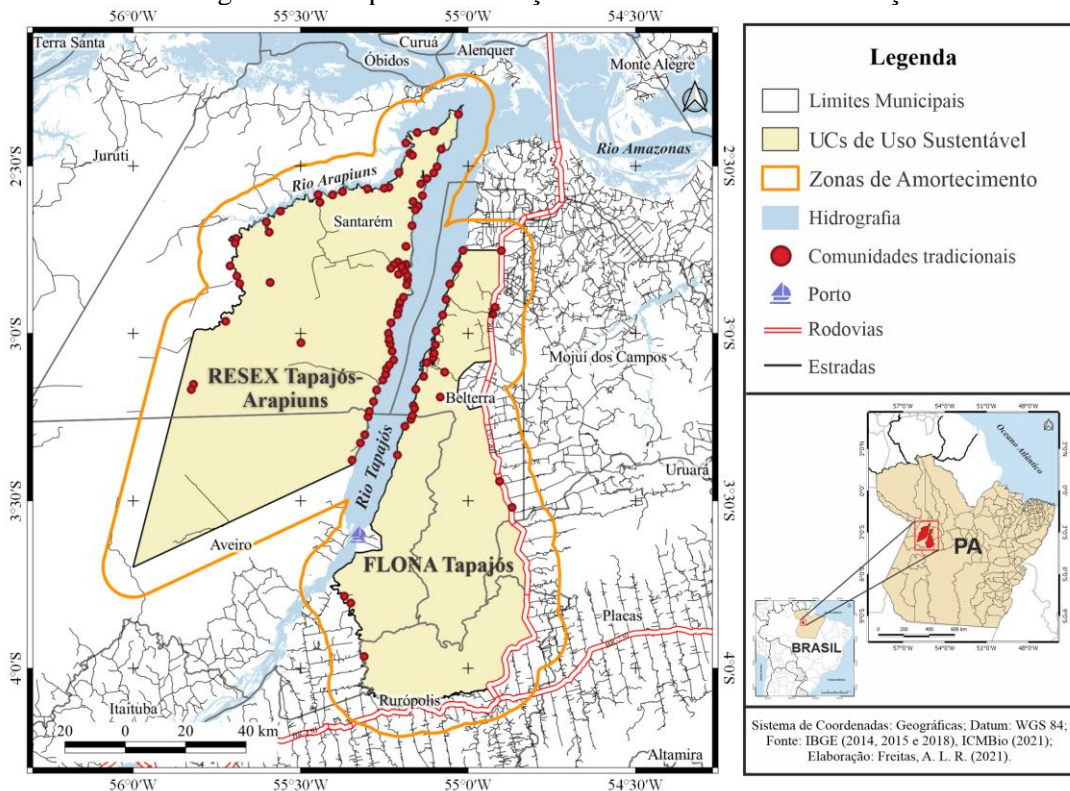
A Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais (PNPCT), instituída pelo Decreto nº 6.040/2007, tem a concepção de que as comunidades tradicionais realizam atividades que não degradam o território e contribuem para a manutenção da floresta. Essa política propicia a inclusão político-social e o comprometimento do Estado com essas populações, bem como reconhece a diversidade socioecológica brasileira. Desta forma, as UCs de Uso Sustentável podem ser consideradas como meios para garantir a conservação de territórios que apresentam características ecológicas e ambientais relevantes, a serem mantidos sob um regime especial de administração, e garantir a perpetuação dos modos de vida dos povos e comunidades tradicionais.

### 3 MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa abrange duas UCs de Uso Sustentável: i) FLONA Tapajós, criada a partir do Decreto nº 73.684, de 19 de fevereiro de 1974, com área de 5.273,19 km<sup>2</sup> (ICMBio, 2019); e ii) a RESEX Tapajós-Arapiuns, criada pelo Decreto s/nº, de 06 de novembro de 1998, com área de 6.476,1 km<sup>2</sup> (ICMBio, 2014). Ambas as unidades estão sob a Coordenação Regional 3 – de Santarém/PA (Figura 3.1).

Figura 3.1: Mapa de localização das Unidades de Conservação.



Fonte: Produção da Autora.

As características intrínsecas às tipologias de UCs e seus procedimentos de gestão servem para nortear o entendimento dos processos que ocorrem em seus territórios. Seus respectivos planos de manejo, além de atenderem às exigências do que é previamente definido pela legislação, têm como objetivos prever e estabelecer mecanismos contra a ocorrência de desmatamento e queimadas. Desta maneira, as atividades previamente definidas podem ou não resultar em uma maior perturbação antrópica, e devem ser objeto de estudo para o diagnóstico destas relações.

Atualmente, a RESEX está organizada em 37 associações comunitárias distribuídas em 64 comunidades, com mais de 3 mil famílias e uma população superior a 18 mil habitantes (SISARP, 2021). As habitações estão em “aglomerados urbanos”, denominadas vilas ou comunidades, onde existe certa estrutura, como microssistema de distribuição de água, grupo gerador de energia elétrica, ruas, escolas, campo de futebol, igreja, entre outros (ICMBIO, 2014).

Devido à ocorrência de atividades conflitantes com as permitidas, como agropecuária intensiva, uso de agroquímicos, retirada de madeira e caça ilegal (ICMBIO, 2019), parte da área do território da FLONA Tapajós foi desafetada, regulamentada pela Lei 12.678/2012 e consolidada pela Medida Provisória (MP) nº 558/2012, na Região de São Jorge, às margens da BR-163. No mesmo processo, às margens do rio Tapajós, foi também desafetada a área que hoje compõe a sede do município de Aveiro. O processo de demarcação gerou conflitos entre as populações indígenas e não indígenas na desocupação destas terras e transtornos para a gestão da UC, que perduram até hoje.

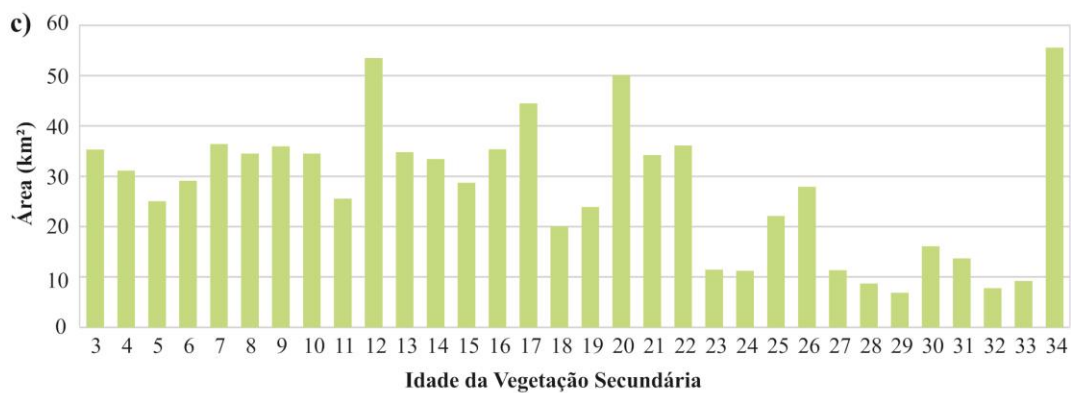
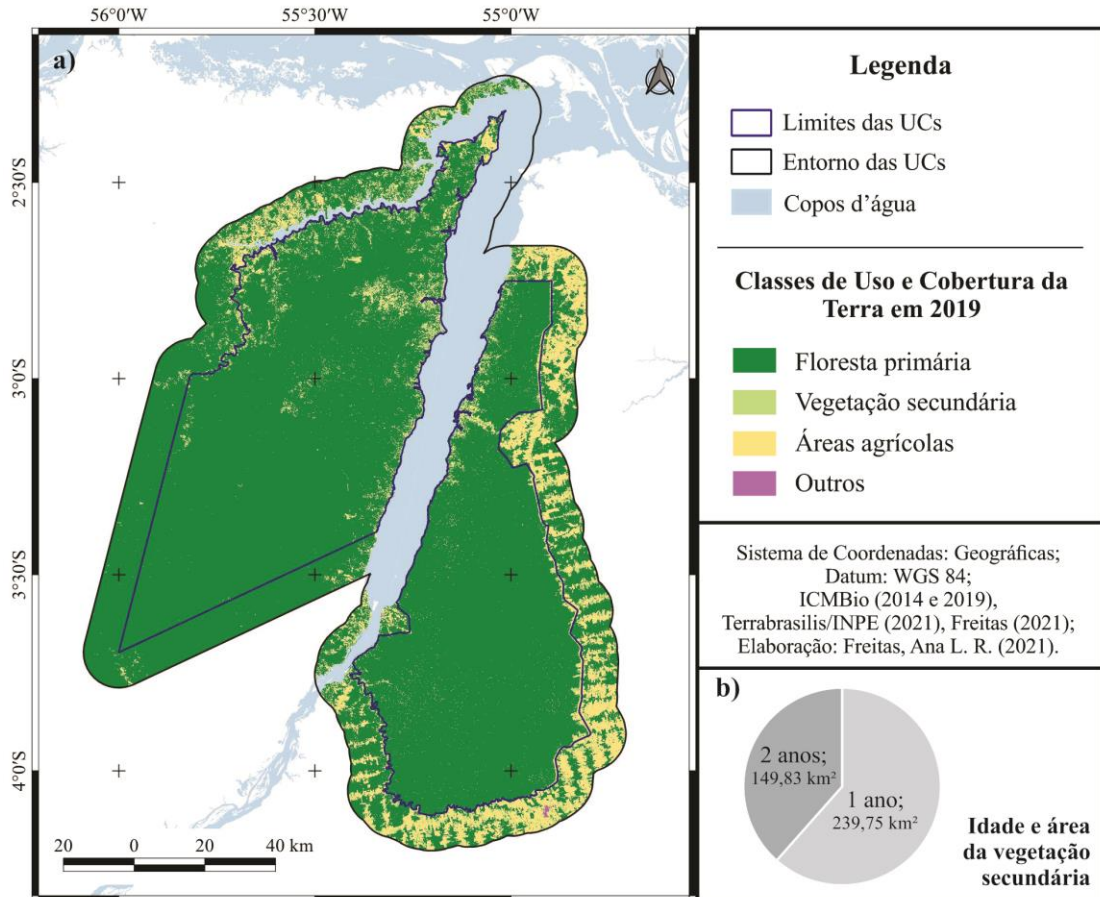
Ressalta-se que houve um protagonismo nas ações desenvolvidas pela gestão integrada dos associados e cooperados, que demonstra a efetividade e capacidade de suporte à floresta e para conciliar populações tradicionais e locais de modo a compatibilizar os objetivos de sustentabilidade. Em 2016, a FLONA Tapajós possuía em seu interior 21 comunidades tradicionais e 03 aldeias indígenas, formadas por 923 famílias e 3.889 habitantes (ICMBio, 2019).

Na FLONA, o crescimento populacional, aliado ao pouco espaço para ampliação dos roçados, diminui o tempo de pousio, o que resulta em desgaste do solo, redução da fertilidade e quebra do ciclo de regeneração natural da cobertura florestal. Neste sentido, o uso do fogo pelas comunidades é justificado pela liberação dos nutrientes provenientes das cinzas durante a abertura dos roçados (AFFONSO et al., 2016).

A avaliação preliminar do uso e cobertura da terra do produto do MapBiomass para as duas UCs e zonas de amortecimento em 2019 revela que a floresta primária é a principal classe presente na área de estudo, com mais de 15 mil km<sup>2</sup> (Figura 3.2 a). A pastagem extraída do dado original e a vegetação secundária, calculada baseando-se no estudo de Silva Junior et al. (2021b), possuem áreas semelhantes, com 1279 km<sup>2</sup> e 1274 km<sup>2</sup>, respectivamente. Em menores proporções, há ainda a formação campestre, soja

(principalmente no entorno da FLONA), outras lavouras temporárias e área urbana. As áreas de vegetação secundária com um e dois anos de idade são as maiores da classe, com 18,7% e 11,7%, respectivamente (Figura 3.2b). O restante da classe tem áreas distribuídas em até 34 anos, idade máxima que pode ser identificada no produto derivado o MapBiomas (Figura 3.2c).

Figura 3.2: Classes de uso e cobertura da terra e área da idade da vegetação secundária em 2019.



Fonte: Produção da Autora.

Na RESEX foram identificados 5.200 pescadores, dos quais, cerca de 150 trabalham diretamente com a pesca comercial e são cadastrados nas colônias de pesca de Santarém e Aveiro, e 4.000 possuem pequenas embarcações (ICMBio, 2014). O ecoturismo é uma atividade em destaque na FLONA que atrai inúmeros visitantes de várias partes do mundo e do Brasil. No ano de 2017 foram mais de 42 mil visitantes entre turistas, pesquisadores, estudantes e outros, todos de diversas nacionalidades (ICMBIO, 2019).

Recentemente se construiu uma articulação entre a FLONA e a RESEX para tratar temas de fortalecimento da gestão territorial, principalmente para a proteção dos estoques pesqueiros do Baixo Tapajós e a prevenção e combate a incêndios florestais. Tal fato foi necessário devido à presença de embarcações oriundas de Santarém e Alenquer, que se tornaram uma ameaça ao estoque pesqueiro disponível para os moradores (ICMBIO, 2014).

O fogo é um método rápido, barato e compatível com a capacidade técnica da população para a manutenção das áreas de agropecuária. Mas, processos ambientais, como a mudança no regime de secas, levam a escapes do fogo que originam os incêndios para a floresta (JOLLY et al., 2015; CARMENTA et al., 2013; CARMENTA; COUDEL; STEWARD, 2019). Além disso, a região do Tapajós tem enfrentado crescentes desafios no manejo do fogo devido à ocorrência de extremos climáticos e crescentes taxas de desmatamento (WITHEY et al., 2018).

Na bacia do rio Arapiuns, muitas famílias possuem uma área denominada colônia, que se constitui em um local de plantio de culturas perenes, sendo uma parte destinada a culturas sazonais ou roçados (CARMENTA et al., 2013). Nas proximidades do rio Tapajós, as comunidades fazem seu plantio em áreas simples de roçado, mais próximo às casas e poucas famílias possuem colônia (ICMBIO, 2014). Além disso, são desenvolvidas atividades de pecuária, criação de peixes em tanques, de animais de pequeno porte, abelhas nativas, caça, pesca, extrativismo vegetal voltado para a fabricação de óleos e borracha, construção de casas e artesanato (ICMBIO, 2014).

As áreas de produção para a agricultura familiar são áreas maiores, que podem chegar até a 100 ha, contando as áreas em uso e pousio, geralmente afastadas das comunidades. As áreas destinadas ao extrativismo geralmente são de uso comum, sem uso intensivo do solo para produção agrícola. Esta dinâmica foi respeitada na proposição do zoneamento e das

normas previstas no acordo de gestão, e passam a regular formalmente a forma de utilização nas diferentes zonas da UC (ICMBIO, 2014).

### 3.2 Dados de sensoriamento remoto e socioambientais

Para realizar a caracterização socioambiental das UCs, foram utilizados nesta pesquisa dados de diferentes fontes. Na primeira etapa foram obtidos dados de sensoriamento remoto para determinar comportamento do fogo, padrões de uso e cobertura da terra, desmatamento e dados meteorológicos das UCs. As variáveis socioambientais obtidas através do órgão gestor são definidas pelas classes de zoneamento das UCs e foram utilizadas para integrar a avaliação e estimar a exposição ao risco de incêndios florestais. Estes dados estão descritos nas seções a seguir.

#### 3.2.1 Dados de sensoriamento remoto

Foram utilizados dados de focos de calor, desmatamento, uso e cobertura, precipitação e temperatura de superfície oriundos de sensoriamento remoto (Tabela 3.1), descritos em detalhes abaixo.

Tabela 3.1: Dados de sensoriamento utilizados para acessar as variáveis da pesquisa.

Variáveis	Detalhamento	Fonte	Período
<b>Sensoriamento Remoto</b>			
<b>Focos de Calor</b>	Registrados pelos satélites: Terra*; Aqua*.	FIRMS/NASA	2003 a 2019
	Registrados pelos satélites: ATSR; GOES-08, 10, 12, 13, 16; NOAA-12, 15, 16, 18, 19 e 20; MSG-02, 03; METOP-B, C; NPP-375; TRMM.	BDQueimadas/ INPE	2003 a 2019
<b>Desmatamento</b>	PRODES: Mapeamento do desmatamento anual, com 6,25 ha de área mínima.	INPE	2008 a 2019
	DETER: Dado mensal de alerta da classe de desmatamento derivado do sensor MODIS, com 25 ha de área mínima.	INPE	2005 a 2017
	DETER: Dado mensal de alerta da classe de desmatamento derivado dos sensores WFI/AWiFS, com 3 ha de área mínima	INPE	2016 a 2019
<b>Uso e Cobertura</b>	Classes de floresta, pastagem, agricultura, corpos d'água, dentre outras, com 30m de resolução.	MapBiomias [5]	2003 a 2019
	Floresta secundária derivada do MapBiomias.	Silva-Júnior et al., (2020b)	2003 a 2019
	Rodovias federais e estradas	DNIT	2012
<b>Precipitação</b>	Dados diários e mensais do produtor CHIRPS com 5km de resolução espacial.	University of California	2003 a 2019
<b>Temperatura de Superfície</b>	Camada LST_Day_1km, derivado do produto MYD11A1.	AppEARS/ USGS	2003 a 2019

\*Satélites utilizados em todas as avaliações por estarem em operação durante toda a série. Os demais foram aplicados em análises específicas descritas abaixo.

Fonte: Produção da Autora.



Os dados de foco de calor foram utilizados e organizados para compor as avaliações de comportamento do fogo (Tabela 3.1). O produto *Thermal Anomalies/Fire* (MCD14DL), derivado do instrumento MODIS em operação durante toda a série temporal, é o dado base para obter as relações com as demais variáveis ambientais. Os dados estão disponibilizados pelo *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS), com informações de FRP, que disponibiliza a intensidade do fogo em *megawatts*.

Os dados de uso e cobertura da terra para a área de estudo foram derivados da coleção 5 do MapBiomass, do período entre 2003 e 2019, e do algoritmo que determina a idade das classes de vegetação secundária proposto por Silva-Junior et al. (2020b). Na análise do padrão de desmatamento *versus* focos de calor, foram utilizados três produtos de desmatamento do INPE, sendo eles: PRODES, DETER-MODIS e DETER-WFI/AWiFS (Tabela 3.1). O PRODES tem como período de referência para estimativa de taxa o ano PRODES - de 01 de agosto de um ano a 31 de julho do ano seguinte - para mapear desmatamento e disponibiliza o incremento anual de desmatamento desde 2008, enquanto os dados do DETER-MODIS e WFI/AWiFS são alertas de áreas de desmatamento.

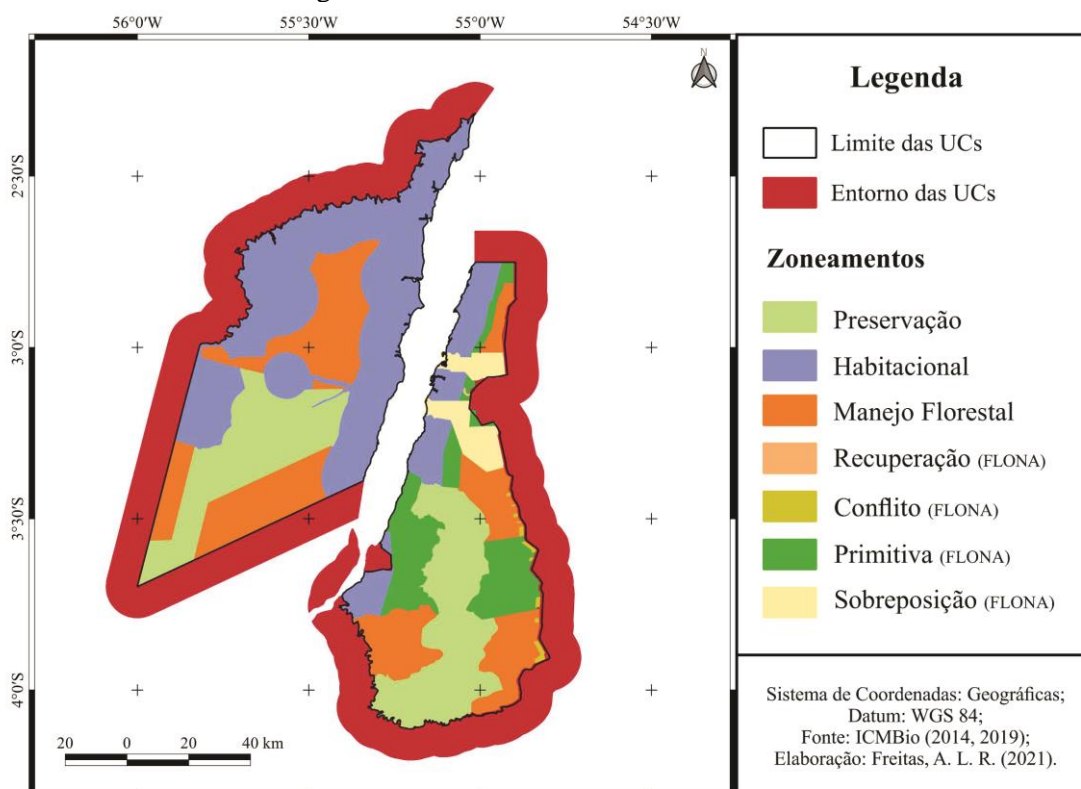
Adicionalmente, foram obtidos os demais dados de focos de calor disponíveis no BDQueimadas (INPE) para compor essa avaliação. A avaliação da relação desmatamento e fogo compõe a segunda parte do objetivo específico 2, que teve um recorte temporal menor do que a série avaliada, devido aos períodos em que os dados de desmatamento foram disponibilizados. Com a nova janela temporal, foi possível acrescentar outros dois sensores nesta avaliação, como explicado nas próximas seções.

Os dados de precipitação diária e o acumulado mensal do CHIRPS foram obtidos pelo *File Transfer Protocol* (FTP) da Universidade da Califórnia para toda a extensão da área de estudo. A temperatura de superfície foi obtida da camada LST\_Day\_1km do produto MYD11A1. Os valores são registrados pelo sensor MODIS durante a passagem da tarde do satélite *Aqua*. O dado tem 1 km de resolução espacial com valores de temperatura em Kelvin, convertidos pelo fator 0,02. O acesso e pré-processamento dos dados foram realizados através da *Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples* (AppEEARS), plataforma online que permite aos usuários acesso a subconjuntos de dados geoespaciais por parâmetros espaço-temporais e de banda/camada (USGS, 2021).

### 3.2.2 Dados Socioambientais

Para determinar as áreas de exposição, foram obtidos os zoneamentos das UCs para identificar as áreas de manejo, de recuperação, de preservação, populacional, dentre outras áreas (ICMBio 2014; 2019) (Figura 3.3). Essas zonas têm seus objetivos de manejo e normas específicas determinadas pelos planos de manejo de cada UC. A análise combinada desses dados possibilita representar a organização espacial das UCs e de sua ocupação.

Figura 3.3: Zoneamento e entorno das UCs.



Fonte: Produção da Autora.

A organização das UCs, bem como seus conjuntos de regras e normas, serve para orientar as suas gestões, o que poderá contribuir ou não para prevenir a ocorrência e o comportamento dos incêndios. Adicionalmente, foram delimitadas as áreas de entorno por um *buffer* de 10 km dos limites das UCs, como forma de avaliar a pressão externa a que estas UCs são submetidas. Para a FLONA, as zonas de amortecimento determinadas pelo plano de manejo foram consideradas na avaliação como áreas de entorno, uma vez que as comunidades não pertencem oficialmente à área.

### 3.3 Procedimentos metodológicos

#### 3.3.1 Análise da dinâmica espaço-temporal dos focos de calor

Entende-se que o fogo em florestas tropicais ocorre devido à ação antrópica, decorrente de práticas como corte e queima da cobertura arbórea e de diferentes formas de manejo da terra. Assim, para avaliar a dinâmica da ocorrência do fogo - objetivo específico I desta pesquisa - foram realizadas avaliações das características espaço-temporais dos focos de calor derivados dos satélites Terra e Aqua no período de 2003 e 2019 nas UCs, em 10 km de seus respectivos entornos e em uma grade celular. A resolução espacial da grade celular foi definida por 5 x 5 km, considerando o dado do CHIRPS, fazendo com que as análises passem por uma “degradação” na escala.

Na primeira fase da etapa de pré-processamento foram atribuídos os campos de ID, hora GMT, dia e local de ocorrência para cada foco. Em seguida, foi criada uma grade celular para o retângulo envolvente da área de estudo, utilizada na intercomparação dos dados de diferentes escalas e na construção dos mapas de exposição. Os *IDGrid* (índice da célula) foram atribuídos aos focos de calor conforme estes estivessem localizados dentro das células, para inserir na tabela de atributos de forma a compor todos os dados necessários para as análises realizadas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Exemplo de tabela de atributos.

<i>ID</i>	<i>Data</i>	<i>Hora GMT</i>	<i>Satélite</i>	<i>Local</i>	<i>FRP</i>	<i>IDGrid</i>
1	12/01/2003	14	Aqua	Flona	3.8	C10L06
2	24/09/2003	15	Aqua	Resex	5.7	C10L06
3	16/11/2003	11	Terra	ZAr	38.3	C21L06
4	21/11/2003	23	Terra	ZAf	1983.9	C21L06

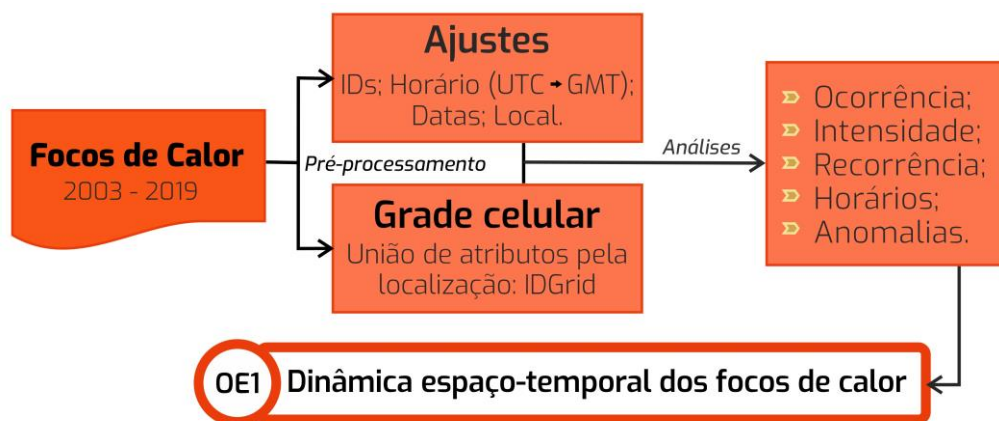
Fonte: Produção da Autora.

Após estes ajustes, foram realizadas as análises de ocorrência, intensidade, recorrência, horários e anomalias dos focos de calor, utilizando os seguintes procedimentos (Figura 3.4):

- i) Ocorrência: foi criado um gráfico para identificar a quantidade de focos que ocorreram nas UCs e entorno, agrupados como FLONA, RESEX e seus respectivos entornos;
- ii) Intensidade: foi obtido o *boxplot* para avaliar a distribuição e os valores discrepantes (*outliers*) dos dados para a FLONA e RESEX;

- iii) **Recorrência:** foram realizadas avaliações em tabelas dinâmicas para contar a quantidade de anos em que houve ocorrência de foco de calor em cada célula, determinando-se a frequência de anos em que cada célula queimou. Como resultado, obteve-se um mapa com os anos de recorrência, e uma de tabela com o número de células recorrentes por ano;
- iv) **Horários:** os dados foram organizados através da tabela dinâmica para obter o número de focos registrados pelos satélites em seus horários de passagem, e dispostos na forma de gráficos;
- v) **Anomalia:** Cada célula teve calculada a anomalia mensal e anual, segundo a Equação 2.1. Foram estabelecidas consultas para selecionar as células que tiveram 95% e 99% de confiança e especializadas de forma a compor os mapas anuais de anomalia. Os histogramas de anomalia foram separados por intervalos de confiança. Por fim, foi elaborado um *heatmap* do número de células de anomalia positiva mensal, série com 99% de confiança.

Figura 3.4: Etapas metodológicas utilizadas para a análise da dinâmica espaço-temporal da ocorrência de incêndios na área de estudo.



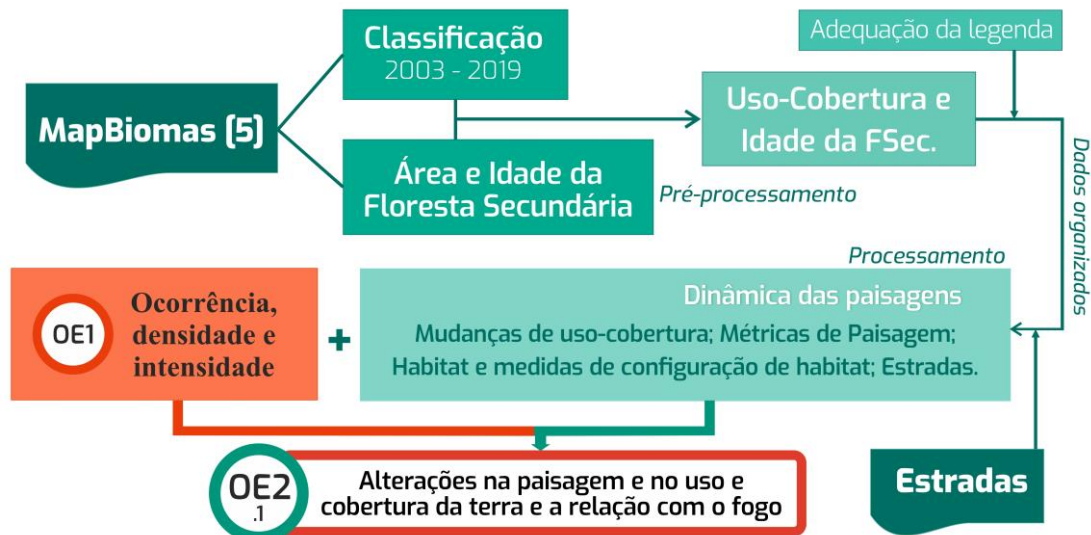
Fonte: Produção da Autora.

### 3.3.2 Mudanças de uso e cobertura da terra, alterações na paisagem e a interação com a dinâmica dos incêndios florestais

O objetivo específico 2 foi dividido em duas grandes etapas: a primeira, para avaliar as dinâmicas de uso e cobertura da terra e as configurações espaciais da paisagem, bem como sua relação com a dinâmica dos focos de calor, utilizando os dados do MapBiomas e as estradas. Na segunda etapa foram identificados os padrões anuais e mensais da ocorrência

de focos de calor em relação ao desmatamento do PRODES e DETER. No pré-processamento do dado MapBiomias, a classificação e o produto derivado de idade e área de vegetação secundária foram unidos por um cálculo de *rasters* (Figura 3.5), de maneira a conservar ambas as informações (classe e idade da vegetação secundária), com base na metodologia de Silva-Junior et al. (2020b).

Figura 3.5: Paisagem, mudanças de uso-cobertura e comportamento dos focos de calor.



Fonte: Produção da Autora.

Em seguida, foi realizada uma adequação da legenda (Tabela 3.3) e inserido o dado de estradas, para, com esses dados organizados, se realizar as etapas de processamento: primeiramente para determinar a dinâmica e a configuração espacial da paisagem e em seguida para obter a sua relação com o comportamento do fogo. Após os processamentos no produto de uso e cobertura da terra, foram determinadas as matrizes de transição das áreas entre 2003 e 2019 para cada UC e seus respectivos entornos.

Tabela 3.3: Adequação da legenda.

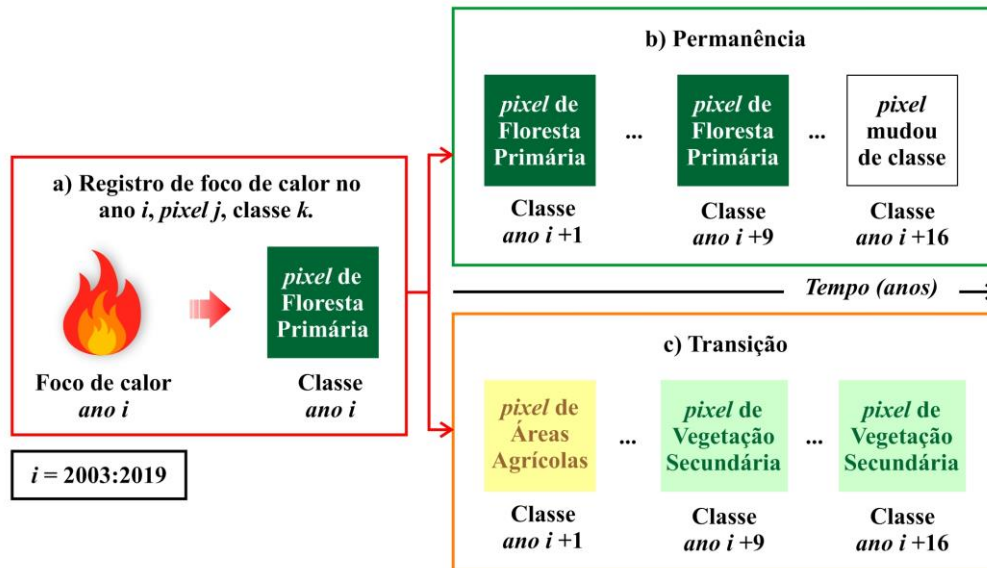
<i>Classes originais MapBiomias</i>	<i>Classes</i>
Floresta	Floresta Primária
	Vegetação Secundária
Formação Campestre; Pastagem; Soja; Outras Lavouras Temporárias	Áreas de Atividade Agrícola
Infraestrutura Urbana; Mineração; Rio, Lago e Oceano	Outros

Fonte: Produção da Autora.

A relação entre os focos de calor e as classes foi avaliada ano a ano em três procedimentos: i) idade da vegetação secundária; ii) permanência da classe após a detecção do foco de calor; iii) transição da classe após a detecção do foco de calor. As avaliações *i* e *ii* identificam os processos que ocorrem com a classe do *pixel* após a

degradação por fogo em determinado ano da série (Figura 3.6a). Após a degradação por fogo em determinado ano, a classe pode ou não passar por uma mudança em algum momento dos anos seguintes (Figura 3.6b). A metodologia de transição foi desenvolvida de forma complementar para identificar em quanto tempo depois ocorre a mudança para a nova classe (Figura 3.6c).

Figura 3.6: Exemplo do procedimento metodológico para obtenção do tempo de permanência e transição da classe após a degradação por fogo.



Fonte: Produção da Autora.

As métricas de paisagem dos dados matriciais (*rasters*) foram calculadas para a grade celular através do pacote *Landscape Metrics for Categorical Map Patterns* (versão 1.5.2) implementado no R (HESELBARTH et al., 2019). A descrição das métricas utilizadas estão dispostas na Tabela 3.4 e foram propostas por McGarigal e Marks, 1995. Adicionalmente, as mudanças de uso e cobertura da terra foram quantificadas para identificar as novas atribuições para áreas classificadas como florestas e mensuradas as distâncias euclidianas das bordas conforme metodologia utilizada por Silva-Junior et al. (2020a). As densidades de borda e de estradas foram obtidas pela mesma equação.

As características da paisagem influenciam na natureza e magnitude dos efeitos de borda dos fragmentos de floresta. Laurance et al. (2017) identificam elevada mortalidade de árvore em até 300 m no interior de fragmentos. Esse parâmetro foi utilizado para obter a área *core* das manchas de floresta primária, como uma medida de área de *habitat*. Como as áreas de entorno das UCs avaliada na pesquisa são responsáveis pela pressão exercida nestas unidades de conservação, a área fora deste limite foi desconsiderada.

Tabela 3.4: Métricas de paisagem utilizadas nesta pesquisa e respectivas descrições.

<i>Métricas</i>	<i>Equação</i>	<i>Descrição</i>
Percentual de área de cada classe	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	É a porcentagem da paisagem (célula) composta pelo tipo de mancha correspondente $a_{ij}$ é a soma das áreas (km <sup>2</sup> ) de mancha $ij$ ; e $A$ é a área total da célula (km <sup>2</sup> ).
Número de manchas	$ni$	É igual ao número de manchas do tipo de mancha correspondente.
Área média das manchas	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{ni} \left( \frac{1}{10^6} \right)$	É a soma das áreas (m <sup>2</sup> ) de todos os remendos do tipo de mancha correspondente, dividida pelo número de mancha do mesmo tipo, dividido por 10 <sup>6</sup> (conversão para km <sup>2</sup> ).
Densidade de borda	$\frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{A}$	Soma do comprimento de borda das manchas de uma determinada classe, dividido pela área da paisagem e multiplicado por 10 <sup>6</sup> (conversão para km <sup>2</sup> ).

Fonte: Produção da Autora.

A relação entre as variáveis resultantes da configuração da paisagem e do foco de calor (OE2), foi avaliada a partir de curvas ajustadas utilizando o modelo de regressão *Locally Weighted Scatterplot Smoothing* (LOESS) (CLEVELAND; GROSSE; SHYU, 1992; CLEVELAND; LOADER, 1996). Essa estratégia foi utilizada para quantificar a relação entre paisagem e fogo, onde os ruídos, pontos de dados esparsos ou inter-relacionamentos fracos interferem na sua capacidade de ver uma linha de melhor ajuste (TATE et al., 2005). Foi utilizado o fator de suavização de 0,5 e 95% (*default*) de confiança no *bootstrap* para a plotagem.

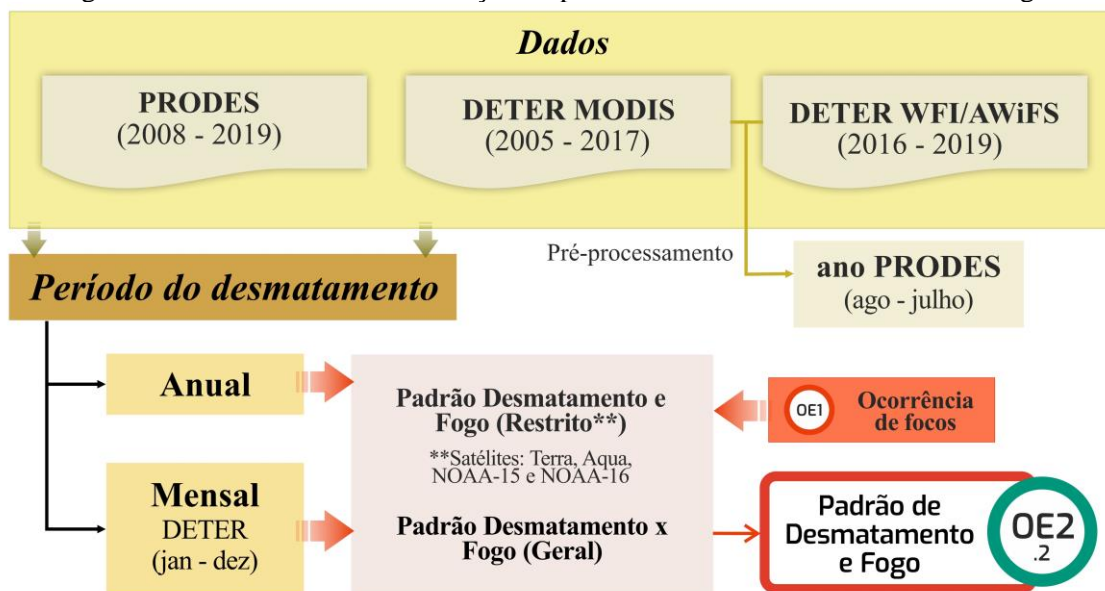
Para avaliar a relação do foco de calor com o padrão anual e mensal do desmatamento, inicialmente foram obtidos os focos de calor para determinar dois padrões espaciais, denominados aqui padrão restrito e panorama geral, descritos a seguir (Figura 3.7). Este procedimento introduz uma incerteza nas análises devido a incompatibilidade entre as escalas espaciais dos dois conjuntos de dados. No entanto, este fator é minimizado, posto que a avaliação restrita foi colocada separadamente para os resultados.

O padrão restrito, baseado na observação dos dados de focos de calor registrados pelos satélites Terra, Aqua, NOAA-15 e NOAA-16 objetivou fornecer uma caracterização temporal para todo o período em que os dados de desmatamento foram utilizados (2005 - 2019). O panorama geral foi obtido como forma de avaliar se o comportamento observado na situação controlada se mantém ao acrescentar os dados de focos de calor derivados de sensores que estiveram ativos em algum momento da série, aumentando, desta forma, a probabilidade de detecção de um foco de calor, conforme exemplificado na Figura 2.3. Esta análise permite aumentar a probabilidade do registro de focos de calor em áreas e alertas de desmatamento, dado o aumento do número de observações e horários

de passagens dos diferentes satélites. Por outro lado, as análises podem introduzir alguma incerteza sobre a localização exata do fogo ativo e o tipo de uso ou processo de desmatamento devido à diferença entre as escalas espaciais dos dados. No entanto, entende-se que os principais padrões emergentes da relação entre o foco de calor, uso e mudança da cobertura da terra serão capturados por este método.

Objetivando-se comparar os dois tipos de dados, as análises foram precedidas pela organização em dois períodos. O primeiro considerou os meses do ano PRODES (agosto do ano anterior a julho do ano de referência) para agrupar os dados de focos de calor e os alertas do DETER na avaliação do padrão anual de desmatamento e fogo. Esse procedimento não foi necessário para a avaliação mensal, uma vez que os dados de alerta do DETER e de focos de calor são obtidos por mês (Figura 3.7).

Figura 3.7: Procedimentos de obtenção do padrão desmatamento e dinâmica do fogo.



Onde: \*\* refere-se ao padrão restrito, que utiliza apenas os sensores que estiveram ativos durante todo o período de análise.

Fonte: Produção da Autora.

Para gerar as informações das interações entre os dados foi realizada a intersecção dos focos de calor sobre as áreas e alertas de desmatamento. O resultado desse procedimento foi avaliado em planilhas para obter-se o padrão de desmatamento e a ocorrência do fogo. Com isso é possível determinar se houve ou não a ocorrência de fogo antes e/ou depois do desmatamento registrado. Esse resultado é importante para explorar o uso do fogo como agente de degradação florestal antes destas áreas serem desmatadas.



### 3.3.3 Condições meteorológicas e a dinâmica dos incêndios florestais

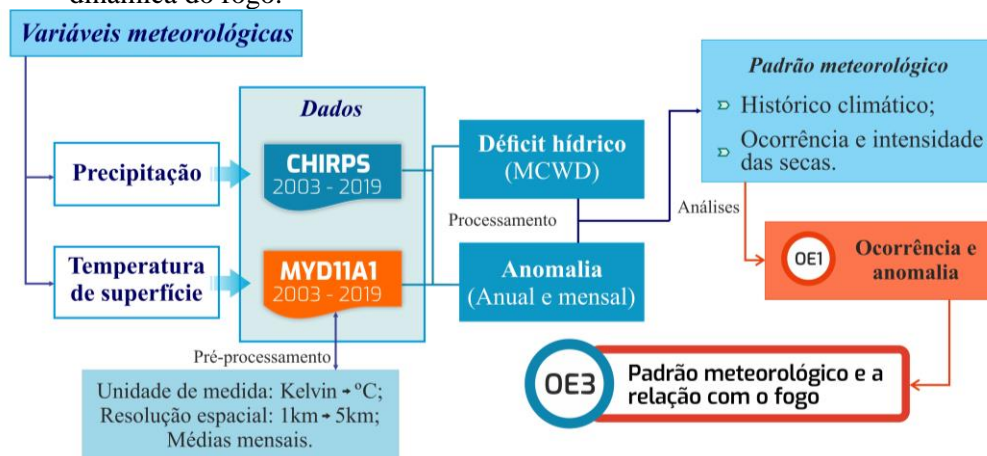
Para avaliar as condições meteorológicas das áreas de estudo, foram obtidos os dados de precipitação do CHIRPS e de temperatura de superfície MYD11A1, com 5 km e 1 km de resolução espacial, respectivamente. Na etapa de pré-processamento do MYD11A1, foram realizados os procedimentos de conversão dos valores de temperatura disponibilizados em Kelvin pelo produto, para graus Celsius no R (Equação 3.1). Os *pixels* foram agregados para a resolução de 5 km através do valor médio dos *pixels* para garantir a compatibilidade espacial dos dados de temperatura e precipitação, e em seguida foi feito o cálculo das médias mensais (Figura 3.8).

$$T_{i,j} = (V_{i,j} * 0,02) - 273,15 \quad (3.1)$$

Onde:  $T_{i,j}$  (T temperatura do pixel na posição  $i,j$ );  $V_{i,j}$  (valor do pixel na posição  $i,j$ ); 0,02 (fator de conversão para Kelvin); e 273,15 (valor de conversão para °C).

As anomalias de temperatura de superfície e precipitação e o MCWD foram calculados pelas Equações 2.1 e 2.2, para caracterizar o comportamento climático na área de estudo e avaliar os períodos e intensidade das secas. Para avaliar a relação entre os produtos de precipitação, temperatura de superfície, anomalia, déficits hídricos e o comportamento do fogo no R foram obtidos os valores de *pixels* com intersecção com os dados de focos de calor. Em seguida, esse resultado foi organizado em planilhas para relacionar os dados das precipitações no dia do foco de calor registrado com o acumulado nos 7 e 15 dias que antecederam o foco de calor, bem como a quantificação dos dias sem chuva no intervalo de 15 dias. O mesmo procedimento foi realizado com os dados de temperatura de superfície.

Figura 3.8: Etapas metodológicas para determinar o padrão meteorológico e sua relação com a dinâmica do fogo.



Fonte: Produção da Autora

A relação estatística entre a variação dos dados meteorológicas (chuva e temperatura) e a ocorrência e comportamento das queimadas e incêndios na região (focos de calor) foi realizada conforme descrito na Seção 3.3.2.

### 3.3.4 Construção do índice de exposição a incêndios florestais

Para subsidiar a gestão do risco e dos impactos dos incêndios florestais nas UCs, foram obtidos indicadores socioambientais para compor a exposição a estes eventos, utilizando resultados de procedimentos detalhados nas seções anteriores. A abordagem da exposição utilizada nesta pesquisa visou identificar o conjunto dos elementos expostos em função da dinâmica espaço-temporal, podendo assim produzir-se o entendimento sobre situações mais ou menos perigosas (ORTEGA et al., 2012).

Tabela 3.5: Componentes do índice de exposição a incêndios florestais (IEif).

Dimensão	Indicadores	Descrição	Variáveis
<b>Dinâmica dos Focos de Calor</b>	Anomalia de Focos	Quando a ocorrência de focos supera o padrão normal.	Indicador simples: nº de anos de anomalia positiva na célula.
	Recorrências de incêndios	Quantidade de vezes que um determinado local queimou.	Indicador simples: nº de anos de recorrência.
	Intensidade de incêndios	Altos valores levam a uma maior emissão de material particulado.	Indicador simples: intensidade média dos focos na série temporal.
<b>Paisagem</b>	Qualidade da floresta	A área com maior exposição tem maior atuação de perturbações antrópicas diretas.	Indicador simples: inversão semântica do percentual de área core na célula em 2019.
	Uso agrícola	A atividade antrópica é a principal causadora da ignição do fogo.	Indicador simples: percentual da classe produtiva em 2019.
	Densidade de estradas	A presença de estradas na paisagem contribui para a ocorrência de incêndios.	Indicador simples: comprimento da estrada (km) / área da célula (km <sup>2</sup> ).
<b>Meteorológica</b>	Anomalia de Chuva	Quando a precipitação é inferior ao padrão normal.	Indicador simples: nº de anos de anomalia negativa na célula.
	Anomalia de Temperatura	Quando a temperatura média anual supera o padrão normal.	Indicador simples: nº de anos de anomalia positiva na célula.
	Déficit Hídrico	Quando a precipitação não supre a necessidade hídrica da floresta.	Indicador simples: valor em módulo (sem sinal) em 2019.
<b>Gestão Territorial</b>	Gestão	Mapas de zoneamento do plano de manejo das UCs.	Indicador composto: percentual da área da zona na célula.

Fonte: Produção da Autora.

Nesta pesquisa utilizou-se a abordagem desenvolvida por Anazawa (2012), na qual se realiza a transformação linear nos indicadores simples para produzir índices adimensionais que permitem a espacialização e a observação da vulnerabilidade através

de uma escala de representação de natureza relacional (Equação 3.2). A escala varia de 0 a 1, onde o valor “1” indica uma maior exposição. Para o indicador qualitativo foram atribuídos valores estratificados de exposição das áreas de zoneamento (descrito na Seção 3.2.4.2).

$$x_{i,j} = \frac{(Vobs_{ij}-Vmín)}{(Vmáx-Vmín)} \quad (3.2)$$

onde: x é o valor do indicador resultante da transformação linear na posição ij; Vobs<sub>i,j</sub> é o valor da variável na posição i,j; Vmín é o valor mínimo do variável; Vmáx é o valor máximo do variável.

O Índice de Exposição a Incêndios Florestais (IEif) é calculado pelas somas dos indicadores resultantes das transformações lineares conforme apresentados na Figura 3.9. O índice é composto por quatro dimensões: dinâmica dos focos, paisagem, condições meteorológicas e gestão territorial. Por sua vez, as variáveis que representam esses fatores são somadas e transformadas no índice sintético final, o IEif. O detalhamento desses procedimentos é apresentado a seguir.

Figura 3.9: Procedimento para o cálculo do Índice de Exposição a Incêndios Florestais.

Entrada	Transformação	Soma Final	Dimensão	
Nº de anos de anomalia positiva de focos.	T1 (0 a 1)	Transformação de (T1 + T2 + T3) = V1	Fogo (0 a 1)	Transformação de (V1 + V2 + V3 + V4) = <b>IEif</b>
Nº de anos de recorrência.	T2 (0 a 1)			
Intensidade média dos focos.	T3 (0 a 1)			
Inversão semântica do percentual de área core na célula em 2019.	T1 (0 a 1)	Transformação de (T1 + T2 + T3) = V2	Paisagem (0 a 1)	
Percentual da classe produtiva em 2019.	T2 (0 a 1)			
Densidade de estradas na célula (km/ km²).	T3 (0 a 1)			
Nº de anos de anomalia negativa de chuva.	T1 (0 a 1)	Transformação de (T1 + T2 + T3) = V3	Meteorológica (0 a 1)	
Nº de anos de anomalia positiva de temperatura de superfície.	T2 (0 a 1)			
Valor em módulo do déficit hídrico em 2019.	T3 (0 a 1)			
Percentual da zona na célula.	T1 (0 a 1)	V4	Institucional (0 a 1)	

Fonte: Produção da Autora.

### 3.3.4.1 Construção dos indicadores simples

Para determinar a dimensão do fogo que caracteriza a exposição dos elementos aos eventos de queimada e/ou incêndio florestal, foram somados o número de anos com

anomalia positiva média de ocorrência de focos na célula. Em seguida, foi obtido o número de anos com recorrência e calculada a intensidade média dos focos de calor na célula. Nesta etapa, quanto maior o número de anos anômalos, recorrência e FRP médio elevado, maior será a exposição dos elementos (ex.: floresta, agricultura e populações), representados pela célula da grade regular. Os valores encontrados foram utilizados para calcular os índices adimensionais de cada indicador.

O índice da paisagem foi determinado pelos indicadores de área *core*, área de uso agrícola e densidade de estradas. Uma inversão semântica ( $x = 100 - y$ ) foi aplicada no indicador do percentual de área *core* em 2019 para que o maior valor do percentual da área da célula representasse uma maior exposição da floresta às perturbações antrópicas. O indicador foi escolhido por representar o percentual da classe de floresta primária sob maior ameaça do efeito de borda. Após este procedimento, os valores dos indicadores foram transformados em valores adimensionais.

O número de anos com anomalias negativas de chuvas e de anomalias positivas de temperatura de superfície, associado ao valor de déficit hídrico de 2019 foi utilizado para caracterizar o padrão meteorológico favorável à propagação dos incêndios florestais. Quanto mais forte a associação entre a dimensão meteorológica e a propagação do fogo para dentro da floresta, maior a exposição das florestas aos eventos de incêndios.

#### **3.3.4.2 Construção dos indicadores compostos**

A dimensão de gestão territorial é determinada pelo mapeamento realizado por equipes do ICMBio em parceria com as populações das UCs para definir zonas e regras de uso. Partindo do pressuposto de que estas regras são obedecidas, acredita-se que as áreas abrangidas por essas zonas estão mais ou menos associadas à exposição a incêndios. O indicador é composto por 3 e 7 zonas para a RESEX e FLONA, respectivamente, e adicionalmente a área de entorno definida nesta pesquisa. Foi adotada uma escala de pesos determinados a partir da descrição destes para ponderar matematicamente a importância e a influência de cada zona para a exposição a incêndio (Tabela 3.6).

As áreas destinadas a preservação de ambas as UCs e as primitivas da FLONA receberam o menor peso, uma vez que não são permitidas interferências humanas, o que diminui a exposição a possíveis ignições por atividades agrícolas. Nas zonas a que foi atribuído o peso dois, considerou-se que os usos desenvolvidos pelas populações respeitam as regras

de conservação estabelecidas pela gestão das UCs. No entanto, a presença antrópica pode ser responsável pela ignição de escape de incêndios, que, aliada às demais condições apresentadas na pesquisa, pode causar grandes incêndios.

O peso três foi atribuído a áreas que já estão em algum estágio de degradação, o que as torna mais expostas à atuação do fogo. Por fim, foi atribuído peso quatro para as áreas que não desenvolvem atividades condizentes com a conservação esperada para FLONA e suas áreas de entorno. A organização proposta evidencia a importância de considerar as individualidades de cada UC para realizar as suas respectivas avaliações. Os valores percentuais de cada zona presente na célula foram ponderados por seus respectivos pesos, somados e, por fim, transformados no indicador institucional para cada UC.

Tabela 3.6: Descrição das atribuições de pesos para as zonas das UCs.

UC	Zona	Descrição	Peso
<b>RESEX</b>	Preservação	Área destinada a manutenção do ecossistema natural, sem interferência de ações humanas, onde espécies de flora e fauna a utilizam para a reprodução, crescimento e trânsito do fluxo gênico.	*1
	Manejo florestal comunitário sustentável	Prevê condições de uso menos intensivas que a Habitacional: “cinturão de proteção” a da Preservação	*2
	Habitacional	Permite o uso do solo e dos recursos naturais: destinada a instalação de infraestruturas de moradia, roçados, e demais estruturas que abrangem áreas e necessidades primárias das comunidades.	*2
<b>FLONA</b>	Primitiva	Onde tenha ocorrido pequena ou mínima intervenção humana, contendo espécies da flora e da fauna, monumentos e fenômenos naturais de relevante interesse científico.	*1
	Preservação	Alto grau de integridade, matriz de repovoamento, com a finalidade de preservar nascentes de cursos d’água.	*1
	Habitacional	Áreas destinadas à moradia das populações tradicionais, ao uso da terra, instalação de infraestruturas, de gestão e de desenvolvimento socioeconômico.	*2
	Sobreposição	Ocupa duas áreas em interface territorial (comunidades tradicionais e povos indígenas).	*2
	Manejo florestal	Áreas de floresta nativa com potencial econômico para o manejo sustentável dos recursos florestais.	*2
	Recuperação	Áreas em estágio avançado de degradação da cobertura florestal e/ou dos solos.	*3
	Uso conflitante	São áreas ocupadas por atividades como: agropecuária, mineração e garimpo.	*4
<b>Entorno</b>	Compreende as áreas que foram desafetadas da FLONA e são áreas em que as ameaças convivem com as oportunidades de integração das UCs com seu entorno imediato.	*4	

Fonte: Adaptado de ICMBIO (2014; 2019).

Em seguida foram calculados os índices compostos das variáveis dinâmica dos focos de calor, paisagem e condição meteorológica a partir da soma e transformação de seus valores entre 0 e 1 resultantes de seus respectivos indicadores. Foi calculado um índice sintético de exposição ambiental resultante da soma e transformação dos valores obtidos na etapa anterior. Esse resultado foi obtido para a área de estudo e serve de base para a determinação dos seus respectivos índices de exposição individuais.

O índice sintético IEif é resultante da soma do índice de exposição ambiental do Tapajós e gestão territorial de cada UC, seguida pela nova transformação de seus valores para 0 e 1, conforme a metodologia apresentada na Figura 3.9.

## 4 RESULTADOS

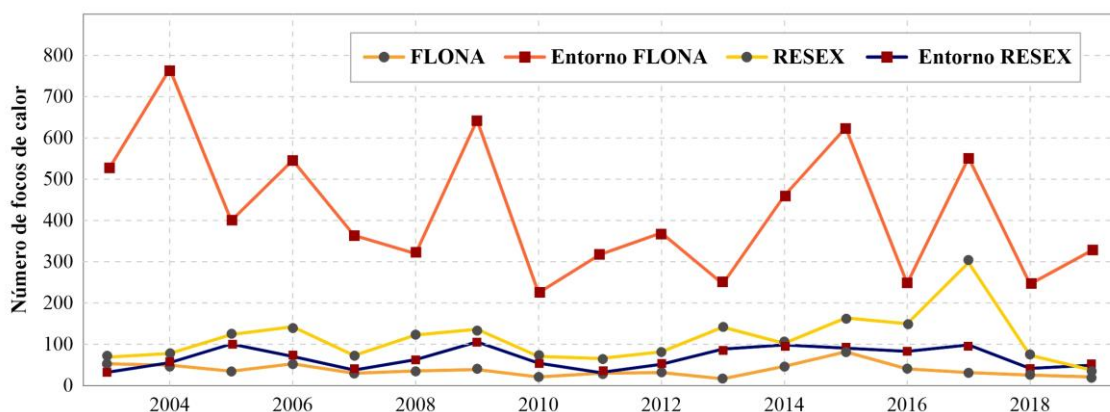
Esta Seção está subdividida em quatro tópicos, estruturados na seguinte ordem: i) Dinâmica espaço-temporal das características dos focos de calor (Objetivo Específico I); ii) Dinâmica da paisagem: relação com os focos (Objetivo Específico II); iii) Comportamento meteorológico: relação com os focos (Objetivo Específico III); e, iv) Índice de exposição a incêndios florestais (IEif) (Objetivo Específico IV).

### 4.1 Dinâmica espaço-temporal das características de focos de calor

A ocorrência total de focos de calor derivados dos satélites Terra e Aqua na área de estudo difere nas dinâmicas internas das UCs e seus respectivos entornos. O valor médio de focos de calor na FLONA e RESEX é de 38 e 114, respectivamente (Figura 4.1). Nas respectivas áreas de entorno, os valores foram de 422 e 68. Em 2013 a FLONA registrou o menor número de focos de calor da série: o valor foi 55% mais baixo que a média. Por outro lado, no mesmo ano na RESEX foram registrados 24% acima da média, considerando que 2017 registrou o maior número, com 298 focos de calor.

Os valores encontrados apresentam um comportamento diferente entre os anos nas UCs e contrastam com as áreas de entorno. No entorno da FLONA, os anos de picos foram 2004, 2009 e 2015, com registros superiores a 600 focos de calor. Para o entorno da RESEX, os picos ocorreram nos anos de 2005 e 2009, com pouco mais de 100 registros.

Figura 4.1: Gráfico de ocorrência temporal de focos de calor (2003-2019).



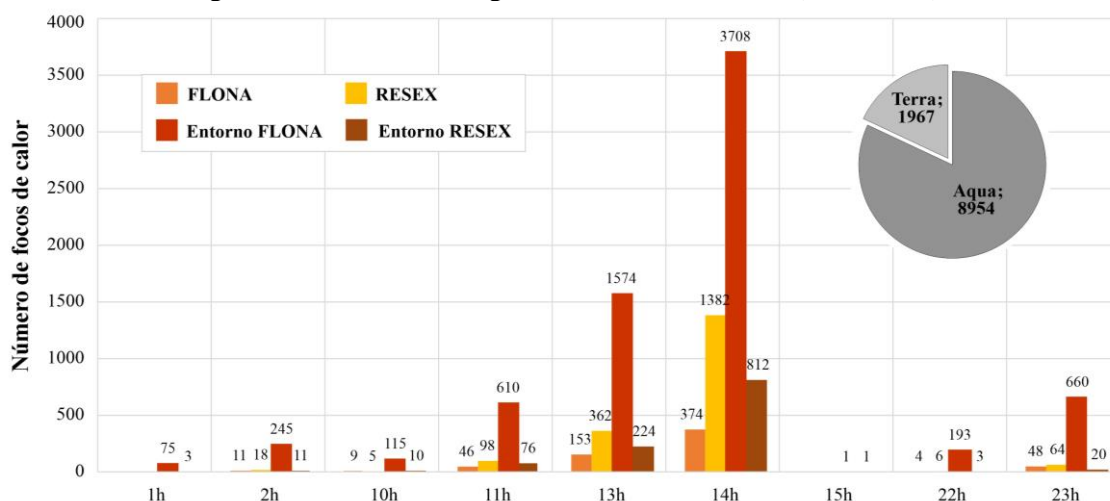
Fonte: Produção da Autora.

A avaliação do horário de detecção permite a identificação de indícios de eventos de incêndio, uma vez que a ocorrência de uma chama durante a noite/madrugada poderia indicar um fogo sem controle. Ao avaliar a detecção dos focos de calor, segundo as

passagens dos satélites Terra e Aqua, observou-se que há registros em todas as passagens dos satélites ao longo da série temporal, sugerindo a presença de focos de incêndios (Figura 4.2). Identifica-se que a passagem do satélite Aqua, entre 13 h e 14 h, é o momento em que ocorre a maioria dos registros, aproximadamente 64,8% na FLONA e 31% na RESEX.

Dentre os horários em que há passagem do satélite Terra, às 10 h observa-se um menor número de focos. Posto que ambos os satélites possuem o sensor MODIS com as mesmas especificações técnicas e que há maior probabilidade de imagens livres de nuvens no período da manhã, pode-se inferir que o final da manhã e o início da tarde são os períodos em que há maior início de novos pontos de ignição. Observa-se também que 12,5% dos focos são detectados entre 22 h e 2 h do dia seguinte, sugerindo que estes focos estavam associados a incêndios.

Figura 4.2: Horários de registros dos focos de calor (2003-2019).



Onde: os horários estão em UTC-3; passagens do satélite Terra às 10h, 11h, 22h e 23h, e o Aqua às 1h, 2h, 13h, 14h e 15h.

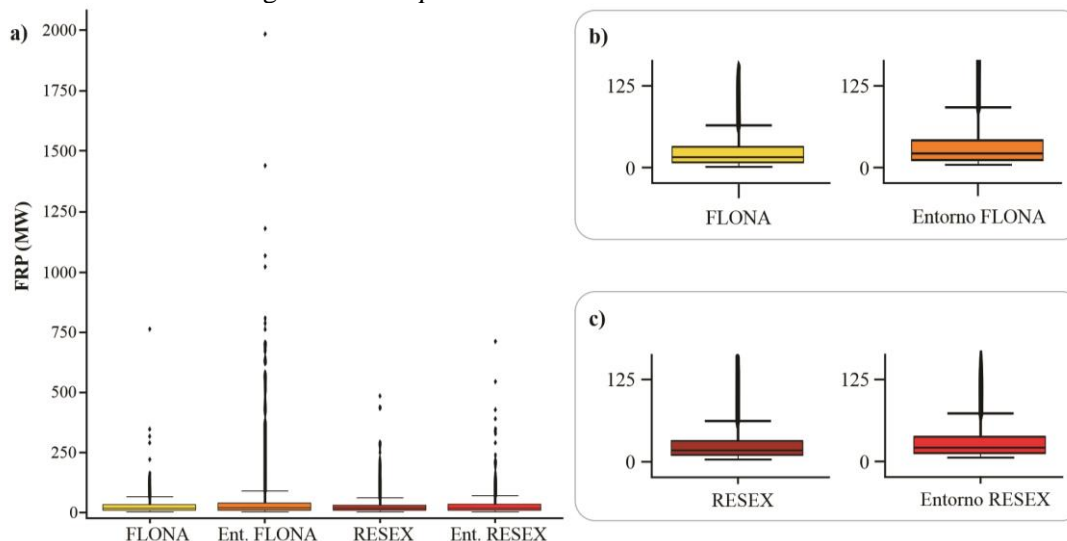
Fonte: Produção da Autora.

Avaliando-se a intensidade dos focos de calor, observa-se que em ambas as UCs têm-se uma distribuição assimétrica positiva, ou seja, a maioria dos focos possui baixos valores de intensidade de FRP. No entorno da FLONA, a variabilidade e a ocorrência de outliers são maiores (Figura 4.3). Essa variabilidade é justificada pela presença de diferentes tipos de combustíveis disponíveis e pelas configurações da paisagem nas áreas, que serão apresentadas na Seção 4.2. Os valores médios da FRP da FLONA e seu entorno, e RESEX



e seu entorno são de 27,8 MW, 42,8 MW, 26,6 MW e 31,6 MW, respectivamente. Esses valores não são estatisticamente diferentes.

Figura 4.3: *Boxplot* de intensidade dos focos de calor.



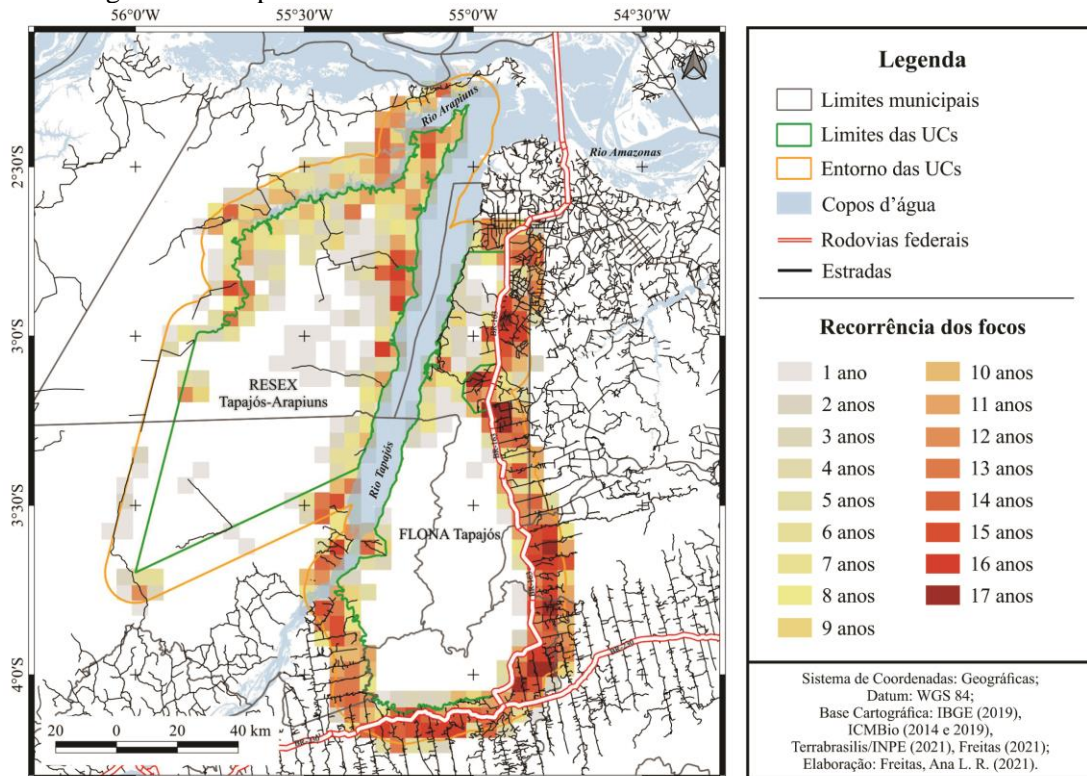
Onde: intensidade dos focos nas UCs e entornos; a) valores mínimos e máximos com *outliers*; b) variabilidade na FLONA e entorno; c) variabilidade na RESEX e entorno.

Fonte: Produção da Autora.

A Figura 4.4 permite a identificação do número de anos com recorrência de focos na grade regular, evidenciando desde os locais com ausência do fogo até as regiões com recorrência no período de 17 anos, abordados nesta pesquisa. Na área de estudo, 45% das células não tiveram ocorrência de focos de calor, 22% tiveram recorrência de até 5 anos e 18,7% com mais de 10 anos, dos quais 6,2% registraram focos de calor em toda a série temporal, sendo estas em sua maioria localizadas no entorno da FLONA. As células da RESEX às margens dos rios Tapajós e Arapiuns apresentam as maiores recorrências por serem áreas utilizadas para desenvolver as atividades agrícolas.

Mais de 36% das células com área total ou com a maior parte inserida na FLONA tiveram recorrência de foco de calor, das quais 23% registraram focos de calor uma vez. Por outro lado, no entorno da FLONA, 96% das células tiveram recorrência de focos, das quais três tiveram registros de focos de calor em um ano da série. Na RESEX e seu entorno, o percentual de células com recorrência com até 16 e 15 anos é de 48,5% e 52,6%, respectivamente, apesar do número de células com recorrência.

Figura 4.4: Mapa do número de anos com recorrência de focos de calor na célula.



Fonte: Produção da Autora.

Na Figura 4.5 apresenta-se o percentual de contribuição para todos os anos, em cada UC, a fim de caracterizar o comportamento de recorrência do foco de calor mapeado. Identifica-se que o número de células com focos de calor registrados pela primeira vez na série diminuiu desde 2007, embora tenham ocorrido picos em 2009, 2015 e 2016. Frente ao comportamento na série, os anos de 2015 e 2016 chamam atenção pois nos anos anteriores havia uma estabilidade no número de detecções, com a média anual de 2,5 e 6,1 novas células queimando pela primeira vez na FLONA, RESEX e entornos, respectivamente. Durante 2015/16, foram detectados 962 e 522 focos de calor e um aumento para 16 e 26 novas células, respectivamente, para a FLONA e a RESEX. Na RESEX, durante esses anos, foram alcançadas áreas mais ao interior da unidade (Figura 4.5b). Relata-se que nos anos de 2015/16 ocorreu o fenômeno do *El Niño*, o que acarretou a diminuição de chuvas na região. Os resultados referente às análises meteorológicas estão apresentados na Seção 4.3.

O ano de 2017 foi o que apresentou o maior número de ocorrências de focos de calor na área de estudo, sendo três células com focos de calor registrados pela primeira vez e 57% das células com recorrência entre 10 e 15 anos. Esse resultado ilustra um comportamento

recorrente e constante da degradação destas áreas devido à ação antrópica, representando um maior risco nestas células a repetidas ocorrências de fogo.

Figura 4.5: Número de células para cada recorrência anual de focos de calor para a área de estudo.

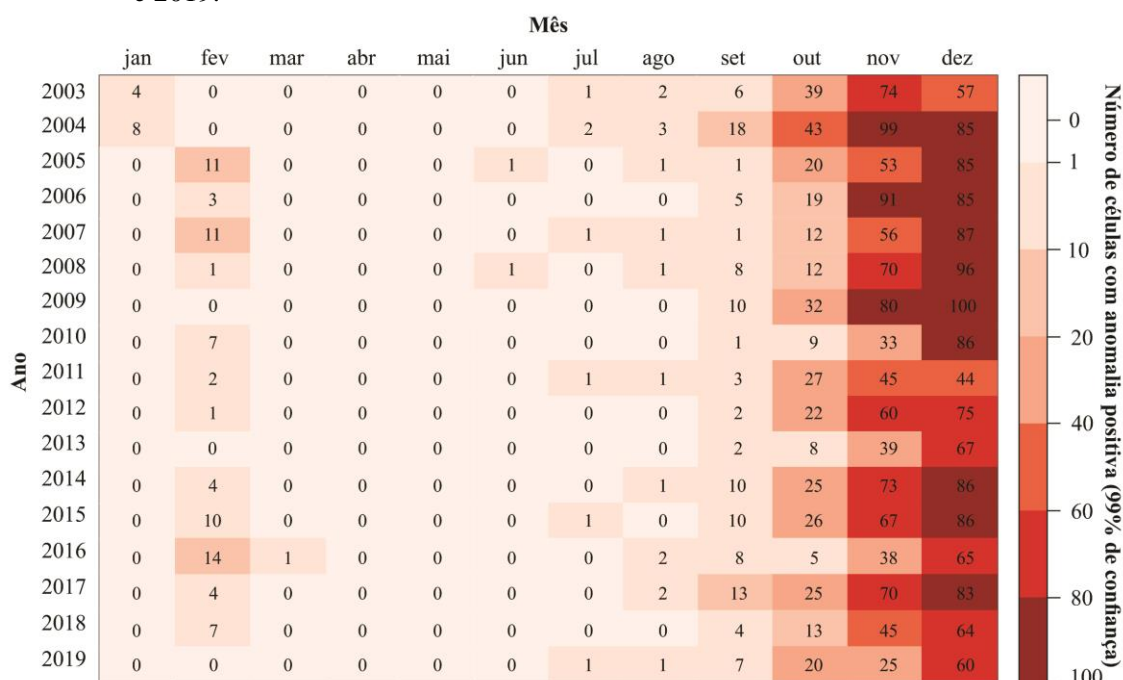
a) FLONA e entorno																	
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2003	141																
2004	40	116															
2005	14	33	88														
2006	11	20	43	81													
2007	5	11	17	37	63												
2008	2	5	13	17	33	48											
2009	4	7	10	14	28	41	43										
2010	1	4	4	7	13	18	24	33									
2011	2	2	7	6	7	14	26	23	28								
2012	2	2	3	6	8	9	18	27	21	27							
2013	3	2	1	4	7	6	13	10	22	16	23						
2014	1	3	1	6	7	8	8	21	18	23	19	23					
2015	6	6	6	5	6	11	8	17	24	18	20	19	22				
2016	6	3	4	0	2	6	8	6	13	19	13	12	10	18			
2017	0	0	4	5	4	6	10	8	6	16	23	17	15	12	17		
2018	0	0	1	2	1	0	5	3	7	6	11	19	13	16	11	12	
2019	2	3	0	0	4	2	2	10	2	5	7	8	21	12	15	14	10
b) RESEX e entorno																	
2003	56																
2004	38	31															
2005	34	32	24														
2006	20	37	21	16													
2007	12	10	17	15	8												
2008	9	11	20	19	18	8											
2009	14	13	17	22	18	14	7										
2010	2	6	8	11	11	9	12	7									
2011	3	9	7	5	12	9	6	4	3								
2012	1	4	8	9	9	19	5	9	7	2							
2013	4	4	9	15	12	10	21	7	8	6	2						
2014	4	3	4	6	9	12	11	17	9	7	6	2					
2015	10	3	8	7	12	9	17	11	13	9	7	5	1				
2016	20	8	4	8	7	6	8	20	7	11	5	8	5	1			
2017	3	5	3	3	7	8	6	6	18	7	10	4	9	5	1		
2018	1	0	2	1	2	5	3	1	5	11	7	7	2	6	2	1	
2019	0	3	3	2	1	4	1	2	4	5	8	5	5	3	4	2	0

Quantidade de células com ocorrência de focos de calor por ano pela 1ª até a 17ª vez.

Fonte: Produção da Autora.

O padrão intra-anual das anomalias de focos de calor para as UCs e entorno é apresentado na Figura 4.6. Observa-se que entre março e julho ocorre o menor número de anomalias na série, com 10 células. O maior número de células com anomalias positivas no período de estudo ocorre nos meses de outubro a dezembro, responsáveis por, em média, 99 células por ano. Em toda a série temporal, oito anos superam os 20% de células com ocorrência de focos de calor, sendo 2004 o de maior número, 29,5%, seguido pelos anos de 2009 e 2006, com 25,4% e 23,2%, respectivamente.

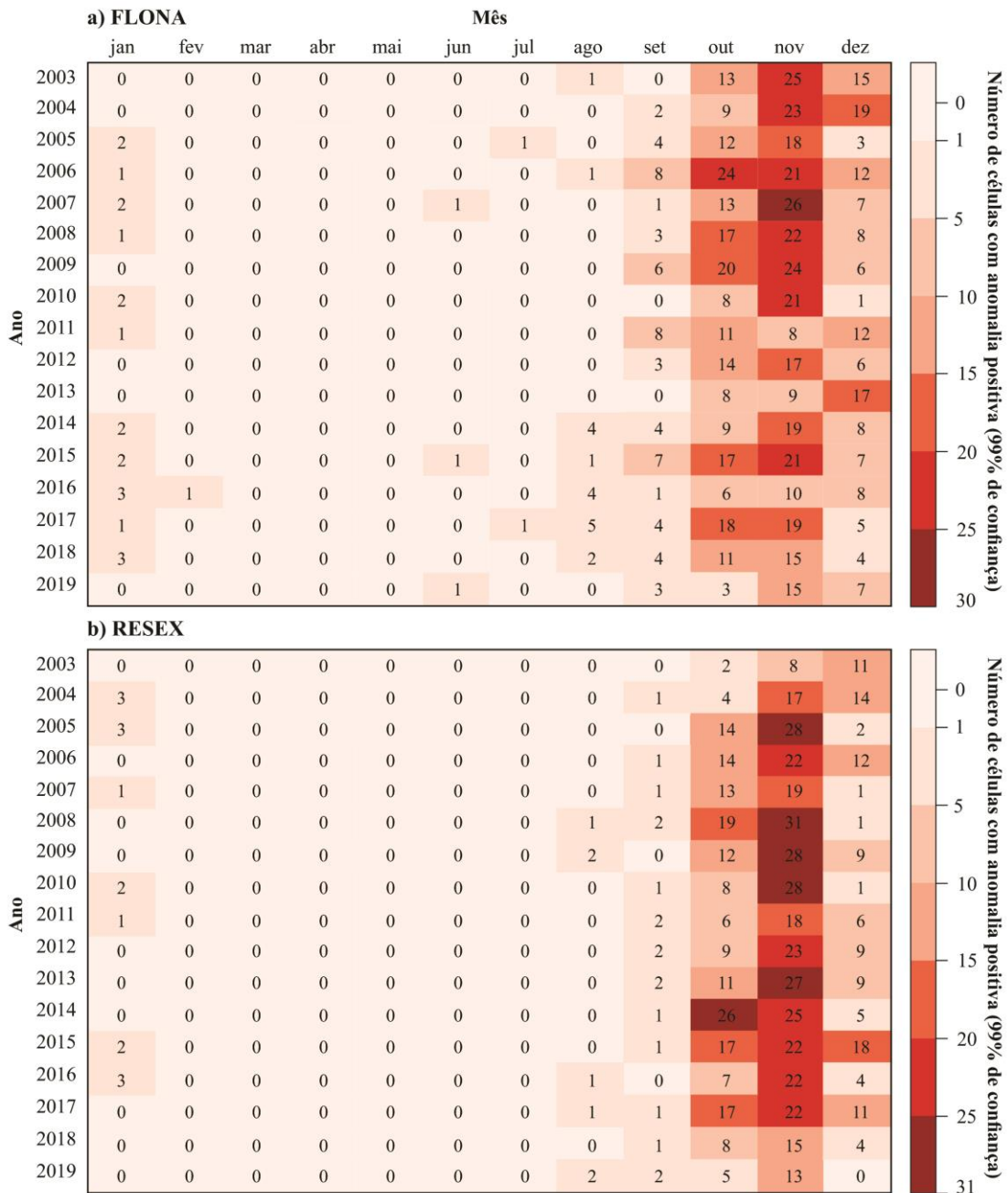
Figura 4.6: *Heatmap* de anomalia positiva mensal de focos de calor na área de estudo entre 2003 e 2019.



Fonte: Produção da Autora.

No interior das UCs, os meses de maior ocorrência dessas anomalias segue um padrão semelhante ao encontrado para a área de estudo (Figura 4.7). A diferença é que a diminuição do número de células com anomalia positiva ocorre em dezembro. Por outro lado, o período com menor ocorrência de células com anomalia positiva de focos de calor é identificado entre fevereiro e agosto. Observa-se assim que no interior das UCs o comportamento subsazonal do fogo é menor do que ao comparar com o comportamento obtido para a área de estudo.

Figura 4.7: *Heatmap* de anomalia positiva mensal de focos de calor no interior das UCs entre 2003 e 2019.



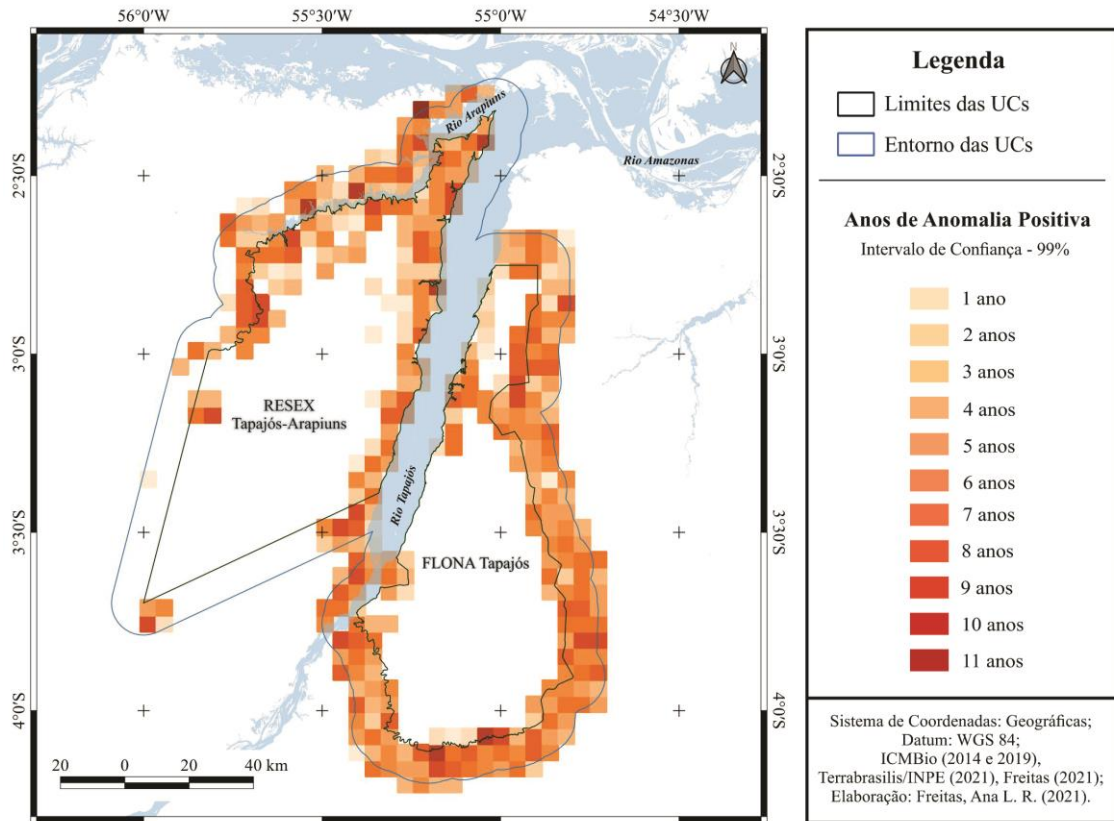
Onde: a) interior da FLONA; b) interior da RESEX.

Fonte: Produção da Autora.

Na Figura 4.8 observa-se o número de anos em que uma mesma célula teve anomalia positiva de focos na série, que ocorrem em 42,8% das células, variando entre 1 e 11 anos. Mais de 74% dessas células apresentam recorrência de foco de calor entre quatro e oito anos, das quais 47,8% estão distribuídas no entorno da FLONA. A RESEX, com 26,8%, apresenta o segundo maior número de células com anomalias, principalmente entre quatro

e sete anos. A anomalia de 11 anos ocorreu em uma única célula, localizada a noroeste do entorno da RESEX.

Figura 4.8: Comportamento espaço-temporal das anomalias anuais positiva de foco de calor.

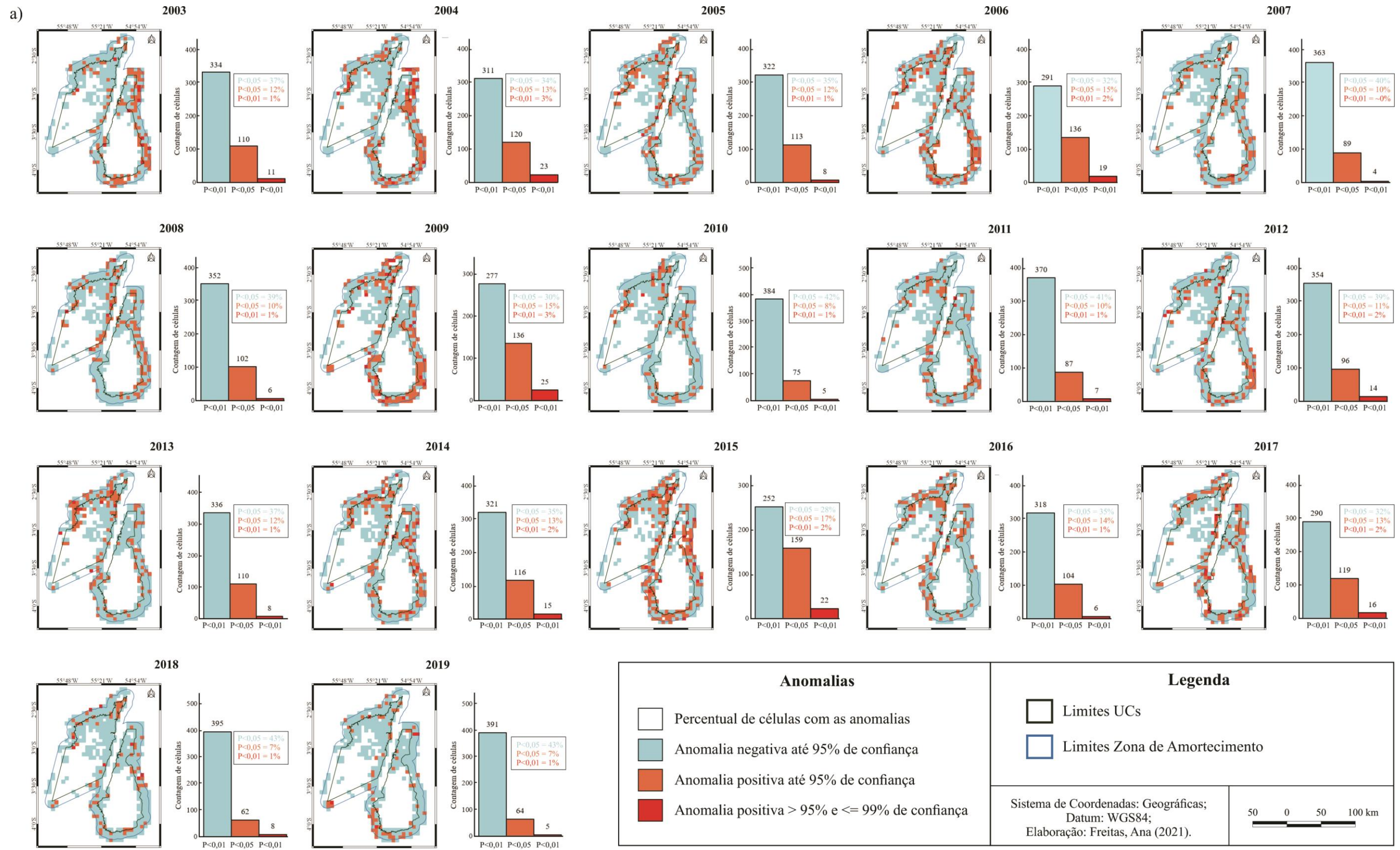


Onde: Anos de anomalia média na célula, com 99% de confiança.

Fonte: Produção da Autora.

O padrão espacial da anomalia anual média de ocorrência de focos de calor na célula está representado na Figura 4.9. Observa-se que nos anos 2007, 2008, 2010, 2011, 2018 e 2019 há um maior número de células com anomalias negativas ( $p < 0,01$ ), ou seja, ocorrência de focos abaixo do normal. As células com presença de anomalia positiva ( $p < 0,01$ ), ou seja, com ocorrência de focos acima do normal, estão concentradas principalmente no perímetro continental da entorno da FLONA e nas margens dos rios Tapajós e Arapiuns, na RESEX. O ano de 2015 teve a maior área com anomalia positiva, com 21% das células com focos de calor ocorrendo acima do normal, das quais 22 delas são significativas ( $p < 0,05$ ). Além de 2015, os anos com anomalias positivas mais intensos e de maior número de células com estas características foram 2009 e 2004, respectivamente.

Figura 4.9: Comportamento espaço-temporal das anomalias médias anuais de foco de calor.



Onde: a) Anomalias médias anuais negativas a 95%, positiva até 95%, positiva entre 95% e 99%. No histograma, a contagem de células com cada anomalia e percentual.

Fonte: Produção da Autora.

## **4.2 Dinâmica da paisagem: relação com os focos de calor**

Esta seção apresenta os resultados associados aos processos de mudança de uso e cobertura da terra, estrutura da paisagem, desmatamento na área de estudo e a sua relação com os focos de calor, estruturada em dois tópicos:

- i) Mudanças de uso e cobertura e paisagem: são os resultados obtidos através das avaliações realizadas utilizando-se os dados MapBiomas e as estradas;
- ii) Padrão de desmatamentos e alertas: resultados das avaliações realizadas com os dados do PRODES, DETER MODIS e DETER WFI/AWiFS.

### **4.2.1 Mudanças de uso e cobertura, padrões de paisagem e focos de calor**

Entre 2003 e 2019, a perda de área de floresta primária para outras classes totalizou 43,4 km<sup>2</sup> na FLONA e 427,5 km<sup>2</sup> em seu entorno. Na RESEX, foram 236,9 km<sup>2</sup> e em seu entorno 169,4 km<sup>2</sup> (Tabela 4.1). Nas áreas de vegetação secundária foi onde observou-se maior aumento de 62,7%, 55,6%, 134% e 80,6% nestes locais, respectivamente. As principais contribuições de área que a classe recebeu, na FLONA e entorno, teve origem nas áreas agrícolas, de 53,3 km<sup>2</sup> e 184,3 km<sup>2</sup>. Na RESEX e entorno, essas áreas eram de floresta primária originalmente, com 184,4 km<sup>2</sup> e 93,3 km<sup>2</sup>. Diferente das demais subáreas, a FLONA é a única que apresenta uma diminuição na classe das áreas agrícola, de 20,4%, enquanto no entorno da RESEX foi o que mais aumentou, com 53,6%.



Tabela 4.1: Matriz de transição entre as classes dos anos de 2003 e 2019.

Locais	Classes em 2003	Classes em 2019				
		Áreas Agrícolas	Floresta Primária	Outros	Vegetação Secundária	Total
FLONA	Áreas Agrícolas	70,70	1,14	0,36	53,30	125,49
	Floresta Primária	15,78	5043,26	0,53	29,27	5088,84
	Outros	0,29	0,81	2,01	0,03	3,13
	Vegetação Secundária	13,17	0,23	0,01	96,84	110,25
	<b>Total</b>	99,94	5045,43	2,90	179,44	5327,72
Entorno FLONA	Áreas Agrícolas	666,51	0,42	2,75	184,29	853,97
	Floresta Primária	317,98	1529,93	1,26	109,83	1959,01
	Outros	0,27	0,88	6,93	0,12	8,20
	Vegetação Secundária	124,46	0,26	0,16	179,78	304,65
	<b>Total</b>	1109,23	1531,50	11,09	474,01	3125,83
RESEX	Áreas Agrícolas	69,36	2,87	0,59	44,66	117,48
	Floresta Primária	55,60	6243,05	0,84	184,39	6483,87
	Outros	0,36	0,82	3,17	0,01	4,36
	Vegetação Secundária	11,69	0,25	0,04	150,10	162,08
	<b>Total</b>	137,00	6247,00	4,64	379,16	6767,80
Entorno RESEX	Áreas Agrícolas	70,14	1,04	0,69	41,39	113,25
	Floresta Primária	76,33	2491,95	1,57	93,30	2663,15
	Outros	0,52	0,55	10,63	0,01	11,71
	Vegetação Secundária	26,95	0,21	0,02	106,27	133,45
	<b>Total</b>	173,94	2493,75	12,90	240,97	2921,56

Onde: as células em azul são as áreas em km<sup>2</sup> que mantiveram a mesma classe, em cinza estão a área total da classe no ano, e em marrom claro a área total da classificação em ambos os anos.

Fonte: Produção da Autora.

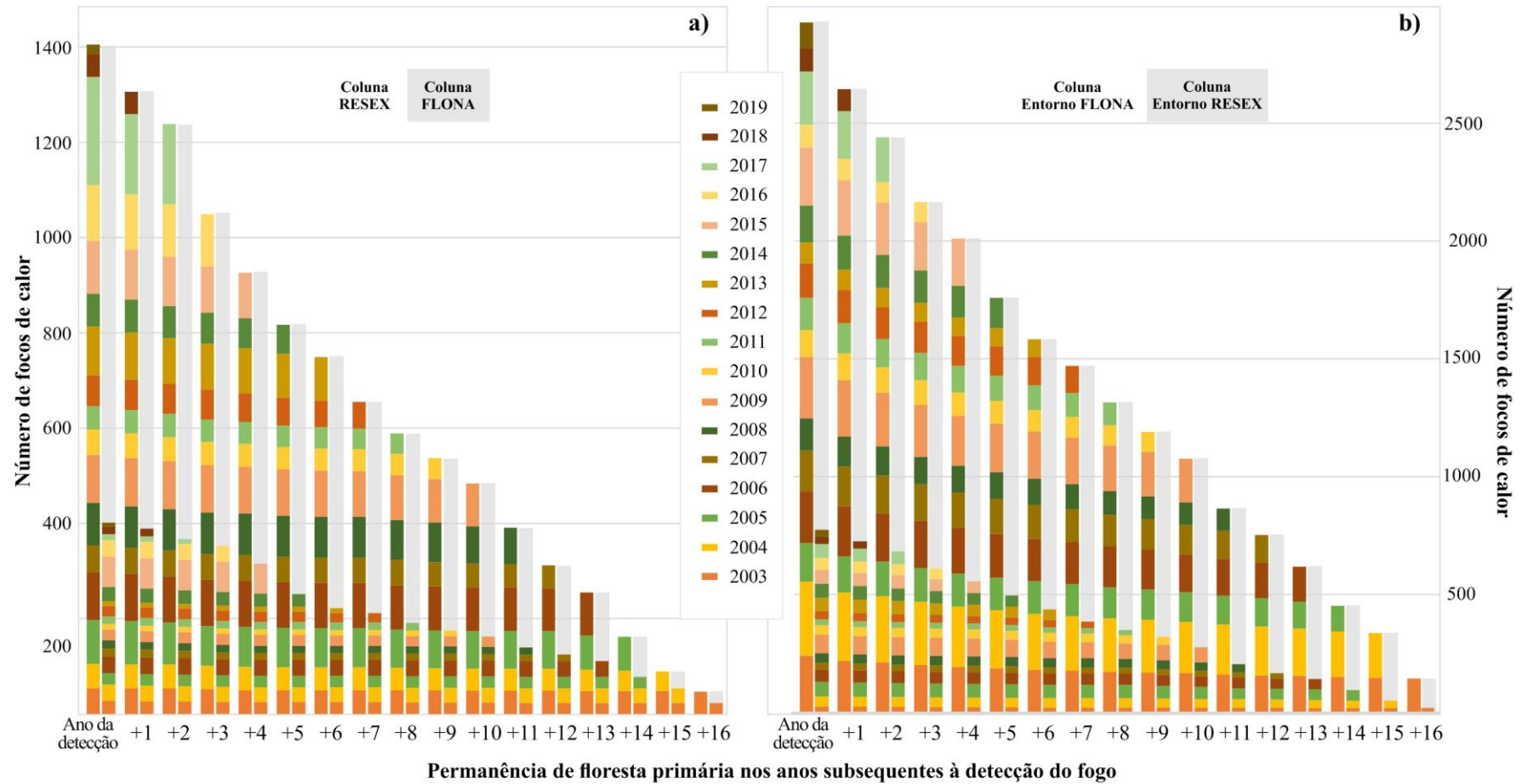
Ao longo da série todas as classes foram submetidas a alguma degradação por fogo, que podem ou não ter contribuído para a conversão de uma classe em outra. Observou-se diferenças na comparação entre UCs e de seus entornos, além do número de registro de focos de calor: os padrões de permanência de classe de floresta primária, por exemplo, são diferentes (Figura 4.10). As tabelas contendo os dados de permanência por classe e subárea estão dispostas no Apêndice A. As subáreas são utilizadas nas avaliações individuais da RESEX, FLONA, e para cada um de seus entornos.

A ocorrência de focos de calor em áreas de floresta primária nas UCs foi mais expressiva durante seis anos ao longo da série (Figura 4.10a). Destes, 2016 foi o ano que apresentou a maior taxa de permanência com 94% dos *pixels* na RESEX mantendo a mesma classe até o final da série, valor semelhante ao encontrado para a FLONA, de 93%. Os anos mais

críticos em relação a permanência da classe para a RESEX foram 2004, 2005 e 2017, registrando 80,4%, 77,2% e 74%, respectivamente.

Os entornos das UCs diferem entre si porque a ocorrência de focos de calor no entorno da FLONA é quase quatro vezes maior do que no da RESEX (Figura 4.10b). Além disso, a ocorrência de focos de calor no interior da RESEX é quase duas vezes maior que no seu entorno. O menor percentual de permanência do *pixel* de floresta primária ocorre em dois anos no entorno da FLONA, em 2003 e 2004, com 60%. Nesta área, a média de permanência na série é de menos de 75%, enquanto no entorno da RESEX esse percentual é de 83%, e não segue um padrão claro como observado para o entorno da FLONA, onde quanto mais tempo desde o foco de calor, menor o remanescente da classe.

Figura 4.10: Padrão temporal de permanência das classes no local após a ocorrência de foco de calor acumulado por classe.

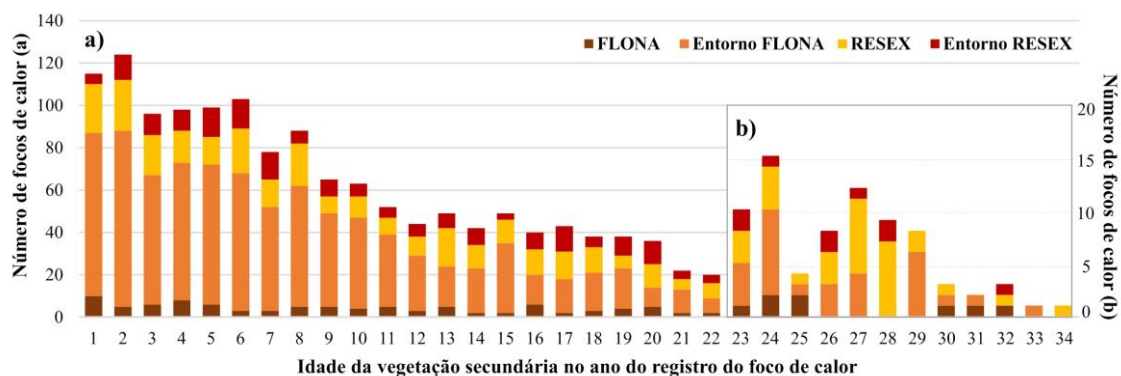


Onde: a) comparação entre a dinâmica na RESEX e na FLONA; b) comparação entre os entornos da FLONA e o da RESEX; o fundo cinza é a diferença que falta à subárea com menor número de ocorrência de focos de calor acumulados. Legenda com os anos em que os focos de calor foram registrados para a classe no mesmo ano. No eixo x, é o tempo em que as mesmas áreas se mantiveram como floresta primária após a detecção.

Fonte: Produção da Autora.

A maioria dos focos de calor registrados na área de estudo na classe de vegetação secundária ocorre quando esta possui até oito anos, com 54,2% (Figura 4.11a). Entre 9 e 22 anos, ocorre uma diminuição média de 8,9%, com três aumentos em áreas de vegetação secundária com 13, 15 e 17 anos. A diminuição é mais expressiva a partir das áreas com mais de 23 anos, com uma média de pouco mais de 6 focos de calor registrados em toda a área de estudo (Figura 4.11b).

Figura 4.11: Acumulado de focos de calor por idade da vegetação secundária no ano de registro.



Onde: na legenda as cores para cada subárea; a) Número de focos de calor registrados  $\geq 20$ ; b) Número de focos de calor registrados  $< 20$ . No eixo x, é a idade da vegetação secundária no ano. Fonte: Produção da Autora.

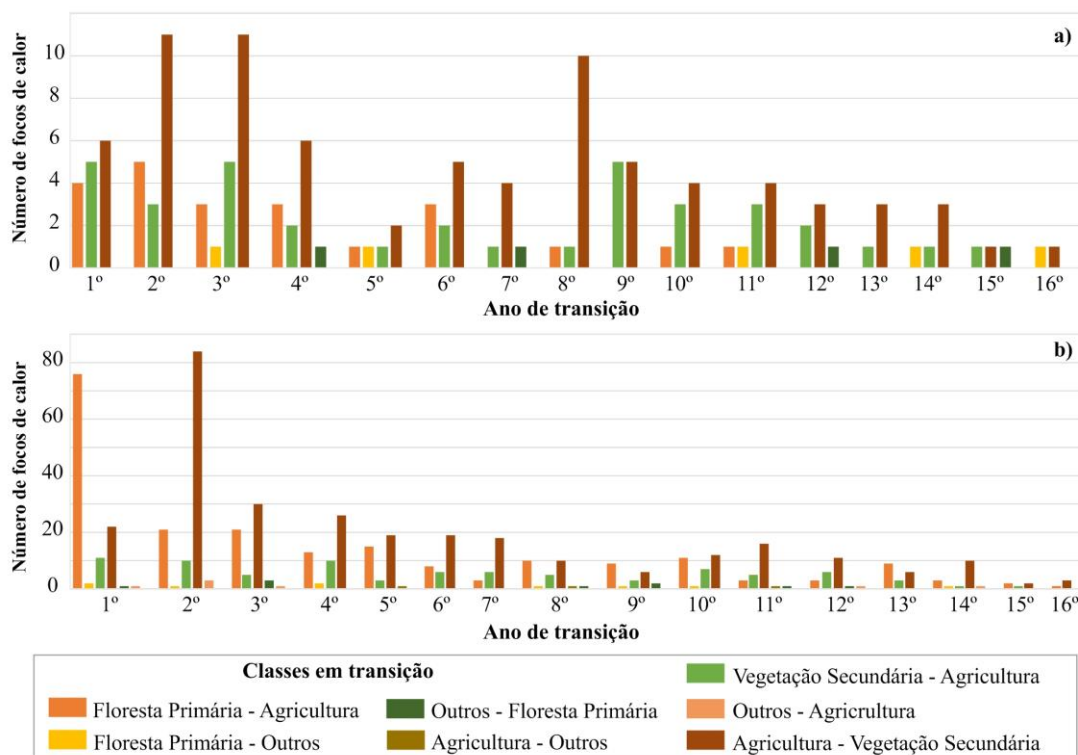
Ao longo da série foram também analisadas e quantificadas as transições que ocorreram na área de estudo. O padrão temporal apresenta uma diminuição média de 25,7% ao ano nas transições e o comportamento intra-anual explica algumas taxas de crescimento observadas. A tabela com as contribuições anuais por subárea está disponível no Apêndice A.

No primeiro ano após a degradação por fogo, a transição de floresta primária e secundária para agricultura diminui 82% e 70%, respectivamente. Para o mesmo período, identifica-se um aumento de 43,4% da transição entre agricultura e vegetação secundária. Em média, ocorrem na série 28 novos locais a mais de vegetação secundária com origem na agricultura do que a transição da classe de vegetação secundária para a classe “Outros”, conforme reclassificação disposta na Tabela 3.3. O comportamento acumulado para as UCs é apresentado a seguir (Figura 4.12).

Na FLONA, o padrão de transição mais evidente ocorre entre o segundo e terceiro anos nos locais que originalmente eram classificados como agricultura e passam a ser da classe de vegetação secundária (Figura 4.12a). No primeiro ano após a ocorrência de focos de

calor na floresta primária, a principal transição identificada na RESEX é para a classe de agricultura, quase quatro vezes maior do que o mesmo tipo de transição nos dois anos seguintes (Figura 4.12b). No entanto, a transição que mais ocorre ao longo da série para a RESEX é de agricultura para vegetação secundária, que tem seu pico dois anos após o registro do foco de calor. Tal padrão pode estar associado ao abandono da área produtiva logo após o primeiro ano de uso.

Figura 4.12: Dinâmica temporal de transição acumulada de cobertura após degradação por fogo.

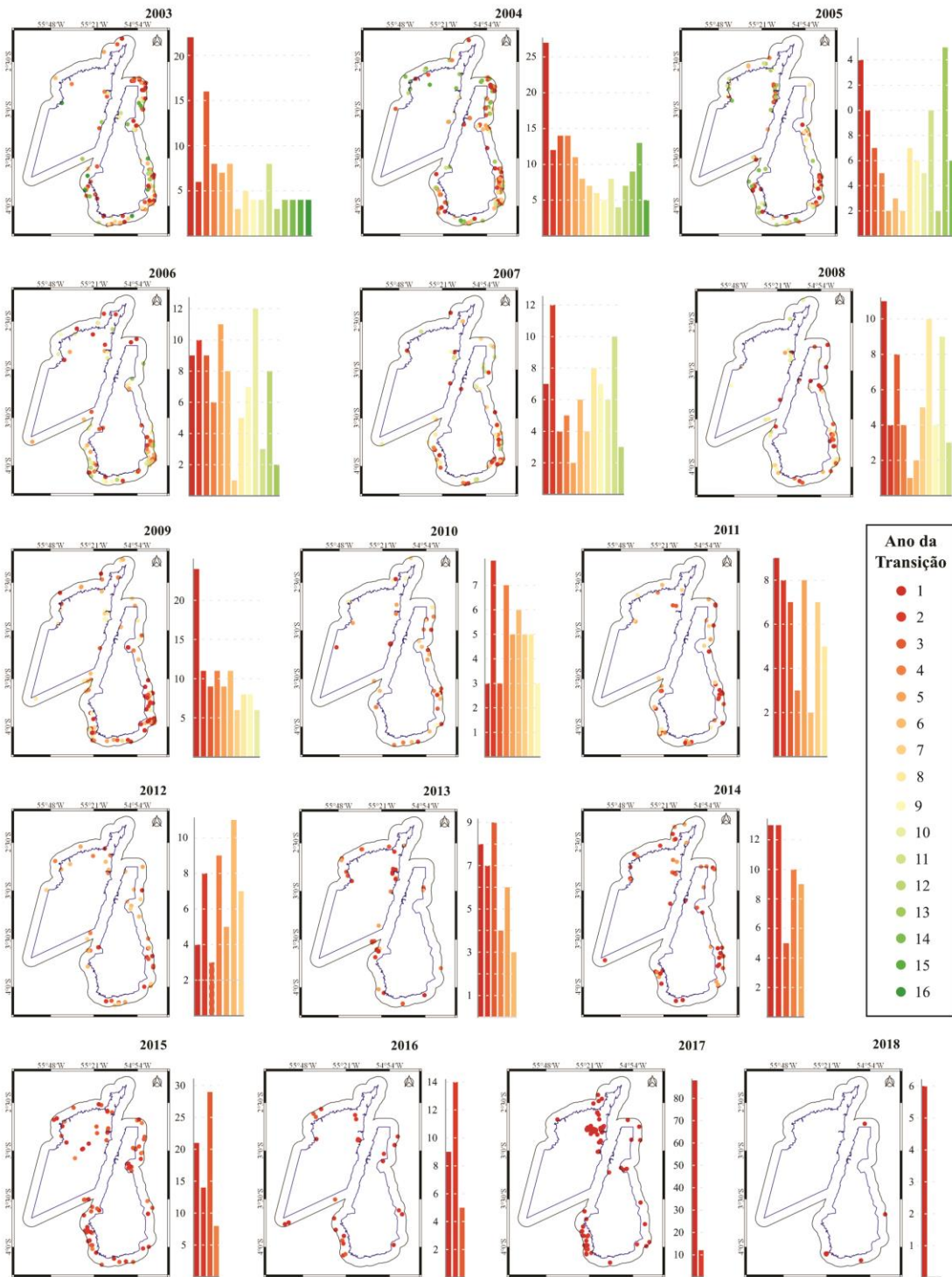


Onde: a) dinâmica na FLONA; b) dinâmica na RESEX.

Fonte: Produção da Autora.

Sabe-se que nem todos os locais têm sua classe de origem convertida no primeiro ano após a ocorrência do foco de calor. Desta forma, identificou-se a distribuição anual do tempo de conversão da floresta primária (Figura 4.13). Nos primeiros três anos após o registro de foco de calor na floresta primária há uma redução média de 45,7% ao ano no número de locais que permanecem na classe de floresta primária. Além disso, o aumento identificado a partir do oitavo ano da série é em torno de 45% entre 2003 e 2008. Além da conversão já esperada nos primeiros anos após a ocorrência do foco de calor na classe de floresta primária, há a possibilidade de que estas florestas venham a passar por uma transição futura através do processo de desmatamento.

Figura 4.13: Padrão anual de distribuição espaço-temporal da transição de floresta primária após a ocorrência de focos de calor.



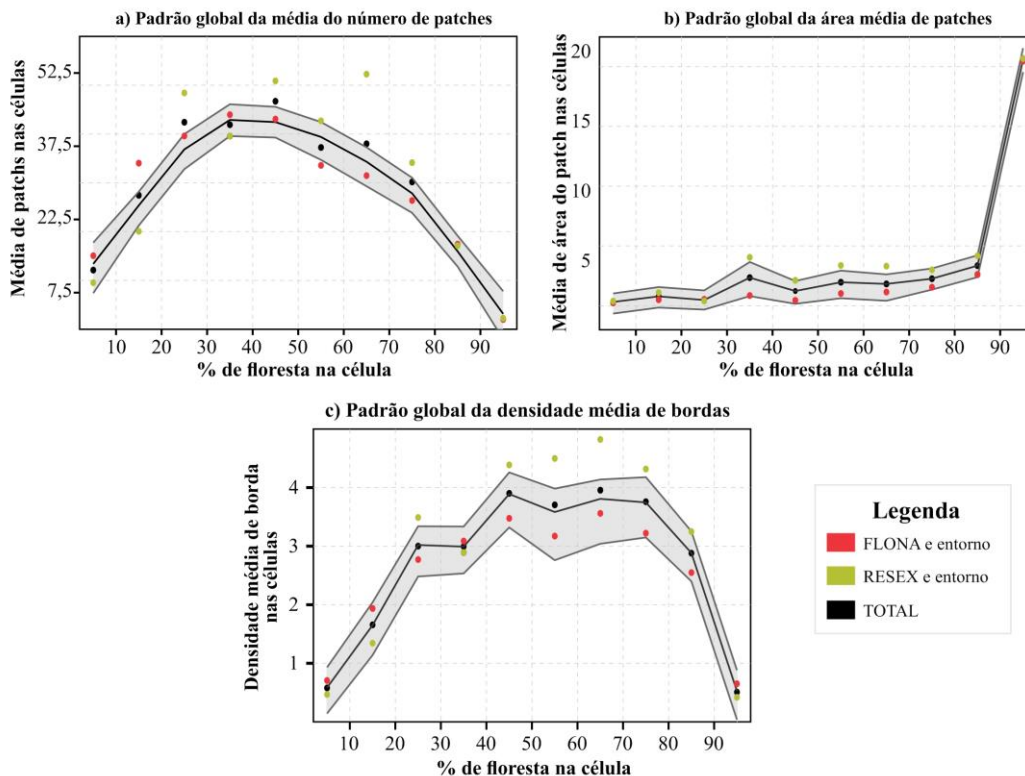
Onde: cada mapa representa o ano em que o foco de calor foi registrado e o histograma representa o número de focos de calor por ano de transição. Na legenda estão representados o número de anos que levou para a classe, onde ocorreu o foco de calor, ser convertida.

Fonte: Produção da Autora.

Ao mesmo tempo em que ocorrem as dinâmicas descritas acima na área de estudo, há alterações na configuração da paisagem destas áreas. O padrão médio das relações entre o *habitat* e as medidas de configuração do *habitat* encontrado nas células das UCs é apresentado na Figura 4.14. O número médio de manchas é maior nas células que possuem entre 20% e 50% de floresta primária, seguidas por uma diminuição menos expressiva desse número conforme aumenta o percentual de floresta primária, cerca de 25,4% (Figura 4.14a).

A área média da mancha na RESEX e entorno aumenta 23,8% por intervalo de floresta primária na célula, com exceção das células entre 30% a 40% (Figura 4.14b). Considera-se ainda que nas células acima de 90% de floresta na célula as áreas médias da mancha de 20 km<sup>2</sup> configuram florestas contínuas, com menor efeito de borda. O efeito de borda é 33% menor na FLONA e em seu entorno do que na RESEX e seu entorno nas células com floresta primária entre 40% e 90% (Figura 4.14c).

Figura 4.14: Padrão global da relação entre as métricas de estrutura de paisagem e intervalo do percentual de floresta na célula (2003-2019).

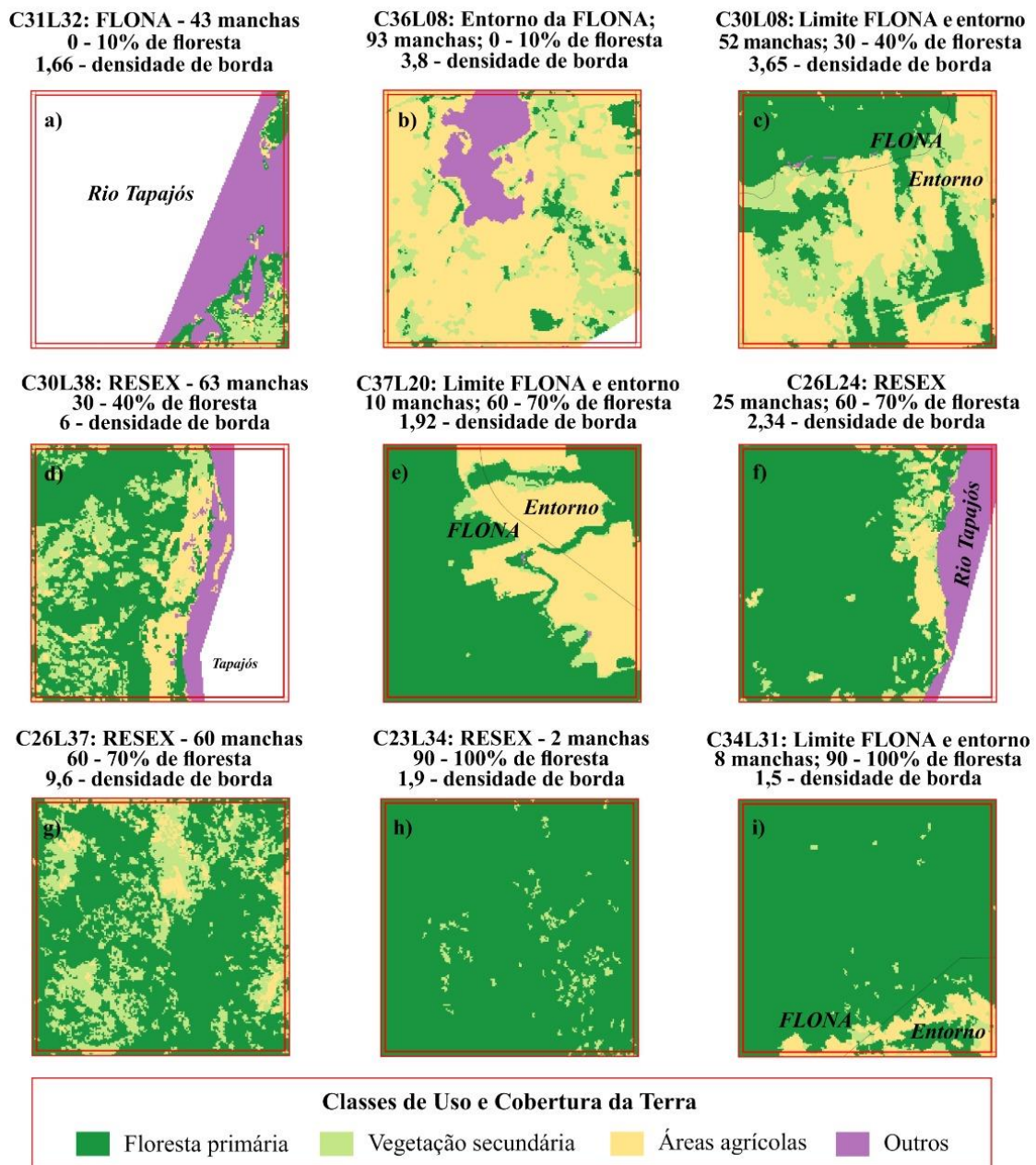


Onde: os gráficos representam os valores médios de cada métrica por intervalo de percentual de floresta na célula. Em vermelho, verde e preto valores das células na FLONA e entorno da FLONA, RESEX e entorno da RESEX, e no Tapajós, respectivamente.

Fonte: Produção da Autora.

Além disso, a avaliação do comportamento dos valores nominais do número e área média das manchas, e ainda da densidade de borda, revelou características individuais da paisagem e de seu arranjo espacial. Por exemplo, em 2019, todas as células com até 10% de floresta, com exceção de uma região localizada no entorno da FLONA, possuíam mais da metade de sua área fora dos limites dos entornos de ambas as UCs (Figura 4.15b), limitando assim sua utilização nas análises.

Figura 4.15: Exemplos de diferentes configurações de habitat por intervalo de percentual de floresta primária na célula em 2019.



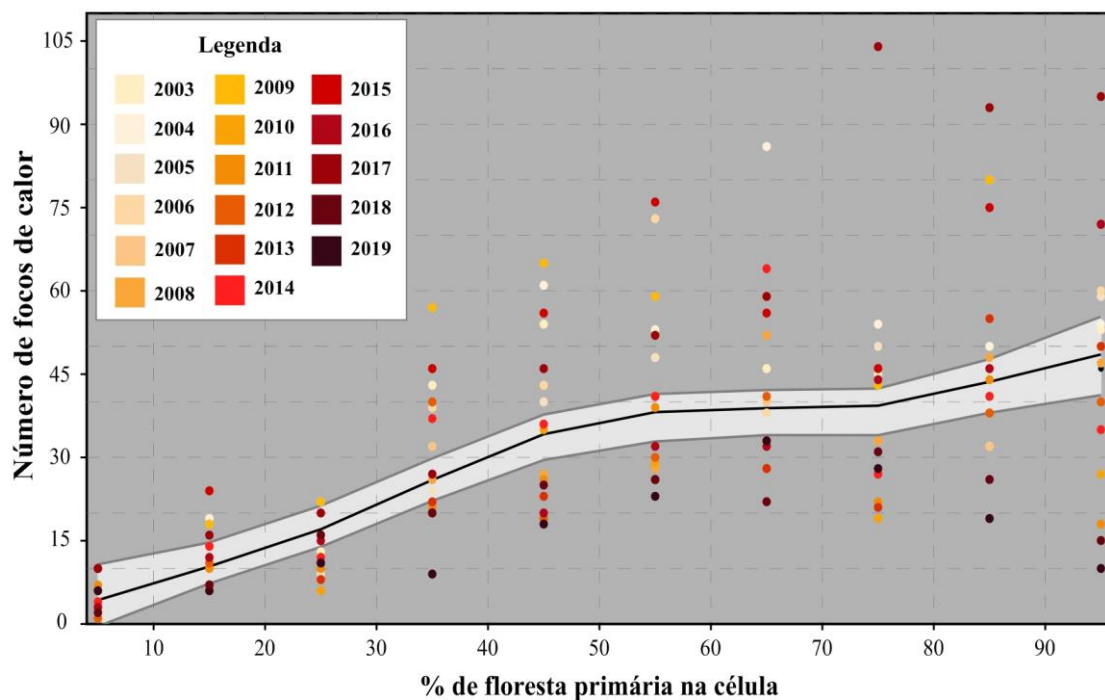
Fonte: Produção da Autora.



Nas células que possuem entre 30% e 40% de floresta, destacam-se dois padrões de paisagem que influenciam na abertura do dossel. A configuração destacada na Figura 4.15d possui uma maior fragmentação resultante do elevado índice de densidade de borda e número de manchas do que na Figura 4.15c, que possui blocos maiores de floresta. No intervalo de 60% a 70% de floresta foram identificados padrões semelhantes, embora a configuração da Figura 4.15g apresente uma floresta mais exposta às perturbações do que a encontrada nas Figuras 4.15e e 4.15f.

O padrão temporal geral de ocorrência de focos de calor em áreas de floresta primária apresenta um aumento no número de células com a maior proporção, com pico entre 40% e 70% de cobertura florestal (Figura 4.16). Mais de 75% do número de focos de calor anuais ocorreram dentro do esperado (média  $\pm$  desvio padrão) por percentual de floresta primária na célula, enquanto 26% dos focos de calor ocorreram acima destes valores. Em 2017 ocorreram 528 focos de calor, dos quais mais de 20% foram em células com 80% a 90% de floresta primária, intervalo que abrange o maior número absoluto de focos.

Figura 4.16: Ocorrência anual de focos por percentual de floresta primária na célula.



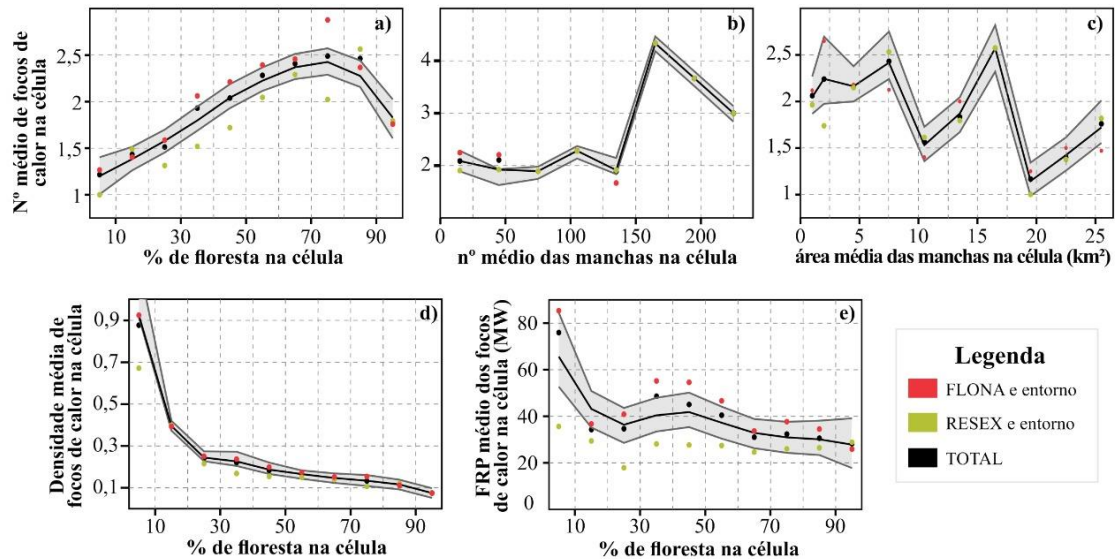
Onde: em cinza claro está definido o intervalo esperado para cada percentual de floresta na célula calculado através da média  $\pm$  desvio padrão.

Fonte: Produção da Autora.

A relação entre as características dos focos e as métricas de paisagem apresenta um aumento na média de ocorrência para ambas as UCs, principalmente entre 30% e 70% de

floresta na célula (Figura 4.17a). Na RESEX, o número médio de focos é maior em células com mais de 150 manchas e com área média superior a 15 km<sup>2</sup> (Figura 4.17b e 4.17c). Na FLONA, a densidade média de focos de calor na célula é maior quando a área da floresta é menor, e assim seus efeitos ficam mais concentrados e atingem uma maior intensidade (Figura 4.17d e 4.17e).

Figura 4.17: Relação entre % de floresta, nº médio de manchas e área média das manchas na célula e as características dos focos de calor.

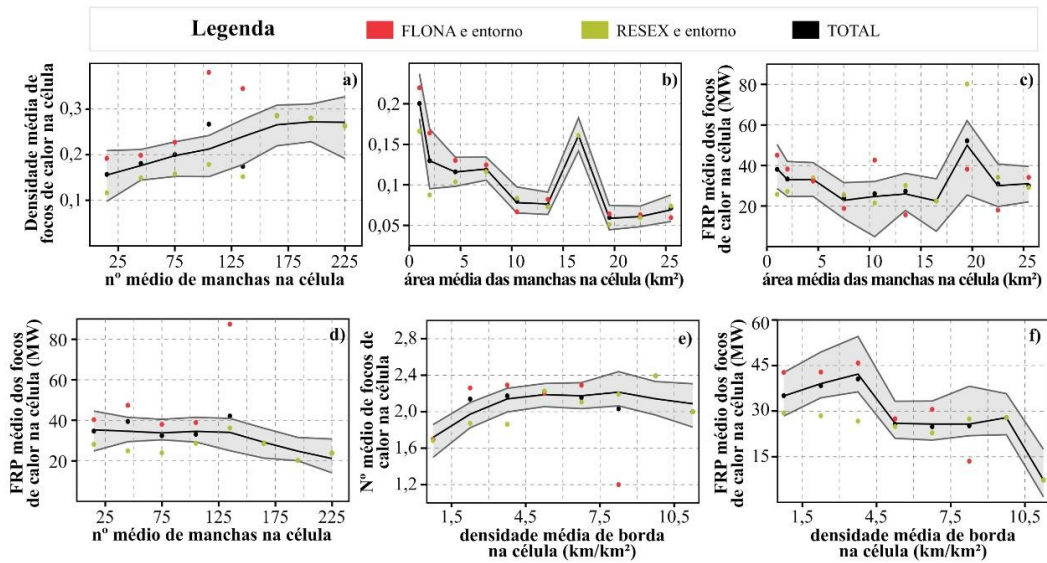


Fonte: Produção da Autora.

O aumento do número de manchas na célula influencia também no aumento da densidade de focos de calor em ambas as UCs (Figura 4.18a). Isso ocorre porque o número de manchas é inversamente proporcional à área média da mancha, de forma que os focos de calor ficam mais distribuídos nas áreas (Figura 4.18b). No entanto, a área média da mancha não descreve um padrão claro da FRP nas UCs, diferente do aumento do número de manchas, que apresenta uma diminuição das intensidades (Figura 4.18c e 4.18d).

Na área de estudo, o número médio de ocorrência de focos de calor aumenta com a maior densidade média de borda na célula (Figura 4.18e). Porém, na FLONA é observada uma diminuição de 50% nessa ocorrência entre 7,5 km/km<sup>2</sup> e 9 km/km<sup>2</sup> de densidade média de borda, que também é o máximo de densidade de célula com focos de calor para a área da UC e entorno. Por fim, observa-se uma diminuição na intensidade média dos focos de calor das UCs com o aumento da densidade de borda na célula (Figura 4.18f).

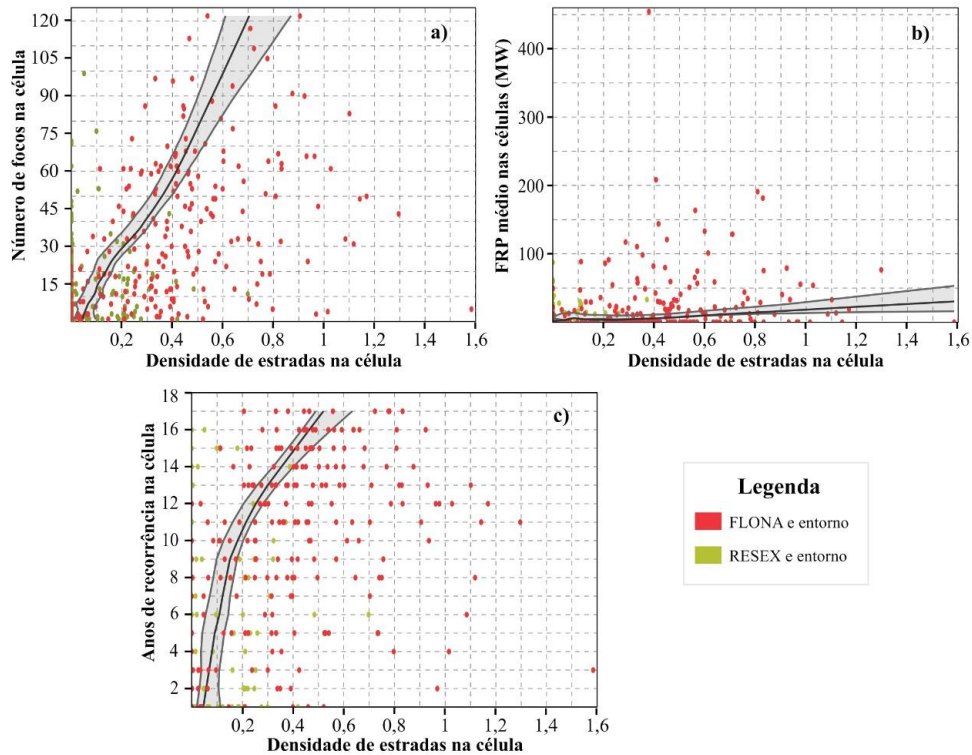
Figura 4.18: Relação entre as métricas de paisagem e as características dos focos de calor.



Fonte: Produção da Autora.

Os padrões de densidade de estradas das células com focos de calor na área de estudo foram obtidos em relação às características dos focos de calor (Figura 4.19). Com o aumento da densidade de estradas na célula há um aumento na intensidade dos focos de calor e um aumento dos anos de recorrência. Na Figura 4.19a observa-se que 46,5% dos focos da área de estudo ocorrem em células com densidade de estradas entre 0 e 0,6.

Figura 4.19: Densidade de estradas e a ocorrência, intensidade e recorrência dos focos de calor.



Fonte: Produção da Autora.

#### 4.2.2 Padrão de desmatamentos e alertas

Entre 2008 e 2019, o programa PRODES mapeou o incremento do desmatamento de mais 260 km<sup>2</sup> de floresta primária na área de estudo, distribuídos em 2.609 polígonos. O ano de 2015 foi o de maior área desmatada mapeada, com 38,6 km<sup>2</sup> distribuídos entre 482 polígonos. O menor número de polígonos ocorreu na FLONA, com 3% do total da área desmatada. Na RESEX, o percentual do número de polígonos mapeados foi de 9,8% do total para a área de estudo, os quais tiveram maior aumento na área total de 2014 até 2016, com 68,2% ao ano (Figura 4.20).

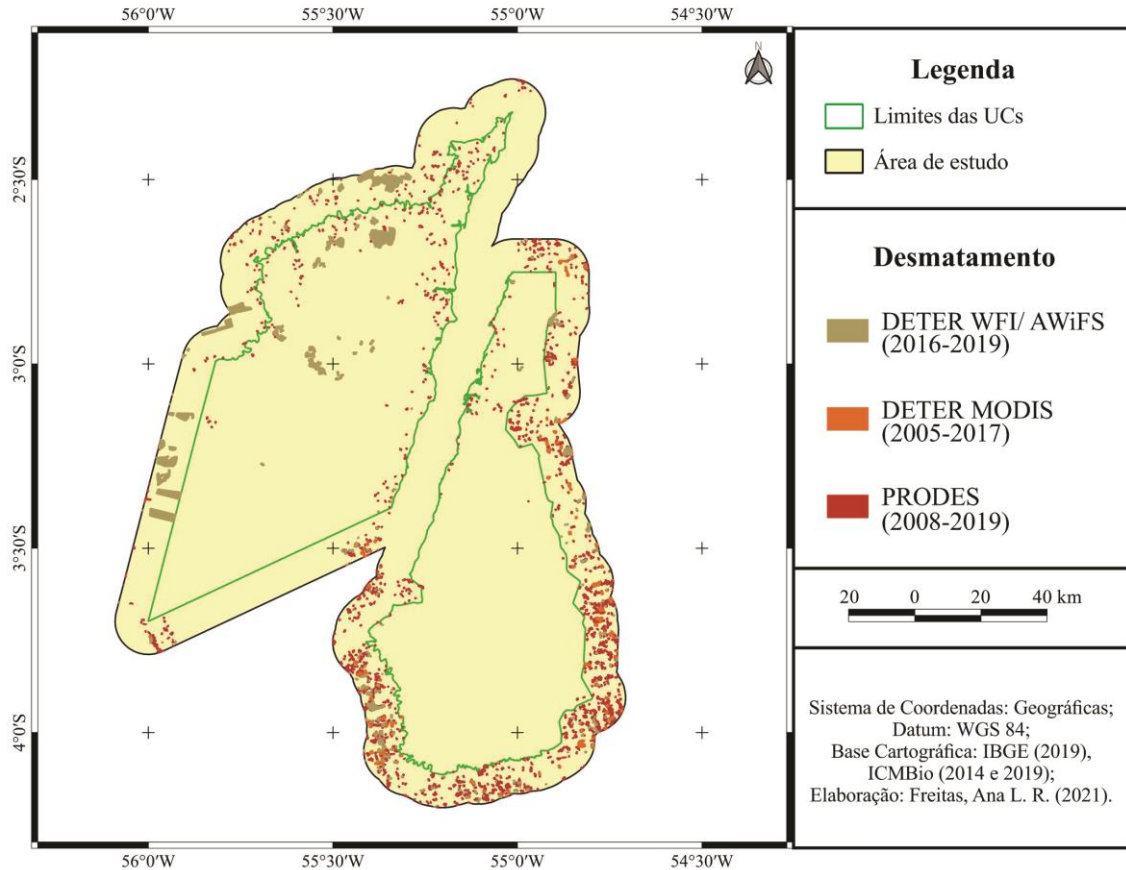
Como esperado, o maior número de polígonos de desmatamento ocorre nas áreas de entorno de ambas as UCs. No entorno da RESEX, esse número é seis vezes menor do que no entorno da FLONA, a qual abrange 76% dos polígonos mapeados pelo PRODES. Apesar de o percentual anual médio de diminuição de área de desmatamento no entorno da RESEX ser de 15,1%, este efeito é atenuado pelas grandes áreas identificadas entre 2014 e 2015, com 64,4% e 91,8% de aumento de área, respectivamente. Por fim, no entorno da FLONA foram mapeados mais de 213 km<sup>2</sup> de desmatamento no período, que, mesmo com os altos números de polígonos de desmatamento e áreas, tem uma tendência de diminuição na taxa anual. Esse comportamento é fortemente influenciado pela área mapeada em 2016, que foi 10 vezes menor do que no ano anterior (Figura 4.20).

O padrão geral para o período, detectado pelo DETER-MODIS entre os anos de 2005 e 2017, revelou 53,8 km<sup>2</sup> de áreas de desmatamento com alertas, distribuídos em 116 polígonos. Desses alertas, 93% ocorreram no entorno da FLONA, 6,8% no entorno da RESEX e um na FLONA. O ano com a menor área de desmatamento foi em 2013 com 0,3 km<sup>2</sup>, enquanto que durante o ano de 2014 observou-se o maior número de alertas distribuídos em 8,7 km<sup>2</sup>. A detecção para o mês de agosto de 2014 foi responsável por 41,2% desses registros e 23,4% da área. Em 2014, o tamanho médio do polígono era de 0,51 km<sup>2</sup>, enquanto que entre 2005 e 2017 foi de 0,46 km<sup>2</sup> (Figura 4.20).

Para o período entre 2016-2019, o DETER-WFS/AWiFS acumulou mais de 243 km<sup>2</sup> em alertas de desmatamento, sendo que o mês de novembro de 2017 foi responsável por 22% destes alertas. O tamanho médio detectado foi de 2,15 km<sup>2</sup>. Em 2019 os alertas apontaram para a maior quantidade de área desmatada - mais de 122 km<sup>2</sup> -, dos quais 37,1% ocorreram no mês de novembro. Um único polígono de novembro foi responsável por

75% da área total no mês. A detecção foi identificada no entorno da RESEX, na margem esquerda do Baixo Arapiuns (Figura 4.20).

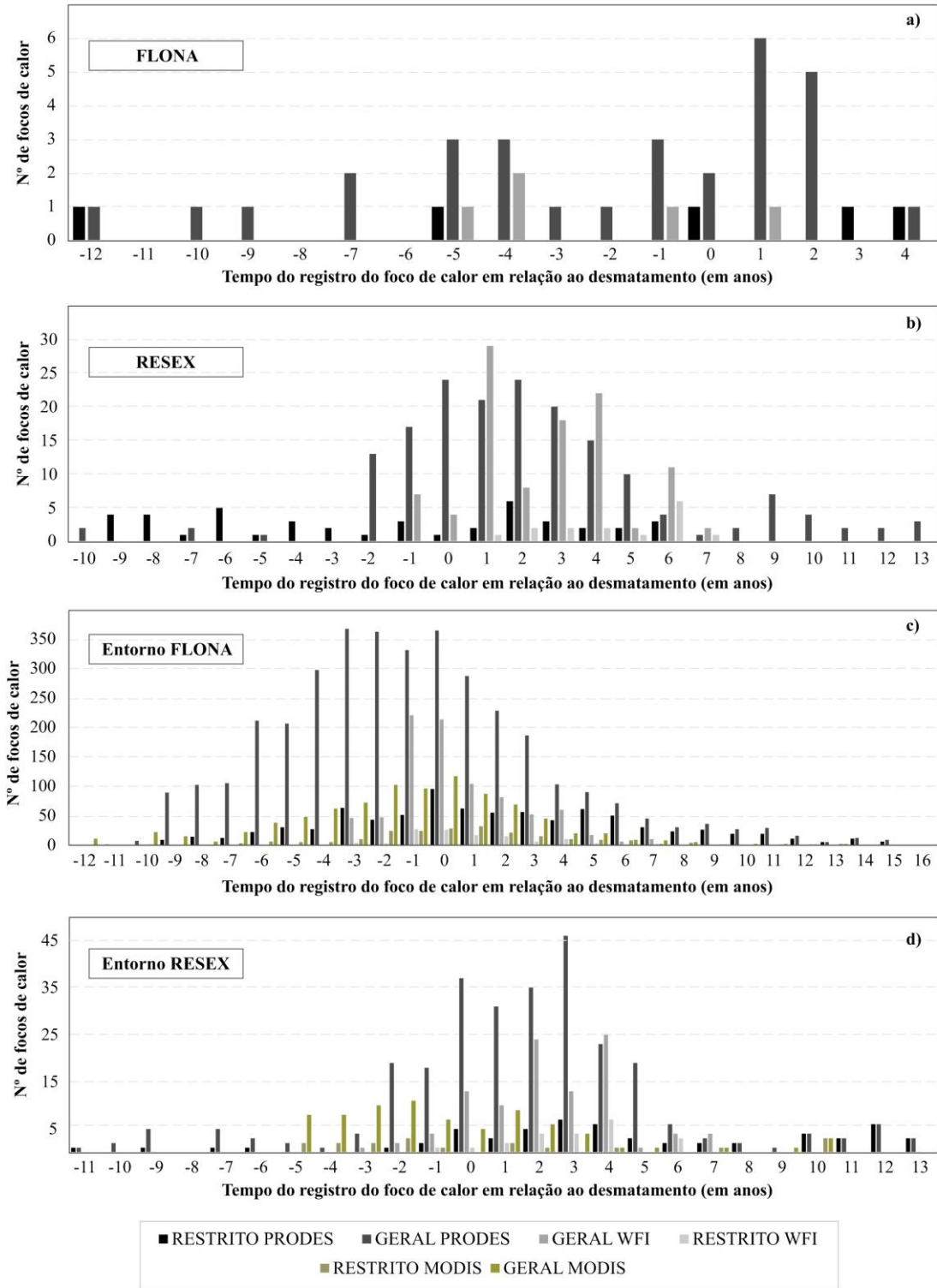
Figura 4.20: Mapa de desmatamento acumulado na área de estudo (2005-2019).



Fonte: Produção da Autora.

Conhecendo o padrão de queima da floresta primária anterior à sua conversão para outra classe, constatou-se, ainda, que estas áreas sofreram constante degradação por fogo em anos anteriores ao desmatamento (alerta e/ou taxa anual). No comportamento anual, observa-se que há um procedimento de degradação mais intenso em até seis anos antes do desmatamento, principalmente no entorno da FLONA, na RESEX e seu entorno (Figura 4.21). Tal comportamento anual é observado em todos os produtos analisados, tanto para o padrão restrito como para o panorama geral. Na FLONA, o padrão anterior não é expressivo, embora, assim como nas outras subáreas, observa-se a ocorrência de focos de calor no ano do desmatamento, que segue uma diminuição nos seis anos seguintes.

Figura 4.21: Padrão anual de ocorrência de foco de calor em relação ao desmatamento.



Onde: a) FLONA; b) RESEX; c) entorno FLONA; d) entorno RESEX. Valor 0 indica que o foco de calor e o desmatamento ocorreram no mesmo ano; valores negativos indicam que o foco de calor precede o desmatamento em anos; valores positivos indicam a ocorrência do foco de calor em anos após o desmatamento.

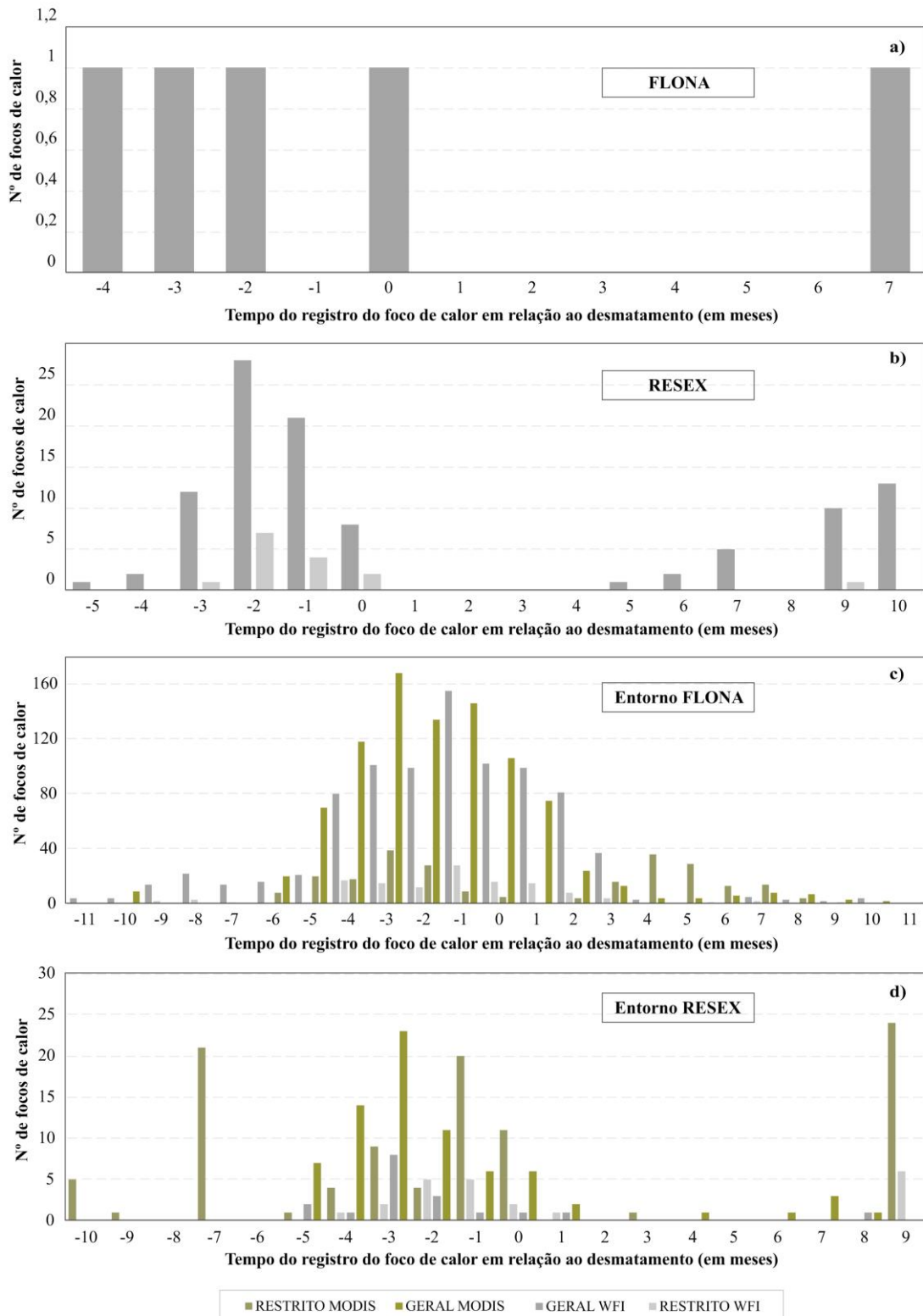
Fonte: Produção da Autora.

De forma geral, em até 16 anos antes de ocorrer o desmatamento ocorreram 2.227 focos de calor, nas áreas que antes eram florestas, dos quais 38,2% compõem a situação restrita, que utiliza satélites que estiveram ativos durante todo o período avaliado. Entre 16 e 6 anos antes do desmatamento ocorreram 24,8% do comportamento geral, dos quais 66,2% foram identificados para a situação restrita. A partir de cinco anos antes da ocorrência do desmatamento há um aumento médio do número de focos de calor de 18% ao ano. Para o mesmo período de cinco anos, observa-se que o número de focos de calor que ocorrem antes do desmatamento, mapeados pelo PRODES, é em média 81,8% maior do que para as áreas alertadas pelo DETER-MODIS.

As taxas médias de aumento do número geral de focos de calor antes do registro desses desmatamentos são de 27,2% e 32,2% para o PRODES e DETER-MODIS, respectivamente. Ressalta-se que, como o período de funcionamento do DETER-WFI/AWiFS é menor que os demais produtos avaliados, é esperado que não acompanhe esse padrão. No ano do desmatamento mapeado pelo PRODES e alertas do DETER-MODIS foram registrados 353 e 98 focos de calor, respectivamente, dos quais 24,9% e 38% compõem a situação restrita. Diferente da situação restrita, que indica uma diminuição no número de focos de calor para os três primeiros anos após o desmatamento, o panorama geral é de aumento médio de 25% e 14,8% do número de focos de calor no primeiro e terceiro anos, com uma diminuição de 30,4% no segundo ano.

Na FLONA, a interação entre foco de calor e áreas desmatadas não foi suficiente para identificar um padrão para os meses (Figura 4.22a), enquanto na RESEX há ocorrência de focos de calor por três meses antes do desmatamento ocorrer (Figura 4.22b). Verificou-se que a ocorrência de focos de calor no padrão intra-anual inicia-se principalmente nos cinco meses que antecedem o alerta de desmatamento nos entornos das UCs. Esses registros seguem um aumento até o terceiro mês antes da emissão do alerta, quando apresentam uma diminuição no registro de focos nos meses seguintes (Figura 4.22c e 4.22d). Este resultado do comportamento mensal de ocorrência de foco de calor em relação ao desmatamento derivado do DETER contribui numa estimativa “rápida” na escala intra-anual para identificar áreas sob pressão antrópica.

Figura 4.22: Padrão mensal de ocorrência de foco de calor áreas de alertas de desmatamento.



Onde: a) FLONA; b) RESEX; c) entorno FLONA; d) entorno RESEX. Valor 0 indica que o foco de calor e o desmatamento ocorreram no mesmo mês; valores negativos indicam que o foco de calor precede o desmatamento em meses; valores positivos indicam a ocorrência do foco de calor em meses após o desmatamento.

Fonte: Produção da Autora.



### 4.3 Comportamento meteorológico: relação com os focos

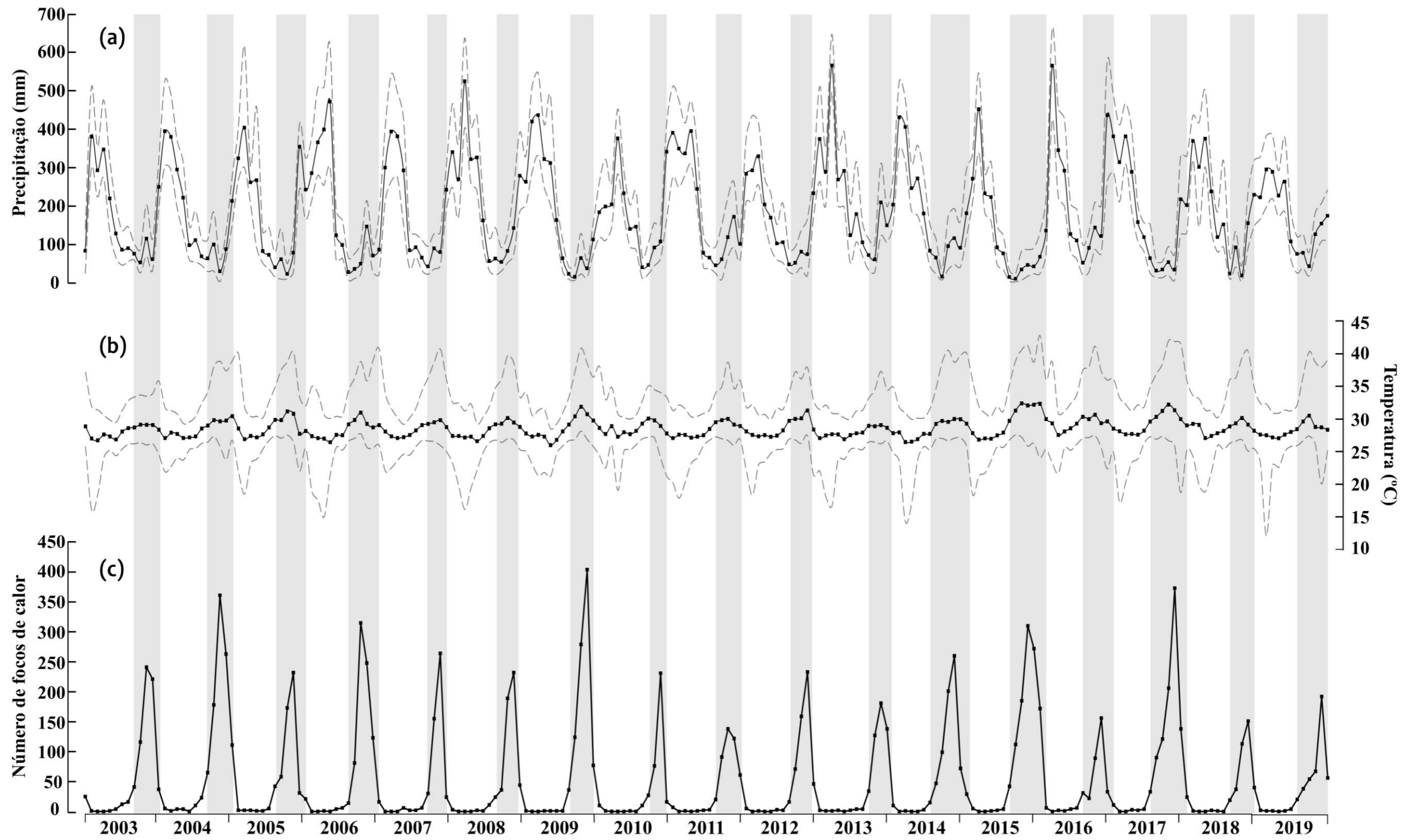
Nesta seção apresentam-se os padrões anuais, mensais e diários das variáveis meteorológicas de chuva e temperatura de superfície e sua relação com a ocorrência de focos de calor.

O valor médio anual de precipitação para a área de estudo é de 2.210 mm. O ano de mínima foi identificado em 2015, com 1.686 mm. Os anos com maior volume de precipitação acumulada foram 2013 e 2008, com 2.695 mm e 2.628 mm, respectivamente. A análise revelou que a estação seca, definida com uma precipitação mensal abaixo da média calculada para a área de estudo na série (184 mm), ocorre entre junho e dezembro, que foi prolongada nos anos de 2006/2007 e 2014/2015 até janeiro, e de 2015 até fevereiro de 2016 (Figura 4.23a). Os meses de menor precipitação foram agosto e setembro de 2015, setembro de 2009 e 2014, que registraram menos de 20 mm. A maior média de precipitação mensal é em março, com 390 mm, e supera os 500 mm nos anos de 2013, 2016 e 2008.

O intervalo de temperatura de superfície esperado para os meses é de  $28,5^{\circ}\text{C} \pm 1,32^{\circ}\text{C}$ . Todos os anos da série tiveram médias nesse intervalo, sendo 2013 o de menor temperatura, com  $27,9^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.23b). Observa-se que o comportamento da temperatura de superfície e das chuvas apresentam-se inversamente na série. Na estação chuvosa, as máximas variam entre  $32,1^{\circ}$  e  $42,7^{\circ}\text{C}$ ; no entanto, sem contabilizar os meses que tiveram prolongamentos da estação seca, as máximas diminuem para até  $38,9^{\circ}\text{C}$ . Nos primeiros três meses da estação seca, as máximas de temperatura começam a subir de  $32,3^{\circ}\text{C}$  para  $37,5^{\circ}\text{C}$ , chegando a ultrapassar  $40^{\circ}\text{C}$  em agosto.

Observa-se que em anos com menores precipitações e maiores temperaturas há um aumento na ocorrência de focos de calor (Figura 4.23c). Em média, foram 954 focos de calor por ano em 2004, 2009, 2015 e 2019. O inverso também é identificado, quando em 2010 e 2018 se registraram uma média de 380 focos de calor por ano. Novembro é o mês com maior registro de focos de calor na maioria dos anos da série, com 38,4% do total de focos de calor, e o atraso do retorno das chuvas em janeiro de 2016, com menor precipitação média de 68,6 mm e temperatura média de  $32,3^{\circ}\text{C}$ , contribuiu para que fossem registrados 172 focos de calor, maior valor na série do mês.

Figura 4.23: Gráfico de associação entre precipitação, temperatura e ocorrência de focos de calor.

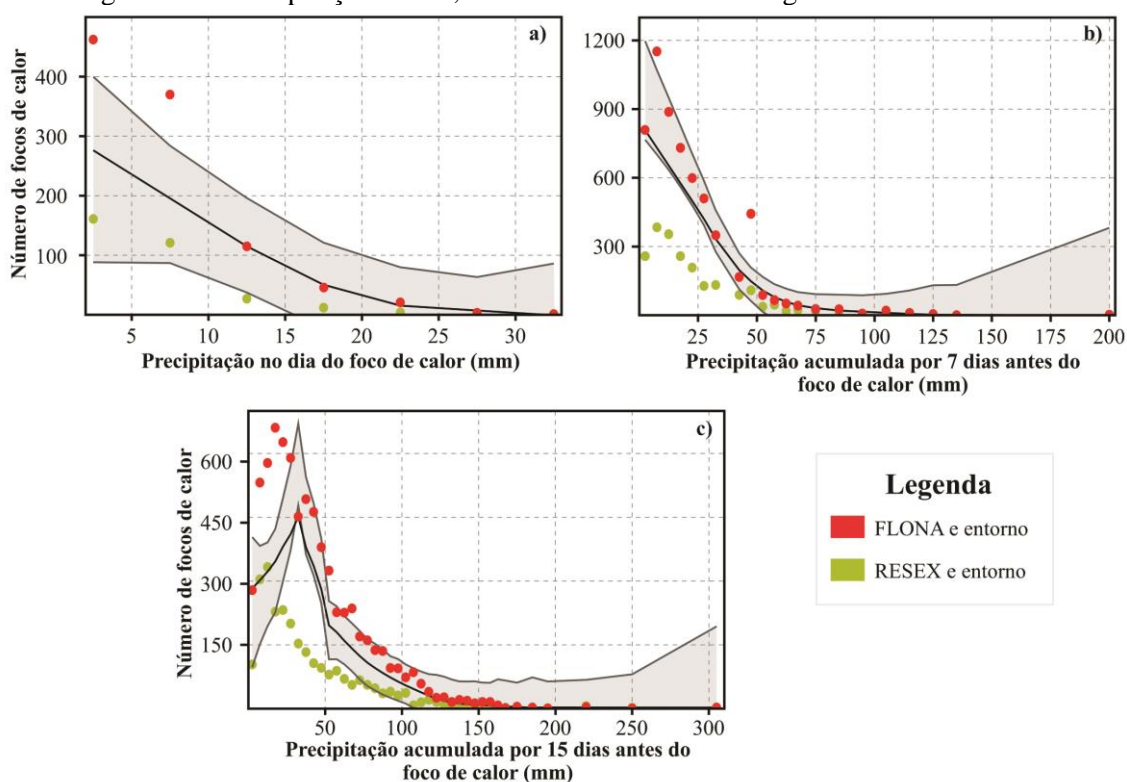


Fonte: Produção da Autora.

A análise na escala diária revelou que 87,7% dos focos de calor ocorrem em dias sem chuva. Em dias com chuva, identifica-se que o número de focos de calor é maior em dois limiares, com 46,9% e 37% dos focos de calor em dias com até 5 mm e 10 mm, respectivamente. Na FLONA. O número de focos de calor para estes limiares ultrapassa o valor estimado na regressão (LOESS) (Figura 4.24a).

Sabe-se que o dado do produto CHIRPS não disponibiliza o horário de ocorrência das chuvas nessas áreas, o que possibilitaria saber se o foco no dia ocorreu ou não antes da chuva. Assim, as avaliações da precipitação acumulada por 7 e 15 dias permitiram identificar a ocorrência de focos de calor em relação às chuvas em curto prazo. Neste resultado, foi identificada uma diminuição de 70% e 80% do registro de focos de calor, respectivamente, condições que podem atenuar a propagação do fogo na floresta (Figura 4.24b, 4.24c).

Figura 4.24: Precipitação no dia, 7 dias e 15 dias antes do registro do foco de calor.



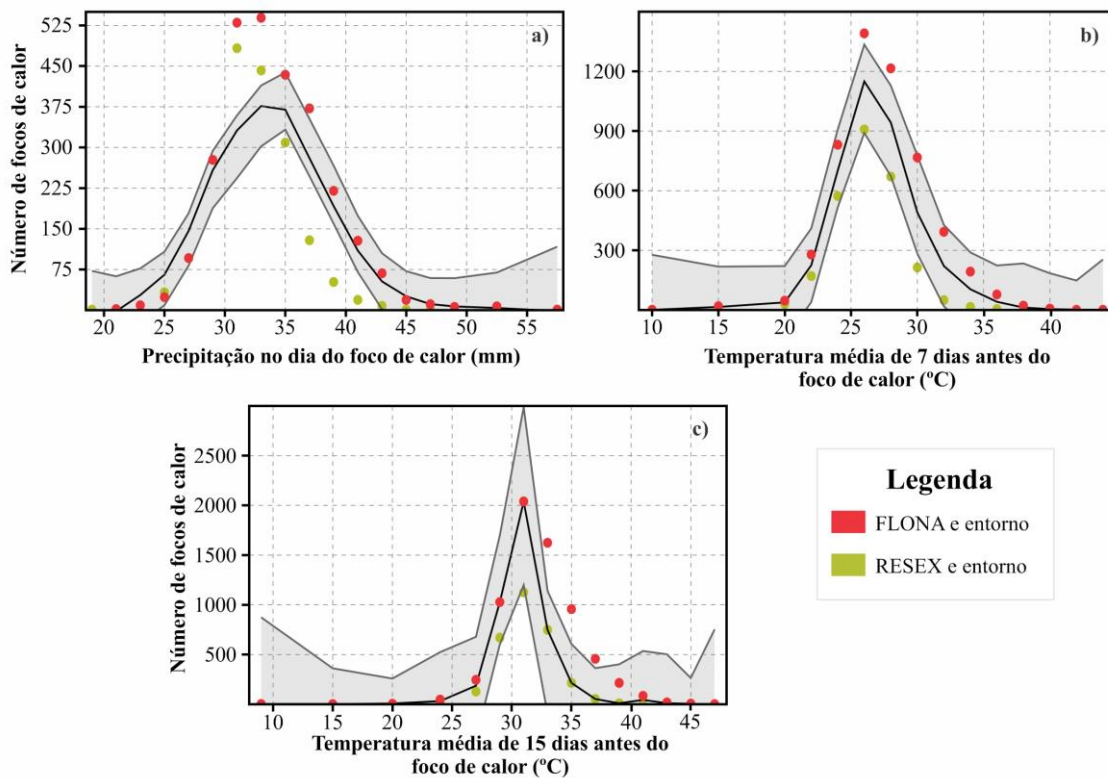
Onde: não foram inseridos nos gráficos o número de focos de calor sem precipitação.

Fonte: Produção da Autora.

Na área de estudo, 52% das ocorrências de focos de calor ocorrem em dias com temperaturas entre 30°C e 34°C (Figura 4.25b). As médias de temperatura dos dias antes

dos focos de calor ilustram que a persistências das temperaturas entre 30°C e 34°C para 7 dias e 28°C a 32°C para 15 dias levam a um aumento da flamabilidade. A existência de *pixels* sem dado é resultante de limitações na produção do produto diário de temperatura de superfície apresentada na sessão do 2.4 do referencial teórico. Assim, a média destes dias permitiu que o comportamento da temperatura de superfície fosse avaliado com relação a um maior número de focos de calor.

Figura 4.25: Temperatura no dia, 7 dias e 15 dias antes do registro do foco de calor.

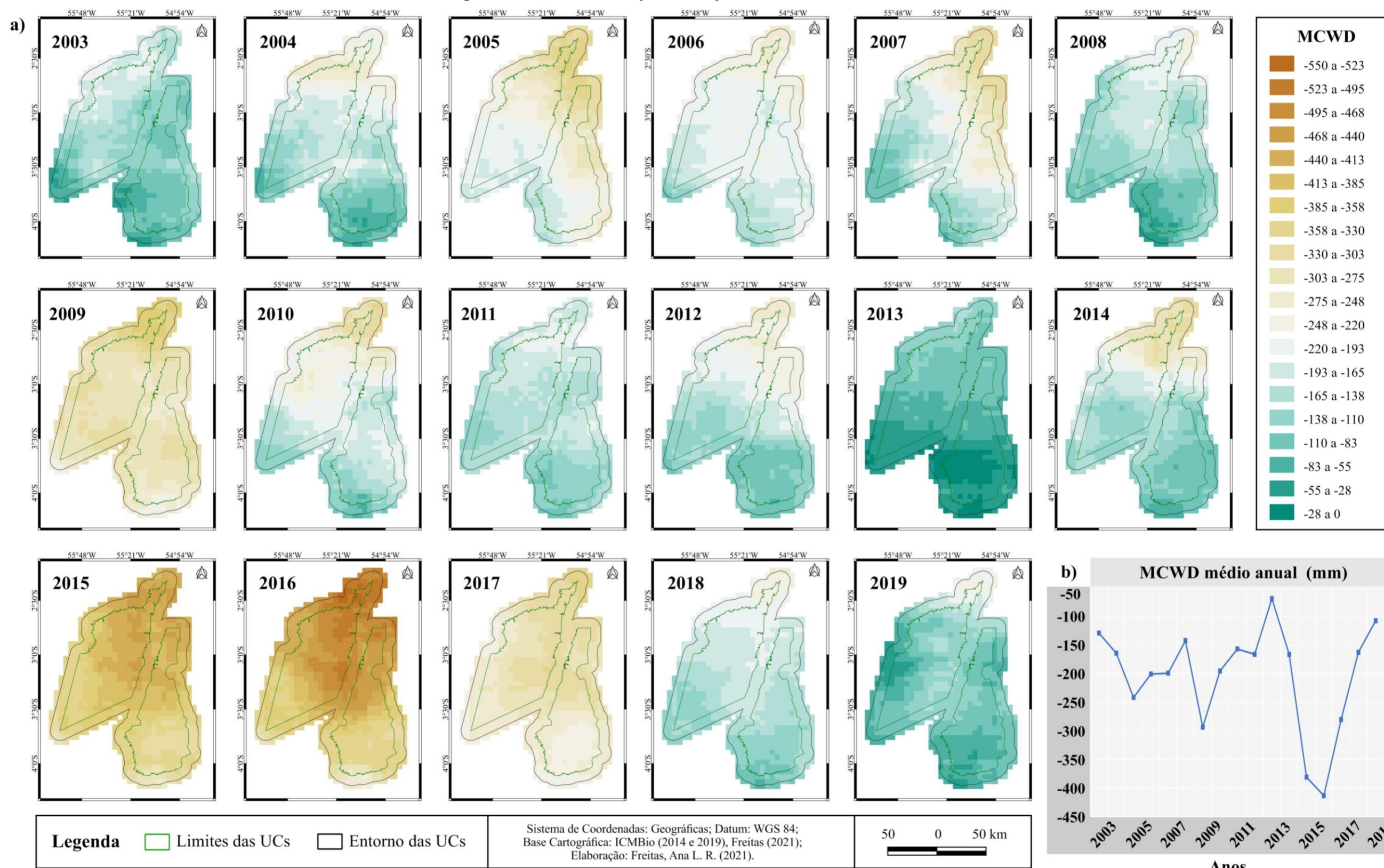


Onde: foram descartados os valores sem dado da avaliação.

Fonte: Produção da Autora.

O déficit hídrico médio anual calculado para cada célula esteve distribuído sobre a área de estudo de acordo com as intensidades menores (0 a -100 mm), médias (-100 a -300 mm) e máximas (< -300 mm), cobrindo na série em média 2.885 km<sup>2</sup>, 15.920 km<sup>2</sup> e 3.910 km<sup>2</sup> da área de estudo por ano (Figura 4.26a). Em 2013 houve uma recuperação do déficit hídrico na série, no entanto, nos anos seguintes iniciou o ciclo mais longo e intenso de déficit hídrico associado à seca extrema, que com quatros anos alcançou médias próximas a -550 mm. A amplitude média anual nesse período de quatro anos (2013 a 2016) foi maior do que nos primeiros 10 anos da série, com aproximadamente -100 mm ao ano, seguida por uma recuperação semelhante até o final da série avaliada (Figura 4.26b).

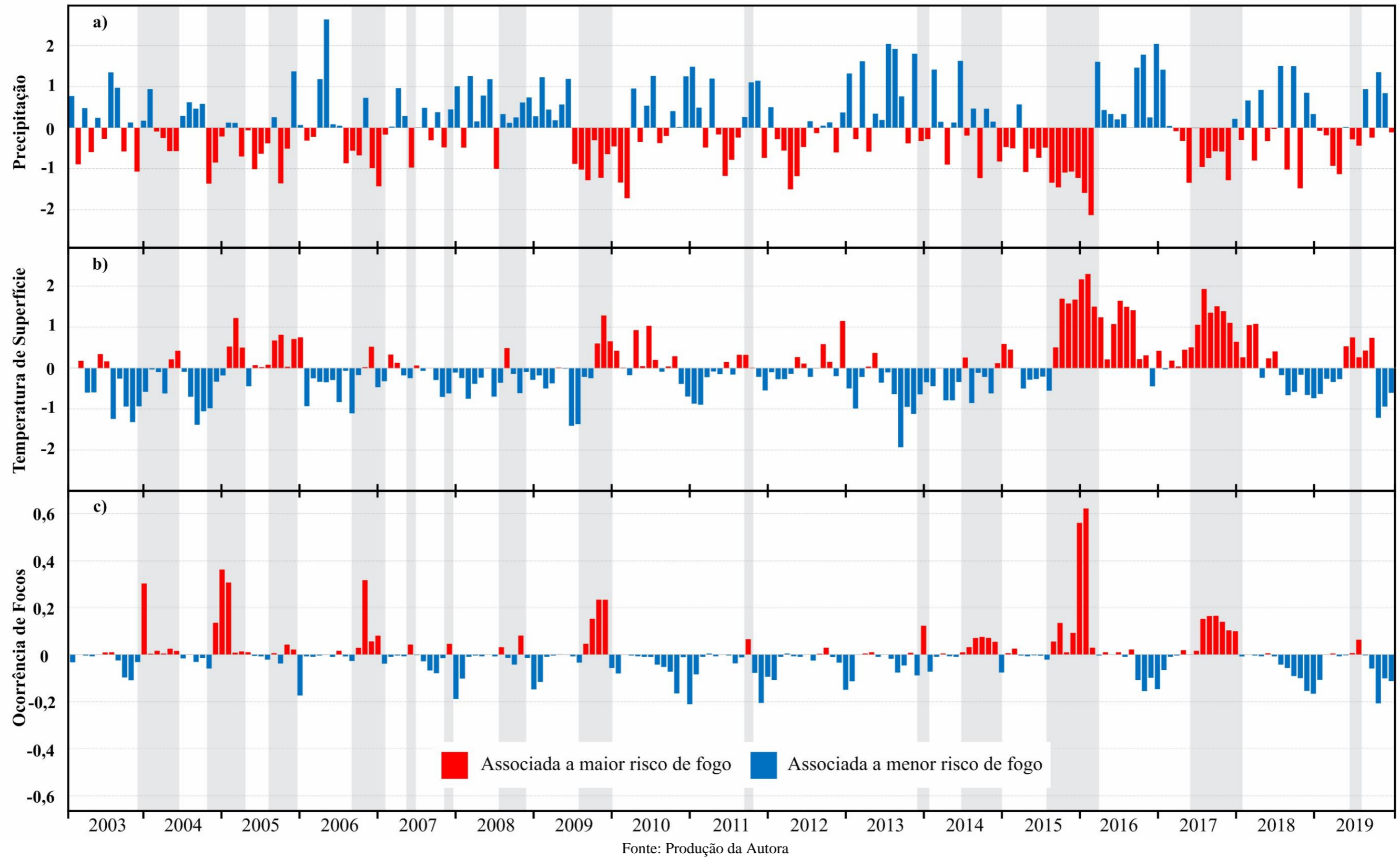
Figura 4.26: Déficit hídrico espacial e temporal na área de estudo (2003 - 2019).



Onde: a) Déficit médio anual na célula durante a série, com o intervalo de valores. b) Déficit hídrico médio anual na área de estudo.  
 Fonte: Produção da Autora.

O padrão de anomalia de chuva da série evidencia secas mais recorrentes e duradoras, com 30 meses mais intensos (entre  $-1,0 \sigma$  e  $-2,5 \sigma$ ), sendo a maior entre 2015 e 2016 (Figura 4.27a). As anomalias positivas de temperatura (entre  $1,0 \sigma$  e  $2,5 \sigma$ ) ocorreram em 23 meses da série, correspondentes a 11,2% do período analisado. O comportamento mais intenso e de maior duração ocorreu entre 2015 e 2018, em que apenas três meses não tiveram anomalia positiva (Figura 4.27b). Apesar das baixas intensidades de anomalias positivas de ocorrência de focos de calor, observa-se que estas são registradas após a diminuição da precipitação, seguidas por um aumento de temperatura (Figura 4.27c).

Figura 4.27: Anomalia temporal de precipitação, temperatura de superfície e ocorrência de focos de calor.

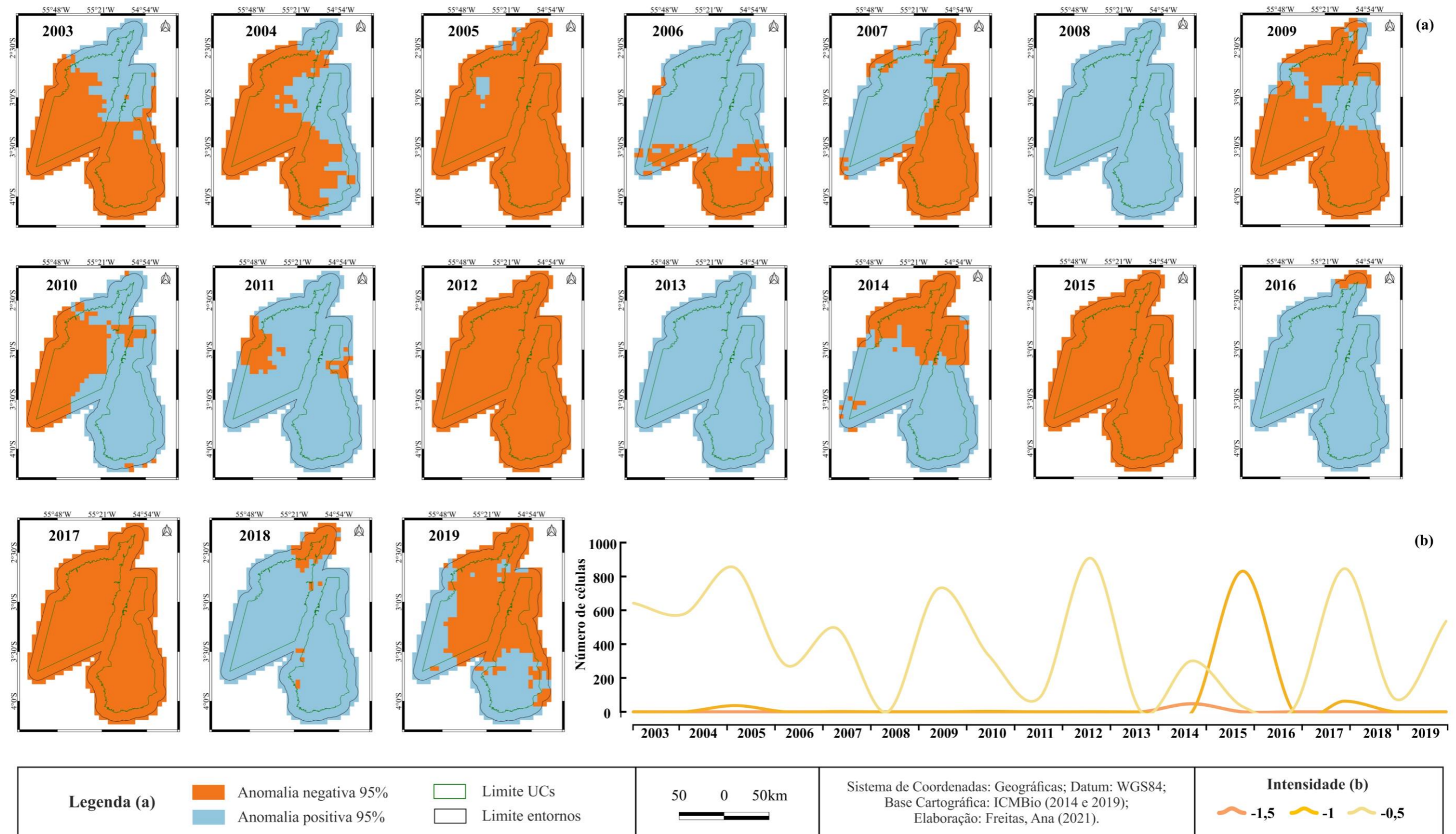


Anualmente, quase metade da área de estudo, que representa 11.300 km<sup>2</sup>, esteve sob efeito de anomalia negativa de precipitação. No entanto, essa distribuição média anual tem maior contribuição dos anos de 2005, 2012, 2015 e 2017, quando mais de 95% da área de estudo esteve sob efeito de anomalia negativa de precipitação (Figura 4.28a). Em contrapartida, esse valor foi atenuado pela distribuição semelhante das anomalias positivas para os anos de 2008, 2013 e 2016. Apesar das características já apresentadas sobre 2016, as anomalias negativas ficaram concentradas nos primeiros meses do ano da série, de forma que ao longo do ano as condições gerais foram atenuadas, voltando a se intensificar para toda a área de estudo em 2017.

Para a distribuição das intensidades das anomalias de precipitação, observam-se picos em 2005, 2009, 2012, 2015 e 2017 (Figura 4.28b). Desses anos, 2015 apresentou mais áreas de média intensidade, com 20.775 km<sup>2</sup>. Os demais foram de anomalias com menor intensidade distribuídos em 20.825 km<sup>2</sup> por ano. A maior intensidade desta anomalia ocorreu em 2014, em 1.200 km<sup>2</sup>.



Figura 4.28: Distribuição das anomalias anuais médias de precipitação.



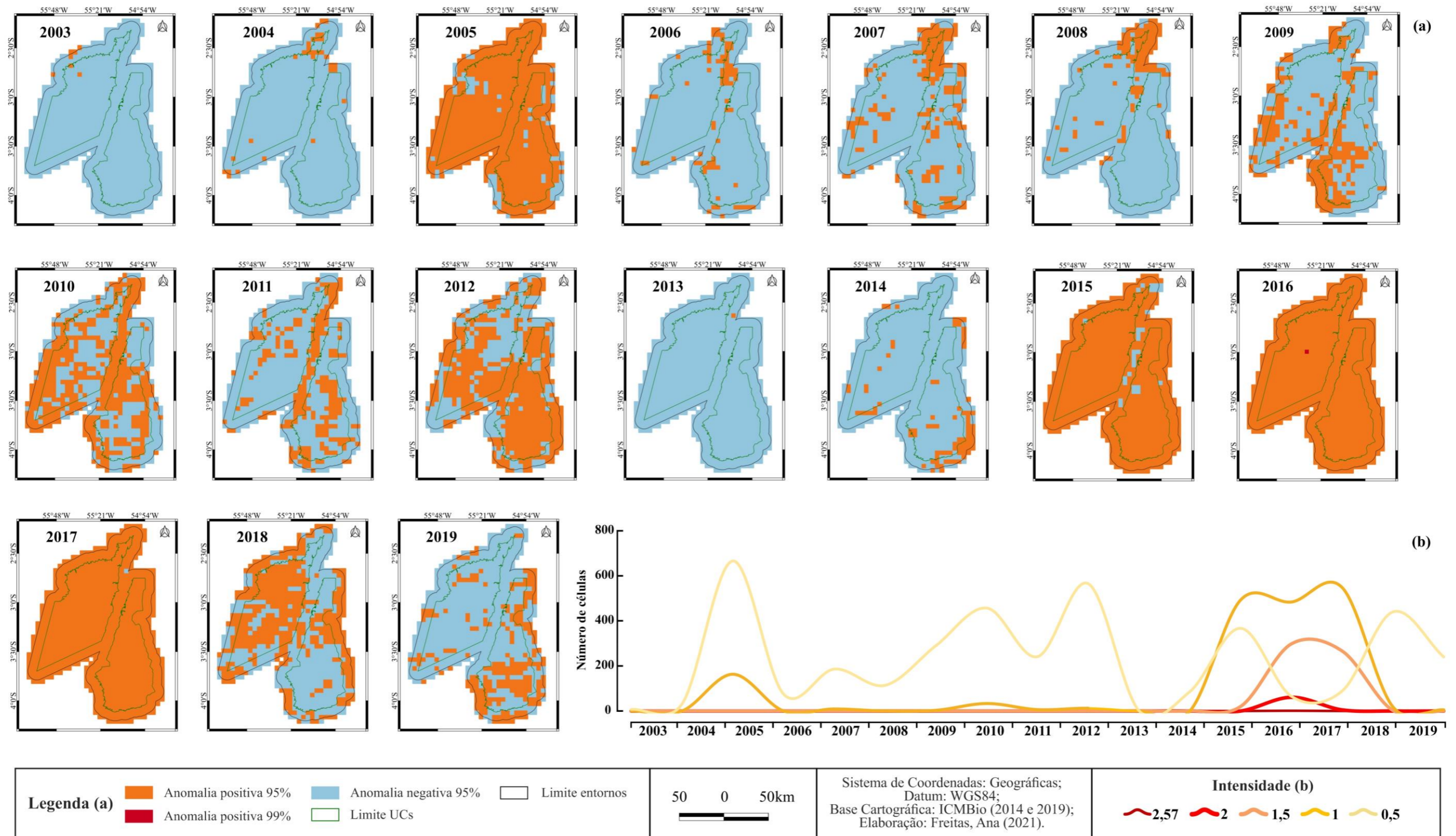
Onde: a) mapas das anomalias médias de precipitação com 95% de confiança; b) Histograma de intensidade de anomalia por área, as cores variam de amarelo para vermelho escuro, de acordo com a menor e maior intensidade associada ao comportamento do fogo (negativa).

Fonte: Produção da Autora.

As anomalias médias positivas de temperatura de superfície estiveram atuantes em 41% da área de estudo por ano (Figura 4.29a). Observam-se temperaturas mais quentes até 2014, que teve uma distribuição mais espaçada do que os anos de 2005, 2010 e 2012, que tiveram mais de 50% da área sob efeito de anomalia média positiva de temperatura. Entre 2015 e 2018 ocorreu o período mais longo com maior área sob os efeitos dessa anomalia.

Ao analisar a distribuição das intensidades de anomalia de temperatura de superfície (Figura 4.29b), foram identificados picos em 2005, 2010, 2012, 2015 e 2018. As áreas com mínimo significativo foram de 5.764 km<sup>2</sup> por ano e com máximo foram de 25 km<sup>2</sup> em 2016. Observa-se que a área afetada é desproporcional entre as intensidades e apresenta variabilidades em anos de seca, sendo as maiores entre 2015 e 2017.

Figura 4.29: Distribuição das anomalias anuais médias de temperatura de superfície.



Onde: a) mapas das anomalias médias de temperatura de superfície com 95% de confiança; b) Histograma de intensidade de anomalia por área, as cores variam de amarelo para vermelho escuro, de acordo com a menor e maior intensidade associada ao comportamento do fogo (positiva).

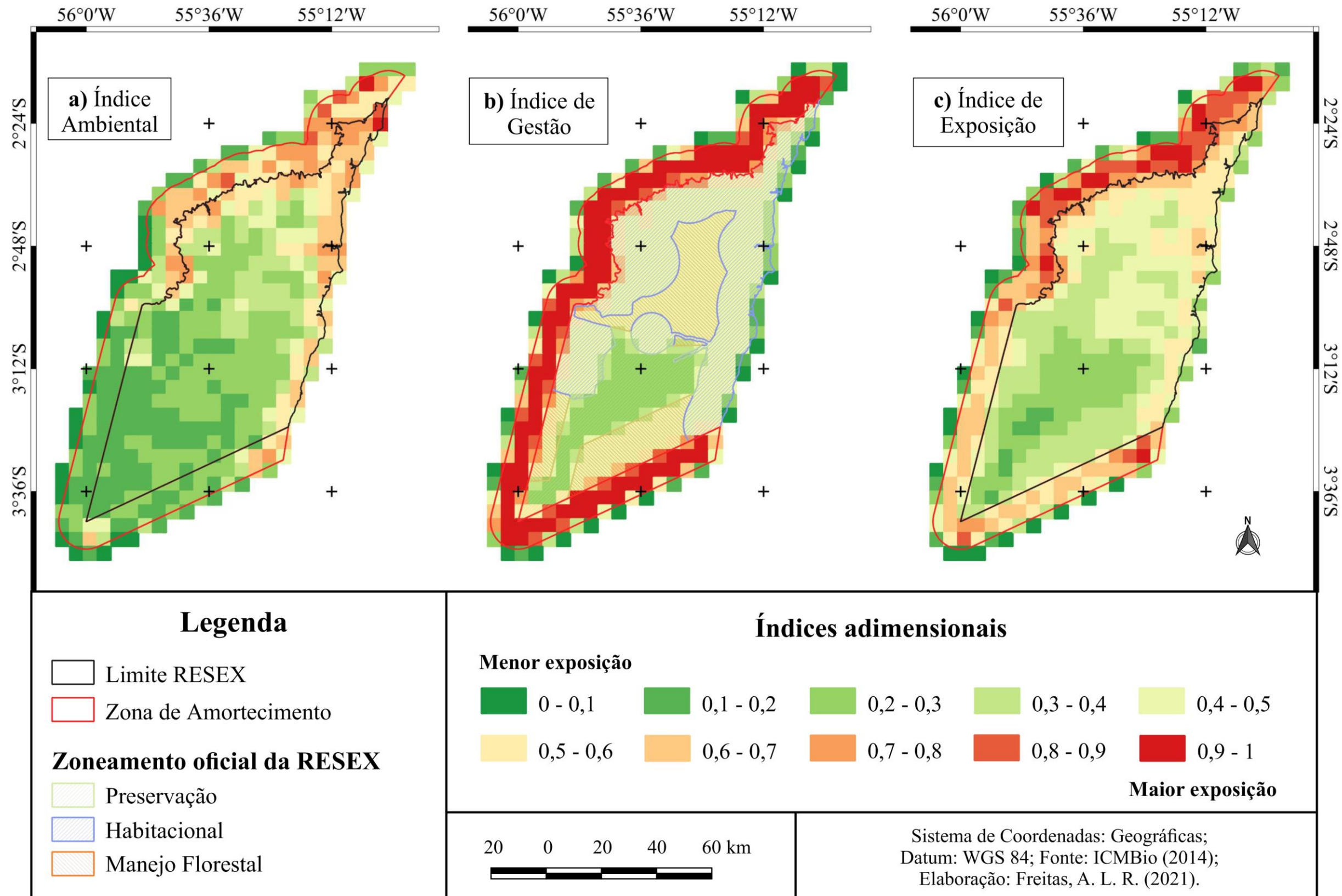
Fonte: Produção da Autora.

#### **4.4 Índice de exposição a incêndios florestais (IEif)**

Nesta seção são apresentados os comportamentos das variáveis que influenciam nos índices de exposição a incêndios florestais (IEif) da FLONA e da RESEX. Além disso, apresenta-se o relacionamento destas variáveis na composição do índice síntese de exposição a incêndios florestais e avalia-se a distribuição espacial para o ano de 2019 deste índice para as áreas estudadas.

Na RESEX, o índice ambiental de maior exposição (0,8 a 1) cobre uma área de 200 km<sup>2</sup>, com 75 km<sup>2</sup> dentro dos limites da UC (Figura 4.30). A porção central e sudoeste da área de estudo é a de menor exposição (0 a 0,2), com 475 km<sup>2</sup>. O resultado do índice de gestão territorial, subsidiado pelo zoneamento da UC, mostra que 255 km<sup>2</sup> estão menos expostos aos incêndios florestais (0,2 a 0,4), por ser uma área destinada à preservação (Figura 4.30b). O IEif é menor (0,1 a 0,3) em 265 km<sup>2</sup> da UC, médio (0,4 a 0,7) em 1.370 km<sup>2</sup> distribuídos pela zona de habitação e manejo, e 440 km<sup>2</sup> de maior intensidade, principalmente às margens do rio Arapiuns. Isso representa 4%, 21% e 7% da RESEX, respectivamente.

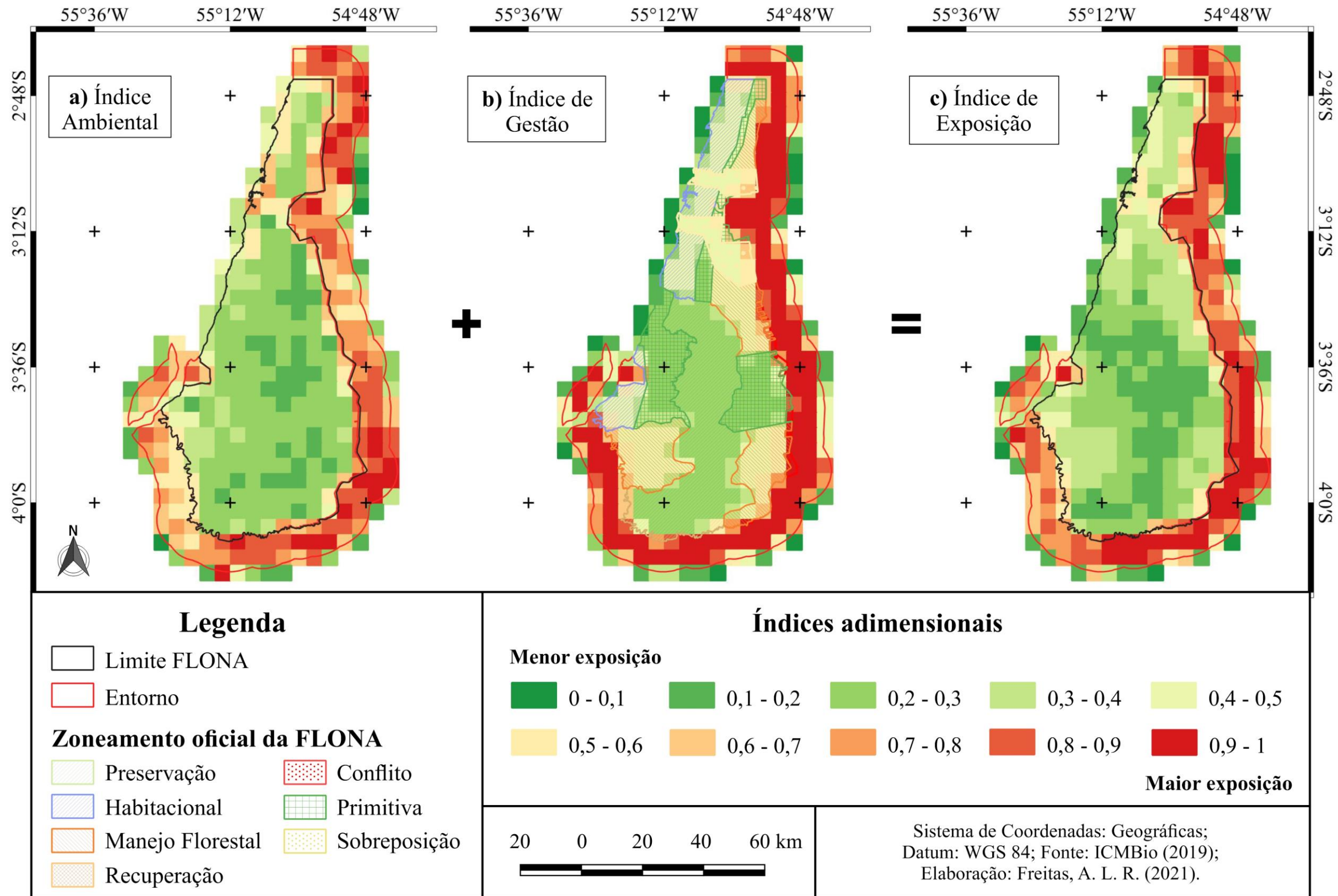
Figura 4.30: Mapa Síntese do IEif da RESEX.



Onde: nos limites a exposição é menor devido aos dados não abrangerem a área fora dela.  
 Fonte: Produção da Autora.

Na FLONA, a área de maior índice ambiental e de gestão territorial (0,8 a 1) está inserida principalmente na zona de amortecimento, com 1.550 km<sup>2</sup> e 2.050 km<sup>2</sup>, respectivamente (Figura 4.31a e 4.31b), observada principalmente na porção próxima ao cruzamento das rodovias federais. As áreas com o menor índice ambiental (0 a 0,2) estão distribuídas na porção centro-sul, com 900 km<sup>2</sup>. O IEif da FLONA e entorno possui 2.625 km<sup>2</sup> com menor valor de exposição - 0 a 0,3, representando cerca de 26% -, 2.975 km<sup>2</sup> com exposição média (0,4 a 0,7), equivalentes a 29,5%, e 2.775 km<sup>2</sup> de maior exposição (0,8 a 1), que corresponde a 27,5%, da qual 25 km<sup>2</sup> são de valor máximo (0,9%).

Figura 4.31: Mapa Síntese do IEif da FLONA.



Onde: nos limites a exposição é menor devido aos dados não abrangerem a área fora dela.  
Fonte: Produção da Autora.

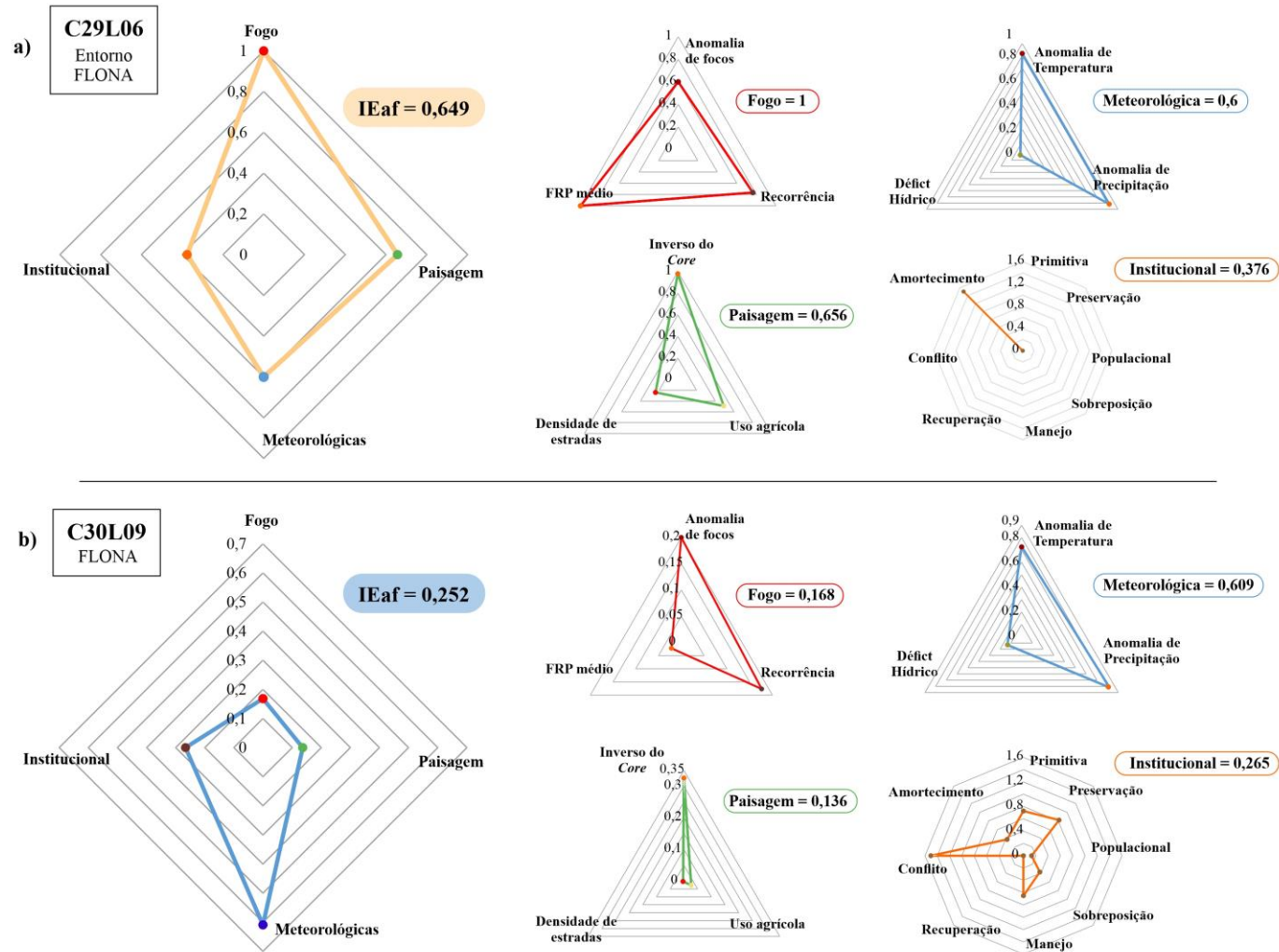
Sabe-se que as atividades antrópicas são as principais responsáveis pelas ocorrências de focos de calor. Assim, há uma dominância do índice de gestão territorial na configuração final da exposição nas UCs. No entanto, como o índice de dinâmica ambiental é o principal responsável pela propagação do fogo, a exposição pode ser atenuada ou intensificada, conforme o seu comportamento.

Para entender como as variáveis e os pesos se comportam nas células, evidenciou-se dois exemplos. O primeiro é associado à contribuição dos índices para o aumento da IEif. Neste exemplo, selecionou-se a célula com maior índice do fogo e influência no comportamento da exposição (Figura 4.32a). Isso ocorre por neste local terem sido detectadas principalmente as altas intensidades do fogo (FRP), seguidas pelos números de recorrência e anomalia positiva na série. Observa-se ainda que a célula com menos efeito de borda da floresta (*core*) é a maior influência para o índice de paisagem, embora atenuado pela menor densidade de estradas.

O segundo exemplo foi escolhido pelo fato de o comportamento da maioria dos índices atuar na diminuição do IEif (Figura 4.32b). A área de qualidade da floresta, com pouca área de densidade de estrada e atividade agrícola, faz com que o índice da paisagem fique perto dos mínimos, entre 0 e 0,3. Observa-se que há a contribuição dos focos de calor, com baixas intensidades e poucos anos de anomalias e recorrências, fato este explicado pela pouca área agrícola na célula. As condições meteorológicas mais associadas ao risco de incêndios florestais possuem um comportamento atuante na série e contribuem para o aumento do valor do IEif. Os efeitos, no entanto, são atenuados devido às poucas fontes de ignição e degradação por fogo ao longo da série.



Figura 4.32: Exemplos das contribuições dos índices para compor o IEif.



Fonte: Produção da Autora.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Gestão territorial

A dinâmica de ocorrência de incêndios e de conversão das florestas na área de estudo é maior nas áreas de entorno das UCs do que no interior destas. Resultado que já foi identificado em outros estudos, que analisaram o perfil de ocorrência de incêndios florestais e a conversão da floresta em alguma forma de uso antropogênico da terra em UCs e entornos no Brasil (TORRES et al., 2016; ALMEIDA-ROCHA; PERES, 2021). Adicionalmente, observa-se que a diferença entre as tipologias e o ordenamento territorial determinado pelos seus respectivos zoneamentos pode ter contribuído para que a FLONA tenha apresentado menos impactos internos e consiga conter o avanço da pressão exercida pelo seu entorno quando comparada à RESEX, o que configurou as diferenças de exposição encontradas para cada UC e entorno nesta pesquisa.

O objetivo geral previsto pela legislação instituída através do SNUC de 2002 é o de “impedir as ameaças e mitigar os impactos negativos aos quais as unidades de conservação e suas zonas de amortecimento estejam expostos”, e também trata especificamente da redução da incidência de incêndios (BRASIL, 2011). Brasil (2011) dispõe ainda sobre as medidas propostas pelo Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas (PNAP), onde constam estratégias de como aperfeiçoar sistemas de prevenção e combate aos incêndios nestas áreas e em seus entornos. Nesta pesquisa, a identificação da exposição a incêndios florestais combinada a fatores condicionantes contribui para o fortalecimento das informações sobre esta ameaça.

Ramos, Fonseca e Morello (2016) avaliam como a formação de brigadas de prevenção e combate por UCs no Brasil contribuiu para impedir a ocorrência de queimadas no interior destas áreas em comparação com seus entornos. Embora identifiquem-se dificuldades em realizar estas atividades nas UCs, mesmo com a existência da política pública, é ainda mais desafiador envolver as populações que habitam o entorno destas áreas. Tais desafios são ainda associados às características como a antropização da entorno da FLONA, que conta com a presença de duas importantes rodovias federais em boa parte de seu perímetro continental e estradas secundárias. Assim, em comparação com as demais subáreas, o entorno da FLONA possui os fatores que contribuem para a maior ocorrência de focos de calor (SAPOUNTZAKI et al., 2009).

Nepstad et al. (2006) identificam como *proxy* da ameaça iminente em UCs na Amazônia tanto o desmatamento quanto a ocorrência de fogo ao longo de seus limites. Segundo o estudo, as UCs que têm seus limites próximos aos locais com altas taxas de desmatamento, conversão de floresta em agricultura e/ou incidência de fogo necessitam de um planejamento em gestão a longo prazo para garantir a sua conservação. Apesar da variabilidade apresentada, os autores afirmam que a densidade populacional atua na inibição do desmatamento para proteger seus territórios. Desta forma, observa-se o potencial de conservação decorrente da presença da FLONA na área de estudo, uma vez que esta manteve uma baixa ocorrência de focos de calor mesmo em anos de extremos climáticos e com a pressão exercida pelo contexto de seu entorno.

Tal problemática, segundo Mares (1986), possui sete fatores primários que limitam a conservação do continente sul-americano, que é refletida em algum grau na área de estudo: i) falta de dados; ii) falta de pessoal treinado em áreas relacionadas à conservação; iii) falta de financiamento; iv) falta de um plano coordenado para o longo prazo; v) economias fracas; vi) estratégias de curto prazo; e vii) um ar de pânico. Apesar de o estudo ter mais de três décadas, o alerta para a necessidade e existência de tempo para o desenvolvimento de políticas públicas junto a especialistas para o planejamento de estratégias de conservação a longo prazo ainda é uma medida a ser tomada nos dias atuais. Este fator também justifica a importância dos resultados desta pesquisa, trazendo uma abordagem integrada e a geração de produtos que possam auxiliar no subsídio ao planejamento e à gestão territorial destas UCs frente às pressões internas e externas.

## **5.2 Contexto socioambiental**

A avaliação das condições climáticas ao longo da série possibilitou a identificação de períodos, intensidade e a distribuição das secas. Na área de estudo, as condições de secas mais intensas ocorrem repetidamente no sentido nordeste-sudeste. A orientação dessa distribuição das variáveis que caracterizam as secas configura uma maior proporção da RESEX sob pressão destas condições. O maior déficit hídrico ocorreu em 2016 com locais, principalmente na RESEX, atingindo aproximadamente -550 mm no ano, embora já apresentasse uma diminuição acentuada iniciando-se em 2013 e 2014.

Apesar da atenuação do déficit hídrico nos anos seguintes, a anomalia média de precipitação (95% de confiança) em 2017 e 2019 esteve presente na maior parte da área

de estudo, recobrando uma área superior a 13 mil km<sup>2</sup>. A anomalia de temperatura, no entanto, foi a que apresentou mais variabilidade na intensidade por ano, que permaneceu com valores elevados em 2018. Este padrão não acompanhou a recuperação do déficit hídrico e da anomalia de precipitação menos intensa concentrada na RESEX, no baixo curso do rio Tapajós e do rio Arapiuns. Isso significa que temperaturas acima da média foram persistentes no período entre 2015 e 2018.

Outros anos, como 2005/06 e 2009/10, também apresentaram condições de seca, no entanto as configurações identificadas após as condições de secas atuantes entre 2015/16 podem evidenciar uma lenta recuperação para condições de normalidade climatológica. Essa condição mais extrema de seca foi identificada como um evento de *El Niño* por diversos estudos (JIMENEZ-MUÑOZ et al., 2016; GLOOR et al., 2018; RIFAI; LI; MALHI, 2019), bem como seus impactos para a Amazônia e a região da área de estudo (WHITNEY et al., 2018). Para Aragão et al. (2018), essa condição aumentou a probabilidade de escape de fogo das áreas de atividades antrópicas para florestas, uma vez que estas áreas vizinhas estavam mais suscetíveis. Para os autores, as secas associadas ao aumento da persistência do desmatamento e o manejo de pastagens podem dobrar a taxa média de incidência de incêndios na Amazônia (SILVEIRA et al., 2020; MARENGO et al., 2021). Além disso, observou-se que a anomalia de ocorrência do fogo tem maior frequência nos meses que antecedem o período de chuva, com principal contribuição do entorno da FLONA.

Berenguer et al. (2021) avaliaram as características fisiológicas da floresta no Baixo Tapajós após a ocorrência do *El Niño* de 2015/16 e das áreas que foram submetidas a incêndios florestais no mesmo período. A interação destes fatores levou à mortalidade de  $2,5 \pm 0,3$  bilhões de árvores. Mesmo após três anos, o crescimento e o recrutamento das plantas compensaram apenas 37% das emissões de carbono para atmosfera. Esse resultado indica que a exposição a incêndios florestais associada a estes eventos de secas extremas deve intensificar-se nas próximas décadas, corroborando os exercícios de modelagem de previsões climáticas (FONSECA et al., 2019). Além disso, demonstra-se a influência da organização e da gestão territorial nas ocorrências e/ou no controle da degradação florestal, tanto nesta pesquisa quanto em Fonseca et al. (2019).

Esse contexto na Amazônia motiva preocupações de como as UCs podem se adaptar aos processos associados às mudanças climáticas, posto que descrevem-se que apenas 8% das UCs possuem heterogeneidade climática suficiente para acomodar espécies em resposta às mudanças climáticas previstas para os próximos 100 anos (LOARIE et al., 2009). Isso ocorre devido à diminuição e à fragmentação do *habitat* associado ao aquecimento global e a secas projetados para o fim do século e restringem a migração e adaptações das espécies, tornando-as mais vulneráveis a estes eventos (DAVIES; PURVIS; GITTLEMAN, 2009).

O contraste na dinâmica interna entre as UCs chama atenção, pois mesmo sendo de tipologias diferentes, existem proximidade geográfica e iniciativas conjuntas para a conservação das áreas. Na RESEX, além da maior ocorrência de focos de calor, é também identificada uma maior fragmentação das áreas de floresta primária no interior da unidade. O desmatamento segue as características observadas em outras UCs, com a pressão exercida pelos entornos, principalmente o da FLONA, com 76% dos polígonos de desmatamento, segundo os dados do PRODES. A ocorrência de focos de calor após o desmatamento é mais intensa nos primeiros três anos, que indica a conversão gradual e lenta destas áreas para o uso agrícola, em relação a dinâmica de corte e queima rápido, observadas no Estado do Mato Grosso para a plantação de *commodities* agrícolas (ANDERSON et al., 2003). As taxas observadas nas UCs, no entanto, confirmam o efeito positivo na preservação das áreas de floresta primária, frente à dinâmica exercida pelo entorno.

Segundo Silva et al. (2018), mesmo em até 31 anos após a ocorrência do fogo em parcelas distribuídas na Amazônia, os níveis de biomassa eram menores do que nas áreas não queimadas, com  $24,8 \pm 6,9$  %. Por outro lado, para Andrade et al. (2020), a cobertura florestal da FLONA é capaz de alcançar taxas de mortalidade e estrutura semelhantes às existente antes da ocorrência do fogo, a partir de 15 anos após a ocorrência de incêndios. Nesta pesquisa foram identificados locais classificados como floresta primária que tiveram focos de calor registrados e o tempo em anos em que permaneceram na classe, de até 16 anos para toda a área de estudo (Figura 4.10).

Desta forma, supõe-se que estes locais estejam passando por uma recuperação da degradação pelo fogo. Na série temporal avaliada, é possível estimar que pelo menos 0,68

km<sup>2</sup> da área total de floresta primária sofreram degradação por fogo entre 2003 e 2005 e recuperaram a estrutura do dossel em 2019, com base na detecção por sensoriamento remoto. Essa identificação pode ser utilizada para orientar ações que evitem que novos impactos nestes locais, uma vez que como também foi observado nesta pesquisa, durante esse período há possibilidade de conversão da cobertura, uma vez que outros processos de degradação estejam atuantes. Quando ocorre uma conversão rápida nestes locais para áreas produtivas, nos primeiros anos após a ocorrência do foco de calor, a dinâmica pode indicar que a perda de floresta primária é mais associada a exposição a incêndios florestais, prática comum utilizada para o preparo da área agrícola. Assim, identifica-se uma pressão pela conversão dessas áreas de floresta para atividade agrícola e/ou que o comportamento do fogo foi forte o suficiente para remover grande parte da biomassa, descaracterizando-a de uma formação florestal (NOGUEIRA et al., 2018).

A recorrência do fogo leva a uma redução sucessiva da biomassa, e pode acarretar na destruição completa da floresta se queimada várias vezes em uma década (BRANDO et al., 2014; BERENGUER et al., 2014; LONGO et al., 2016). O comportamento recorrente e constante de degradação na floresta decorrente da ação antrópica é apontado como um cenário crítico de vulnerabilidade (SALES et al., 2019).

As características de mudanças de uso e cobertura da terra, as alterações na paisagem, o fogo e os extremos climáticos identificadas por esta pesquisa para a área de estudo assemelham-se ao já avaliado por interações entre as variáveis propostas nos estudos citados, mas não de forma integrada, como apresentado aqui. Por exemplo, o uso do fogo na conversão de florestas primárias em áreas produtivas acarretou aumento da fragmentação da paisagem. A maior perda percentual de área *core* na área de estudo foi de 6,7% entre 2015/16, o que evidencia o papel das forçantes meteorológicas associadas às atividades antrópicas em potencializar este processo.

## 6 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, a integração de dados socioambientais permitiu a avaliação temporal da dinâmica dos focos de calor e as diferentes relações com seus fatores e condicionantes. As características deste processo foram associadas aos dados de gestão territorial para a construção do Índice de Exposição a Incêndios Florestais (IEif). Ao longo das análises foram produzidas informações importantes para subsidiar estratégias de prevenção e monitoramento de incêndios.

A dinâmica de registro de focos de calor na área de estudo tem a principal contribuição do entorno da FLONA, onde se concentram os maiores valores de FRP, recorrência, anomalias e registros noturnos, mais associados a escapes de incêndio. Ao mesmo tempo, a FLONA é a UC que, em contraste com a pressão a que tem sido submetida, apresentou uma menor ocorrência de focos de calor, o que evidencia a sua importância para a conservação das florestas da região do Tapajós. Por outro lado, apesar da proximidade e intercâmbio de informações entre as UCs, a RESEX é a segunda subárea com dinâmica mais intensa de focos de calor, quando o esperado seria que fosse o seu entorno.

Os desmatamentos e as mudanças de uso e cobertura da terra imprimiram alterações nas características da paisagem, uma dinâmica que apresentou diversas perspectivas com a relação entre a atividade antrópica e a de registro de focos de calor. Estas atividades são amplamente associadas com a ignição do fogo na Amazônia e confirmadas para a área de estudo. Antes dos desmatamentos serem alertados e/ou mapeados, foi observada a atuação da degradação por fogo nas áreas que originalmente eram florestas.

Esse comportamento é confirmado na avaliação do período de conversão da floresta primária após a ocorrência do foco de calor, que inicialmente apresenta uma diminuição do número de transição nos primeiros anos, seguido por um aumento no número de florestas secundárias com mais de seis anos de idade. Na comparação entre as UCs, a RESEX foi a que perdeu a maior área de floresta primária na série, com 236,9 km<sup>2</sup>, ficando atrás dos 427,5 km<sup>2</sup> perdidos pelo entorno da FLONA. Tais resultados confirmam que, mesmo para as UCs, existem diferenças nas tipologias e objetivos intrínsecos, o que evidencia a importância do planejamento e da gestão territorial efetiva para garantir o desenvolvimento de atividades adequadas às suas necessidades populacionais e à conservação ambiental.

A precipitação é inversamente proporcional à ocorrência de focos de calor avaliados no comportamento diário como esperado. Para a temperatura, o pico de ocorrência do fogo é entre 30°C e 34°C. Os anos com maior déficit hídrico e atuação de anomalias de temperatura e precipitação coincidem com o maior número de ocorrência de focos de calor. Isso é mais evidente em anos com maior variabilidade entre as intensidades dessas anomalias, que aumentaram o alcance do fogo para o interior das UCs, principalmente na RESEX, que teve o seu interior atingido uma única vez na série durante o *El Niño* de 2015/16.

As interações que resultariam em uma maior ou menor exposição na área de estudo foram integradas na composição de índices. Este procedimento se apresentou vantajoso ao conservar para cada índice (fogo, paisagem, condição meteorológica e gestão territorial) as informações individuais de seus indicadores. Assim, além de fornecer informações quantitativas e qualitativas sintetizadas através de índices socioambientais compostos, os resultados produzidos permitem identificar qual componente está sendo responsável pelo aumento ou atenuação da exposição ao fogo na área.

A pesquisa fornece também uma base socioambiental para o desenvolvimento de estratégias de prevenção, uma vez que as áreas mais expostas a incêndios florestais são identificadas com tamanho detalhamento. Desta forma, as atividades preventivas podem ser mais bem direcionadas e mais efetivas, frente a limitações de recurso financeiro e de equipes de combate aos incêndios.

A aplicação da abordagem desenvolvida neste estudo é útil para indicar onde e como ocorrem as interações mútuas entre focos de calor, paisagem, uso e cobertura da terra, comportamento climático e gestão territorial. A utilização de dados públicos e abertos, além de *softwares* livres, também se destaca na produção desta pesquisa, que vai além da confiabilidade destes, uma vez que torna esta metodologia replicável para outras UCs. Por fim, acredita-se que o uso das informações produzidas aqui irá contribuir para um maior entendimento das dinâmicas socioambientais atuantes em 17 anos em ambas as UCs.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFFONSO, A. G.; ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S.; SOUZA, A. R.; SIQUEIRA, J. M.; TORRES, N. C.; CAMILOTTI, V. L.; DAL'ASTA, A. P.; COSTA, L. C. O.; SOARES, F. R. **As comunidades ribeirinhas do Baixo Tapajós (PA):** infraestrutura, mobilidade, serviços sócios ambientais e conectividade. São José dos Campos: INPE, 2016. 150 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3M7C69L>. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3M7C69L>.
- ALENCAR, A. A. C.; SOLORZANO, L. A.; NEPSTAD, D. C. Modeling forest understory fires in an eastern Amazonian landscape. **Ecological Applications**, v,14, p.S139–S149, 2004.
- ALENCAR, A.; ASNER, G. P.; KNAPP, D.; ZARIN, D. Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, 2011.
- ALMEIDA-ROCHA, J. M.; PERES, C. A. Nominally protected buffer zones around tropical protected areas are as highly degraded as the wider unprotected countryside. **Biological Conservation**, v. 256, e109068, 2021.
- ANAZAWA, T. M. **Vulnerabilidade e território no litoral norte de São Paulo:** indicadores, perfis de ativos e trajetórias. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; GLOOR, M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SAATCHI, S. S.; MALHI, Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; BARLOW, J.; BERENQUER, E.; DUARTE, V. Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 10, p. 1739–1753, 2015.
- ANDERSON, L. O.; RIBEIRO NETO, G.; CUNHA, A. P.; FONSECA, M. G.; MOURA, Y. M.; DALAGNOL, R.; WAGNER, F. H.; ARAGÃO, L. E. O. C. Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, e 20170411, 2018.
- ANDERSON, L. O.; RIBEIRO NETO, G.; CUNHA, A. P.; FONSECA, M. G.; MOURA, Y. M.; DALAGNOL, R.; WAGNER, F. H.; ARAGÃO, L. E. O. E. C. Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, 2018.
- ANDERSON, L.O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v.35, n.4, p.445-456, 2005.
- ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 19–25.

ANDRADE, D. F. C.; RUSCHEL, A. R.; DE AVILA, A. L.; GAMA, J. R. V. Composição e estrutura de uma floresta primária atingida por incêndio florestal na Amazônia Oriental. **Ciencia Florestal**, v. 30, n. 1, p. 145–160, 2020.

ANDREN, H. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. **Oikos**, v.71, n. 3, p. 355-366, 1994.

AQUINO, A. R.; LANGE, C. N.; LIMA, C. M.; AMORIM, E. P.; PALETTA, F. C.; FERREIRA, H. P.; BORDON, I. C. A.; ALMEIDA, J. R.; GOMES, M. A. U. G.; ZAMPIERI, M. C. T.; OLIVEIRA, M. J. A.; CORREIA JUNIOR, P. A.; SOUZA, R. R.; MATTIOLO, S. R.; RODRIGUES, S. G. Vulnerabilidade ambiental. In: AQUINO, A. R.; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. (Ed.). **Vulnerabilidade ambiental**. [S.l.]: Blucher, 2017. p. 15–28.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C. V. J.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J. A.; MILLER, J. B.; PHILLIPS, O. L.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 7, p. 1–5, 2007.

ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in amazonian forests with implications for REDD. **Science**, v. 328, n. 5983, p. 1275–1278, 2010.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1779-1785, 2008.

ARAGÃO, L. E. O.; SILVA-JUNIOR, C. H. L.; ANDERSON, L. O. **O desafio do Brasil para conter o desmatamento e as queimadas na Amazônia durante a pandemia por Covid-19 em 2020**: implicações ambientais, sociais e sua governança. São José dos Campos: INPE, 2020. Disponível em: [https://www.treeslab.org/uploads/4/6/5/4/465490/nt\\_desmatamento\\_fogo\\_e\\_covid-19\\_na\\_amazonia\\_circulacao.pdf](https://www.treeslab.org/uploads/4/6/5/4/465490/nt_desmatamento_fogo_e_covid-19_na_amazonia_circulacao.pdf). Acesso em: maio 2021.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, 2008.

ARAGÃO, L. E. O. C.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ANDERSON, L. O. **O desafio do Brasil para conter o desmatamento e as queimadas na Amazônia durante a pandemia por COVID-19 em 2020: implicações ambientais, sociais e sua governança.** São José dos Campos: INPE, 2020. 34p.

ARAI, D. T.; ARAI, E.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; SUGAWARA, L. M.; FREITAS, R. M.; ANDERSON, L. O. Avaliação temporal de padrões de fogo, uso e tipo de cobertura da terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 6278-6284. IBI: <3ERPFQTRW/3A5H8RE>. Disponível em: <http://urlib.net/rep/3ERPFQTRW/3A5H8RE>.

BACHA, C.J.C; RODRIGUEZ, L.C.E. **Impactos sócio-econômicos do Projeto ITTO na Floresta Nacional do Tapajós.** Piracicaba: ITTO, 2004.

BECKER, B. **Amazônia.** 5.ed. São Paulo: Ática, 1997.

BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia: conferência do mês do Instituto de Estudos Avançados da USP proferida pela autora em 27 de abril de. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 71–86, 2005.

BERENGUER, E.; FERREIRA, J.; GARDNER, T. A.; ARAGÃO, L. E. O. C.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. E.; DURIGAN, M.; OLIVEIRA, R. C.; VIEIRA, I. C. G.; BARLOW, J. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. **Global Change Biology**, v. 20, n. 12, p. 3713-3726, 2014.

BERENGUER, E.; LENNOX, G. D.; FERREIRA, J.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; BARRETO, J. R.; ESPÍRITO-SANTO, F. B.; FIGUEIREDO, A. E. S.; FRANÇA, F.; GARDNER, T. A. Tracking the impacts of El Niño drought and fire in human-modified Amazonian forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 30, p. 1-8, 2021.

BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; MORTON, D. C.; PUTZ, F. E.; COE, M. T.; SILVÉRIO, D.; MACEDO, M. N.; DAVIDSON, E. A.; NÓBREGA, C. C.; ALENCAR, A.; SOARES-FILHO, B. S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 17, p. 6347–6352, 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza:** Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000; Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002; Decreto nº 5.746, de 5 de abril de 2006. Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas: Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006. Brasília: MMA, 2011. 76 p.

CARDONA, O. D.; VAN AALST, M. K.; BIRKMANN, J.; FORDHAM, M.; MC GREGOR, G.; ROSA, P.; PULWARTY, R. S.; SCHIPPER, E. L. F.; SINH, B. T.; DÉCAMPS, H.; KEIM, M.; DAVIS, I.; EBI, K. L.; LAVELL, A.; MECHLER, R.; MURRAY, V.; PELLING, M.; POHL, J.; SMITH, A. O.; THOMALLA, F. Determinants of risk: exposure and vulnerability. In: INTERGOVERNMENTAL

PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 65–108.

CARDOSO, M. F.; HURTT, C. G.; MOORE, B.; NOBRE, C. A.; E. M. PRINS. Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 9, p. 656–669, 2003.

CARMENTA, R.; COUDEL, E.; STEWARD, A. M. Forbidden fire: does criminalising fire hinder conservation efforts in swidden landscapes of the Brazilian Amazon? **Geophysical Journal**, v.184, n.2, p. 23–37, 2019.

CARMENTA, R.; VERMEYLEN, S.; PARRY, L.; BARLOW, J. Shifting cultivation and fire policy: insights from the Brazilian Amazon. **Human Ecology**, v.41, p. 603–614, 2013.

CASTRO, E. Dinâmica socioeconômica e desmatamento na Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 8, n. 2, p. 5–39, 2005.

CAVALCANTE, R. B. L.; FERREIRA, D. B. S.; PONTES, P. R. M.; TEDESCHI, R. G.; COSTA, C. P. W.; SOUZA, E. B. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020.

CLEVELAND, W. S.; GROSSE, E.; SHYU, W. M. Local regression models. In: CHAMBERS, J. M.; HASTIE, T. J. (Ed.). **Statistical models in S**. New York: Chapman and Hall, 1992. p. 309-376.

CLEVELAND, W. S.; LOADER, C. Smoothing by local regression: principles and methods. In: STATISTICAL THEORY AND COMPUTATIONAL ASPECTS OF SMOOTHING, 1996, Heidelberg. **Proceedings...** Heidelberg: Physica-Verlag HD, 1996.

COCHRANE, M. A. Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in evergreen tropical forests. **Conservation Biology**, v.15, p.1515-1521, 2001.

COCHRANE, M. A.; LAURANCE, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. **Journal of Tropical Ecology**, v.18, p. 311-325, 2002.

COSTA, A. A.; PAULIQUEVIS, T. M. Aerossóis, nuvens e clima: resultados do experimento LBA para o estudo de aerossóis e microfísica de nuvens. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 234-253, 2009.

COSTA, B. O. **Degradação florestal por extração seletiva e fogo na Amazônia Legal**. 186p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

CRUZ, A. G. Dois séculos de extrativismo e especialização primário-exportadora na Amazônia: uma análise comparada entre os ciclos da borracha e do minério de ferro. **Cadernos Cepec**, v.8, n.1, p.6-24, 2019.

CSISZAR, I.; SCHROEDER, W.; GIGLIO, L.; ELLICOTT, E.; VADREVU, K. P.; JUSTICE, C. O.; WIND, B. Active fires from the Suomi NPP visible infrared imaging radiometer suite: product status and first evaluation results. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v.119, p. 803–816, 2014.

DAVIES, T. J.; PURVIS, A.; GITTLEMAN, J. L. **Quaternary climate change and the geographic ranges of mammals**. [S.l.]: University of Chicago, 2009.

DENNISON, P. E.; CHAROENSIRI, K.; ROBERTS, D. A.; PETERSON, S. H.; GREEN, R. O. Wildfire temperature and land cover modeling using hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.100, p. 212-222, 2006.

DUNN, O. J. Multiple comparisons using rank sums. **Technometrics**, v. 6, p.241-252, 1964.

ESCADA, M. I. S.; LOBO, F. L.; GAVLAK, A. A.; SAITO, E. A.; PINHEIRO, T. F.; SILVA, M.; Almeida, C. A.; AZEREDO, M. Padrões espaço-temporais de uso e cobertura da terra nas Áreas de Endemismo Xingu e Tapajós. In: EMÍLIO, T.; LUIZÃO, F. (Org.). **Cenários para a Amazônia**: clima, biodiversidade e uso da terra. Manaus: INPA, 2014. p. 67-77.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v.34, p.487-515, 2003.

FERREIRA, J.; BLANC, L.; KANASHIRO, M.; LEES, A.C.; BOURGOIN, C.; FREITAS, J. V. D.; GAMA, M. B.; LAURENT, F.; MARTINS, M. B.; MOURA, N.; OLIVEIRA, M. V. N.; SOTTA, E. D.; SOUZA, C. R.; RUSCHEL, A. R.; SCHWARTZ. **Degradação florestal na Amazônia**: como ultrapassar os limites conceituais, científicos e técnicos para mudar esse cenário. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2015

FONSECA, M. G.; ALVES, L. M.; AGUIAR, A. P. D.; ARAI, E.; ANDERSON, L. O.; ROSAN, T. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. E. C. Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931–2946, 2019.

FREEBORN, P. H.; WOOSTER, M. J.; HAO, W. M.; RYAN, C. A.; NORDGREN, B. L.; BAKER, S. P.; ICHOKU, C. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires. **Journal of Geophysical Research - Atmospheres**, v. 113, D01301, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007JD008679>.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1–21, 2015.

GATTI, L. V.; BASSO, L. S.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; DOMINGUES, L. G.; CASSOL, H. L. G.; TEJADA, G.; ARAGÃO, L. E. O. C.; NOBRE, C.; PETERS, W.

MARANI, L.; ARAI, E.; SANCHES, A. H.; CORRÊA, S. M.; ANDERSON, L. O.; RANDOW, C. V. CORREIA, C. S. C.; CRISPIM, S. P.; NEVES, R. A. L. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021.

GELDMANN, J.; BARNES, M.; COAD, L.; CRAIGIE, I. D.; HOCKINGS, M.; BURGESS, N. D. Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines, **Biological Conservation**, v. 161, p. 230-238, 2013.

GIBBONS, J. D.; CHAKRABORTI, S. Nonparametric statistical inference. In: LOVRIC, M. (Ed.). **International encyclopedia of statistical science**. Berlin: Springer, 2011. p. 977-979.

GIGLIO, L. **MODIS collection 5 active fire product user's guide**: version 2.5. [S.l.]: University of Maryland, 2013. 61p.

GLOOR, E.; WILSON, C.; CHIPPERFIELD, M. P.; CHEVALLIER, F.; BUERMANN, W.; BOESCH, H.; PARKER, R.; SOMKUTI, P.; GATTI, L. V.; CORREIA, C. Tropical land carbon cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, e 20170302, 2018.

HEINRICH, V. H. A.; DALAGNOL, R.; CASSOL, H. L. G.; ROSAN, T. M.; TORRES, C.; ALMEIDA, D.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; CAMPANHARO, W. A.; HOUSE, J. I.; SITCH, S.; HALES, T. C.; ADAMI, M.; ANDERSON, L. O.; DIVISION, R. S.; SCIENCES, O. Large carbon sink potential of Amazonian secondary forests to mitigate climate change. **Natures Research**, v. 1, p. 4–6, 2020.

HENDRIX, E. **Analysis of the use of spatio-temporal early warning metrics to estimate fire vulnerability resilience in the Amazon rainforest**. [S.l.]: Wageningen University, 2018.

HETTMANSPERGER, T. P.; MCKEAN, J. W. **Robust nonparametric statistical methods**. 2.ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010. ISBN 9781439809082.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - ICMBio. **Plano de manejo**: Floresta Nacional do Tapajós. Brasília: MMA, 2019. 316 p.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - ICMBio. **Plano de manejo**: Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns. Brasília: MMA, 2014. 159 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA – INPE/OBT. **Projeto de monitoramento do desmatamento na Amazônia brasileira por satélite - PRODES**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 12 jan. 2021a.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA – INPE/OBT. **Sistema de detecção de**

**desmatamento em tempo quase real – DETER.** Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/deter>. Acesso em: 12 jan. 2021b.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **DETER intenso.** Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/deter-intenso>. Acesso em: jun. 2021d.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Programa queimadas: perguntas frequentes.** Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>. Acesso em: mar. 2021c.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL ISA. **Situação atual das unidades de conservação.** Disponível em: <https://uc.socioambiental.org/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.** Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J. A.; SCHRIER, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016.

JOLLY, W. M.; COCHRANE, M. A.; FREEBORN, P. H.; HOLDEN, Z. A.; BROWN, T. J.; WILLIAMSON, G. J.; BOWMAN, D. M. J. S. Danger from 1979 to 2013. **Nature Communications**, v. 6, p. 1–11, 2015.

KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 1, p. 116–126, 2009.

KÖEPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde.** Berlin: Walter de Gruyter, 1931.

KRUG, T. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, p. 43–72, 2008.

LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; AGUIAR, A. P. D.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CARDOSO, M. F.; COSTA, M. H.; JOLY, C. A.; LEITE, C. C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B. B. N.; VIEIRA, I. C. G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 27–35, 2014.

LOARIE, S. R.; DUFFY, P. B.; HAMILTON, H.; ASNER, G. P.; FIELD, C. B.; ACKERLY, D. D. The velocity of climate change. **Nature**, v. 462, n. 7276, p. 1052–1055, 2009.

LONGO, M.; KELLER, M.; DOS-SANTOS, M. N.; LEITOLD, V.; PINAGÉ, E. R.; BACCINI, A.; SAATCHI, S.; NOGUEIRA, E. M.; BATISTELLA, M.; MORTON, D.

C. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1639–1660, 2016.

MAPBIOMAS. **Coleção 4 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. Disponível em: <http://plataforma.mapbiomas.org/stats>. Acesso em: 20 mar. 2021.

MARENGO, J. A.; JIMENEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C.; CUNHA, A. P.; ARAGÃO, L. E. O. Increased climate pressure on the new agricultural frontier in the eastern Amazonia-Cerrado transition zone. **Research Square**, p. 1-17, 2021.

MARES, M. A. Conservation in South America: problems, consequences, and solutions. **Science**, v. 233, n. 4765, p. 734-739, 1986.

MCGARIGAL, K.; MARKS, B.J. **FRAGSTATS**: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. [S.l.]: Oregon State University, 1994. 67p.

MCRAE, R.; SHARPLES, J. Assessing mitigation of the risk from extreme wildfires using MODIS hotspot data. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION (MODSIM), 21., 2015. **Proceedings...** 2015. p. 250–256.

MEEHL, G. A.; KARL, T.; EASTERLING, D. R.; CHANGNON, S.; PIELKE, R.; CHANGNON, D.; EVANS, J.; GROISMAN, P. Y.; KNUTSON, T. R.; KUNKEL, K. E.; MEARNS, L. O.; PARMESAN, C.; PULWARTY, R.; ROOT, T.; SYLVES, R. T.; WHETTON, P.; ZWIERS, F. Uma introdução às tendências em eventos extremos de tempo e clima: observações, impactos socioeconômicos, impactos ecológicos terrestres e modelos de projeções. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.81, p. 413-416, 2000.

MEIR, P.; METCALFE, D. B.; COSTA, A. C. L.; FISHER, R. A. The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1849–1855, 2008.

MORTON, D. C.; LE PAGE, Y.; DEFRIES, R.; COLLATZ, G. J.; HURTT, G. C. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, 2013.

Mu, Y.; Biggs, T.; Shen, S. S. P. Improving the CHIRPS (V2.0) precipitation estimates for rainfall extremes using a dense rain gauge network over the Brazilian Amazon. **AGU Fall Meeting Abstracts**, H200-0035, 2020.

NEPSTAD, D. C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large-scale impoverishment of amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505–508, 1999.

NEPSTAD, D.; SCHWARTZMAN, S.; BAMBERGER, B.; SANTILLI, M.; RAY, D.; SCHLESINGER, P.; LEFEBVRE, P.; ALENCAR, A.; PRINZ, E.; FISKE, G.; ROLLA,



- A. Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. **Conservation Biology**, v. 20, n. 1, p. 65–73, 2006.
- NEVES, A. K.; KÖRTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S. Assessment of terra-class and mapbiomas data on legend and map agreement for the Brazilian Amazon biome. **Acta Amazonica**, v. 50, n. 2, p. 170–182, 2020.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e o Brasil: contextualização. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, p. 7–17, 2008.
- NOGUEIRA, E. M.; YANAI, A. M.; DE VASCONCELOS, S. S.; DE ALENCASTRO GRAÇA, P. M. L.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's Amazonian protected areas as a bulwark against regional climate change. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 2, p. 573–579, 2018.
- ORGANIZAÇÃO PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). **A framework for land evaluation**. Roma: FAO, 1977. 87p. (ILRI PUBLICATION, 22).
- ORTEGA, M.; SAURA, S.; GONZÁLEZ-AVILA, S.; GÓMEZ-SANZ, V.; ELENA-ROSSELLÓ, R. Landscape vulnerability to wildfires at the forest-agriculture interface: half-century patterns in Spain assessed through the SISPAES monitoring framework. **Agroforestry Systems**, v. 85, n. 3, p. 331–349, 2012.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Climate change 1999: the scientific basis**, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Climate change 2007: the physical science basis**. Geneva: IPCC, 2007. 18p.
- PAULIQUEVIS, T. M.; ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P.; PAIXÃO, M. A. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico, **Mudanças Climáticas**, p. 48-50, 2007.
- PEREIRA, J. L. G.; BATISTA, G. T.; CORDEIRO THALÊS, M.; ROBERTS, D. A.; VENTURIERI, A. Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. **Geografia**, v. 26, n. 1, 2001.
- PESSÔA, A. C. M.; ANDERSON, L. O.; CARVALHO, N. S.; CAMPANHARO, W. A.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ROSAN, T. M.; REIS, J. B. C.; PEREIRA, F. R. S.; ASSIS, M.; JACON, A. D.; OMETTO, J. P.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA, C. V. J.; PONTES-LOPES, A.; MORELLO, T. F.; ARAGÃO, L. E. O. C. Intercomparison of burned area products and its implication for carbon emission estimations in the Amazon. **Remote Sensing**, v. 12, n. 23, p. 1–24, 2020.
- RAJÃO, R.; NUNES, F.; SCHMITT, J.; SOARES-FILHO, B. **Dicotomia da impunidade do desmatamento ilegal**. 2021. Disponível em: [https://csr.ufmg.br/csr/wp-content/uploads/2021/06/Rajao\\_Schmitt-et-al\\_Julgamentos-IBAMA\\_final.pdf](https://csr.ufmg.br/csr/wp-content/uploads/2021/06/Rajao_Schmitt-et-al_Julgamentos-IBAMA_final.pdf). Acesso em: jun. 2021.

RAMOS, R. M.; FONSECA, R. L.; MORELLO, T. F. Unidades de conservação e proteção contra incêndios florestais: relação entre foco de calor e ações articuladas pelas brigadas contratadas. **Biodiversidade Brasileira**, v. 6, n. 2, p. 135-148, 2016.

REYDON, B. P.; FERNANDES, V. B.; TELLES, T. S. Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 94, e 104313, 2020.

RIFAI, S. W; LI, S.; MALHI, Y. Coupling of El Niño events and long-term warming leads to pervasive climate extremes in the terrestrial tropics. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 10, e 105002, 2019.

ROHDE, G. M.; PHILOMENA, A. L. Emissão antropogênica de CO<sub>2</sub> e sustentabilidade. **Tendências**, v. 2, p. 1–2, 1998.

ROSAN, T. M.; ANDERSON, L. O.; VEDOVATO, L. Avaliação da origem de focos de calor em anos de extremos climáticos na Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, 2017.

SALES, G. M.; ALMEIDA, A. S.; PEREIRA, J. L. G.; THALÊS, M. C. Identificação de áreas críticas a ocorrência de fogo na área de endemismo Belém. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 71, p. 572-588, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/rcg207148550>.

SAPOUNTZAKI, K.; DANDOULAKI, M.; LOUIS, W.; MELISSOURGOS, K.; VIKATOU, K.; PARKER, D. J.; HANDMER, J.; COSTA, L.; KROPP, J.; BENENSON, I. **State-of-the-art on vulnerability territorial systems: the case of forest fire & drought**. Brussels: Ensure, 2009.

SCHROEDER, W.; CSISZAR, I.; GIGLIO, L.; SCHMIDT, C. C. On the use of fire radiative power, area, and temperature estimates to characterize biomass burning via moderate to coarse spatial resolution remote sensing data in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 115, n. 21, p. 1–10, 2010.

SILVA DIAS, M.A.F. Meteorologia, desmatamento e queimadas na Amazônia: uma síntese de resultados do LBA, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 190-199, 2006.

SILVA JÚNIOR, C. H. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; VANCUTSEM, C.; ACHARD, F.; BEUCHLE, R.; NUMATA, I.; SILVA, C. A.; MAEDA, E. E.; LONGO, M.; SAATCHI, S. S. Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. **Science Advances**, v. 6, n. 40, 2020a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.aaz8360>.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; HEINRICH, V. H. A.; FREIRE, A. T. G.; BROGGIO, I. S.; ROSAN, T. M.; DOBLAS, J. P.; ANDERSON, L. O.; ROUSSEAU, G. X.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA, C. A.; HOUSE, J. I.; ARAGÃO, L. E. O. C.

Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, e269, 2020b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>.

SILVA, C. H. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; FONSECA, M. G.; ALMEIDA, C. T.; VEDOVATO, L. B.; ANDERSON, L. O. Deforestation-induced fragmentation increases forest fire occurrence in central Brazilian Amazonia. **Forests**, v. 9, n. 6, 2018.

SILVA, C. V.; ARAGÃO, L. E.; BARLOW, J.; ESPIRITO-SANTO, F.; YOUNG, P. J.; ANDERSON, L. O.; XAUD, H. A. Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, 2018.

SILVEIRA, M. V. F.; PETRI, C. A.; BROGGIO, I. S.; CHAGAS, G. O.; MACUL, M. S.; LEITE, C. C. S. S.; FERRARI, E. M. M.; AMIM, C. G. V.; FREITAS, A. L. R.; MOTTA, A. Z. V. Drivers of fire anomalies in the Brazilian Amazon: lessons learned from the 2019 fire crisis. **Land**, v. 9, n. 12, p. 516, 2020.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. 2019. Disponível em: [https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC\\_SEEG\\_Relatorio\\_2019pdf.pdf](https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf). Acesso em: 9 maio 2021.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**. 2020. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG\\_8/SEEG8\\_DOC\\_ANALITICO\\_SINTESE\\_1990-2019.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf). Acesso em: 9 maio 2021.

SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, v. 260, n. 5116, p.1905-1910, 1993.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; DE OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020.

TABOR, K.; HEWSON, J.; TIEN, H.; GONZÁLEZ-ROGLICH, M.; HOLE, D.; WILLIAMS, J. W. Tropical protected areas under increasing threats from climate change and deforestation. **Land**, v. 7, n. 3, p. 1–14, 2018.

TEDIM, F.; CARVALHO, S. Vulnerabilidade aos incêndios florestais : reflexões em torno de aspectos conceituais e metodológicos. **Territorium: Revista Portuguesa de**

**Riscos, Prevenção e Segurança**, v. 20, p. 85–99, 2013.

TEDIM, F.; GARCIN, M.; VINCHON, C.; CARVALHO, S.; DESRAMAUT, N.; ROHMER, J. **Comprehensive vulnerability assessment of forest fires and coastal erosion: evidences from case-study analysis in Portugal**. [S.l.]: Elsevier, 2014. p.149–177. ISBN 9780124105485.

TORRES, F. T. P.; LIMA, G. S.; COSTA, A. G.; FÉLIX, G. A.; SILVA JÚNIOR, M. R. Perfil dos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras no período de 2008 a 2012. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 531–541, 2016.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION – UNISDR. **Terminology on disaster risk reduction**. 2009. Disponível em: <http://www.unisdr.org/eng/terminology/UNISDR-terminology-2009-eng.pdf>.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION – UNISDR. **Living with risk**. Geneva: UNISDR, 2004.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS)**. Disponível em: <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>. Acesso em: jun. 2021.

VERA DIAZ, C.; NEPSTAD, D.; MENDONÇA, M. J. C.; MOTTA, R. S.; ALENCAR, A.; GOMES, J. C.; ORTIZ, R. A. **O Prejuízo oculto do fogo: custos econômicos das queimadas e incêndios florestais na Amazônia**. [S.l.]: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), 2002. 43p.

WADE, C. M.; AUSTIN, K. G.; CAJKA, J.; LAPIDUS, D.; EVERETT, K. H.; GALPERIN, D.; MAYNARD, R.; SOBEL, A. What is threatening forests in protected areas? a global assessment of deforestation in protected areas, 2001–2018. **Forests**, v. 11, n. 5, 2020.

WAN, Z.; HOOK, S.; HULLEY, G. **MYD11A1 MODIS/Aqua temperatura / emissividade da superfície terrestre diária L3 global 1km SIN Grid V006**. Washington: NASA, 2015.

WITHEY, K.; BERENGUER, E.; PALMEIRA, A. F.; ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; LENNOX, G. D.; SILVA, C. V. J.; ARAGÃO, L. E. O. C.; FERREIRA, J.; FRANÇA, F.; MALHI, Y.; ROSSI, L. C.; BARLOW, J. Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, 2018.

WITHEY, K.; BERENGUER, E.; PALMEIRA, A. F.; ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; LENNOX, G. D.; SILVA, C. V. J.; ARAGÃO, L. E. O. C.; FERREIRA, J.; FRANÇA, F.; MALHI, Y. Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, e 20170312, 2018.

WOLFE, R.; LIN, G.; NISHIHAMA, M.; TEWARI, K. P.; TILTON, J. C.; ISAACMAN, A. R. Suomi NPP VIIRS prelaunch and on-orbit geometric calibration

and characterization. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, p.11,508–11,521, 2013.

WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, G. L. W.; KAUFMAN, Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 110, D24311, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005JD006318>.

WOOSTER, M. J.; ZHUKOV, B.; OERTEL, D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 83-107, 2003.

XIMENES, A. C.; AMARAL, S.; VALERIANO, D. M. **Os impactos dos cenários gerais de mudanças climáticas sobre as ecorregiões da Amazônia legal brasileira**. São José dos Campos: INPE, 2012. 35 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3CKR4SB>. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP7W/3CKR4SB>.

ZENG, N.; MARIOTTI, A.; WETZEL, P. Terrestrial mechanisms of interannual CO<sub>2</sub> variability. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, n. 1, p. 1–15, 2005.

**APÊNDICE A - DINÂMICA ANUAL DA INTERAÇÃO ENTRE FOCO DE CALOR COM USO E COBERTURA DA TERRA.**

Tabela A.1: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor na FLONA.

	Classe	No ano	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
<b>TOTAL</b>	Floresta Primária	351	340	321	308	276	220	194	185	167	153	142	122	109	97	68	47	20
	Floresta Secundária	104	95	85	73	67	55	48	47	44	39	31	25	20	17	11	8	4
	Área Agrícola	188	172	157	140	136	126	107	101	89	76	74	62	49	41	30	22	12
	Outros	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>2003</b>	Floresta Primária	24	23	23	22	22	22	22	22	21	21	21	20	20	20	20	20	20
	Floresta Secundária	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4
	Área Agrícola	21	18	18	17	17	17	16	16	16	15	14	13	13	13	13	12	12
	Outros	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>2004</b>	Floresta Primária	30	29	28	28	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
	Floresta Secundária	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Área Agrícola	14	14	13	13	13	13	13	12	11	11	11	11	11	10	10	10	
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2005</b>	Floresta Primária	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21		
	Floresta Secundária	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3		
	Área Agrícola	9	8	8	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7		
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>2006</b>	Floresta Primária	31	31	31	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29			
	Floresta Secundária	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5			
	Área Agrícola	17	17	17	17	17	17	16	16	15	14	14	13	12	11			
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>2007</b>	Floresta Primária	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12				
	Floresta Secundária	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
	Área Agrícola	12	10	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6				
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
<b>2008</b>	Floresta Primária	15	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13					
	Floresta Secundária	7	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4					
	Área Agrícola	14	14	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12					
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>2009</b>	Floresta Primária	20	20	20	20	20	20	19	19	19	19	19						
	Floresta Secundária	7	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5						
	Área Agrícola	12	12	11	11	11	11	11	11	11	10	10						
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
<b>2010</b>	Floresta Primária	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10							
	Floresta Secundária	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8							
	Área Agrícola	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1							
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
<b>2011</b>	Floresta Primária	14	14	14	14	14	14	14	14	14								
	Floresta Secundária	5	5	5	5	5	5	5	4	4								
	Área Agrícola	11	11	11	10	10	10	10	10	9								
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<b>2012</b>	Floresta Primária	19	19	19	19	19	19	17	17									
	Floresta Secundária	3	3	3	3	3	3	3	3									
	Área Agrícola	10	10	9	9	9	9	8	8									
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
<b>2013</b>	Floresta Primária	9	9	9	9	9	9	9										
	Floresta Secundária	1	0	0	0	0	0	0										
	Área Agrícola	7	7	6	5	5	5	5										
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0									
<b>2014</b>	Floresta Primária	26	26	25	25	24	23											
	Floresta Secundária	5	5	5	5	5	5											
	Área Agrícola	16	16	15	15	14	14											
	Outros	0	0	0	0	0	0	0										
<b>2015</b>	Floresta Primária	56	56	56	55	55												
	Floresta Secundária	15	15	14	12	11												
	Área Agrícola	11	11	11	10	10												
	Outros	0	0	0	0	0	0											
<b>2016</b>	Floresta Primária	30	30	29	29													
	Floresta Secundária	7	7	5	5													
	Área Agrícola	4	4	3	3													
	Outros	0	0	0	0													
<b>2017</b>	Floresta Primária	11	10	9														
	Floresta Secundária	8	8	8														
	Área Agrícola	12	12	11														
	Outros	1	1	1														
<b>2018</b>	Floresta Primária	14	14															
	Floresta Secundária	7	7															
	Área Agrícola	5	5															
	Outros	0	0															
<b>2019</b>	Floresta Primária	7																
	Floresta Secundária	4																
	Área Agrícola	10																
	Outros	0																

Fonte: Produção da Autora.

Tabela A.2: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor no entorno da FLONA.

	Classe	No ano	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
<b>TOTAL</b>	Floresta Primária	2927	2644	2440	2165	2010	1759	1583	1470	1315	1190	1076	865	753	618	452	337	144
	Floresta Secundária	866	689	605	523	458	373	320	285	247	216	184	131	108	84	58	43	16
	Área Agrícola	3376	3108	2902	2579	2411	2109	1840	1704	1519	1371	1286	1041	926	803	602	445	170
	Outros	2927	2644	2440	2165	2010	1759	1583	1470	1315	1190	1076	865	753	618	452	337	144
<b>2003</b>	Floresta Primária	240	219	213	201	193	187	180	177	173	169	167	160	157	155	151	147	144
	Floresta Secundária	57	33	31	31	31	30	29	27	27	23	22	21	20	19	18	16	16
	Área Agrícola	226	220	214	209	202	198	196	190	185	183	180	176	175	171	171	170	170
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2004</b>	Floresta Primária	315	290	280	268	256	246	238	231	226	224	217	213	208	201	193	190	
	Floresta Secundária	96	72	68	62	55	52	49	49	48	45	36	36	33	31	29	27	
	Área Agrícola	356	344	338	329	317	310	306	304	298	293	289	286	282	277	276	275	
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>2005</b>	Floresta Primária	164	153	147	144	140	139	139	137	132	129	126	122	120	113	108		
	Floresta Secundária	30	28	22	21	21	20	19	18	16	16	15	14	14	12	11		
	Área Agrícola	205	200	195	183	181	179	177	174	169	164	163	161	160	158	155		
	Outros	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>2006</b>	Floresta Primária	218	212	205	199	193	185	178	177	174	168	159	156	151	149			
	Floresta Secundária	59	50	44	41	40	39	38	35	30	27	26	25	23	22			
	Área Agrícola	267	259	246	242	236	227	222	218	213	206	205	201	199	197			
	Outros	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
<b>2007</b>	Floresta Primária	174	169	160	156	151	149	145	141	134	130	127	120	117				
	Floresta Secundária	43	40	37	33	32	28	23	21	21	20	18	18					
	Área Agrícola	146	139	128	128	125	124	119	119	118	116	112	112	110				
	Outros	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
<b>2008</b>	Floresta Primária	136	128	124	116	113	113	111	106	100	97	95	94					
	Floresta Secundária	52	49	45	44	37	35	32	29	27	25	17	17					
	Área Agrícola	132	128	125	123	121	118	114	113	112	112	109	105					
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
<b>2009</b>	Floresta Primária	261	239	228	221	212	206	201	198	194	189	185						
	Floresta Secundária	103	95	90	82	76	70	63	56	51	49	48						
	Área Agrícola	277	272	264	260	253	245	243	239	236	231	228						
	Outros	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
<b>2010</b>	Floresta Primária	114	113	107	105	99	97	91	87	85	84							
	Floresta Secundária	26	23	21	20	16	16	15	14	13	10							
	Área Agrícola	85	80	79	74	74	72	70	69	66	66							
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<b>2011</b>	Floresta Primária	137	128	120	115	113	106	105	101	97								
	Floresta Secundária	40	29	25	21	19	17	16	14	14								
	Área Agrícola	140	137	130	127	126	126	124	123	122								
	Outros	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
<b>2012</b>	Floresta Primária	146	142	135	132	128	125	120	115									
	Floresta Secundária	42	35	34	31	27	26	23	22									
	Área Agrícola	181	175	170	165	161	160	158	155									
	Outros	1	1	1	1	1	1	1	1									
<b>2013</b>	Floresta Primária	89	85	82	81	78	77	75										
	Floresta Secundária	32	27	23	20	16	14	13										
	Área Agrícola	127	124	119	117	117	116	111										
	Outros	0	0	0	0	0	0	0										
<b>2014</b>	Floresta Primária	156	145	140	137	134	129											
	Floresta Secundária	49	44	34	34	27	26											
	Área Agrícola	254	248	246	245	239	234											
	Outros	0	0	0	0	0	0											
<b>2015</b>	Floresta Primária	246	234	222	206	200												
	Floresta Secundária	98	84	75	64	61												
	Área Agrícola	281	274	268	263	259												
	Outros	0	0	0	0	0												
<b>2016</b>	Floresta Primária	98	92	86	84													
	Floresta Secundária	26	20	19	19													
	Área Agrícola	124	123	117	114													
	Outros	0	0	0	0													
<b>2017</b>	Floresta Primária	225	202	191														
	Floresta Secundária	51	41	37														
	Área Agrícola	272	269	263														
	Outros	4	4	4														
<b>2018</b>	Floresta Primária	99	93															
	Floresta Secundária	23	19															
	Área Agrícola	124	116															
	Outros	0	0															
<b>2019</b>	Floresta Primária	109																
	Floresta Secundária	39																
	Área Agrícola	179																
	Outros	0																

Fonte: Produção da Autora.

Tabela A.3: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor na RESEX.

	Classe	No ano	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
<b>TOTAL</b>	Floresta Primária	1405	1306	1238	1049	926	817	749	655	589	537	484	391	312	255	162	89	47
	Floresta Secundária	319	298	273	234	214	188	163	130	119	105	90	68	54	50	30	15	6
	Área Agrícola	197	161	130	96	84	64	57	52	48	45	44	41	32	28	20	16	3
	Outros	14	10	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	1	1	0
<b>2003</b>	Floresta Primária	54	54	54	52	50	50	50	50	50	50	49	49	49	48	48	48	47
	Floresta Secundária	8	8	8	8	8	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Área Agrícola	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2004</b>	Floresta Primária	51	50	50	49	49	48	48	48	47	46	46	46	46	45	43	41	
	Floresta Secundária	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
	Área Agrícola	16	15	15	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
	Outros	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>2005</b>	Floresta Primária	92	91	88	84	84	83	82	82	80	79	79	79	79	72	71		
	Floresta Secundária	19	19	18	18	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16	15		
	Área Agrícola	11	10	10	7	7	7	6	5	5	5	5	5	4	4	4		
	Outros	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1		
<b>2006</b>	Floresta Primária	101	99	97	97	97	95	95	95	93	93	92	92	90	90			
	Floresta Secundária	23	23	22	21	20	20	20	20	20	20	19	19	19	19			
	Área Agrícola	19	17	14	13	12	10	9	9	9	8	8	8	8				
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>2007</b>	Floresta Primária	56	55	54	54	54	54	53	53	53	51	50	48	48				
	Floresta Secundária	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4				
	Área Agrícola	10	10	7	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4				
	Outros	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
<b>2008</b>	Floresta Primária	89	87	87	87	87	86	86	86	84	83	78	77					
	Floresta Secundária	18	17	17	17	17	17	17	16	16	16	14	14					
	Área Agrícola	15	15	11	10	9	9	9	8	8	8	8	8					
	Outros	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
<b>2009</b>	Floresta Primária	101	101	101	99	98	98	97	96	94	91	90						
	Floresta Secundária	25	25	24	23	23	23	23	21	21	20	20						
	Área Agrícola	9	8	6	4	4	4	4	3	3	3	3						
	Outros	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1						
<b>2010</b>	Floresta Primária	53	52	50	49	48	46	46	46	45	44							
	Floresta Secundária	16	16	16	16	15	15	15	14	13	12							
	Área Agrícola	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0							
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<b>2011</b>	Floresta Primária	49	49	49	47	46	45	45	43	43								
	Floresta Secundária	13	13	13	13	13	13	13	13	12								
	Área Agrícola	3	3	3	3	3	3	3	3	3								
	Outros	1	0	0	0	0	0	0	0	0								
<b>2012</b>	Floresta Primária	64	64	63	63	60	59	56	56									
	Floresta Secundária	10	10	10	10	10	10	8	8									
	Área Agrícola	8	4	4	3	3	3	3	3									
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0									
<b>2013</b>	Floresta Primária	103	99	96	96	95	92	91										
	Floresta Secundária	32	32	31	31	30	28	28										
	Área Agrícola	7	5	4	4	4	4	2										
	Outros	0	0	0	0	0	0	0										
<b>2014</b>	Floresta Primária	69	69	67	65	63	61											
	Floresta Secundária	27	27	26	26	23	23											
	Área Agrícola	6	4	4	4	4	3											
	Outros	1	0	0	0	0	0											
<b>2015</b>	Floresta Primária	111	105	104	97	95												
	Floresta Secundária	31	29	27	24	23												
	Área Agrícola	22	20	17	16	15												
	Outros	0	0	0	0	0												
<b>2016</b>	Floresta Primária	117	116	110	110													
	Floresta Secundária	14	13	12	12													
	Área Agrícola	18	15	8	6													
	Outros	1	1	1	0													
<b>2017</b>	Floresta Primária	227	168	168														
	Floresta Secundária	42	35	34														
	Área Agrícola	28	26	20														
	Outros	1	1	1														
<b>2018</b>	Floresta Primária	47	47															
	Floresta Secundária	15	15															
	Área Agrícola	11	1															
	Outros	1	1															
<b>2019</b>	Floresta Primária	21																
	Floresta Secundária	10																
	Área Agrícola	5																
	Outros	2																

Fonte: Produção da Autora.



Tabela A.4: Permanência das classes após a ocorrência do foco de calor no entorno da RESEX.

	Classe	No ano	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
<b>TOTAL</b>	Floresta Primária	775	726	683	610	556	496	437	385	349	320	276	204	166	141	94	49	18
	Floresta Secundária	189	169	154	134	119	108	91	72	63	61	49	38	32	27	24	10	4
	Área Agrícola	190	164	144	113	94	72	58	52	47	44	41	28	22	19	14	2	0
	Outros	6	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
<b>2003</b>	Floresta Primária	24	23	23	22	22	21	20	20	20	20	19	19	19	18	18	18	18
	Floresta Secundária	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
	Área Agrícola	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	Outros	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
<b>2004</b>	Floresta Primária	43	43	42	41	40	40	40	40	40	38	37	37	35	34	31	31	
	Floresta Secundária	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8	7	7	6	6	6	
	Área Agrícola	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>2005</b>	Floresta Primária	62	60	59	59	58	58	56	56	56	54	52	46	46	45	45		
	Floresta Secundária	20	17	17	17	17	17	17	17	17	17	16	15	15	13	13		
	Área Agrícola	18	18	16	14	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
	Outros	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
<b>2006</b>	Floresta Primária	53	52	51	50	50	49	48	48	48	47	45	45	44	44			
	Floresta Secundária	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	3			
	Área Agrícola	11	11	10	10	9	7	6	6	5	5	5	5	5	5			
	Outros	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
<b>2007</b>	Floresta Primária	29	28	27	27	27	27	26	26	25	24	23	22	22				
	Floresta Secundária	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2				
	Área Agrícola	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3				
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>2008</b>	Floresta Primária	40	40	40	40	40	40	40	40	38	38	36	35					
	Floresta Secundária	13	12	12	12	12	10	10	9	7	7	7	6					
	Área Agrícola	9	9	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6					
	Outros	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
<b>2009</b>	Floresta Primária	79	77	77	77	76	73	69	67	65	65	64						
	Floresta Secundária	10	10	9	9	9	9	9	8	8	8	7						
	Área Agrícola	17	16	16	15	14	14	14	14	14	14	13						
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
<b>1010</b>	Floresta Primária	40	39	39	39	39	38	38	37	35	34							
	Floresta Secundária	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8							
	Área Agrícola	6	5	4	3	3	3	3	3	3	2							
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
<b>2011</b>	Floresta Primária	25	25	25	25	25	25	24	23	22								
	Floresta Secundária	2	2	1	1	1	1	1	1	1								
	Área Agrícola	5	2	2	2	2	2	2	2	2								
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
<b>2012</b>	Floresta Primária	34	34	34	34	32	31	30	28									
	Floresta Secundária	12	11	11	8	7	7	6	6									
	Área Agrícola	6	6	6	6	6	5	5	4									
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0									
<b>2013</b>	Floresta Primária	57	57	56	48	48	46	46										
	Floresta Secundária	21	19	19	19	18	18	17										
	Área Agrícola	10	8	8	6	5	5	5										
	Outros	1	1	1	1	1	1	1										
<b>2014</b>	Floresta Primária	60	58	53	53	49	48											
	Floresta Secundária	24	23	21	19	17	15											
	Área Agrícola	14	14	14	14	13	13											
	Outros	1	1	1	0	0	0											
<b>2015</b>	Floresta Primária	59	56	55	50	50												
	Floresta Secundária	12	8	8	7	7												
	Área Agrícola	20	20	19	18	17												
	Outros	0	0	0	0	0												
<b>2016</b>	Floresta Primária	51	49	48	45													
	Floresta Secundária	11	11	10	10													
	Área Agrícola	21	20	14	12													
	Outros	0	0	0	0													
<b>2017</b>	Floresta Primária	59	54	54														
	Floresta Secundária	16	15	13														
	Área Agrícola	24	21	20														
	Outros	0	0	0														
<b>2018</b>	Floresta Primária	31	31															
	Floresta Secundária	7	7															
	Área Agrícola	4	4															
	Outros	0	0															
<b>2019</b>	Floresta Primária	29																
	Floresta Secundária	7																
	Área Agrícola	14																
	Outros	0																

Fonte: Produção da Autora.

Tabela A.5: Transição das classes após a ocorrência do foco de calor na FLONA.

	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	+12	+13	+14	+15	+16
<b>2003</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	3	0	1	1	0	1	0	0	2	1	2	0	0	1	1	1
Floresta Primária - Agricultura	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Floresta Primária - Outros	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
Vegetação Secundária - Agricultura	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	0	1	1	0
Outros - Floresta Primária	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
<b>2004</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	1	1	0	0	0	1	2	0	1	1	0	1	2	0	
Floresta Primária - Agricultura	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Vegetação Secundária - Agricultura	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	
<b>2005</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0		
Vegetação Secundária - Agricultura	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
<b>2006</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	2			
Floresta Primária - Agricultura	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Vegetação Secundária - Agricultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
<b>2007</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	2	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	2				
Floresta Primária - Agricultura	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
Vegetação Secundária - Agricultura	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>2008</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	1	2	0	0	0	0	2	0	0	0					
Floresta Primária - Agricultura	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0					
Vegetação Secundária - Agricultura	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0					
<b>2009</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	1	0	0	0	0	1	1	1	2						
Floresta Primária - Agricultura	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0						
Vegetação Secundária - Agricultura	0	0	1	0	1	0	0	0	2	1						
<b>2010</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	0	1	0	0	0	0	1	0							
<b>2011</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	0	1	0	0	0	0	2								
Floresta Primária - Agricultura	0	0	0	0	0	0	1	0								
<b>2012</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	1	0	0	0	1	2									
Floresta Primária - Agricultura	0	0	0	0	0	2	0									
<b>2013</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	1	1	0	0	0										
Floresta Primária - Agricultura	1	0	0	0	0	0										
<b>2014</b>																
Agricultura - Outros	0	1	0	1	0											
Floresta Primária - Agricultura	0	1	0	1	1											
Vegetação Secundária - Agricultura	0	0	0	1	0											
<b>2015</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	0	1	4												
Floresta Primária - Agricultura	0	0	1	0												
Vegetação Secundária - Agricultura	0	1	2	1												
<b>2016</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	1	3													
Floresta Primária - Agricultura	0	1	0													
Vegetação Secundária - Agricultura	0	2	0													
<b>2017</b>																
Agricultura - Vegetação Secundária	0	2														
Floresta Primária - Agricultura	1	1														
<b>2018</b>																

Fonte: Produção da Autora.



<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	2	2	3	1
<b>2016</b>				
<b>Agricultura - Vegetação Secundária</b>	3	7	10	
<b>Floresta Primária - Agricultura</b>	1	6	0	
<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	1	1	0	
<b>Outros - Floresta Primária</b>	0	0	1	
<b>2017</b>				
<b>Agricultura - Vegetação Secundária</b>	2	60		
<b>Floresta Primária - Agricultura</b>	59	0		
<b>2018</b>				
<b>Agricultura - Vegetação Secundária</b>	2			

Fonte: Produção da Autora.



<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	14	11	12	8
<b>Outros - Agricultura</b>	0	1	0	0
<b>2016</b>				
<b>Agricultura - Vegetação Secundária</b>	1	6	9	
<b>Floresta Primária - Agricultura</b>	6	6	2	
<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	6	2	1	
<b>2017</b>				
<b>Agricultura - Vegetação Secundária</b>	3	19		
<b>Floresta Primária - Agricultura</b>	23	11		
<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	10	4		
<b>2018</b>				
<b>Agricultura - Vegetação Secundária</b>	8			
<b>Floresta Primária - Agricultura</b>	6			
<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	4			

Fonte: Produção da Autora.



<b>Floresta Primária - Agricultura</b>	5	0
<b>Vegetação Secundária - Agricultura</b>	1	4
<b>2018</b>		

Fonte: Produção da Autora.