

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

MARCOS CESAR KOSSOSKI

**ANÁLISE DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS ASSOCIADO ÀS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO ESTADO DE SANTA CATARINA**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – câmpus florianópolis

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

MARCOS CESAR KOSSOSKI

**ANÁLISE DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS ASSOCIADOS ÀS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO ESTADO DE SANTA CATARINA**

Dissertação de mestrado submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente.

Professor Orientador: Michel Nobre Muza,
Dr.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

CDD 551.5
K86a

Kossoski, Marcos Cesar
Análise do risco de incêndios florestais associados às condições climáticas no estado de Santa Catarina - [DIS] / Marcos Cesar Kossoski; orientação de Michel Nobre Muza – Florianópolis, 2023.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Condições climáticas. 2. Incêndio florestal. 3. Índice de risco de incêndio. 4. Fórmula de Monte Alegre. 5. Fator de risco de Angstrom. I. Muza, Michel Nobre. II. Título.

Aluno (a): **MARCOS CESAR KOSSOSKI**

| | |
|----------------|---|
| Título: | ANÁLISE DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS ASSOCIADOS ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO ESTADO DE SANTA CATARINA |
|----------------|---|

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr(a). **MICHEL NOBRE MUZA**



Documento assinado digitalmente
MICHEL NOBRE MUZA
Data: 05/10/2023 16:02:25-0300
CPF: 977.090.260-87
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Florianópolis – SC

Participação: (x) Presencial () Videoconferência
() Aprovado () Reprovado

Dr(a). **MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO**



Documento assinado digitalmente
MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 02/10/2023 16:04:33-0300
CPF: 539.913.030-00
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis – SC

Participação: (x) Presencial () Videoconferência
() Aprovado () Reprovado

Dr(a). **ADRIANO VITOR**



Documento assinado digitalmente
ADRIANO VITOR
Data: 02/10/2023 11:12:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis – SC

Participação: (x) Presencial () Videoconferência
() Aprovado () Reprovado

Dr(a). **ANGELO MENDES MASSIGNAN**

Avaliador(a) Externo / EPAGRI / Florianópolis – SC

Participação: (x) Presencial () Videoconferência
() Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade



Assinaturas do documento



Código para verificação: **9A6A5D6R**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



ANGELO MENDES MASSIGNAM (CPF: 436.XXX.669-XX) em 02/10/2023 às 10:05:57

Emitido por: "SGP-e", emitido em 29/03/2019 - 15:47:05 e válido até 29/03/2119 - 15:47:05.

(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/RVBBR1JJXzM0NjVfMDAwMDAyMzdfMjM4XzlwMjNfOUE2QTVENII=> ou o site

<https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **EPAGRI 0000237/2023** e o código **9A6A5D6R** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.

(Dedicatória é um elemento opcional.
Texto alinhado no canto inferior direito.
Não deve ultrapassar uma página.)

AGRADECIMENTOS

(Elemento opcional que não pode ultrapassar o limite de uma página.)

(Epígrafe é um elemento opcional.
Texto alinhado no canto inferior direito.
Não deve ultrapassar uma página.)

RESUMO

Os incêndios florestais causam consideráveis prejuízos ambientais e econômicos ao longo dos anos. Neste contexto, busca-se encontrar relações do clima com a evidência dos incêndios. A atribuição de um índice de risco de incêndio baseado nas condições meteorológicas é uma maneira de proporcionar ferramentas para os órgãos responsáveis pela prevenção e combate aos incêndios florestais. Neste trabalho foram utilizadas técnicas computacionais e estatísticas para analisar o desempenho de 3 (três) índices de risco de incêndio: Fórmula de Monte Alegre (FMA), Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) e o Fator de Risco de Ångstrom (FRA), para o Estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil. O período de estudo e validação foi de 2010 a 2022, utilizando as variáveis: precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura do ar, com valores obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), contemplando 23 estações meteorológicas. Esses dados foram comparados com detecção de incêndios registrados por satélite e obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Após a análise dos dados utilizando várias técnicas estatísticas, ficou evidente que a FMA e a FMA+ apresentaram alto índice de acertos para os dias com ocorrência detectada, com mais de 80% de acertos, contra apenas por volta de 35% do FRA. Em relação ao total de dias computados, o FRA obteve melhor índice de acertos (por volta de 85%), contra valores por volta de 50% para FMA e FMA+.

Palavras-chave: Fórmula de Monte Alegre, Fórmula de Monte Alegre alterada, Fator de Risco de Ångstrom, incêndio florestal, sensoriamento remoto.

Palavras-chave: Incêndio florestal. Índice de risco de incêndio. Fórmula de Monte Alegre. Fator de Risco de Ångstrom.

ABSTRACT

Forest fires have caused significant environmental and economic damage over the years. In this context, efforts have been made to establish relationships between climate and control measures for fire occurrence. Assigning a fire risk index based on meteorological conditions is a way to provide tools for organizations responsible for forest fire prevention and combat. In this study, computational and statistical techniques were employed to analyze the performance of three fire risk indices: the Monte Alegre equation, the modified Monte Alegre equation, and the Ångström Risk Factor, for the state of Santa Catarina, located in the Southern region of Brazil. The study and validation period covered from 2010 to 2022, using variables such as precipitation, relative humidity, wind speed, and air temperature, with values obtained from the National Institute of Meteorology (INMET), encompassing 23 meteorological gauges. These data were compared with fire detection records obtained from satellite imagery and provided by the National Institute for Space Research (INPE). After analyzing the data using various statistical techniques, it became evident that both Monte Alegre equations exhibited a high accuracy rate for days with detected fire occurrences, with over 80% accuracy, compared to only around 35% for Ångström Risk Factor. Concerning the overall number of days computed, Ångström Risk Factor achieved a higher accuracy rate (approximately 85%), compared to values around 50% for both Monte Alegre equations.

Keywords: Monte Alegre equation, modified Monte Alegre equation, Ångström Risk Factor, forest fire, remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Classificação climática de Köppen (SC)..... | 16 |
| Figura 2 – Estações meteorológicas e hipsometria em SC..... | 26 |
| Figura 3 – Mesorregiões selecionadas para o estudo..... | 27 |
| Figura 4 – Porcentagem calculada dos graus de perigo para a FMA e a FMA+..... | 40 |
| Figura 5 – Porcentagem calculada dos graus de perigo para o FRA..... | 41 |
| Figura 6 – Porcentagem calculada dos graus de perigo em eventos observados para FMA e FMA+..... | 42 |
| Figura 7 – Porcentagem calculada dos graus de perigo em eventos observados para o FRA..... | 43 |
| Figura 8 – Número de dias com precipitação menor que 1 mm ou maior que 13 mm por mesorregião, por ano e para todo o período (2010 a 2022). Parte 1..... | 46 |
| Figura 9 – Número de dias com precipitação menor que 1 mm ou maior que 13 mm por mesorregião, por ano e para todo o período (2010 a 2022). Parte 2..... | 47 |
| Figura 10 – Número de dias com alta temperatura, baixa umidade relativa do ar, e/ou precipitação maior que 1 mm em dias com ocorrência de incêndio detectada. Parte 1..... | 48 |
| Figura 11 – Número de dias com alta temperatura, baixa umidade relativa do ar, e/ou precipitação maior que 1 mm em dias com ocorrência de incêndio detectada. Parte 2..... | 49 |
| Figura 12 – Relação entre baixa UR e alta temperatura em dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 1..... | 50 |
| Figura 13 – Relação entre baixa UR e alta temperatura em dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 2..... | 51 |
| Figura 14 – Percentual de acertos nas previsões para os índices, por mesorregião e para os dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 1..... | 52 |
| Figura 15 – Percentual de acertos nas previsões para os índices, por mesorregião e para os dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 2..... | 53 |
| Figura 16 – Percentual de acertos por mesorregião para dias com ocorrência. Parte 3..... | 54 |
| Figura 17 – Percentual de acertos por mesorregião para todos os dias (com e sem ocorrência) e para todo o período (2010 a 2023)..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 18 – Percentual de acertos por mesorregião para com ocorrência e para todo o período (2010 a 2023)..... | 55 |
| Figura 19 – Processamento da manipulação dos dados do INPE..... | 59 |
| Figura 20 – Fluxograma do Processamento dos dados do INMET..... | 60 |
| Figura 21 – Fluxograma do cálculo dos índices de risco de incêndio..... | 61 |
| Figura 22 – Fluxograma da comparação dos graus de perigo com as ocorrências detectadas..... | 62 |
| Figura 23 – Exemplo do resultado após os cálculos e comparação com ocorrências..... | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Métodos utilizados no estudo europeu..... | 19 |
| Tabela 2 – Municípios agrupados às estações automáticas (Nomenclatura INPE). Parte 1..... | 28 |
| Tabela 3 – Municípios agrupados às estações automáticas (Nomenclatura INPE). Parte 2..... | 29 |
| Tabela 4 – Municípios agrupados às estações automáticas (Nomenclatura INPE). Parte 3..... | 30 |
| Tabela 5 – Restrições no cálculo da FMA..... | 31 |
| Tabela 6 – Graus de perigo definidos pela FMA..... | 31 |
| Tabela 7 – Restrições no cálculo da FMA+..... | 32 |
| Tabela 8 – Graus de perigo definidos pelo Fator de Risco de Ångstrom..... | 33 |
| Tabela 9 – Tabela de contingência..... | 33 |
| Tabela 10 – Dias calculados com e sem ocorrência de incêndio detectada..... | 39 |
| Tabela 11 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para a FMA e FMA+..... | 39 |
| Tabela 12 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para o FRA. | 40 |
| Tabela 13 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para dias com ocorrências da FMA e FMA+..... | 41 |
| Tabela 14 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para dias com ocorrências do FRA..... | 42 |
| Tabela 15 – Tabela de contingência para os dados gerais calculados..... | 43 |
| Tabela 16 – Valores estatísticos calculados para previsões/ocorrências..... | 44 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVESC – Associação dos Bombeiros Voluntários no Estado de Santa Catarina

B – Razão de Bias

CSS - Clayton Skill Score

CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

F – Taxa de Falso Alarme

FAR – Razão de Falso Alarme

FMA – Fórmula de Monte Alegre

FMA+ – Fórmula de Monte Alegre Alterada

FRA – Fator de Risco de Ångstrom

H – Taxa de Acerto

HSS - Heidke Skill Score

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IFSC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ORSS – Odds Rate Skill Score

PSS – Pierce Skill Score

PC - Proporção Correta

SC – Santa Catarina

TS - *Threat Score*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 Conceito de incêndio florestal..... | 13 |
| 1.2 Controle de Incêndio florestal..... | 15 |
| 1.3 Climatologia no estado de Santa Catarina..... | 16 |
| 1.4 Justificativa..... | 17 |
| 1.5 Definição do Problema..... | 18 |
| 1.6 Objetivos..... | 18 |
| 1.6.1 Objetivo Geral..... | 18 |
| 1.6.2 Objetivos Específicos..... | 18 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 19 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 23 |
| 3.1 Área de Estudo..... | 23 |
| 3.2 Dados de ocorrências de incêndios..... | 23 |
| 3.3 Dados meteorológicos..... | 24 |
| 3.4 Mapas da área de estudo..... | 26 |
| 3.5 Metodologias estudadas..... | 30 |
| 3.5.1 Fórmula de Monte Alegre (FMA)..... | 30 |
| 3.5.2 Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+)..... | 31 |
| 3.5.3 Fator de Risco de Ångstrom (FRA)..... | 32 |
| 3.6 Verificação das previsões..... | 33 |
| 3.6.1 Tabela de contingência..... | 33 |
| 3.6.2 Proporção Correta (PC)..... | 33 |
| 3.6.3 Threat Score (TS)..... | 34 |
| 3.6.4 Razão de Probabilidade (<i>odd rate</i> , ou θ)..... | 34 |
| 3.6.5 Razão de Bias (B)..... | 35 |
| 3.6.6 Razão de Falso Alarme (FAR)..... | 35 |
| 3.6.7 Taxa de Acerto (H)..... | 36 |
| 3.6.8 Taxa de Falso Alarme (F)..... | 36 |
| 3.6.9 Heidke Skill Score (HSS)..... | 36 |
| 3.6.10 Odds Ratio Skill Score (ORSS)..... | 37 |
| 3.6.11 Peirce Skill Score (PSS)..... | 37 |
| 3.6.12 Clayton Skill Score (CSS)..... | 38 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 39 |
| 5 RELATÓRIO TÉCNICO DE PRODUTO TECNOLÓGICO..... | 57 |
| 5.1 Definição do Escopo..... | 57 |
| 5.2 Tecnologia utilizadas..... | 57 |
| 5.3 Desenvolvimento do Produto..... | 58 |
| 5.4 Resultados obtidos..... | 63 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 64 |
| 8 REFERÊNCIAS..... | 66 |
| 8 ANEXO I..... | 69 |

1 INTRODUÇÃO

Muitos estudos têm sido realizados no sentido de elaborar a melhor maneira de lidar com incêndios florestais. Nesta introdução vamos abordar alguns conceitos sobre o assunto, começando com os conceitos gerais e abordando alguns estudos realizados com índices de risco de incêndio.

1.1 Conceito de incêndio florestal

Incêndio florestal pode ser definido, segundo Batista e Soares (2003, p. 52), como uma combustão sem controle que se propaga consumindo os combustíveis naturais da floresta, sendo a característica principal a sua livre propagação e tendo influência das variáveis ambientais, dos combustíveis vegetais, do clima e da topografia.

Para Parizotto *et al.* (2008, p. 651), “os incêndios florestais têm atingido níveis preocupantes, pois ameaçam a manutenção da biodiversidade, o rendimento sustentado das florestas, as benfeitorias e até mesmo vidas humanas”.

Já para Torres *et al.* (2020, p. 14), tem-se um incêndio florestal, propriamente dito, quando o homem perde o controle do incêndio, tornando o evento um agente com alto poder destrutivo.

Segundo o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO), incêndio florestal “é todo fogo sem controle que incide sobre qualquer forma de vegetação, podendo tanto ser provocado pelo homem (intencional ou negligência) como por causa natural (raios)” (ICMBIO, 2010, p. 23).

As complexas interações entre a vegetação, clima (e tempo), topografia e atividades antrópicas ao longo do tempo afetam as características dos incêndios, segundo Torres *et al.* (2020, p. 20).

Além dos prejuízos ambientais, materiais e até da perda de vidas humanas, os incêndios florestais também afetam a qualidade do ar. Segundo Hoinaski *et al.* (2020), em estudo sobre o estado de Santa Catarina para os anos de 2017 e 2018, entre as principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos está a queima de biomassa a céu aberto, pois as queimadas liberam grande quantidade de compostos gasosos e partículas para a atmosfera. Segundo esse estudo, as

emissões das queimadas superam as dos veículos e indústrias quanto aos poluentes CO, CO₂ e material particulado.

Segundo Nunes, Batista e Soares (2005, p. 2), as condições e fatores climáticos estão fortemente relacionados à ocorrência e propagação de incêndios, sendo que a umidade relativa, a temperatura do ar e a velocidade do vento são diretamente ligados à intensidade e à velocidade do avanço dos mesmos.

Com relação às variáveis climáticas:

A temperatura ambiente elevada, associada a uma baixa umidade relativa do ar, pressiona e favorece o princípio do poder evaporativo nos vegetais, tornando-os mais secos e, conseqüentemente, mais combustíveis. Por sua vez, os ventos alimentam a combustão e direcionam os incêndios, facilitando, portanto, sua propagação. [...] A reduzida precipitação estacional (abaixo das normais climatológicas) e períodos de seca prolongados conduzem à redução do conteúdo de umidade no solo e nos combustíveis mortos e vivos, tornando estes mais disponíveis ao fogo. (TORRES *et al*, 2020, p. 45).

Já em relação à estiagem e à seca, para Bolson e Haonat (2016, p. 226), até alguns anos atrás o foco da preocupação com a falta de água no Brasil estava reservado à região do semiárido nordestino, mas atualmente evidenciou-se também uma escassez hídrica na região Oeste do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, segundo revelam dados climatológicos e hídricos.

Para Castro *et al*. (2013, p. 55), “As estiagens resultam da redução das precipitações pluviométricas, do atraso dos períodos chuvosos ou da ausência de chuvas previstas para uma determinada temporada.”.

Já a seca pode ser definida como:

1. Ausência prolongada, deficiência acentuada ou fraca distribuição de precipitação. 2. Período de tempo seco, suficientemente prolongado, para que a falta de precipitação provoque grave desequilíbrio hidrológico. 3. Do ponto de vista meteorológico, a seca é uma estiagem prolongada, caracterizada por provocar uma redução sustentada das reservas hídricas existentes. 4. Numa visão socioeconômica, a seca depende muito mais das vulnerabilidades dos grupos sociais afetados que das condições climáticas. (BRASIL, 2009, p. 150)

O conhecimento das variáveis meteorológicas e uma análise climática podem ajudar a determinar uma maior probabilidade da ocorrência de incêndios, possibilitando a adoção de ações de prevenção, estimar os possíveis danos causados pelo fogo ao ambiente e a estimativa da logística necessária para o combate (TORRES *et al*, 2011, p. 144).

Com relação às causas de incêndios florestais, um estudo foi elaborado utilizando dados de Unidades de Conservação (UCs) federais no Brasil no período de 2008 a 2012 (TORRES *et al.*, 2016). O resultado mostrou que a categoria denominada “diversos” alcançou maior percentual (37,3%), seguido por “queima para limpeza”, com 27,38% de apontamentos, enquanto “incendiários” foi relatado em 25,36%, já “operações florestais” chegou a 6,05%, raios com 2,45%, e fogos de recreação, com 1,73% dos casos. O resultado demonstrou que fenômenos antrópicos têm grande impacto nas ocorrências de incêndio.

1.2 Controle de Incêndio florestal.

Segundo o “Manual de Prevenção e Combate de Incêndios Florestais”:

O “Controle de incêndios florestais” está associado às ações administrativas e técnicas tomadas para realizar a prevenção e o combate ao fogo, as quais podem ser realizadas por uma instituição privada ou pública, municipal, estadual ou federal. (TORRES *et al.*, 2020, p. 14).

Em Santa Catarina, é atribuído ao Corpo de Bombeiros Militar a prevenção e o combate a incêndios, como consta no inciso I da constituição do estado: “I – realizar os serviços de prevenção de sinistros ou catástrofes, de combate a incêndio e de busca e salvamento de pessoas e bens e o atendimento pré-hospitalar;” (SC, 1989).

Além do Corpo de Bombeiros Militar de SC, o estado conta com a ABVESC (Associação dos Bombeiros Voluntários no Estado de Santa Catarina), uma organização não governamental fundada em 1994, que representa as organizações de bombeiros voluntários no Estado de Santa Catarina, possuindo 4.829 integrantes distribuídos em 32 corporações filiadas, atuando em 52 municípios do estado. (ABVESC, 2022).

Para elaborar um plano de proteção em um sistema de prevenção e combate a incêndios é preciso observar que isso dependerá dos “objetivos a serem alcançados, das peculiaridades da região a ser protegida e da capacidade de investimento na proteção” e “deve considerar os seguintes elementos básicos: causas das ocorrências, sazonalidade, locais, combustíveis e zonas prioritárias.” (TORRES *et al.*, 2020, p. 61)

1.3 Climatologia no estado de Santa Catarina

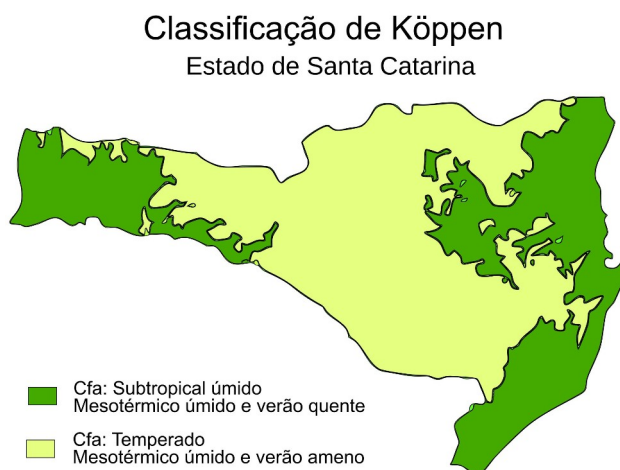
O estado de Santa Catarina está circunscrito na região Sul do Brasil, entre os estados do Paraná e Rio Grande do Sul. Faz fronteira a Oeste com a Argentina e sua costa Leste está voltada ao Oceano Atlântico.

Segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN, 1936), que utiliza valores médios mensais e anuais de temperatura, precipitação e de dados de vegetação para determinar limites climatológicos, o estado de Santa Catarina possui clima Mesotérmico Úmido e engloba dois subtipos:

- a) cfa: clima subtropical com temperatura média no mês mais frio inferior a 18° C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22° C, sem estação definida, geadas menos frequentes e tendência de concentração de chuvas nos meses de verão;
- b) cfb: clima temperado com temperatura média no mês mais frio inferior a 18° C (mesotérmico), chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca. A temperatura média no mês mais quente é inferior a 22° C, geadas severas e frequentes, precipitação de 1.100 a 2.000 mm.

A Figura 1 mostra um mapa do estado de Santa Catarina com a classificação climática de Köppen:

Figura 1 – Classificação climática de Köppen (SC)



Fonte: Elaboração Própria, adaptado de Köppen (1936)

Na região Sul do Brasil, que engloba o estado de Santa Catarina, a precipitação da área está associada a:

Diferentes sistemas atmosféricos influenciam a precipitação na R4 ao longo do ano, ou seja, os sistemas frontais, os ciclones, os CCM, as linhas de instabilidade, os sistemas convectivos alongados persistentes, os VCANs e as circulações de brisa (REBOITA *et al.*, 2009, p. 44).

Além disso, a região Sul do Brasil, onde está localizado o estado de Santa Catarina, tem um ciclo anual de amplitude térmica bem definido, pela maior radiação solar recebida nos meses de verão em relação aos de inverno (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Outros fatores importantes que influenciam na temperatura do estado são a topografia (com mínimas nas áreas serranas) e a proximidade com o oceano, pela influência da corrente marítima quente do Brasil. A superfície do mar em contato com a atmosfera em superfície contribui para diminuir a amplitude térmica nas áreas próximas ao litoral. Com relação ao vento, a Alta Semipermanente do Atlântico Sul faz com que haja predominância de vento leste/nordeste, de intensidade fraca, principalmente na região litorânea, e, ao se intensificar no inverno, penetra sobre o continente. A intensidade da precipitação orográfica que ocorre na região está relacionada aos movimentos sazonais dessa área de alta pressão. Na região centoleste do estado ocorre um ciclo anual de precipitação unimodal, o que mostra um regime subtropical de monções de verão. Já na região oeste, a maior precipitação ocorre na primavera.

1.4 Justificativa

O IFSC (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina), no artigo 2º do seu estatuto, define algumas das diretrizes da instituição:

O IF-SC tem por finalidade formar e qualificar profissionais no âmbito da educação tecnológica, nos diferentes níveis e modalidades de ensino, para os diversos setores da economia, bem como realizar pesquisa aplicada e promover o desenvolvimento tecnológico de novos processos, produtos e serviços, em estreita articulação com os setores produtivos e a sociedade, especialmente de abrangência local e regional, oferecendo mecanismos para a educação continuada. (IFSC, 2009, p. 5)

Levando em consideração que a melhor forma de mitigar prejuízos e custos causados por incêndios florestais é a prevenção, esta pesquisa busca trazer ferramentas para apoio de decisão no sentido de fornecer um estudo do desempenho de índices de risco de incêndio que tentam apontar se as condições meteorológicas de uma determinada região são favoráveis à propagação de incêndios fora de controle.

1.5 Definição do Problema

Diversos índices de risco de incêndio têm sido pesquisados nos últimos anos, em várias regiões do Brasil. Apesar de já dispormos vários estudos, cada um reflete a realidade climática e geográfica de região selecionada. Esta pesquisa busca realizar um estudo amplo para o estado de Santa Catarina, envolvendo todos os municípios (com os dados de satélite) e um período razoavelmente extenso (2010 a 2022), testando três diferentes índices de risco de incêndio e valorando seus acertos e erros, para todo o estado de Santa Catarina.

1.6 Objetivos

Foram definidos os seguintes objetivos para esta pesquisa:

1.6.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é investigar a utilização de índices de detecção de potenciais incêndios florestais sobre o Estado de Santa Catarina a partir de condições atmosféricas favoráveis.

1.6.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho foi definido:

- a) Realizar testes com bases de dados meteorológicos utilizando as fórmulas selecionadas e atribuir o índice de risco de incêndio correspondente;
- b) Verificar se as ocorrências de incêndio registradas no INPE correspondem às datas onde a FMA apontou risco relevante de incêndio;
- c) Elaborar e averiguar o processo de cálculo das fórmulas e a apresentação de resultados por meio de linguagem de programação e automação via inteligência computacional;
- d) Desenvolver um produto tecnológico de software que viabilize a utilização dos índices de risco de incêndio.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de elaborar a melhor maneira de utilizar as variáveis meteorológicas para verificar o grau de risco de incêndio.

Com o intuito de obter um grau de probabilidade de incêndio, Soares e Paez (1973, p. 15) elaboraram um estudo para a determinação de um índice de risco, que resultou na definição da Fórmula de Monte Alegre (FMA). O estudo abrangeu o período de 1965 a 1971, na região do município de Telêmaco Borba, estado do Paraná, Brasil, e utilizou as variáveis de precipitação diária acumulada e umidade relativa do ar medida às 13 horas, tornando-se um referencial para a determinação de índice de risco de incêndio, sendo utilizado em diversos estudos posteriores.

Em 1999, foi publicado no *International Journal of Wildland Fire* um estudo que comparou cinco métodos para a avaliação do perigo de incêndio, para áreas do Sul do continente Europeu, com base em fatores meteorológicos (VIEGAS *et al*, 2014, p. 235).

Os métodos utilizados na pesquisa podem ser vistos na Tabela 1:

Tabela 1 – Métodos utilizados no estudo europeu

| Método | Variáveis | Tipo |
|----------------|--|-----------------------------|
| Ic (canadense) | Vel. do vento, temp. ar, UR, precipitação (24h) | cumulativo |
| If (francês) | Temp. ar, UR, nuvens, vel. do vento e teor de água do solo | não cumulativo |
| li (italiano) | Temp. do ar, UR, vel. do vento, insolação e precipitação | não cumulativo |
| Ip (português) | Precipitação, temp. do ar, UR, veloc. e direção do vento. | cumulativo e não cumulativo |
| Is (espanhol) | Temp. do ar, UR | não cumulativo |

Fonte: Domingos *et al* (2014, p. 236)

De acordo com o estudo, dos métodos que foram testados alguns apresentam melhor desempenho em certas condições e alguns em outras, levando à conclusão de que pode ser interessante continuar a pesquisa, pelo menos com aqueles que mostram melhores desempenhos gerais.

Em 2005, foi apresentado um estudo no sentido de aprimorar a Fórmula de Monte Alegre original (FMA), acrescentando a velocidade do vento, que foi denominada Fórmula de Monte Alegre Alterada, ou FMA+ (NUNES, SOARES, e BATISTA, 2005, p. 75). Esse trabalho utilizou dados meteorológicos diários de

umidade relativa do ar, precipitação acumulada em 24 horas e velocidade do vento às 13 horas, além dos dados de ocorrências de incêndio compreendidos no período de 1998 a 2003, no município de Telêmaco Borba, estado do Paraná.

Em 2011, outro estudo foi publicado analisando os índices de Nesterov, FMA e FMA+. Foram utilizados dados de cinco estações meteorológicas do período de 2003 a 2006, para a região dos municípios de São Mateus e Conceição da Barra, na mesorregião do Litoral Norte do Estado do Espírito Santo. Os resultados de desempenho calculados pelos métodos estatísticos foram maiores para o índice FMA+ em comparação aos demais índices de risco, o que, segundo o estudo, tornou este índice o mais adequado para a região em estudo (BORGES *et al.*, 2011, p. 153).

Outro estudo foi publicado na Revista Ciência Florestal utilizando a FMA+ no ano de 2015, buscando ajustar as classes do índice para a região norte-central do estado do Espírito Santo e na costa sul do estado da Bahia. Foi observado que o ajuste de classe para o sistema alcançou excelentes resultados (EUGENIO *et al.*, 2020, p. 1085).

Em 2015 foi publicado na Revista Brasileira de Geografia Física, um estudo que comparou três índices de risco de incêndio (Fator de Risco de Ångstrom, Fórmula de Monte Alegre e Índice de Nesterov) para a região de Belém, capital do Estado do Pará. Este estudo abrangeu o ano de 2015, e buscou a convergência dos resultados, comparando os resultados entre os três índices escolhidos. (OLIVEIRA *et al.*, 2016, p. 1030). O resultado sugeriu que a acumulação da precipitação pluviométrica apresentou-se como fator de diminuição do risco de incêndio e houve boa correlação entre os índices estudados, com maior eficiência para o Índice de Nesterov e a Fórmula de Monte Alegre.

Em 2019, foi publicado na Revista de Ciências Agrárias um estudo que avaliou o desempenho de sete índices de perigo de incêndios (Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Monte Alegre Alterada (FMA+), Nesterov, Telitsyn, Ångstrom, P-EVAP e EVAP/P) em uma área de transição Cerrado-Amazônia, pelo método de *Skill Score* (CASAVECCHIA, 2019, p. 842). Os dados meteorológicos utilizados foram extraídos das estações convencionais do INMET, no período de 1972 a 2010. Os índices de risco Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Monte Alegre Alterada (FMA+) apresentam dependência cumulativa do número de dias sem chuvas, podendo ocasionar erros de predição quando da ocorrência de menores acumulados

de chuvas. O Fator de Risco de Ångstrom apresentou os melhores desempenhos para predição de dias com e sem ocorrência de focos de calor, sendo recomendado para a região de Sinop-MT.

Em 2021 foi realizado um estudo para verificar o desempenho da FMA+ para região da Reserva Natural Serra do Tombador, município de Cavalcante, Estado de Goiás, Brasil (ALMEIDA *et al*, 2022, p. 484), para o período de 2016 a 2020. Foram utilizados os métodos *Skill Score* e Porcentagem de Sucesso, e foi feita uma modificação da amplitude das classes de perigo de incêndios da fórmula, indicando ao final que a fórmula apresentou aptidão para a área de estudo após os ajustes.

Outro estudo foi publicado em 2021, avaliando sete índices de perigo de incêndio no município de Canaã dos Carajás, na Amazônia oriental (CAVALCANTE *et al*, 2021, p. 352). Foram utilizados dados de três estações meteorológicas da região, com diferentes altitudes e foram utilizados os métodos *Skill Score* e porcentagem de sucesso para diferentes usos do solo. O estudo utilizou dados dos anos de 2013 a 2016 e os índices utilizados foram:

- a) Índice de Angstrom;
- b) Índice de Rodríguez e Moretti (IRM);
- c) Fórmula de Monte Alegre (FMA);
- d) Fórmula Alterada de Monte Alegre (FMA+);
- e) Índice Keetch-Byram Drought (KBDI);
- f) Índice Forest Fire Danger (FFDI);
- g) Índice Forest Fire Weather (FWI).

Nesse estudo, o índice KBDI teve o melhor desempenho médio geral, bem como o melhor desempenho em áreas florestadas e desmatadas, que representam a maior área de ocupação do solo em Canaã dos Carajás. Já o Fator de Risco de Ångstrom teve o melhor desempenho na previsão de dias com mais de seis *hotspots* detectados.

O INPE também fornece um método para o cálculo do risco de fogo, utilizando as variáveis meteorológicas: precipitação diária; temperatura do ar e umidade relativa do ar à superfície (INPE; 2019, pg. 12).

No estado de Santa Catarina, o Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM, 2023), órgão vinculado à EPAGRI (EPAGRI, 2023), disponibiliza em seu portal na internet o

produto chamado AGROCCONNECT, o qual mostra um mapa em tempo real com as condições meteorológicas e uma opção de verificar o risco de incêndio para diversas regiões do estado com dados de estações meteorológicas (AGROCCONNECT, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O estado de Santa Catarina está localizado na região Sul do Brasil, com um território de 95.730,690 km². Os dados sobre a divisão política dos municípios foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

3.2 Dados de ocorrências de incêndios

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) fornece em seu portal na *internet* a possibilidade de acessar arquivos com as ocorrências de incêndios detectadas por satélites. Segundo o INPE (2023), “o monitoramento de queimadas em imagens de satélites é particularmente útil para regiões remotas sem meios intensivos de acompanhamento”. A recomendação do INPE é utilizar os arquivos do satélite de referência, no caso, o Aqua2 M-T.

Dentre as razões para a utilização do satélite de referência, estão:

- a) seu horário de passagem foi/é estável ao longo dos anos, no final da tarde, mantendo portanto o mesmo padrão de amostragem temporal, e praticamente isento de falsas detecções devido a reflexos do sol em superfícies terrestres;
- b) o horário de passagem AQUA_M-T é semelhante ao do satélite de referência anterior usado, o NOAA-12 (que operou até 09/ago/2007), e a série temporal pode ser mantida;
- c) trabalhos de validação de campo indicam que uma frente de fogo com cerca de 30 m de extensão por 1 m de largura, ou maior, será detectada. Caso fossem utilizados os satélites geoestacionários, a 25 mil km de distância, a frente precisa ter o dobro de tamanho para ser localizada.
- d) como o elemento de resolução espacial (*pixel*) do satélite de referência tem 1 km x 1 km ou mais, uma queimada de algumas dezenas de m² será identificada como tendo pelo menos 1 km². Nas imagens dos satélites geoestacionários, onde o *pixel* tem 4 km² x 4 km², esta pequena queimada passará a ser indicada por uma área de 16 km² ou mais (INPE, 2023).

Por outro lado, as queimadas podem não ser detectadas pelo satélite, devido a condições que impeçam ou prejudiquem a leitura, como:

- a) frentes de fogo com menos de 30 m;
- b) fogo apenas no chão de uma floresta densa, sem afetar a copa das árvores;
- c) nuvens cobrindo a região (exceto nuvens de fumaça);
- d) queimada de pequena duração, ocorrendo entre as imagens disponíveis;
- e) fogo em uma encosta de montanha, enquanto que o satélite só observou o outro lado;

f) imprecisão na localização do foco de queima, que no melhor caso é de cerca de 1 km, mas podendo chegar a 6 km (INPE, 2023).

Segundo estudo de Pereira *et al.* (2012, p. 342), foi obtido um percentual de cerca de 71% de acertos na detecção de queimadas pelos satélites, sendo que o AQUA apresentou a detecção de focos de calor com maior precisão.

As imagens de satélite utilizadas são as que estejam na faixa termal-média de 3,7um a 4.1um do espectro ótico que busca identificar a energia de material em chamas, conhecido como fluxo de energia radiante (INPE, 2023).

Trabalhos de campo e validação mostraram que cerca de 80% dos focos estão em um raio de 01 km das coordenadas indicadas, que o erro na média é ~400 m, com desvio padrão de ~3 km (INPE, 2023).

Todos os *scripts* utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram elaborados na linguagem de programação Ruby (RUBY, 2023).

Após baixar os arquivos, foi realizada uma separação do material objeto de estudo, e uma verificação inicial nas variáveis de interesse. Os dados do estado de SC do período de 2010 a 2022 foram selecionados para a pesquisa. Em seguida, foi elaborado um *script* que lê os arquivos e seleciona as variáveis de interesse (data e município) da ocorrência. Um novo arquivo é gerado com os dados de todas as ocorrências, removendo duplicações, levando em consideração que esta pesquisa busca analisar apenas eventos diários e não recorrência ou área queimada.

3.3 Dados meteorológicos

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) fornece em seu portal na internet os dados de estações meteorológicas homologadas pela instituição de todo o Brasil, sejam convencionais ou automáticas (INMET, 2023). Nesta pesquisa, são utilizados os dados das estações automáticas do estado de Santa Catarina, do período de 2010 a 2022.

Atualmente, são 24 as estações homologadas para o estado de SC, sendo que, em 2010, eram 20 estações. A estação LAGES (código A865) entrou em operação em 2014, a estação RANCHO QUEIMADO (código A870) em 2016 e em 2019 entraram em operação as estações CAMPOS NOVOS (código A898) e CHAPECO (código A895). Após uma análise prévia dos arquivos, a estação RANCHO QUEIMADO foi descartada do estudo, por ter um grande número de

falhas das variáveis de interesse na pesquisa. A localização das estações pode ser vista na figura 2.

Para selecionar os dados válidos para a pesquisa foi elaborado um *script*, que verifica a presença ou não das variáveis de interesse (para a precipitação, todos os horários, em mm). A temperatura do ar em graus Célsius (°C), umidade relativa do ar em porcentagem (%) e velocidade do vento em metros por segundo (m/s), devem estar presentes às 13:00. Aqui são aplicados filtros no *script* para verificar dados vazios, nulos, com valores “-9999”. Além disso, são aplicadas restrições nos valores de acordo com as medidas esperadas das variáveis. Isso porque pode haver, por exemplo, erros de leitura ou sensores descalibrados.

Após selecionar os arquivos com os dados das estações meteorológicas automáticas, foi elaborada uma série de tarefas:

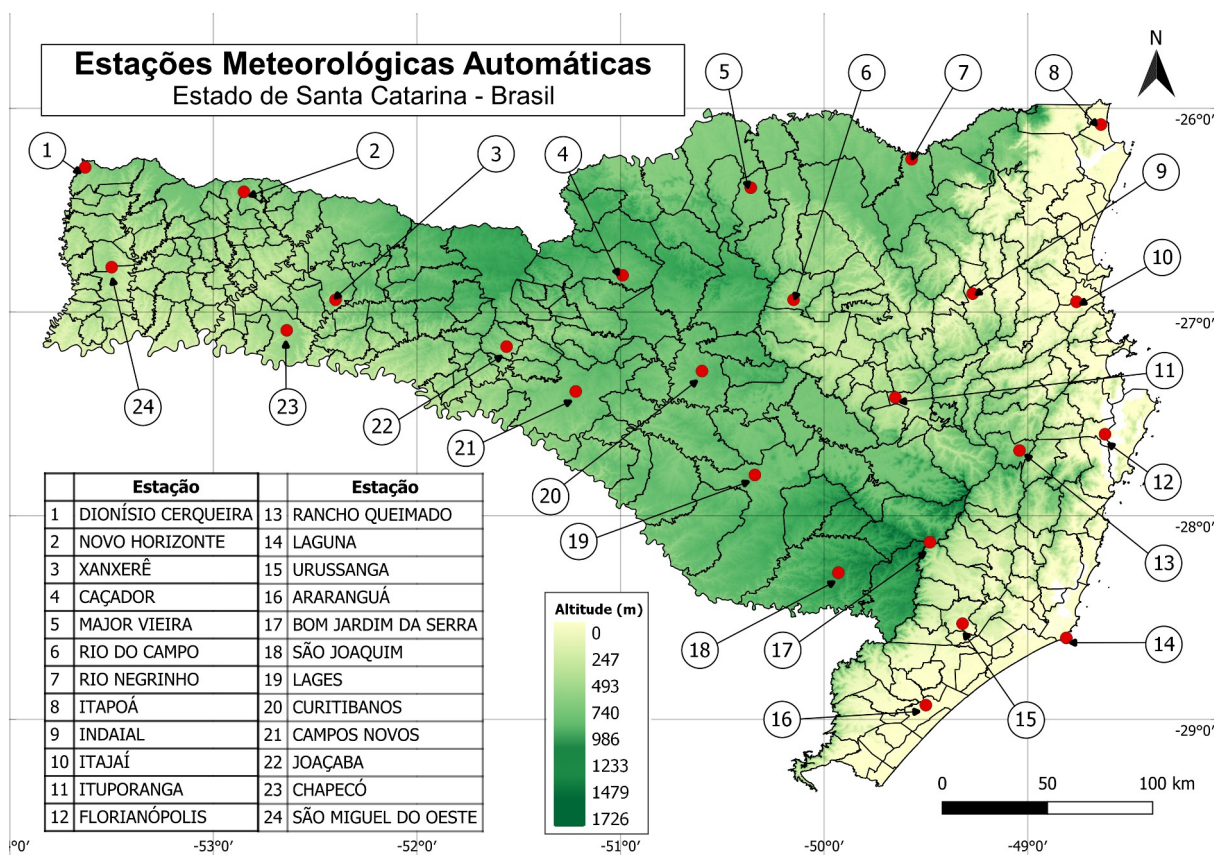
- a) nos casos em que todos os dados estiverem disponíveis, somar a precipitação diária e gerar um novo arquivo com dados diários das variáveis de interesse (estação, data, soma da precipitação diária, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento medidos às 13:00). Aqui temos uma limitação da pesquisa, pois ao descartar os dados de dias faltantes e levando em consideração que a FMA e a FMA+ são cumulativas, ao retornar o cálculo após uma falha, o valor da FMA do dia anterior do dia anterior é mantida. Isso porque foi definido que seria melhor manter o valor da FMA acumulada e correr o risco de que ela seja superestimada do que zerar e correr o risco de subestimar o valor. Além disso, o número de dias sem chuva maior que 13 mm também é preservado para a continuação do cálculo. Foi feita esta escolha no sentido de que seria melhor manter os valores da FMA e da FMA+ acumulados com a possibilidade de apontar um risco maior do que zerar os valores sem saber se havia estiagem nos dias que foram descartados por falhas nas variáveis.
- b) na próxima etapa, um outro *script* calcula os índices para cada um dos dias previamente separados e com a precipitação diária calculada. Esta etapa gera um novo arquivo com todas as variáveis anteriores e mais os índices, incluindo os valores e a atribuição do grau de perigo;
- c) em seguida, são atribuídos os municípios que serão agregados a cada estação meteorológica e um novo arquivo é gerado;

- d) por último, o arquivo com os índices calculados e os municípios atribuídos é comparado com o arquivo previamente produzido das ocorrências registradas pelo satélite de referência. Um arquivo final é produzido, apontando para os dias e locais em que houve ocorrência, além dos índices calculados e graus de perigo atribuídos.

3.4 Mapas da área de estudo

Foi elaborado um mapa no *software* de geoprocessamento QGIS (QGIS, 2023), utilizando dados do IBGE, sobre a divisão política dos municípios do estado de Santa Catarina (IBGE, 2023). Em seguida, foi adicionada uma camada com a localização das estações selecionadas para o estudo. Outra camada, de hipsometria, foi adicionada para evidenciar as diferenças de altitude. O mapa resultante que pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Estações meteorológicas e hipsometria em SC

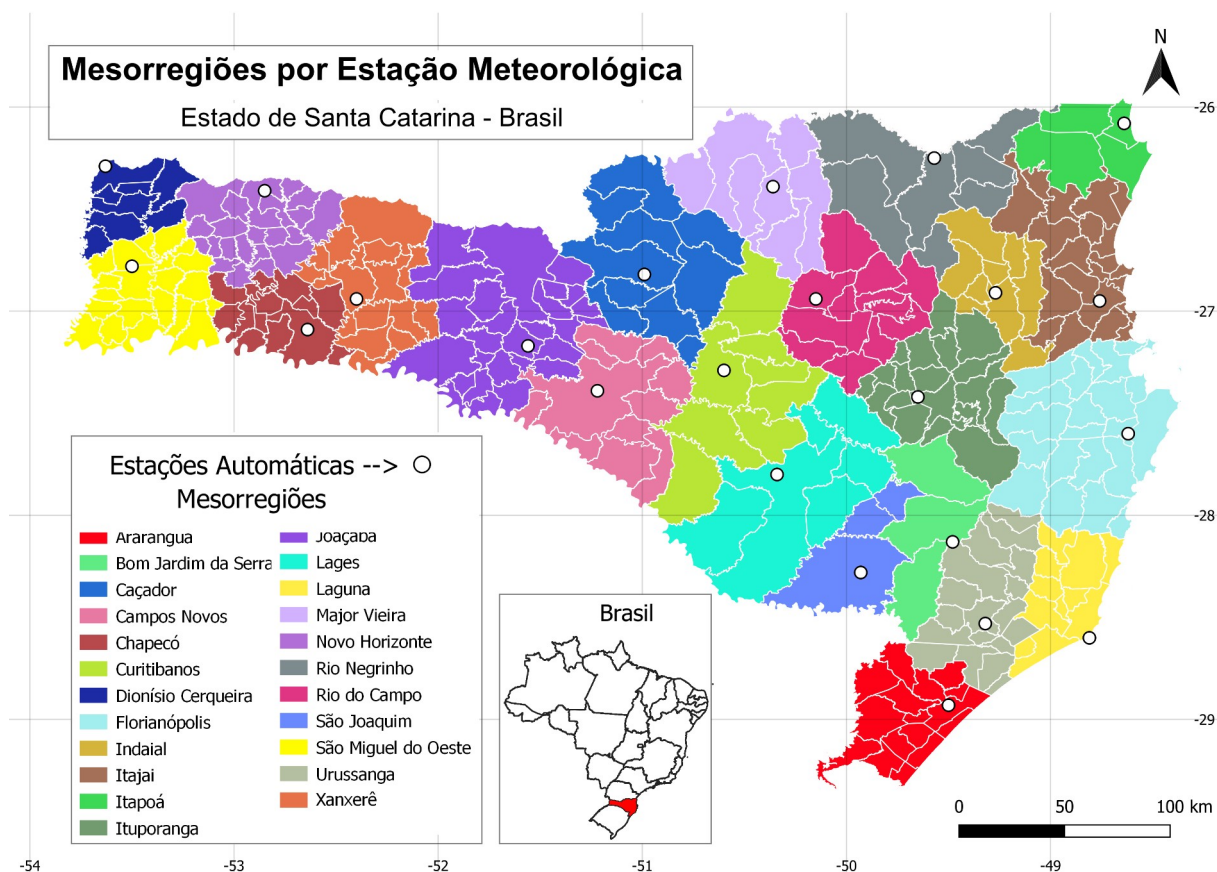


Fonte: Elaboração Própria (2023)

Como as ocorrências observadas pelos satélites são disponibilizadas por município, foi realizado um agrupamento dos municípios no entorno das estações, levando em conta não somente a distância, mas também a diferença de altitude.

Um novo mapa foi elaborado, com os municípios agrupados às estações, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Mesorregiões selecionadas para o estudo



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Em seguida foi criado um arquivo com as estações e seus municípios correspondentes previamente definidos, para utilizar na comparação com os dados do satélite de referência. Ou seja, quando o satélite detecta uma ocorrência em um determinado município dentro da mesorregião geográfica, esta ocorrência será comparada com os dados da estação meteorológica da mesma mesorregião geográfica.

As Tabelas 2 a 4 mostram os municípios agrupados às estações, com a nomenclatura utilizada pelo INPE para os nomes dos municípios.

Tabela 2 – Municípios agrupados às estações automáticas (Nomenclatura INPE). Parte 1.

| Mesorregião | Município Associado |
|---------------------|---|
| ARARANGUA | BALNEARIO ARROIO DO SILVA, BALNEARIO GAIVOTA, PASSO DE TORRES, SAO JOAO DO SUL, SANTA ROSA DO SUL, SOMBRIO, ERMO, PRAIA GRANDE, JACINTO MACHADO, TURVO, MARACAJA, FORQUILHINHA, TIMBE DO SUL, MORRO GRANDE, GRAO PARA, MELEIRO |
| BOM JARDIM DA SERRA | URUBICI, BOM RETIRO |
| CACADOR | CALMON, MATOS COSTA, PORTO UNIAO, TIMBO GRANDE, LEBON REGIS, FRAIBURGO, FREI ROGERIO, VIDEIRA, RIO DAS ANTAS, |
| CAMPOS NOVOS | ZORTEA, CELSO RAMOS, ANITA GARIBALDI, CERRO NEGRO, ABDON BATISTA, VARGEM, MONTE CARLO, BRUNOPOLIS, TANGARA, IBIAM |
| CHAPECO | PAIAL, XAXIM, CORDILHEIRA ALTA, CORONEL FREITAS, NOVA ITABERABA, GUATAMBU, AGUAS DE CHAPECO, AGUAS FRIAS, CAXAMBU DO SUL, NOVA ERECHIM, PLANALTO ALEGRE, SAO CARLOS, SAUDADES |
| CURITIBANOS | SAO JOSE DO CERRITO, CAMPO BELO DO SUL, CORREIA PINTO, PONTE ALTA, SAO CRISTOVAO DO SUL, SANTA CECILIA, PONTE ALTA DO NORTE |
| DIONISIO CERQUEIRA | PALMA SOLA, SAO JOSE DO CEDRO, PRINCESA, PRINCESA, GUARUJA DO SUL, GUARACIABA, PARAISO |
| FLORIANOPOLIS | SAO JOSE, PALHOCA, PAULO LOPES, GAROPABA, SAO BONIFACIO, SANTO AMARO DA IMPERATRIZ, AGUAS MORNAS, RANCHO QUEIMADO, ANGELINA, MAJOR GERCINO, NOVA TRENTO, SAO JOAO BATISTA, ANTONIO CARLOS, BIGUACU, GOVERNADOR CELSO RAMOSTIJUCAS, BOMBINHAS, PORTO BELO, CANELINHA, ANITAPOLIS, NAVEGANTES, SAO PEDRO DE ALCANTARA |
| INDAIAL | ASCURRA, BENEDITO NOVO, BLUMENAU, POMERODE, RODEIO, RIO DOS CEDROS, TIMBO |
| ITAJAI | BALNEARIO CAMBORIU, ITAPEMA, CAMBORIU, BRUSQUE, GUABIRUBA, GASPAR, ILHOTA, BALNEARIO DE PICARRASPENHA, BARRA VELHA, ARAQUARI, BALNEARIO BARRA DO SUL, GUARAMIRIM, SCHROEDER, JARAGUA DO SUL, MASSARANDUBA, SAO JOAO DO ITAPERIU, BOTUVERA, LUIZ ALVES |
| ITAPOA | GARUVA, JOINVILLE, SAO FRANCISCO DO SUL |
| ITUPORANGA | AGROLANDIA, AGRONOMICA, ALFREDO WAGNER, APIUNA, ATALANTA, AURORA, BRACO DO TROMBUDO, CHAPADAO DO LAGEADO, IBIRAMA, IMBUIA, LEOBERTO LEAL, LONTRAS, PETROLANDIA, PRESIDENTE NEREU, RIO DO SUL, TROMBUDO CENTRAL, VIDAL RAMOS |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Tabela 3 – Municípios agrupados às estações automáticas (Nomenclatura INPE). Parte 2.

| Mesorregião | Município Associado |
|---------------------|---|
| JOACABA | AGUA DOCE, PASSOS MAIA, MACIEIRA, TREZE TILIAS, SALTO VELOSO, PONTE SERRADA, IOMERE, PINHEIRO PRETO, IBICARE, HERVAL D'OESTE, LACERDOPOLIS, OURO, ERVAL VELHO, CAPINZAL, PIRATUBA, ALTO BELA VISTA, PERITIBA, IPIRA, CONCORDIA, IRANI, VARGEM BONITA, CATANDUVAS, PRESIDENTE CASTELO BRANCO, ARROIO TRINTA, JABORA, LUZERNA |
| LAGES | BOCAINA DO SUL, CAPAO ALTO, OTACILIO COSTA, PAINEL, PALMEIRA |
| LAGUNA | JAGUARUNA, SANGAO, TUBARAO, CAPIVARI DE BAIXO, IMBITUBA, IMARUI, SAO MARTINHO, ARMAZEM, GRAVATAL |
| MAJOR VIEIRA | TRES BARRAS, PAPANDUVA, MONTE CASTELO, BELA VISTA DO TOLDO, CANOINHAS, IRINEOPOLIS |
| NOVO HORIZONTE | SAO LOURENCO DO OESTE, JUPIA, GALVAO, SAO DOMINGOS, IPUACU, QUILOMBO, SANTIAGO DO SUL, CAMPO ERE, SALTINHO, IRATI, SERRA ALTA, SUL BRASIL, JARDINOPOLIS, CORONEL MARTINS, MODELO, FORMOSA DO SUL, BOM JESUS DO OESTE, PINHALZINHO, SAO BERNARDINO, UNIAO DO OESTE |
| RIO DO CAMPO | DONA EMMA, JOSE BOITEUX, LAURENTINO, MIRIM DOCE, POUSO REDONDO, PRESIDENTE GETULIO, RIO DO OESTE, SALETE, SANTA TEREZINHA, TAI0, VITOR MEIRELES, WITMARSUM |
| RIO NEGRINHO | SAO BENTO DO SUL, CAMPO ALEGRE, CORUPA, DOUTOR PEDRINHO, ITAIOPOLIS, MAFRA |
| SAO JOAQUIM | URUPEMA, RIO RUFINO |
| SAO MIGUEL DO OESTE | ITAPIRANGA, SAO JOAO DO OESTE, MONDAI, TUNAPOLIS, IPORA DO OESTE, SANTA HELENA, RIQUEZA, CAIBI, PALMITOS, CUNHATAI, CUNHA PORA, ANCHIETA, ROMELANDIA, SANTA TEREZINHA DO PROGRESSO, MARAVILHA, TIGRINHOS, IRACEMINHA, BANDEIRANTE, BARRA BONITA, BELMONTE, FLOR DO SERTAO, DESCANSO, SAO MIGUEL DA BOA VISTA, |
| URUSSANGA | CRICIUMA, NOVA VENEZA, ICARA, MORRO DA FUMACA, TREZE DE MAIO, PEDRAS GRANDES, SAO LUDGERO, BRACO DO NORTE, RIO FORTUNA, SANTA ROSA DE LIMA, SIDEROPOLIS, TREVISO, LAURO MULLER, ORLEANS, COCAL DO SUL, |
| XANXERE | SEARA, XAVANTINA, ARVOREDO, ITA ARABUTA, IPUMIRIM, LINDOIA DO SUL, FAXINAL DOS GUEDES, VARGEAO, OURO VERDE, ENTRE RIOS, ABELARDO LUZ, BOM JESUS, LAJEADO GRANDE, MAREMA, |
| LAGES | BOCAINA DO SUL, CAPAO ALTO, OTACILIO COSTA, PAINEL, PALMEIRA |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Tabela 4 – Municípios agrupados às estações automáticas (Nomenclatura INPE). Parte 3.

| Mesorregião | Município Associado |
|---------------------|---|
| LAGUNA | JAGUARUNA, SANGAO, TUBARAO, CAPIVARI DE BAIXO, IMBITUBA, IMARUI, SAO MARTINHO, ARMAZEM, GRAVATAL |
| MAJOR VIEIRA | TRES BARRAS, PAPANDUVA, MONTE CASTELO, BELA VISTA DO TOLDO, CANOINHAS, IRINEOPOLIS |
| NOVO HORIZONTE | SAO LOURENCO DO OESTE, JUPIA, GALVAO, SAO DOMINGOS, IPUACU, QUILOMBO, SANTIAGO DO SUL, CAMPO ERE, SALTINHO, IRATI, SERRA ALTA, SUL BRASIL, JARDINOPOLIS, CORONEL MARTINS, MODELO, FORMOSA DO SUL, BOM JESUS DO OESTE, PINHALZINHO, SAO BERNARDINO, UNIAO DO OESTE |
| RIO DO CAMPO | DONA EMMA, JOSE BOITEUX, LAURENTINO, MIRIM DOCE, POUSO REDONDO, PRESIDENTE GETULIO, RIO DO OESTE, SALETE, SANTA TEREZINHA, TAI0, VITOR MEIRELES, WITMARSUM |
| RIO NEGRINHO | SAO BENTO DO SUL, CAMPO ALEGRE, CORUPA, DOUTOR PEDRINHO, ITAIOPOLIS, MAFRA |
| SAO JOAQUIM | URUPEMA, RIO RUFINO |
| SAO MIGUEL DO OESTE | ITAPIRANGA, SAO JOAO DO OESTE, MONDAI, TUNAPOLIS, IPORA DO OESTE, SANTA HELENA, RIQUEZA, CAIBI, PALMITOS, CUNHATAI, CUNHA PORA, ANCHIETA, ROMELANDIA, SANTA TEREZINHA DO PROGRESSO, MARAVILHA, TIGRINHOS, IRACEMINHA, BANDEIRANTE, BARRA BONITA, BELMONTE, FLOR DO SERTAO, DESCANSO, SAO MIGUEL DA BOA VISTA, |
| URUSSANGA | CRICIUMA, NOVA VENEZA, ICARA, MORRO DA FUMACA, TREZE DE MAIO, PEDRAS GRANDES, SAO LUDGERO, BRACO DO NORTE, RIO FORTUNA, SANTA ROSA DE LIMA, SIDEROPOLIS, TREVISO, LAURO MULLER, ORLEANS, COCAL DO SUL, |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

3.5 Metodologias estudadas

Nesta pesquisa serão utilizadas três fórmulas que já foram amplamente estudadas em diversos trabalhos no sentido de verificar graus de perigo para eventos de incêndio.

3.5.1 Fórmula de Monte Alegre (FMA)

A FMA (SOARES e PAEZ, 1973) utiliza as variáveis meteorológicas umidade relativa do ar medida às 13 horas e a precipitação diária, sendo a precipitação cumulativa, conforme a Equação 1.

$$FMA = \sum_{i=1}^n \frac{(100)}{H_i} \quad (1)$$

Onde:

- a) “FMA”: Fórmula de Monte Alegre;
- b) “n”: número de dias sem chuva maior ou igual a 13 mm;
- c) “H”: umidade relativa do ar, medida às 13:00 h;

Durante o cálculo da fórmula, são aplicadas restrições baseadas na precipitação diária, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Restrições no cálculo da FMA

| Precipitação diária (mm) | Restrições no cálculo |
|--------------------------|--|
| <= 2,4 | Nenhuma |
| 2,5 a 4,9 | Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia |
| 5,0 a 9,9 | Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia |
| 10,00 a 12,9 | Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia |
| >= 13,00 | Interromper o cálculo (FMA=0), recomeçando a somatória no dia seguinte |

Fonte: (SOARES e PAEZ, 1973).

Os graus de perigo de incêndio definidos para a fórmula estão definidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Graus de perigo definidos pela FMA

| Índice FMA calculado | Grau de perigo |
|----------------------|----------------|
| Até 1,0 | Nulo |
| De 1,1 até 3,0 | Pequeno |
| De 3,1 até 8,0 | Médio |
| De 8,1 até 20,0 | Alto |
| Maior que 20,0 | Muito alto |

Fonte: (SOARES e PAEZ, 1973).

3.5.2 Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+)

Em 2005, uma nova pesquisa foi realizada no sentido de aprimorar a FMA original (NUNES, SOARES, e BATISTA, 2005), acrescentando a velocidade do vento na fórmula, que ficou estabelecida como FMA+ (Fórmula de Monte Alegre Alterada), ficando a notação como na Equação 2.

$$FMA^+ = \sum_{i=1}^n \frac{(100)}{H_i} e^{0,04v} \quad (2)$$

Onde:

- a) FMA+: Fórmula de Monte Alegre Alterada;
- b) “n”: número de dias sem chuva maior ou igual a 13 mm;
- c) “H”: umidade relativa do ar, medida às 13:00 h;
- d) “e”: base dos logaritmos naturais (2,718282);
- e) “v”: velocidade do vento medida às 13:00 h.

As restrições no cálculo diário da FMA+ são as mesmas vistas na Tabela 7, utilizadas no cálculo da FMA. Os graus de perigo definidos para a FMA+ estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Restrições no cálculo da FMA+

| Índice FMA+ calculado | Grau de perigo |
|-----------------------|----------------|
| Até 3,0 | Nulo |
| De 3,1 até 8,0 | Pequeno |
| De 8,1 até 14,0 | Médio |
| De 14,1 até 24,0 | Alto |
| Maior que 24,0 | Muito alto |

Fonte: (NUNES *et al.*, 2005).

3.5.3 Fator de Risco de Ångstrom (FRA)

Trata-se de um índice não cumulativo, que utiliza as variáveis meteorológicas umidade relativa do ar (%) e temperatura do ar (°C), medidos às 13:00 (Ångström, 1942).

O cálculo do Fator de Risco de Ångstrom está descrito na Equação 3.

$$FRA = 0,05 \cdot UR - 0,1 \cdot (T - 27) \quad (3)$$

Onde:

- a) “FRA”: Fator de Risco de Ångstrom;
- b) “UR”: umidade relativa do ar, medida às 13:00;
- c) “T”: temperatura do ar, medida às 13:00.

Os graus de perigo definidos para este índice estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Graus de perigo definidos pelo Fator de Risco de Ångstrom

| Índice de Ångstrom calculado | Grau de perigo |
|------------------------------|----------------|
| < 2,5 | Risco |
| >= 2,5 | Nulo |

Fonte: (Ångstrom, 1949).

3.6 Verificação das previsões

Para realizar uma verificação dos acertos e erros das previsões, serão utilizadas algumas técnicas estatísticas.

3.6.1 Tabela de contingência

Para analisar o desempenho das fórmulas estudadas, foi elaborada uma Tabela de Contingência (WILKS, 2006, p. 260), onde, são definidas as variáveis que serão utilizadas nos cálculos. Em uma primeira etapa, são distribuídos os valores em pares de previsão/evento para a situação de verificação (Tabela 9).

Tabela 9 – Tabela de contingência

| Tabela de contingência. | | | | |
|-------------------------|--------------|-----------|--------------|-------------------|
| Evento | | Observado | | Total previsto |
| | | Incêndio | Não incêndio | |
| Índice | Previsto | a | b | a + b |
| | Não previsto | c | d | c + d |
| Total observado | | a + c | b + d | N = a + b + c + d |

Fonte: Adaptado de WILKS (2006).

Através da definição das variáveis na Tabela de Contingência, é possível utilizar várias técnicas estatísticas para verificar a quantidade de acertos e erros dos índices.

3.6.2 Proporção Correta (PC)

A Proporção Correta (PC) mostra a estimativa para a fração das “n” ocasiões de previsão para as quais a previsão antecipou corretamente o evento subsequente ou não evento. Além disso, satisfaz o princípio da equivalência de

eventos, pois credita igualmente previsões corretas, sim e não, o que pode não ser tão desejável quando a ocorrência do evento é pequena (WILKS, 2019). Este é o caso dos incêndios observados neste estudo, que correspondem a apenas 7,12% do total de dias calculado. Os melhores acertos estarão próximo de 1.

$$PC = \frac{a+d}{N} \quad (4)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, d incêndio não previsto e não observado e N total de dias calculados.

A Proporção Correta (PC) satisfaz o princípio da equivalência de eventos, pois credita igualmente previsões corretas, sim e não, o que pode não ser tão desejável quando a ocorrência do evento é pequena (WILKS, 2006, p. 263). Este é o caso dos incêndios observados neste estudo, que correspondem a apenas 7,12% do total de dias calculado, como vimos na Tabela 7.

3.6.3 Threat Score (TS)

O *Threat Score* (TS), pode ser utilizado em casos onde o evento a ser previsto ocorre substancialmente menos frequentemente do que a não ocorrência, que é o caso deste estudo. O TS também conhecido como Índice Crítico de Sucesso (CSI) e que mostra a estimativa para o número de previsões “sim” corretas dividido pelo número total de ocasiões em que aquele evento foi previsto e/ou observado (WILKS, 2019). Os melhores resultados estarão próximos de 1, e os piores, de 0.

$$TS = \frac{a}{a+b+c} \quad (5)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto, mas observado.

3.6.4 Razão de Probabilidade (*odd rate*, ou θ)

A Razão de Probabilidade (*odd rate*, ou θ) trata do produto dos números de previsões corretas pelo produto dos números de previsões incorretas

(WILKS, 2019). Valores maiores do resultado da equação indicam previsões mais precisas.

$$\theta = \frac{a \cdot d}{b \cdot c} \quad (6)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, d incêndio não previsto e não observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto, mas observado.

3.6.5 Razão de Bias (B)

A Razão de *Bias* (B), trata da relação entre o número de previsões “sim” e o número de observações “sim”. Por não fazer correlação entre as previsões e as observações do evento, não é uma medida de precisão (WILKS, 2019). As previsões mais corretas deste cálculo se encontram num resultado = 1. Caso o número seja maior, houve sobreprevisão, se menor, subprevisão.

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad (7)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto, mas observado.

3.6.6 Razão de Falso Alarme (FAR)

A Razão de Falso Alarme (FAR) é a estimativa para a proporção dos eventos previstos que não se materializam (WILKS, 2019). Os valores menores de FAR são preferidos, pois tem uma orientação negativa. O melhor valor possível para a FAR é zero, e o pior, 1.

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (8)$$

Em que: b incêndio previsto e não observado e a incêndio previsto e observado.

3.6.7 Taxa de Acerto (H)

A Taxa de Acerto (H) (WILKS, 2006, p. 264), mostra a estimativa para a probabilidade de acerto para quando houve ocorrência, apresentando a probabilidade de detecção, e mostra uma distribuição entre previsão e observação, utilizando a Fórmula 9.

$$H = \frac{a}{a+c} \quad (9)$$

Em que: “H” é o valor da Taxa de Acerto, “a” é o valor dos incêndios previstos e observados e “c” é o número de ocorrências não previstas mas observadas. Nesta fórmula, valores próximos a 1 mostram grande taxa de acerto.

3.6.8 Taxa de Falso Alarme (F)

A Taxa de Falso Alarme (F), busca a estimativa para a probabilidade de o sistema prever corretamente os eventos observados (WILKS, 2019). Valores próximos de 1 representam uma baixa taxa de acertos.

$$F = \frac{b}{b+d} \quad (10)$$

Em que: b incêndio previsto e não observado e d incêndio não previsto e não observado.

3.6.9 Heidke Skill Score (HSS)

O *Heidke Skill Score* (HSS) mostra a estimativa para a proporção correta que seria alcançada por previsões aleatórias que são estatisticamente independentes das observações (WILKS, 2019). O HSS busca o número de acertos

e rejeições corretos padronizados para que as previsões aleatórias tenham habilidade zero.

$$HSS = \frac{2 \cdot ((a \cdot d) - (b \cdot c))}{(a+c) \cdot (c+d) + (a+b) \cdot (b+d)} \quad (11)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, d incêndio não previsto e não observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto, mas observado.

3.6.10 Odds Ratio Skill Score (ORSS)

O ORSS (*Odds Ratio Skill Score* ou Q) elabora um *Skill Score* baseado na Razão de Probabilidade (odd rate, ou θ), (WILKS, 2019). Para previsões perfeitas, a pontuação será 1, e para previsões aleatórias, 0.

$$Q = \frac{(a \cdot d) + (b \cdot c)}{(a \cdot d) - (b \cdot c)} \quad (12)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, d incêndio não previsto e não observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto, mas observado.

3.6.11 Peirce Skill Score (PSS)

No PSS (*Peirce Skill Score*), a taxa de acerto de referência no denominador é aquela para previsões aleatórias que são restritas a serem imparciais (WILKS, 2019). As previsões perfeitas do PSS indicam pontuação 1, as previsões aleatórias recebem pontuação 0 e as previsões inferiores às previsões aleatórias recebem pontuações negativas.

$$PSS = \frac{(a \cdot d) - (b \cdot c)}{(a+c) \cdot (b+d)} \quad (13)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, d incêndio não previsto e não observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto mas observado.

3.6.12 Clayton Skill Score (CSS)

O CSS (*Clayton Skill Score*) evidencia habilidade positiva na medida em que o evento ocorre com mais frequência quando previsto do que quando não previsto (WILKS, 2019). No CSS, a frequência relativa condicional do resultado sim, dadas as previsões sim, é maior do que a frequência relativa condicional, dadas as previsões não. Melhores valores estarão próximos de 1 para o CSS.

$$CSS = \frac{(a \cdot d) - (b \cdot c)}{(a + b) \cdot (c + d)} \quad (14)$$

Em que: a incêndio previsto e observado, d incêndio não previsto e não observado, b incêndio previsto e não observado e c incêndio não previsto mas observado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi elaborado um cálculo para verificar a quantidade de dias analisados com e sem ocorrências, que podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de dias analisados com e sem ocorrência de incêndio detectada por satélite do período de 2010 a 2022

| Quantidade de dias analisados | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|-------|
| | | Quantidade de dias | % |
| Observados | Não ocorrências | 75106 | 92,88 |
| | Ocorrências | 5758 | 7,12 |
| TOTAL | | 80864 | 100 |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Observa-se que os dias calculados onde não houve observação do evento de incêndio correspondem a 92,88%, o que denota uma baixa taxa de ocorrência.

Após a comparação das ocorrências de incêndio registradas pelo satélite de referência, foi possível obter os resultados do total de previsões de graus de perigo para cada índice.

Para realizar os cálculos de sucessos e erros das fórmulas, foi definindo para a FMA e a FMA+ um acerto quando o grau de perigo for considerado “Muito alto” em dias em que houve ocorrência detectada pelo satélite. Os demais índices (Alto, Médio, Pequeno e Nulo) são considerados erros para ambos os índices nessas ocasiões. Já para os dias em que não houve ocorrência detectada, se o grau de perigo for considerado “Muito alto” será considerado um erro e se for apontado outro grau de perigo (Alto, Médio, Pequeno e Nulo), um acerto (Tabela 11).

Tabela 11 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para a FMA e FMA+

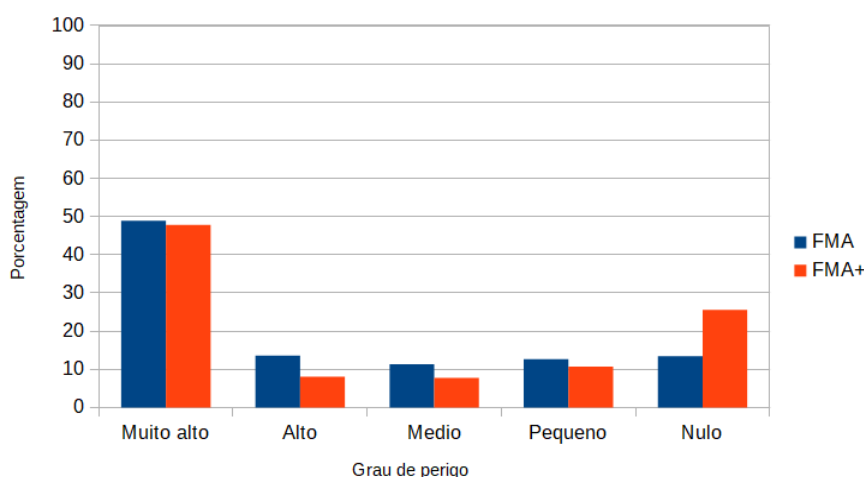
| Quantidade e porcentagem de dias com graus de perigo calculados (2010 a 2022) | | | | |
|--|------------|-------|------------|-------|
| Grau de Perigo | FMA | | FMA+ | |
| | Quantidade | % | Quantidade | % |
| Nulo | 10175 | 12,58 | 19334 | 25,18 |
| Pequeno | 9600 | 11,87 | 8200 | 10,54 |
| Médio | 8698 | 10,76 | 6089 | 7,31 |
| Alto | 10788 | 13,34 | 6497 | 7,64 |
| Muito Alto | 41603 | 51,45 | 40744 | 49,33 |
| Risco | – | – | – | – |
| TOTAL | 80864 | 100 | 80864 | 100 |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

O resultado mostra que o percentual de grau de perigo “Muito alto” de FMA e FMA+ resulta em aproximadamente 50% dos casos e do período de dados. Este resultado mostrou-se muito parecido com o estudo de NUNES *et al.* (2005, p. 86), que alcançou por volta de 48% de apontamentos de grau de perigo “Muito alto”. A FMA+ mostra uma diminuição do percentual em todos os graus de período, mas principalmente nos graus de perigo “Pequeno” e “Médio”.

A Figura 4 apresenta um gráfico com os percentuais de previsões para os 13 anos e as 23 estações estudadas. Observa-se que a FMA e FMA+ mostram bastante sensibilidade à detecção para a categoria “Muito Alto”.

Figura 4 – Percentagem calculada dos graus de perigo para a FMA e a FMA+



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Já o Fator de Risco de Ångstrom apresentou mais de 86% de grau de perigo “Nulo”, como é apresentado na Tabela 12.

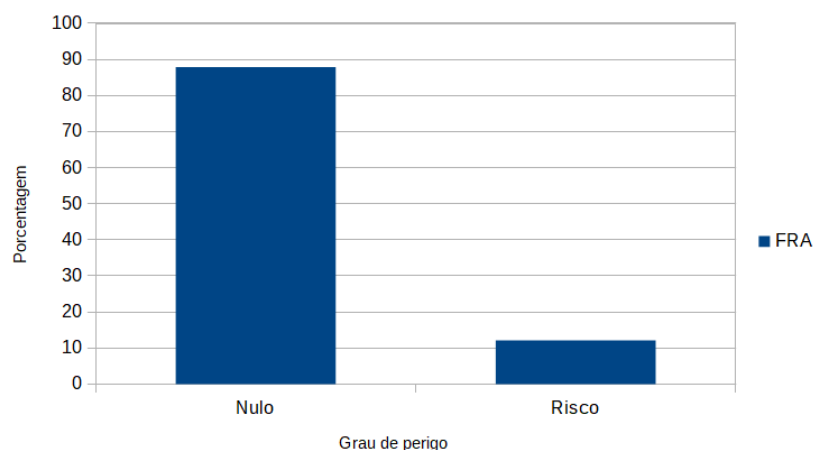
Tabela 12 – Quantidade e percentagem por graus de perigo calculados para o FRA.

| Quantidade e percentagem de dias com graus de perigo calculados (2010 a 2022) | | |
|---|------------|-------|
| Grau de Perigo | FRA | |
| | Quantidade | % |
| Nulo | 69777 | 86,29 |
| Risco | 11087 | 13,71 |
| TOTAL | 80864 | 100 |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

O gráfico com o percentual para cada grau de perigo para o FRA é apresentado na figura 5.

Figura 5 – Porcentagem calculada dos graus de perigo para o FRA.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

A figura 5 evidencia que para o FRA houve predominância (cerca de 80%) para o grau de perigo “Nulo”.

Em seguida foram calculados os índices para os casos quando houve ocorrência de incêndio detectada pelo satélite para a FMA e a FMA+, como é possível ver na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para dias com ocorrências da FMA e FMA+

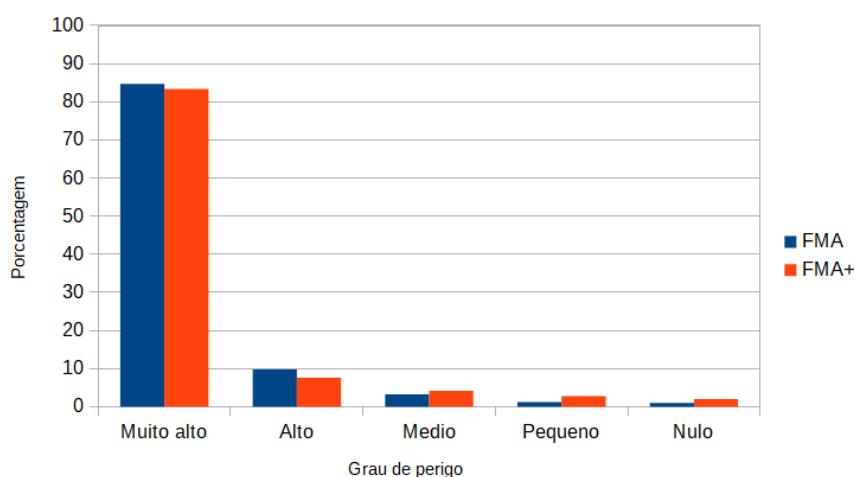
| Quantidade e porcentagem de índices por dias com ocorrências (2010 a 2022) | | | | |
|---|-------------|------------|-------------|------------|
| Grau de Perigo | FMA | | FMA+ | |
| | Quantidade | % | Quantidade | % |
| Nulo | 56 | 0,97 | 118 | 2,05 |
| Pequeno | 70 | 1,22 | 162 | 2,81 |
| Médio | 188 | 3,27 | 240 | 4,17 |
| Alto | 566 | 9,82 | 437 | 7,59 |
| Muito Alto | 4878 | 84,72 | 4801 | 83,38 |
| TOTAL | 5758 | 100 | 5758 | 100 |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Tabela 13 vemos que predomina o grau de perigo “Muito alto” para ambos os índices, com mais de 80% de apontamentos para ambas as fórmulas.

A porcentagem de atribuição de cada grau de perigo definido pelos índices em casos em que houve ocorrências para a FMA e a FMA+, pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 – Porcentagem calculada dos graus de perigo em eventos observados para FMA e FMA+



Fonte: Elaboração Própria (2023).

A Figura 6 mostra que para os casos onde houve incêndio observado, a FMA e a FMA+ alcançaram mais de 80% de acertos (grau de perigo “Muito alto”).

Também foi realizado um cálculo para o FRA para os dias com ocorrência detectada pelo satélite (Tabela 14).

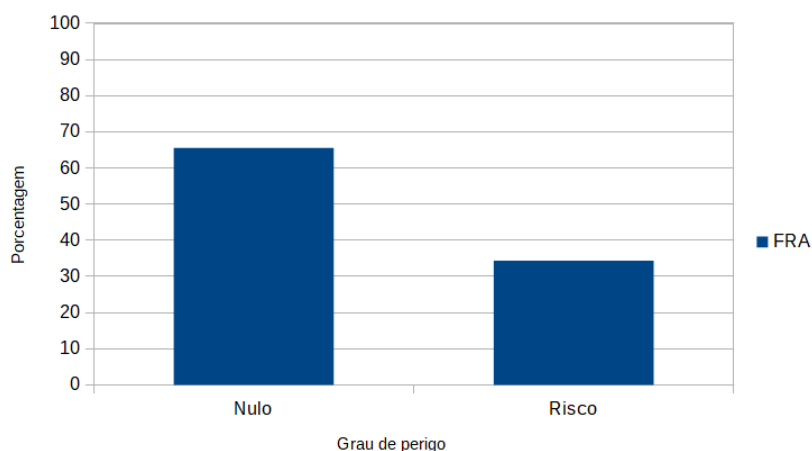
Tabela 14 – Quantidade e porcentagem por graus de perigo calculados para dias com ocorrências do FRA

| Graus de perigo para dias com ocorrências para o FRA | | |
|--|-------------|------------|
| Grau de Perigo | FRA | |
| | Quantidade | % |
| Nulo | 3777 | 65,6 |
| Risco | 1981 | 34,4 |
| TOTAL | 5758 | 100 |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Nota-se na Tabela 15 que o FRA apontou somente 34,4% o grau de perigo “Risco” para os dias onde houve ocorrência detectada pelo satélite. A Figura 7 mostra um gráfico com o percentual alcançado pelo índice.

Figura 7 – Porcentagem calculada dos graus de perigo em eventos observados para o FRA.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Observando o percentual de grau de perigo “Nulo” apontado pelo FRA (65,6%), vemos que o índice obteve alto percentual do resultado não esperado para dias onde houve incêndio detectado pelo satélite

Após a definição dos graus de perigo para os 3 índices, os dados foram adicionados em uma tabela de contingência, como vemos na Tabela 15.

Tabela 15 – Tabela de contingência para os dados gerais calculados

| Tabela de contingência | | | | |
|------------------------|--------------|-----------|--------------|----------------|
| Evento | | Observado | | Total previsto |
| | | Incêndio | Não incêndio | |
| FMA | Incêndio | a = 4878 | b = 36725 | 41603 |
| | Não Incêndio | c = 880 | d = 38381 | 39261 |
| | TOTAL | 5758 | 75106 | 80864 |
| FMA+ | Incêndio | a = 4801 | b = 35943 | 40744 |
| | Não Incêndio | c = 957 | d = 39163 | 40120 |
| | TOTAL | 5758 | 75106 | 80864 |
| Ångstrom | Incêndio | a = 1981 | b = 9106 | 11087 |
| | Não Incêndio | c = 3777 | d = 66000 | 69777 |
| | TOTAL | 5758 | 75106 | N = 80864 |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Foram elaborados os cálculos com as Equações 4 a 14, resultando nos valores da tabela 16.

Tabela 16 – Valores estatísticos calculados para previsões/ocorrências.

| Índice | PC | TS | Θ | B | FAR | H | F | HSS | Q | PSS | CSS |
|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| FMA | 0.5350 | 0.1148 | 5.7931 | 7.2253 | 0.8827 | 0.8472 | 0.4890 | 0.0924 | 0.7055 | 0.3581 | 0.0948 |
| FMA+ | 0.5437 | 0.1151 | 5.4661 | 7.0761 | 0.8822 | 0.8338 | 0.4786 | 0.0933 | 0.6906 | 0.3552 | 0.0940 |
| FRA | 0.8407 | 0.1333 | 3.8015 | 1.9255 | 0.8213 | 0.3440 | 0.1212 | 0.1561 | 0.5834 | 0.2838 | 0.1245 |

Fonte: Elaboração Própria (2023). Legenda: PC, Proporção Correta; TS, Threat Score; θ , Razão de Probabilidade; B, Razão de Bias; FAR, Razão de Falso Alarme; H, Taxa de Acerto; F, Taxa de Falso Alarme; HSS, Heidke Skill Score; Q, Odds Ratio Skill Score; PSS, Peirce Skill Score; CSS, Clayton Skill Score.

Vemos na Tabela 6 que a Proporção de Acertos (PC) apresentou valores de mais de 50% de acertos para FMA e FMA+ e mais de 84% para FRA. Em relação ao Threat Score (TS), vemos que FRA obteve um melhor resultado, enquanto FMA e FMA+ obtiveram valores muito próximos. Com relação à Razão de Probabilidade (θ), FMA e FMA+ alcançaram melhores resultados. Para a Razão de Bias, houve grande superestimativa para FMA e FMA+. Para a Razão de Falso Alarme (FAR), os três índices tiveram alta taxa de previsões falsas. Já para a Taxa de Acerto (H), a FMA e a FMA+ tiveram excelente resultado, enquanto FRA obteve poucos acertos. Com relação a Taxa de Falso Alarme (F), FMA e FMA+ obtiveram um pouco menos da metade de falsas indicações, enquanto FRA teve baixa taxa de previsões equivocadas. Por último, temos os valores dos *Skill Score*, começando com o *Heidke Skill Score* (HSS), que trouxe melhores resultados para o FRA em relação à FMA e FMA+. O valor de Q (*Odds Ratio Skill Score*) apresentou melhores resultados para a FMA e a FMA+. O *Pierce Skill Score* (PSS) apresentou resultados melhores para a FMA e a FMA+ em relação ao FRA. No *Clayton Skill Score* (CSS), o FRA se mostrou mais eficiente, sendo que a FMA e FMA+ obtiveram valores semelhantes ao do HSS.

Chama a atenção os valores da Taxa de Acerto (H) da FMA e da FMA+, que trabalha somente com os dias onde houve ocorrência, com índices acima de 80% de acertos.

Além dos cálculos utilizando técnicas estatísticas, foram realizados estudos sobre os resultados obtidos após os cálculos das fórmulas, a atribuição dos municípios no entorno das estações e a comparação com as ocorrências detectadas pelo satélite.

Nas Figuras 8 e 9, são apresentados dados sobre a precipitação, nos casos em que houve menos que 1 mm e mais que 13 mm, para cada mesorregião ao longo dos anos. Nessas figuras, é possível notar um grande número de dias com baixa precipitação, ao mesmo tempo em que a distribuição de chuvas é regular para

todas as mesorregiões do estado. É interessante notar que o número de dias com precipitação acima de 13 mm corresponde a aproximadamente 50 dias por ano, enquanto os dias com menos de 1 mm são em média por volta de 200.

Nas Figuras 10 e 11, vemos os dias onde a temperatura do ar foi maior que 30° C e umidade relativa do ar menor que 40% em dias onde houve ocorrência detectada pelo satélite. Nota-se que há relação entre a baixa umidade do ar e a alta temperatura com as ocorrências de incêndio nas mesorregiões de Caçador, Curitiba, Joaçaba e Urussanga.

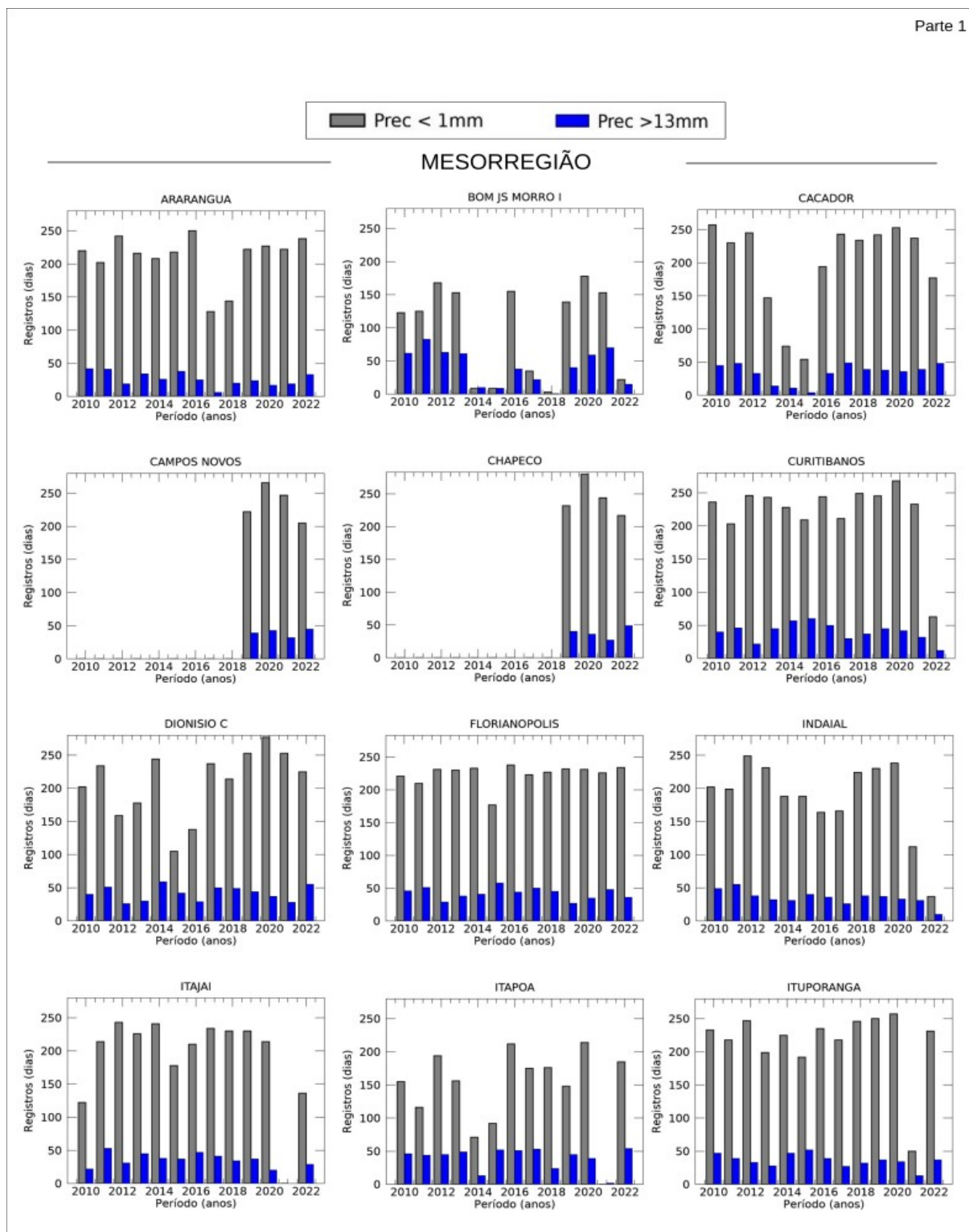
As Figuras 12 e 13 apresentam a quantidade de dias onde foram detectadas ocorrências de incêndio e a mesorregião apresentou temperatura maior que 30° C e a umidade relativa do ar foi menor que 40%. Nessas figuras, fica evidente a baixa correlação entre altas temperaturas e ocorrências nas mesorregiões de Caçador, Curitiba, Novo Horizonte e São Joaquim. Já em Indaial, Itajaí, Itapoá e Urussanga, predominaram as altas temperaturas para os dias com ocorrência.

Nas figuras 14 a 16, foi apresentada uma análise dos acertos dos índices de risco de incêndio por mesorregião do estudo para os dias onde houve ocorrência de incêndio. Fica evidente o grande percentual de acerto tanto da FMA quanto da FMA+ nesses casos, com mais de 80% em geral.

Na figura 17 é apresentado o resultado para todo o período do estudo (2010 a 2022), para cada mesorregião, dos acertos dos índices, para dias com e sem ocorrência. Nesse caso, o FRA apresentou maior índice de acertos, sendo que a FMA e FMA+ apresentaram cerca de 50% de apontamentos corretos.

Já a figura 18 apresenta o resultado dos acertos para os dias com ocorrências e incêndio, evidenciando novamente o grande percentual de acertos da FMA e FMA+.

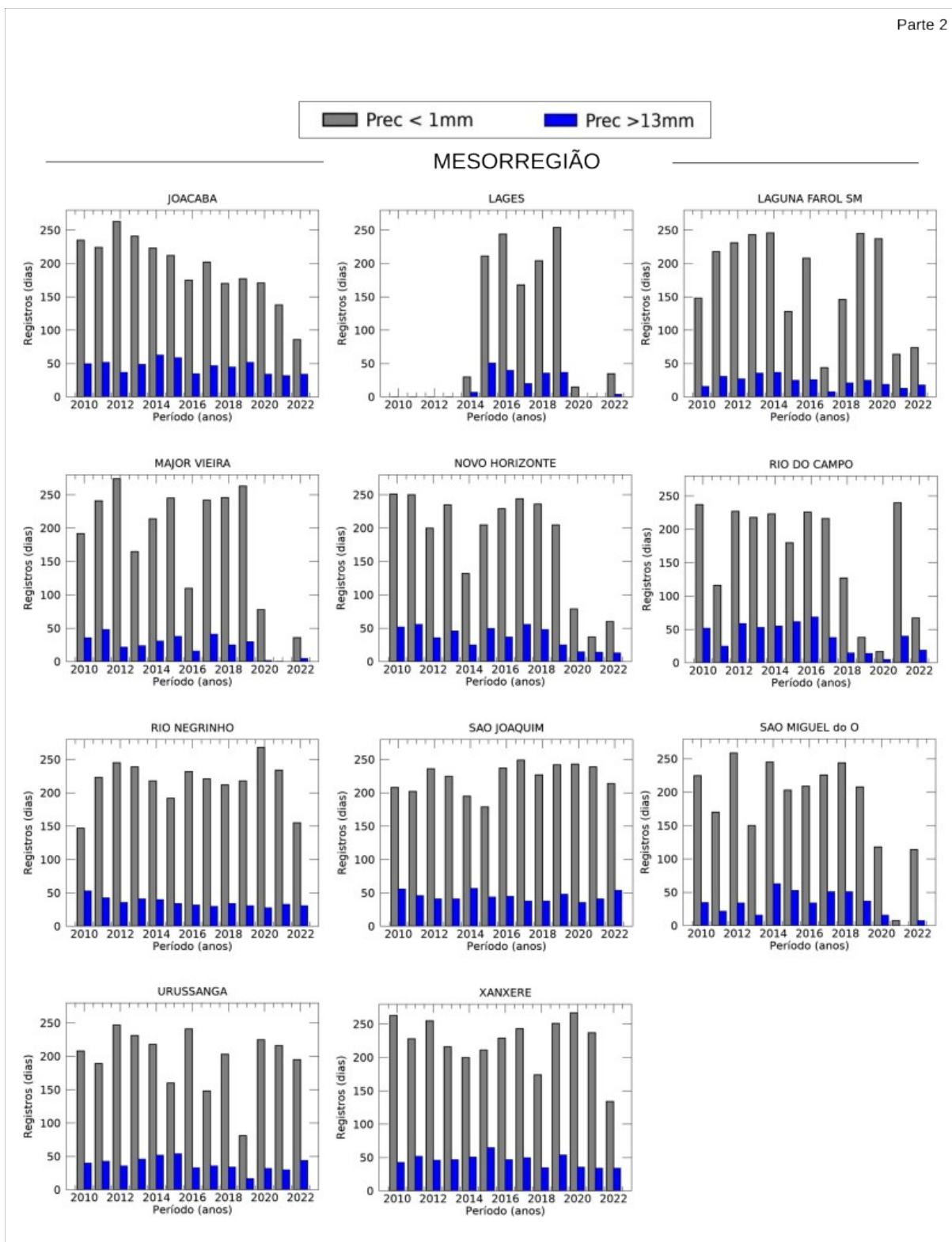
Figura 8 – Número de dias com precipitação menor que 1 mm ou maior que 13 mm por mesorregião, por ano e para todo o período (2010 a 2022). Parte 1.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Com um grande número de dias com baixa precipitação, é esperado que a FMA e a FMA+ apresentem grau de perigo “Muito alto” com maior frequência, conforme vemos na Figura 8.

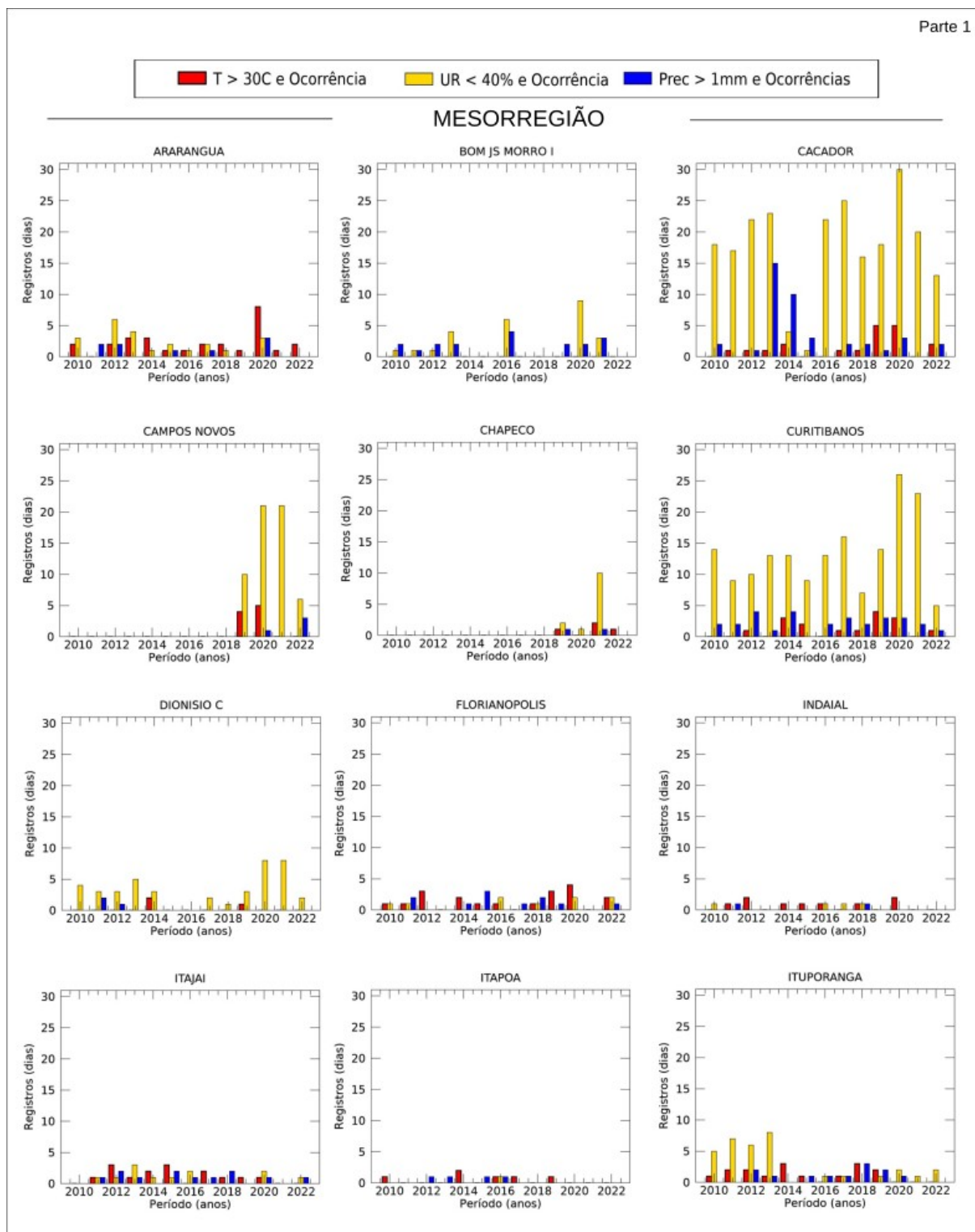
Figura 9 – Número de dias com precipitação menor que 1 mm ou maior que 13 mm por mesorregião, por ano e para todo o período (2010 a 2022). Parte 2.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Figura 9, nota-se que a distribuição de chuvas é semelhante para as diferentes mesorregiões.

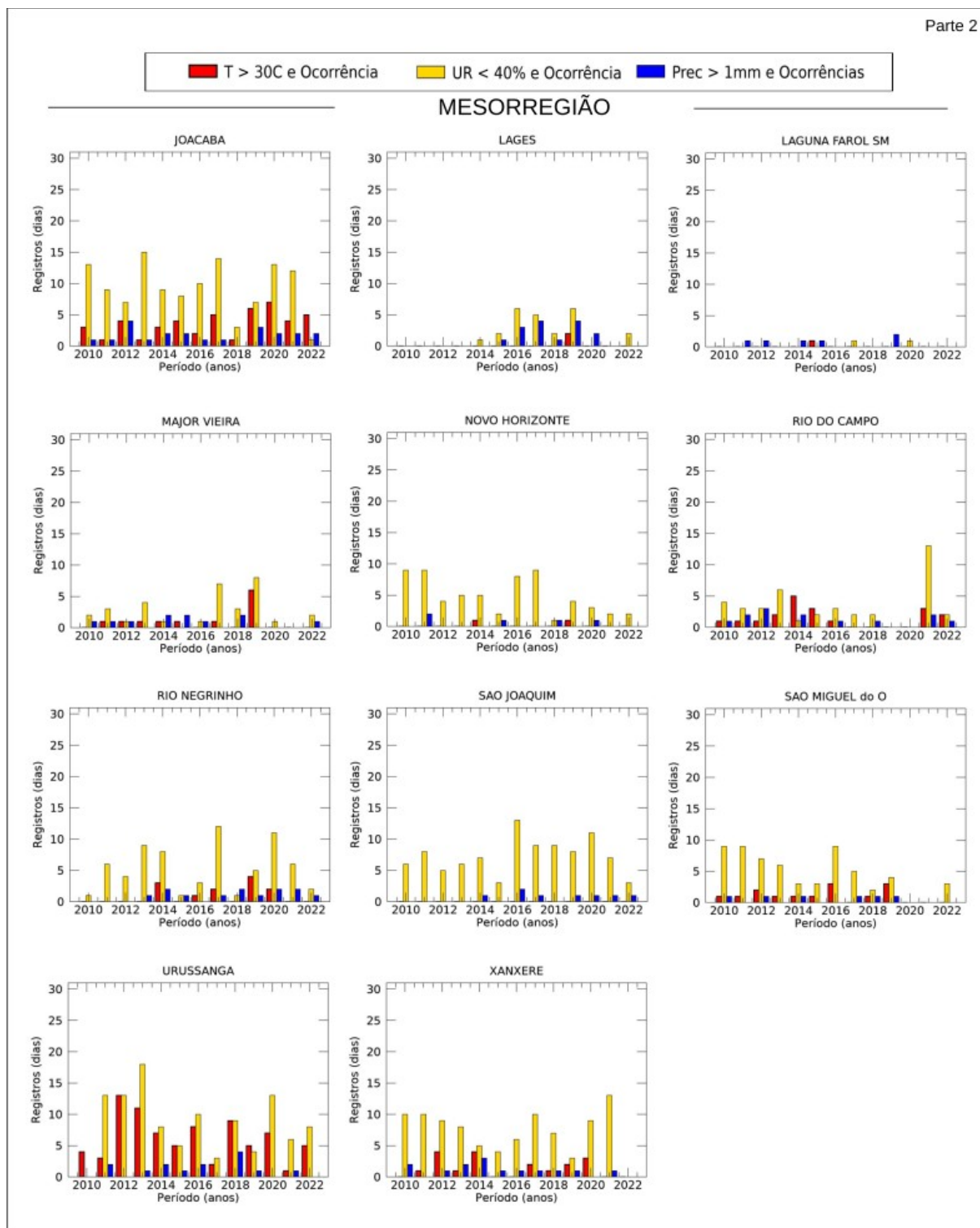
Figura 10 – Número de dias com alta temperatura, baixa umidade relativa do ar, e/ou precipitação maior que 1 mm em dias com ocorrência de incêndio detectada. Parte 1.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Figura 10, é possível notar que as mesorregiões das estações de Caçador, Curitibaanos e Campos Novos, apresentaram baixa umidade do ar nos dias onde houve ocorrência detectada.

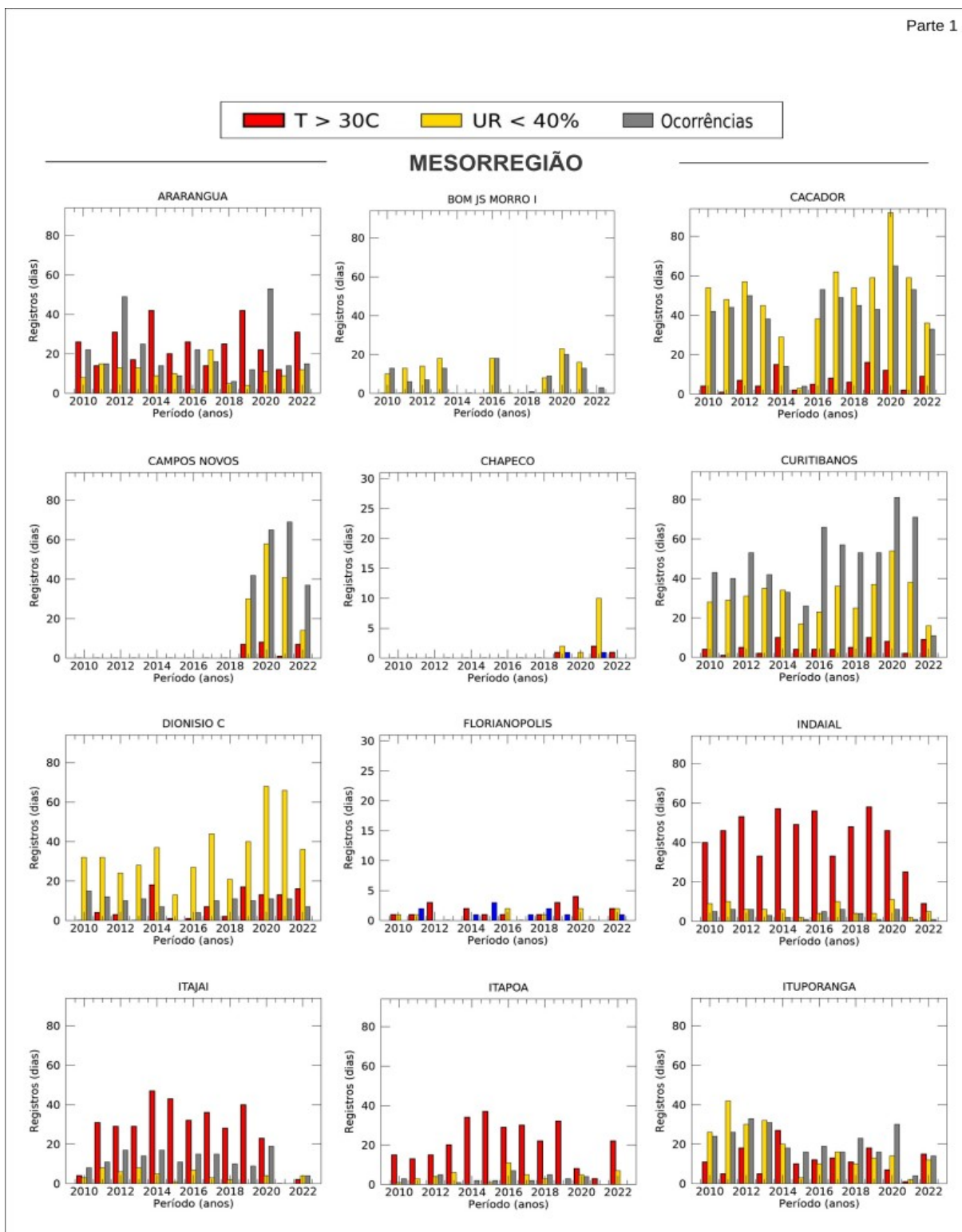
Figura 11 – Número de dias com alta temperatura, baixa umidade do ar, e/ou precipitação maior que 1 mm em dias com ocorrência de incêndio detectada. Parte 2.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Figura 11, é possível notar que as estações Joaçaba e Urussanga, além de baixa umidade do ar, tiveram altas temperaturas nos dias em que houve ocorrências detectadas.

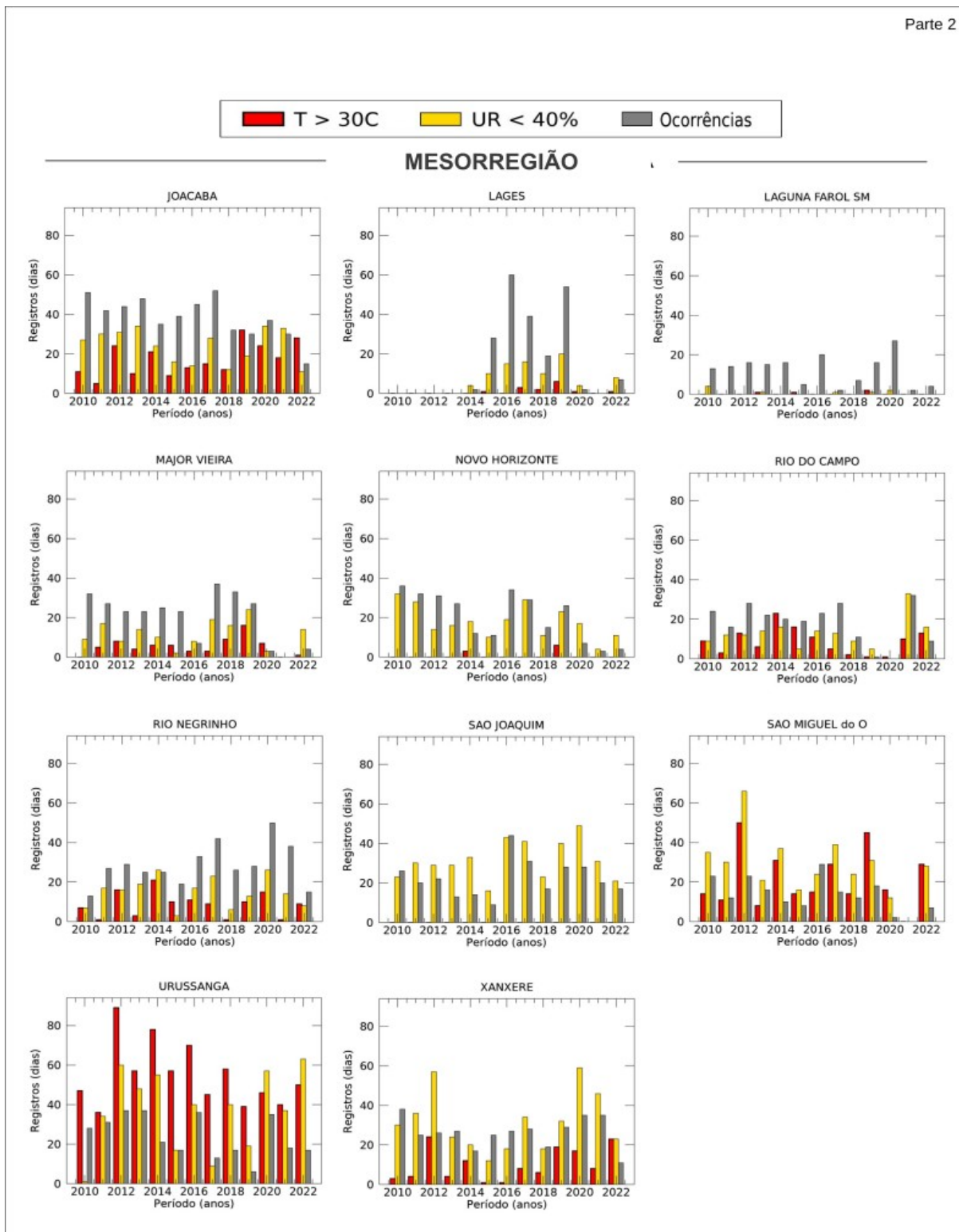
Figura 12 – Relação entre baixa UR e alta temperatura em dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 1.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Figura 12, é possível notar forte correlação entre as ocorrências detectadas e as altas temperaturas em áreas do litoral do estado, com destaque para Araranguá, Indaial, Itajaí e Itapoá.

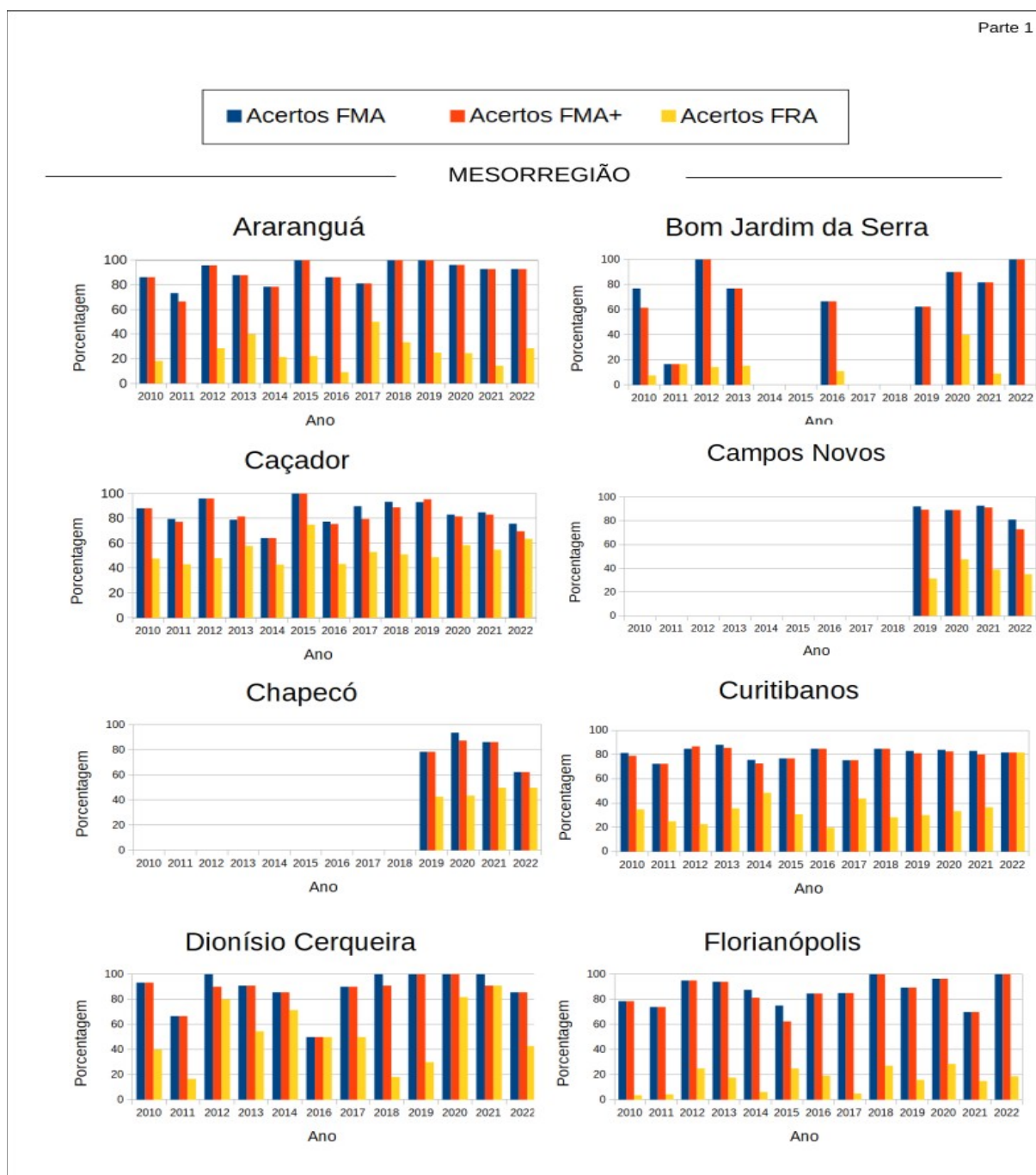
Figura 13 – Relação entre baixa UR e alta temperatura em dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 2.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Figura 13, é possível notar que a temperatura do ar alta e uma baixa umidade do ar apresentam correlação com ocorrências nas mesorregiões de Joaçaba São Miguel do Oeste e Urussanga.

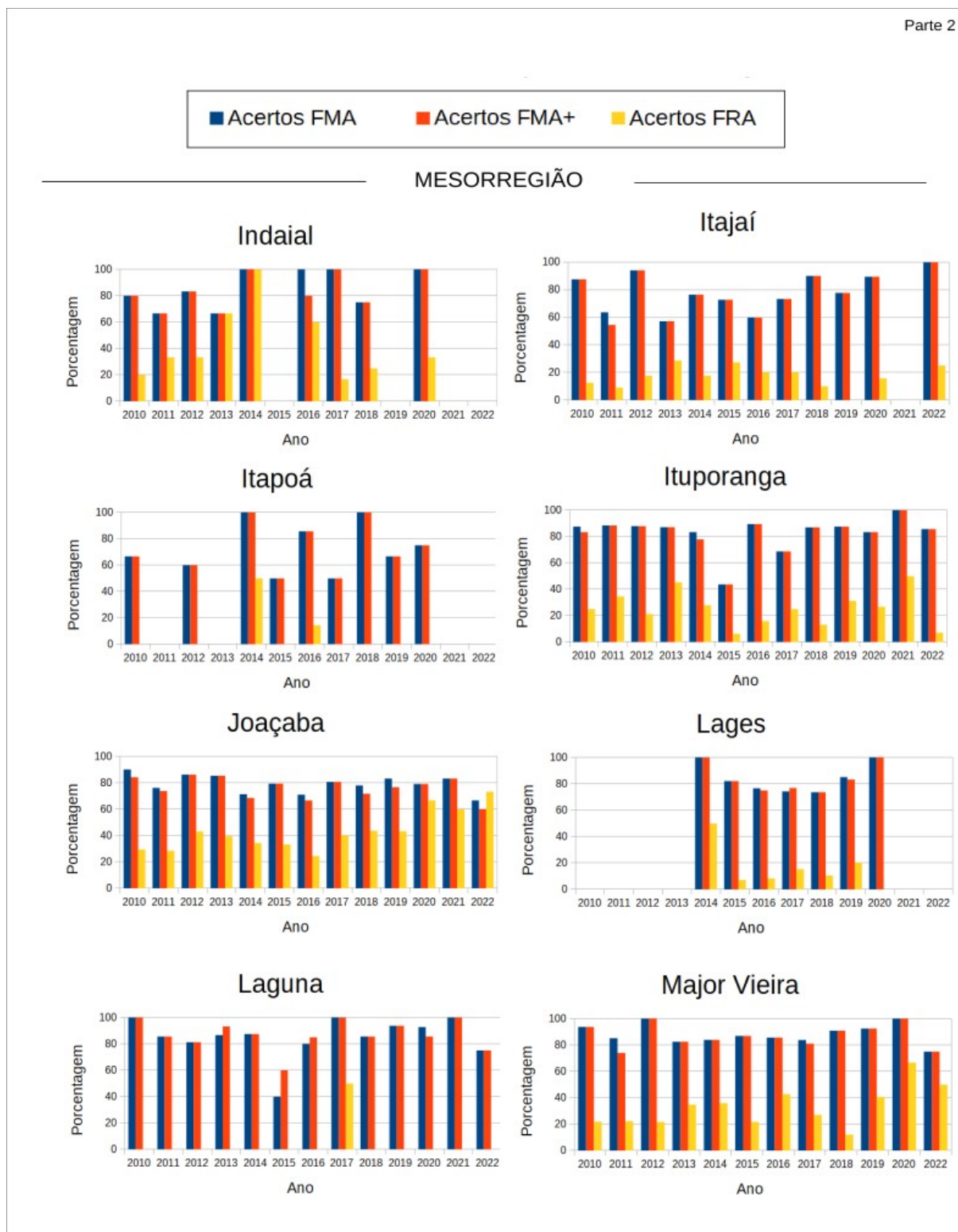
Figura 14 – Percentual de acertos nas previsões para os índices, por mesorregião e para os dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 1.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Figura 14, nota-se que a FMA e a FMA+ apresentaram alto índice de acerto para todas as mesorregiões (em geral mais de 80%) para os dias com ocorrência detectada pelo satélite.

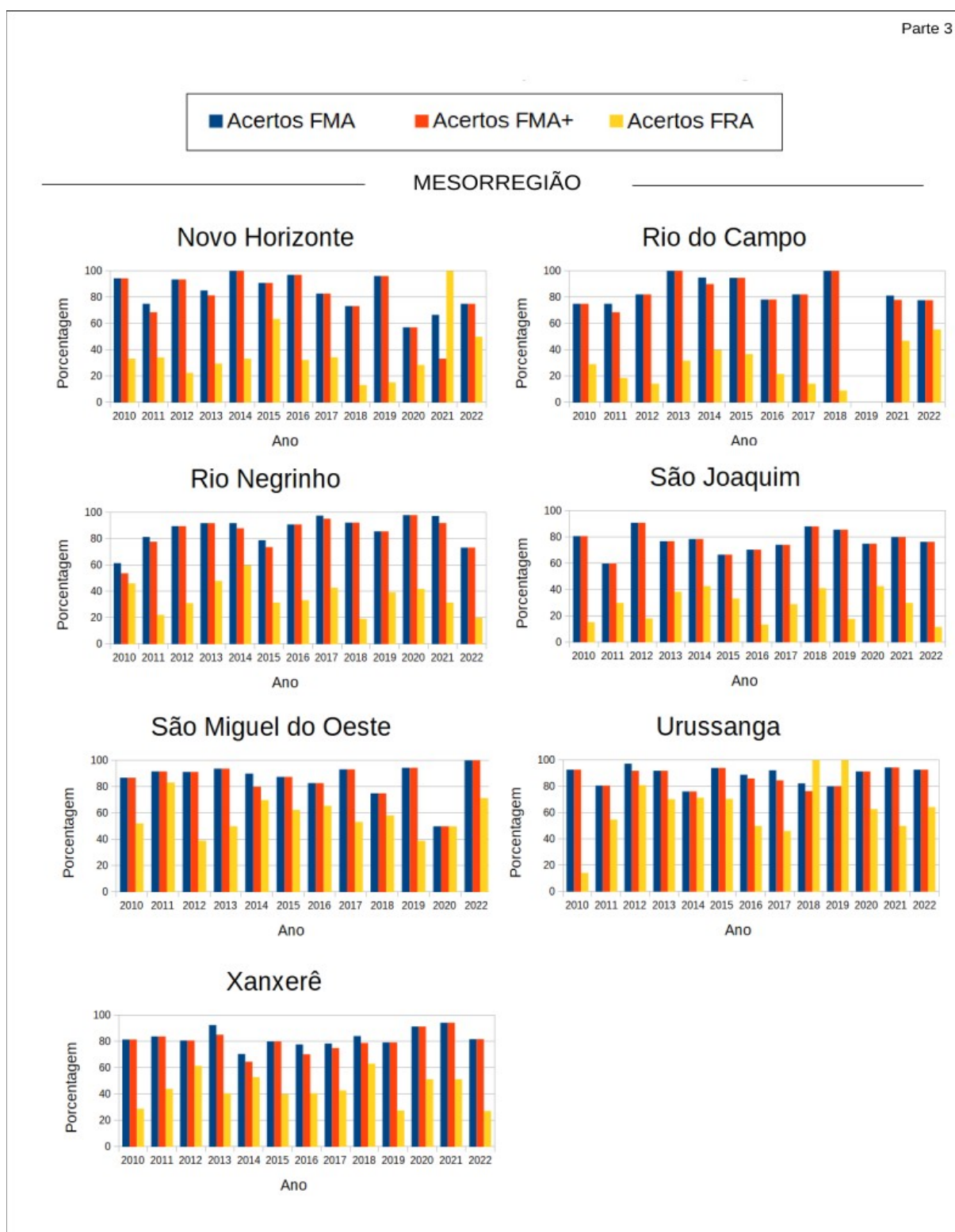
Figura 15 – Percentual de acertos nas previsões para os índices, por mesorregião e para os dias com ocorrência detectada pelo satélite. Parte 2.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Nas mesorregiões de Laguna e Itapoá, o FRA apresentou poucos acertos, o que pode significar que sua fórmula não é muito eficiente nas regiões litorâneas, (Figura 15).

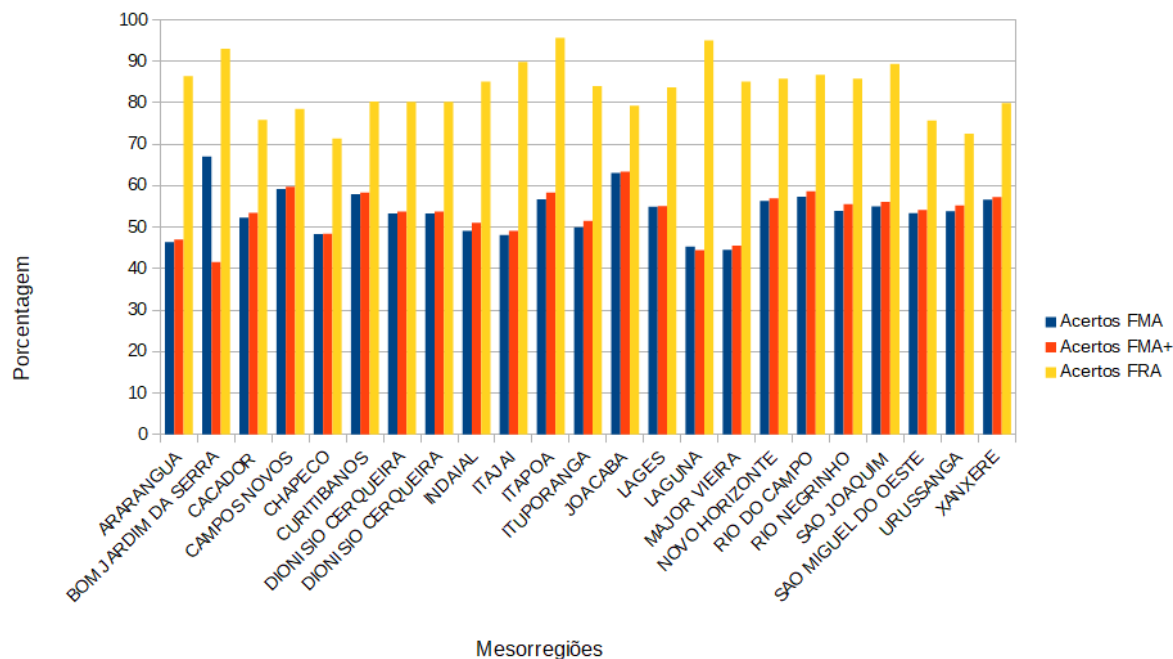
Figura 16 – Percentual de acertos por mesorregião para dias com ocorrência. Parte 3.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

O gráfico da figura 16 mostra que, apesar da predominância dos acertos da FMA e FMA+ em geral, o FRA alcançou bons resultados nas mesorregiões de São Miguel do Oeste e Urussanga.

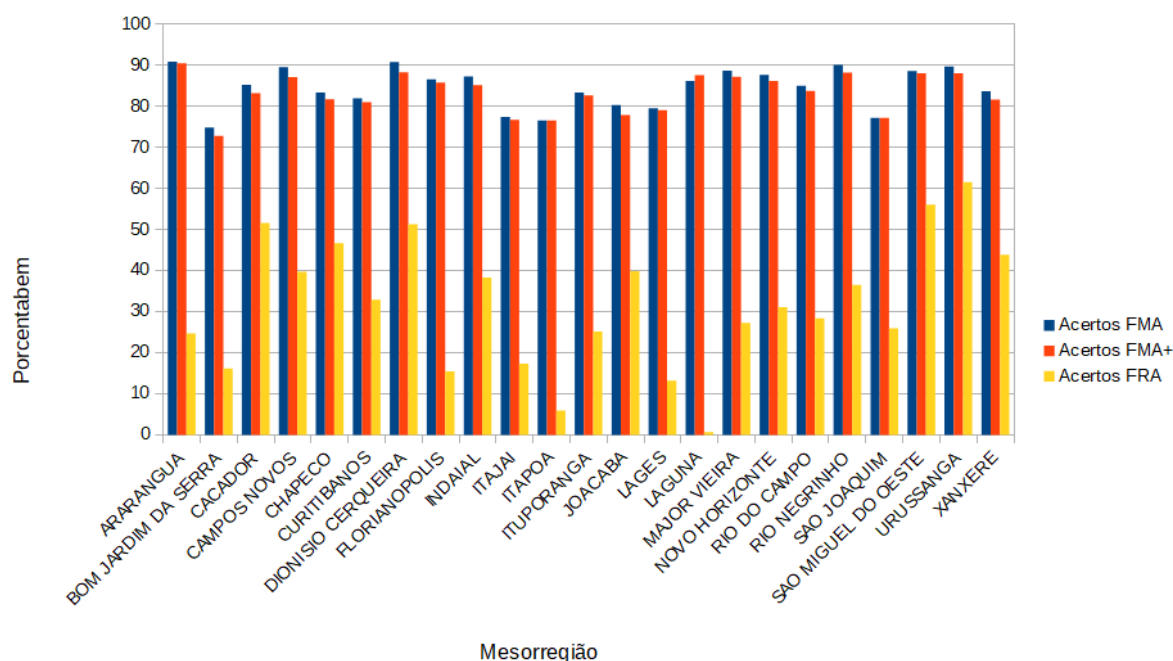
Figura 17 – Percentual de acertos por mesorregião para todos os dias (com e sem ocorrência), para o período de 2010 a 2022.



Fonte: Elaboração própria (2023).

É notável na Figura 17 que a FMA e FMA+ apresentam por volta de 50% de acertos para o total de dias calculados, enquanto o FRA apresentou acertos em cerca de 80% dos dias.

Figura 18 – Percentual de acertos em cada mesorregião para dias com ocorrência de incêndio detectada pelo satélite, para o período de 2010 a 2022.



Fonte: Elaboração própria (2023)

Apesar de o FRA apresentar alto índice de acertos no âmbito geral, quando são estudados os dias onde houve ocorrência detectada pelo satélite, a relação se inverte, e a FMA e a FMA+ alcançam alto índice de acertos (em geral mais de 80%), enquanto o FRA, em geral, obteve menos de 50% de acertos (Figura 18).

5 RELATÓRIO TÉCNICO DE PRODUTO TECNOLÓGICO

Nesta seção será apresentado um Relatório Técnico de Produto Tecnológico para a pesquisa realizada.

5.1 Definição do Escopo

Este Produto Tecnológico busca trazer ferramentas para a definição de índices de risco de incêndio de referências bibliográficas sobre dados de estações meteorológicas e dados de satélite, sendo os dados fornecidos através dos portais na internet das instituições responsáveis pela sua manipulação e divulgação.

Para tal, os dados de estações meteorológicas automáticas devem ser obtidos no endereço eletrônico do INMET (INMET, 2023) e os dados de satélite através do portal do INPE (INPE, 2023).

5.2 Tecnologia utilizadas

Para o desenvolvimento do trabalho foi definida a linguagem de programação Ruby (RUBY, 2023) para a elaboração dos *scripts*. Tal linguagem foi escolhida por ser uma linguagem poderosa, orientada a objetos, simples e independente de compilação, por ser uma linguagem de *script*, com muitas ferramentas para trabalhar com arquivos de texto, que é o caso dos arquivos no formato CSV disponíveis das estações meteorológicas e das observações do satélite. A linguagem de programação Ruby é definida como software livre, sob licença BSD (OPEN SOURCE INICIATIVE, 2023), portanto isenta de custos de aquisição da plataforma.

Para o documento da dissertação e deste relatório e para a manipulação das planilhas, foi escolhido o *software* Libre Office Writer e Calc (LIBREOFFICE, 2023), por serem multiplataforma, definidos como software livre, sob licença *Mozilla Public License v2.0* (MOZILLA, 2023).

Foi utilizado um notebook próprio, sem a necessidade de uma computação mais robusta, visto que os *scripts* não requerem grande poder de processamento.

5.3 Desenvolvimento do Produto

O primeiro passo para o desenvolvimento do produto é realizar o *download* dos dados para a análise, nos portais do INMET (INMET, 2023) e INPE (INPE, 2023).

Em seguida o material de estudo é separado, ou seja, os dados referentes ao Estado de Santa Catarina e do período definido para o estudo.

Após os arquivos serem armazenados em diretórios específicos, é realizada uma análise inicialmente visual para a verificação da presença ou não de dados, dados inconsistentes, localização da variável de interesse na coluna do arquivo, etc.

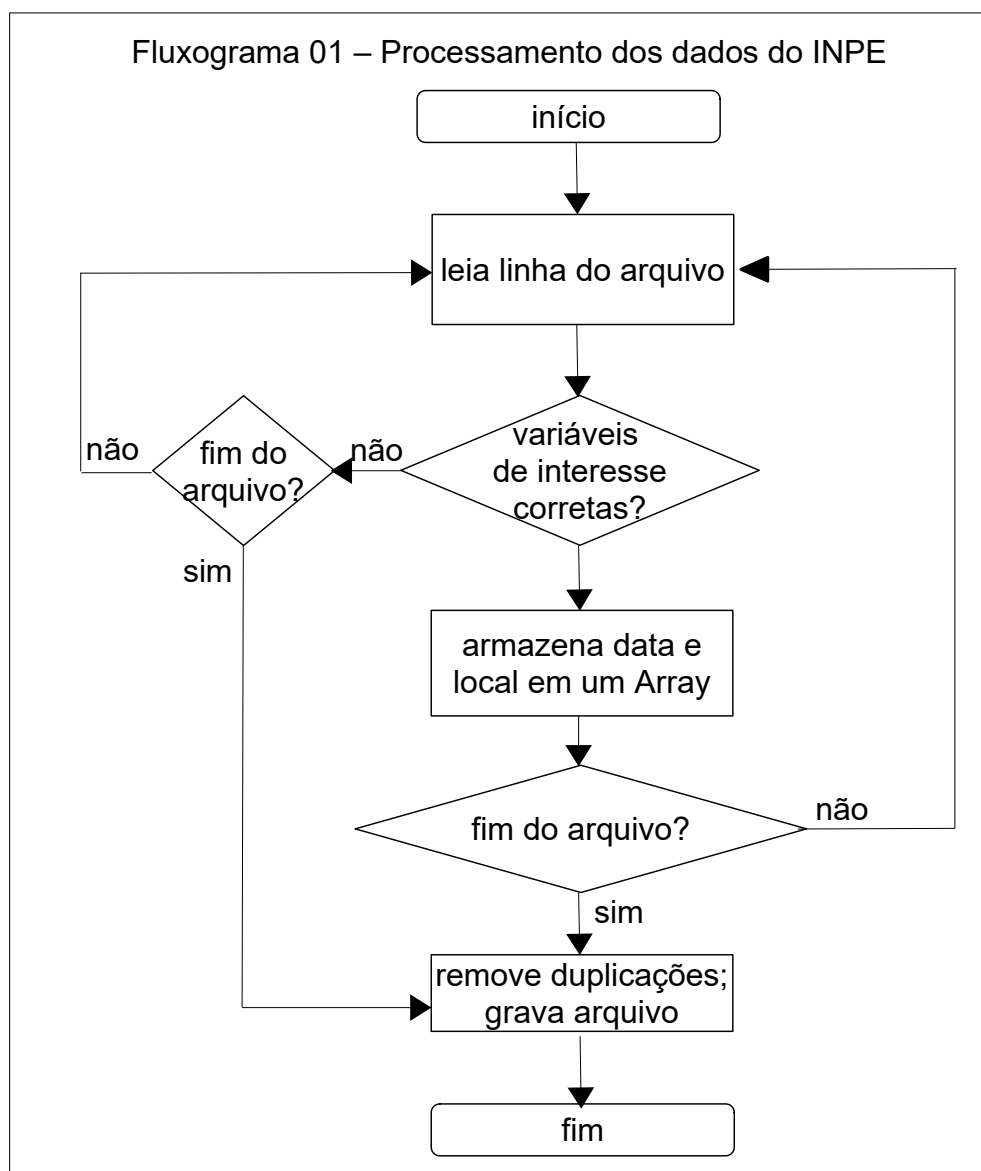
Em seguida, um primeiro *script* realiza a leitura dos arquivos do INPE sobre as queimadas, separando as variáveis de interesse (data e município), removendo duplicações e gravando um novo arquivo com todas as ocorrências registradas pelo satélite, como é visto na Figura 19.

O próximo passo é iniciar a leitura e os cálculos das variáveis meteorológicas disponíveis nos arquivos do INMET. Para tal, um *script* lê os arquivos, verifica se no dia em questão as variáveis de interesse estão presentes, calcula a precipitação diária por dia e por estação e grava um novo arquivo com os dados sem falhas. Este processo pode ser visualizado na Figura 20.

Na próxima etapa, um *script* lê os arquivos já com a precipitação diária calculada e inicia o cálculo dos índices de risco de incêndio para cada dia da série. Um novo arquivo é gerado, com o nome da estação, data, os valores das variáveis de interesse: precipitação (acumulada nas últimas 24 horas), umidade relativa do ar (registrada às 13:00 h), temperatura do ar (registrada às 13:00 h) e velocidade do vento (registrada às 13:00 h), além dos índices calculados e com a definição dos graus de perigo definidos. A figura 21 mostra um fluxograma com esse processo.

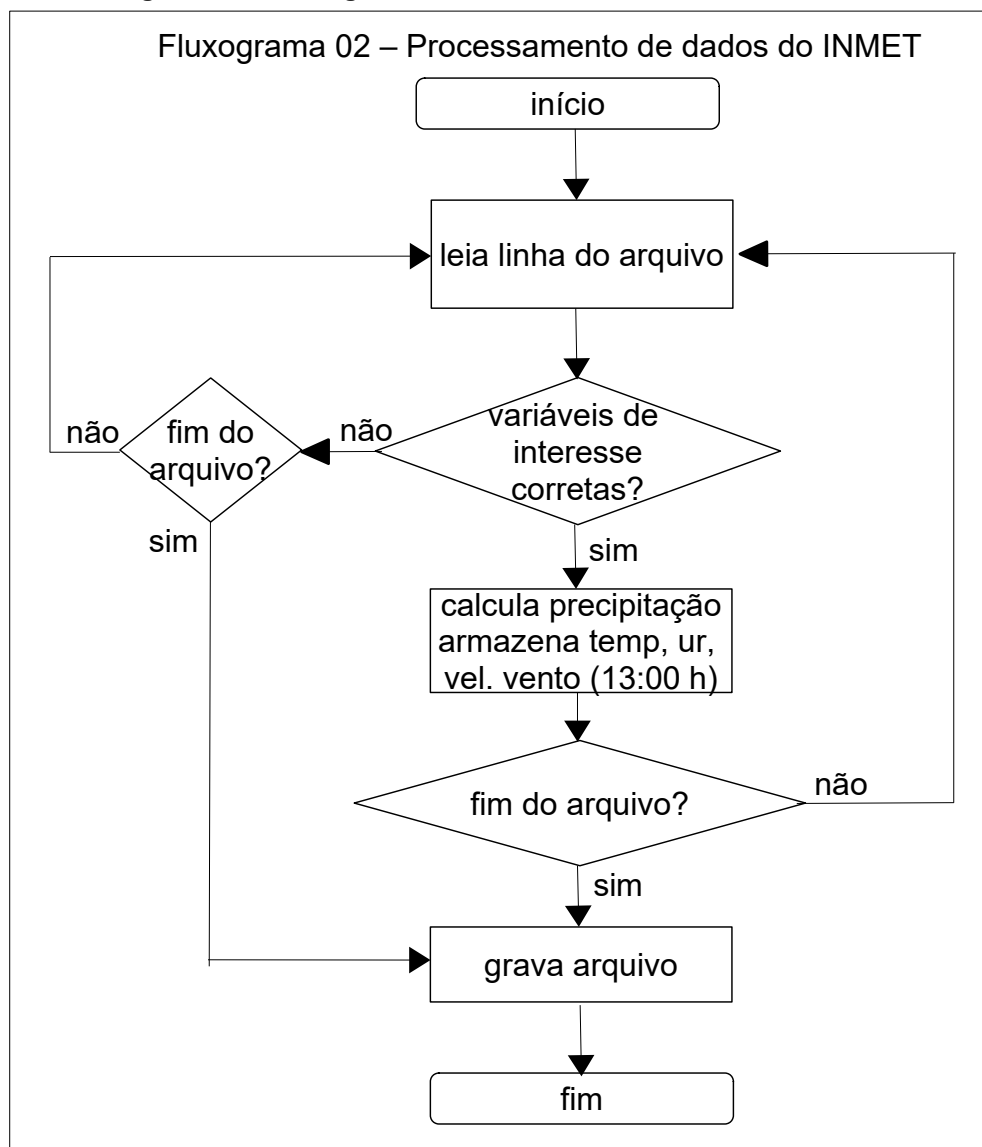
Por último, um *script* realiza a comparação dos eventos registrados pelo satélite de referência com os índices previamente calculados, levando em consideração os municípios agrupados às estações meteorológicas, que formaram as mesorregiões, resultando em um arquivo final, com todas as informações, incluindo se houve ocorrência ou não em cada dia da série estudada, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 19 – Processamento da manipulação dos dados do INPE



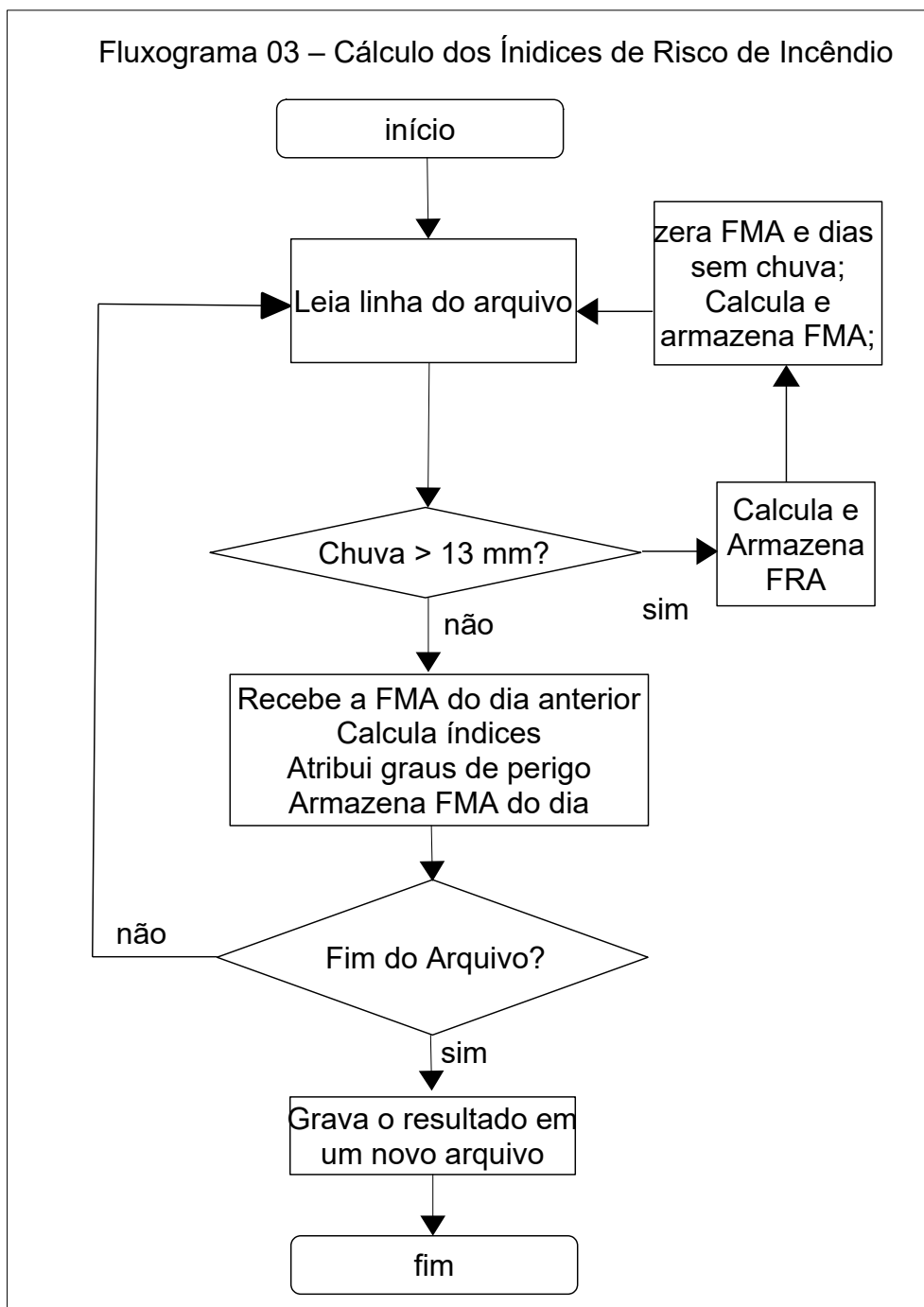
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 20 – Fluxograma do Processamento dos dados do INMET



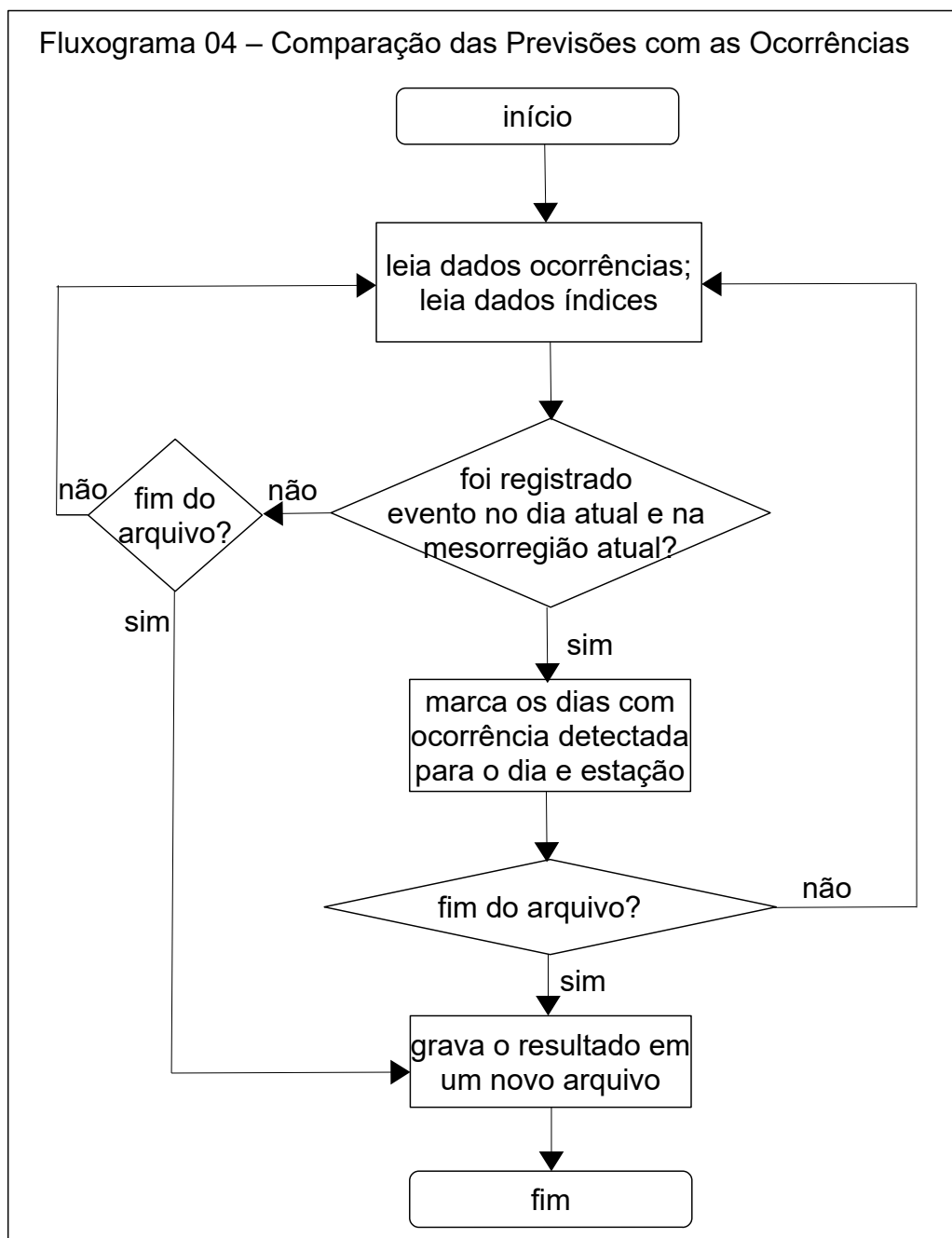
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 21 – Fluxograma do cálculo dos índices de risco de incêndio



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 22 – Fluxograma da comparação dos graus de perigo com as ocorrências detectadas



Fonte: Elaboração própria (2023).

5.4 Resultados obtidos

A figura 23 mostra o resultado final, com os dados da estação, os índices calculados e o apontamento da ocorrência ou não do evento.

Figura 23 – Exemplo do resultado após os cálculos e comparação com ocorrências

| Est. | Data | Prec. | UR | Temp. | Vento | FMA | Ind. FMA | FMA+ | Ind. FMA+ | Angstrom | Ind. A | Ocorr. |
|-----------|------------|-------|------|-------|-------|--------|------------|--------|------------|----------|--------|--------|
| ARARANGUA | 2016/01/02 | 3.0 | 79.0 | 24.0 | 3.5 | 4.53 | Medio | 5.21 | Pequeno | 4.25 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/03 | 0.0 | 63.0 | 25.9 | 4.9 | 31.51 | Muito alto | 38.34 | Muito alto | 3.26 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/04 | 0.0 | 72.0 | 26.3 | 5.0 | 56.51 | Muito alto | 69.03 | Muito alto | 3.67 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/05 | 0.0 | 63.0 | 29.5 | 5.8 | 86.67 | Muito alto | 109.31 | Muito alto | 2.9 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/06 | 0.0 | 70.0 | 28.9 | 1.2 | 115.24 | Muito alto | 120.91 | Muito alto | 3.31 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/07 | 0.4 | 78.0 | 26.1 | 5.2 | 142.17 | Muito alto | 175.04 | Muito alto | 3.99 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/08 | 0.0 | 77.0 | 25.2 | 4.0 | 170.74 | Muito alto | 200.36 | Muito alto | 4.03 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/09 | 0.0 | 78.0 | 27.8 | 3.1 | 200.23 | Muito alto | 226.66 | Muito alto | 3.82 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/10 | 2.0 | 86.0 | 25.9 | 2.1 | 228.13 | Muito alto | 248.12 | Muito alto | 4.41 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/11 | 0.6 | 74.0 | 28.5 | 4.0 | 261.92 | Muito alto | 307.36 | Muito alto | 3.55 | Nulo | 1 |
| ARARANGUA | 2016/01/12 | 0.0 | 68.0 | 29.0 | 3.1 | 300.15 | Muito alto | 339.78 | Muito alto | 3.2 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/13 | 0.2 | 61.0 | 29.5 | 4.2 | 344.41 | Muito alto | 407.42 | Muito alto | 2.8 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/14 | 14.4 | 92.0 | 22.0 | 3.8 | | Nulo | 0.0 | Nulo | 5.1 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/15 | 0.0 | 72.0 | 27.7 | 3.2 | 1.39 | Pequeno | 1.58 | Nulo | 3.53 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/16 | 0.0 | 63.0 | 28.0 | 3.5 | 4.56 | Medio | 5.25 | Pequeno | 3.05 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/17 | 0.2 | 64.0 | 29.2 | 3.2 | 9.25 | Alto | 10.51 | Medio | 2.98 | Nulo | 0 |
| ARARANGUA | 2016/01/18 | 0.0 | 53.0 | 30.5 | 3.1 | 16.8 | Alto | 19.02 | Alto | 2.3 | Risco | 1 |

Fonte: Elaboração própria (2023).

6 CONCLUSÃO

Foi possível atingir os objetivos geral e específicos da pesquisa, levando em conta que foram realizados os testes com as bases de dados meteorológicos e a atribuição dos graus de perigo para os índices de risco de incêndio. Também foi realizada a comparação dos incêndios identificados pelo satélite com os graus de perigo calculados, além de apresentar resultados que evidenciaram o potencial de cada índice em prever o grau de risco de incêndio para as mesorregiões estudadas.

Com relação à FMA e FMA+, foi atribuído um acerto quando foi apontado o grau de perigo “Muito alto” em dias com ocorrência detectada pelo satélite. Para o FRA, não houve necessidade de atribuição, pelo fato de o índice original ter somente 2 graus de perigo (“Risco” e “Nulo”).

Nos casos em que não houve ocorrência, qualquer grau de perigo diferente de “Muito alto” foi considerado um acerto para FMA e FMA+.

Na análise geral, realizada em dia com e sem ocorrência, a FMA e a FMA+ apresentaram por volta de 50% de apontamentos de grau de risco “Muito alto”, enquanto o FRA apresentou cerca de 85% de grau de risco “Nulo”. Nos casos onde houve ocorrência detectada pelo satélite, tanto a FMA quanto a FMA+ atingiram alto índice de acerto (mais de 80%).

Em geral a FMA+ obteve resultados um pouco melhores que a FMA, considerando os vários métodos estatísticos aplicados.

Levando em consideração o objetivo de utilizar índices de risco de incêndio para a prevenção e pronta atuação nos casos em que ocorrem os eventos, além do fato de que, os eventos ocorrem em cerca de apenas 7,12% dos dias calculados, uma atuação prudente aponta para a observação dos índices FMA e FMA+.

Por outro lado, nos casos em que os dados das estações meteorológicas não estiverem disponíveis, como, por exemplo, a velocidade do vento, a FMA ainda pode ser calculada. E em caso de falta dos dados da precipitação, o Fator de Risco de Ångstrom pode ser utilizado.

Para estudos futuros, é possível realizar ajustes nas classes de perigo a fim de obter melhores resultados nas previsões, além de adicionar outros índices para comparação e possível uso.

Após análises e discussões, é possível concluir que:

- a) ao analisar a capacidade dos índices de risco de incêndio de prever os eventos, uma boa estratégia pode ser a utilização da tabela de contingência que, associada a técnicas estatísticas, serve como ferramenta para demonstrar a eficiência do índice de apontar um grau de perigo esperado;
- b) a FMA e a FMA+ apresentaram resultados consistentes para os dias com ocorrência detectada pelo satélite (acima de 80% de acertos), enquanto que o FRA teve resultados relevantes para os dias sem ocorrências (por volta de 85% de acertos);
- c) levando em consideração o objetivo de utilizar índices de risco de incêndio para a prevenção e pronta atuação nos casos em que ocorrem os eventos, além do fato de que, os eventos ocorrem em cerca de apenas 7,12% dos dias calculados, uma atuação prudente aponta para a observação dos índices FMA e FMA+;
- d) um registro diário e um histórico para utilização e atualização de análises estatísticas pode ser uma ferramenta importante na prevenção e combate de incêndios.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de técnicas para o preenchimento de dados, que pode melhorar a precisão da análise temporal, por exemplo, utilizando técnicas de reanálise (Merra2 ou Era5), ou técnicas de preenchimento de dados faltantes.

Outra sugestão para estudos futuros é o impacto que a educação ambiental pode ter para a diminuição da ocorrência de incêndios florestais, visto que ações desse tipo podem ser consideradas como um fator importante no sentido de conscientizar a população da importância de evitar que seja deflagrado um incêndio que fuja do controle, auxiliando, dessa forma, a evitar as ocorrências. Isso levando em consideração que as causas de incêndio relatadas nas pesquisas apontam para uma incidência predominante da ação antrópica.

Por fim, é possível realizar ajustes nas classes de perigo dos índices de risco de incêndio, a fim de obter melhores resultados nas previsões, além de adicionar outros índices para comparação e possível uso.

8 REFERÊNCIAS

- ABVESC - Associação dos Bombeiros Voluntários no Estado de Santa Catarina. <https://www.abvesc.com.br/institucional-associacao-bombeiros-voluntarios-sc/>. Acesso em: 10/05/2021.
- AGROCONNECT. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/agroconnect/>. Acesso em: 10/05/2021.
- ALMEIDA, D. F. et al. **Performance of the Fma+ Forest Fire Hazard Index For The Serra Do Tombador Natural Reserve, Goiás, Brazil.** *Revista Floresta*, Curitiba, PR, v. 52, n. 4, p. 484-491, out/dez, 2022.
- Ångstrom, A. (1949) – **Swedish meteorological research.** *Tellus* A1, p. 1939-1948.
- BATISTA, A. C.; SOARES R. V. **Manual de prevenção e combate a incêndios florestais.** Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2003.
- BOLSON, S. H.; HAONAT, A. I. **A governança da água, a vulnerabilidade hídrica e os impactos das mudanças climáticas no Brasil. Veredas do Direito.** Belo Horizonte, UFSC, v. 13, n.25, p. 223-248, jan./abr. 2016.
- BORGES T. S.; et. al. **Desempenho de Alguns Índices de Risco de Incêndios em Plantios de Eucalipto no Norte do Espírito Santo.** *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, RJ, v. 2, n. 18, p. 153-159, 2011.
- BRASIL. **Glossário de defesa civil: estudos de riscos e medicina de desastres.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2009. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br/images/documentos/Defesa%20Civil/manuais/GLOSSARIO-Dicionario-Defesa-Civil.pdf>. Acesso em: 19/03/2019.
- CASAVECCHIA, B. H. et. al. **Índices de perigo de incêndios em uma área de transição Cerrado-Amazônia.** *Revista de Ciências Agrárias*, v. 3, n. 42, p. 842-854, 2019.
- CASTRO, A. L. C et al. **Manual de Desastres: desastres naturais.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003.
- CAVALCANTI, Iracema F. de. **Tempo e Clima no Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. **Quem Somos.** Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/o-ciram/quem-somos/>. Acesso em: 10/05/2021.
- EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Quem Somos.** Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/a-epagri/quem-somos/>. Acesso em: 10/05/2021.
- EUGENIO, F. C.; et. al. **Metodologia para determinação das classes de risco de incêndio florestal usando a Fórmula de Monte Alegre modificada.** *Ciência Florestal*, Santa Maria, RS, v. 30, n. 4, p. 1085-1102, out./dez., 2011.
- FINLEY, J. P. **Tornado prediction.** *American Meteorological Journal*, p. 85–88, 1884.

HEIDKE, P. **Berechnung des Erfolges und der Güte der Windstärkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst. Geografika Annaler**, n. 8, p. 301–349, 1926.

HOINASKI, L.; TEIXEIRA, N. C.; RODELLA, F. H. **Emissões Pela Queima De Biomassa No Estado De Santa Catarina**. Laboratório de Controle da Qualidade do ar, UFSC, 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 20/04/2023.

ICMBIO. **Manual para Formação de Brigadista de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais**. Disponível em: https://ava.icmbio.gov.br/pluginfile.php/4592/mod_data/content/20215/Apostila%20Brigadista.pdf. Acesso em: 10/05/2021.

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina. Aprova, ad referendum, o Estatuto do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. **Resolução nº 028/2009/CS, de 31 de agosto de 2009**. Disponível em: <https://www.ifsc.edu.br/documents/23567/0/Resolucao+n+28+-+ESTATUTOalterado.pdf>. Acesso em: 20/04/2021.

INKSCAPE. **Editor gráfico de vetores**. Disponível em: <https://inkscape.org/pt-br/>. Acesso em: 20/04/2023.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <http://pindara.cptec.inpe.br/qmanova/faq.inicio.logic>. Acesso em: 25/08/2023.

LIBREOFFICE. **Suíte de Escritório**. Disponível em: <https://www.libreoffice.org/>. Acesso em: 20/04/2023.

MOZILLA. **Mozilla Public License**. Disponível em: <https://www.mozilla.org/en-US/MPL/>. Acesso em: 20/04/2023.

NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Fma+ - **Um Novo Índice de Perigo de Incêndios Florestais para o Estado do Paraná. Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 36, n. 1, p. 75-91, jan./abr. 2006.

OLIVEIRA, M. do C. F. de; et. al. **Risco de ocorrência de queimada e de incêndio e as medidas de prevenções, em Belém – PA, ano de 2015. Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, PE, v. 9, n. 4, p. 1030-1042, 2016.

OPEN SOURCE INICIATIVE. **The 3-Clause BSD License**. Disponível em: <https://opensource.org/license/bsd-3-clause/>. Acesso em: 20/04/2023.

PARIZOTTO, W. et al. **Controle dos Incêndios Florestais pelo Corpo de Bombeiros de Santa Catarina: diagnóstico e sugestões para seu aprimoramento. Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 4, p. 651-662, out./dez. 2008.

PEREIRA, A. P.; PEREIRA, J. A. A.; MORELLI, F.; BARROS, D. A.; JUNIOR, F. W. A.; SCOLFORO, J. R. S. **Validação De Focos de Calor Utilizados no Monitoramento Orbital 335 de Queimadas por Meio de Imagens TM**, Cerne, Lavras, v. 18, n. 2, p. 335-343, abr./jun. 2012.

QGIS. **Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto**. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 20/04/2023.

RUBY. **Linguagem de Programação**. Disponível em: <https://www.ruby-lang.org/pt/>. Acesso em: 20/04/2023.

SC – Estado de Santa Catarina. **Constituição do Estado de Santa Catarina**. Disponível em: http://leis.alesc.sc.gov.br/html/constituicao_estadual_1989.html. Acesso em 25/04/2021.

SOARES, R. V.; PAEZ, G. **Uma Nova Fórmula para Determinar o Grau de Perigo de Incêndios Florestais na Região Centro Paranaense**. *Revista Floresta*, Curitiba, PR, v. 2, n. 2, p. 15-25, 1973.

SOARES, R. V.; SANTOS, J. F.; BATISTA, A. C. **Perfil dos Incêndios Florestais no Brasil em Áreas Protegidas no Período de 1998 a 2002**. *Revista Floresta*, Curitiba, PR, v. 36, n. 1, p. 93-100, jan./abr. 2006.

TORRES, F. T. P. et al. **Correlações entre es Elementos Meteorológicos e as Ocorrências de Incêndios Florestais na Área Urbana de Juiz de Fora, MG**. *Revista Árvore*. Viçosa, UFV, v. 35, n. 1, p. 143-150, 2011.

TORRES, F. T. P. et al. **Manual de Prevenção e Combate de Incêndios Florestais**. Universidade Federal de Viçosa, 2020.

VIEGAS, D. X. et al. **Comparative Study of Various Methods of Fire Danger Evaluation in Southern Europe**. *International Journal of Wildland Fire*, v. 4, n. 2, p. 235 – 246, 1999.

WILKS, D. S., 2006: **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2nd ed. Academic Press.

8 ANEXO I

Como subproduto desta pesquisa, foi elaborado um artigo científico que foi submetido a Revista Floresta (1982-4688, Quais B2 na Geociências em 2022) para publicação. A primeira página do artigo é apresentada a seguir.

ELEMENTOS CLIMÁTICOS E ÍNDICES DE RISCO DE INCÊNDIO EM SANTA CATARINA

Resumo

Os incêndios florestais têm causado enormes prejuízos ambientais e econômicos ao longo dos anos. Neste contexto, tem-se buscado encontrar relações do clima com o controle para a ocorrência dos incêndios. A atribuição de um índice de risco de incêndio baseado nas condições meteorológicas é uma maneira de trazer ferramentas para os órgãos responsáveis pela prevenção e combate aos incêndios florestais. Neste trabalho foram utilizadas técnicas computacionais e estatísticas para analisar o desempenho de 3 (três) índices de risco de incêndio: Fórmula de Monte Alegre (FMA), Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) e o Fator de Risco de Ångström (FRA), para o Estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil. O período de estudo e validação foi de 2010 a 2022, utilizando as variáveis: precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura do ar, com valores obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), contemplando 23 estações meteorológicas. Esses dados foram comparados com detecção de incêndios registrados por satélite e obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Após a análise dos dados utilizando várias técnicas estatísticas, ficou evidente que a FMA e a FMA+ apresentaram alto índice de acertos para os dias com ocorrência detectada, com mais de 80% de acertos, contra apenas por volta de 35% do FRA. Em relação ao total de dias computados, o FRA obteve melhor índice de acertos (por volta de 85%), contra valores por volta de 50% para FMA e FMA+.

Palavras-chave: Fórmula de Monte Alegre, Fórmula de Monte Alegre alterada, Fator de Risco de Ångström, incêndio florestal, sensoriamento remoto.

Abstract

Climatic elements and fire risk indexes in Santa Catarina. Forest fires have caused significant environmental and economic damage over the years. In this context, efforts have been made to establish relationships between climate and control measures for fire occurrence. Assigning a fire risk index based on meteorological conditions is a way to provide tools for organizations responsible for forest fire prevention and combat. In this study, computational and statistical techniques were employed to analyze the performance of three fire risk indices: the Monte Alegre equation, the modified Monte Alegre equation, and the Ångström Risk Factor, for the state of Santa Catarina, located in the Southern region of Brazil. The study and validation period covered from 2010 to 2022, using variables such as precipitation, relative humidity, wind speed, and air temperature, with values obtained from the National Institute of Meteorology (INMET), encompassing 23 meteorological gauges. These data were compared with fire detection records obtained from satellite imagery and provided by the National Institute for Space Research (INPE). After analyzing the data using various statistical techniques, it became evident that both Monte Alegre equations exhibited a high accuracy rate for days with detected fire occurrences, with over 80% accuracy, compared to only around 35% for Ångström Risk Factor. Concerning the overall number of days computed, Ångström Risk Factor achieved a higher accuracy rate (approximately 85%), compared to values around 50% for both Monte Alegre equations.

Keywords: Monte Alegre equation, modified Monte Alegre equation, Ångström Risk Factor, forest fire, remote sensing.

INTRODUÇÃO

Um incêndio florestal pode ser caracterizado como um fogo que fica fora de controle, consome os combustíveis florestais enquanto se espalha, dificultando o seu combate e aumentando seu poder destrutivo (SANTOS *et al.*, 2017).

Com relação às variáveis climáticas, uma baixa umidade relativa do ar associada a uma alta temperatura, favorecem o poder evaporativo das plantas, tornando-as mais secas e favorecendo a sua combustão. Além disso, caso a precipitação seja reduzida, tendem a diminuir a umidade do solo e dos combustíveis mortos e

vivos, produzindo mais material disponível ao fogo. Os ventos facilitam a propagação dos incêndios, pois os alimentam e direcionam (TORRES *et al.*, 2020).

Sobre as causas de incêndios florestais, um estudo foi elaborado utilizando dados de Unidades de Conservação (UCs) federais no Brasil no período de 2008 a 2012 (TORRES *et al.*, 2016). O resultado mostrou que a categoria denominada “diversos” alcançou maior percentual (37,3%), seguido por “queima para limpeza”, com 27,38% de apontamentos, enquanto “incendiários” foi relatado em 25,36%, já “operações florestais” chegou a 6,05%, raios com 2,45%, e fogos de recreação, com 1,73% dos casos. O resultado demonstrou que fenômenos antrópicos têm grande impacto nas ocorrências de incêndio [...].