

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS E SUA RELAÇÃO COM OS RELÂMPAGOS

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Raul Nicolas Maciel Chaves

Itajubá, MG, Brasil

2024

CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS E SUA RELAÇÃO COM OS RELÂMPAGOS

por

Raul Nicolas Maciel Chaves

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

Orientador: Enrique Vieira Mattos Coorientador: João Gabriel Martins Ribeiro

> Itajubá, MG, Brasil 2024

Universidade Federal de Itajubá Instituto de Recursos Naturais Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS E SUA RELAÇÃO COM OS RELÂMPAGOS

elaborada por

Raul Nicolas Maciel Chaves

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Enrique Vierra Mattes

Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI) (Presidente/Orientador)

Joapprietter

João Gabriel Martins Ribeiro, Msc. (UNIFEI) (Coorientador)

Savalho

Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dra. (UNIFEI)

Raymel & Perusia

Raquel Gonçalves Pereira, Msc. (Serena Energia)

Itajubá, 22 de novembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grato a Deus e ao senhor Jesus por toda a minha vida, por toda a minha história, e por me dar todo dia a oportunidade de viver e partilhar dos prazeres da vida. Agradeço aos meus heróis Lucimara e Vanilson por terem me dado a vida, por terem me ensinado o que é importante, e por nunca terem feito eu deixar a peteca cair e tirar de letra essa vida maravilhosa. Agradeço aos meus irmãos de Rauhann e O'hara por terem me ensinado tanto em minha vida, e por serem meus irmãos mais velhos tão incríveis, eu amo muito vocês. Agradeço também aos meus sobrinhos e afilhados Laura, Isabele, Vitor e Eva pela grande quantidade de amor que me mostram todos os dias, e pelos meus cunhados Ruan e Alana pela grande amizade sendo parte da minha família. Não esquecendo também de minha cadelinha Naninha por todo amor e carinho que colocou em minha vida desde o primeiro momento, e por ter me salvado tantas vezes. Sou grato aos meus amigos (irmãos) Rafael e Kauan por estarem comigo sempre e nunca terem desistido de mim, vocês sabem que vocês sempre foram e sempre serão, meus melhores amigos. Sou grato aos meus amigos de graduação Vitor (Copal), Luiz Gustavo (Jesus), Flávio (Fravinho), Hernan, Werik, Maycon, Alisson, Alana, Juliana, Ísis, Gabriel (Gabs), Thaynara (Thay) e por último e não menos importante Fabiana.

Deixo claro aqui meu agradecimento a todos os professores da minha faculdade e curso por terem me ensinado tudo sobre o curso de Ciências Atmosféricas e ter ensinado coisas além do ensino. Tenho enorme gratidão ao João Gabriel, companheiro e colega de pesquisa, veterano e mestre que me ensinou o caminho de ser um bom pesquisador e cientista, sem você João eu não teria feito esse trabalho.

Expresso meu profundo carinho e agradecimento ao Professor Enrique Vieira Mattos, por ter me ensinado tanto nesses anos de graduação, e por ter despertado em mim a paixão de programar e fazer ciência, o senhor é um verdadeiro professor que inspira em seus alunos o prazer de aprender e se desenvolver.

Gostaria de dedicar esse meu trabalho aos meus amigos e familiares que se foram, meu avô Jaci Monteiro (*in memoriam*); avô Geraldo (*in memoriam*); avó Maria Mercedes (*in memoriam*); meu amigo Carlinhos (*in memoriam*) e minha amiga Auxiliadora (*in memoriam*).

Por fim, sou grato a todos da minha família e amigos pela ajuda e paciência comigo nesses anos. Além de ser grato aos meus grandes amigos Vinícius (Tapioca), Helton, Lucas, Giovani, Pedro (Korvo), Wagner, Vinícius e Victor pela grande ajuda nesses anos e pelo grande companhia e risadas que me forneceram em todo o tempo. A todos descritos nesse texto, eu só posso expressar minha profunda gratidão, eu amo cada um de vocês.

Para meus pais Vanilson Ricardo Chaves e Lucimara Vilas Boas Raimundo Chaves.

"Toda sabedoria é temor do Senhor; em toda sabedoria está a prática da Lei e o conhecimento de sua onipotência."

(BÍBLIA, Eclesiástico, 19, 20).

RESUMO

Monografia de Graduação Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS E SUA RELAÇÃO COM OS RELÂMPAGOS

AUTOR(A): RAUL NICOLAS MACIEL CHAVES ORIENTADOR: ENRIQUE VIEIRA MATTOS Local e Data da Defesa: Itajubá, 22 de novembro de 2024.

Os Sistemas Convectivos (SC) são nuvens de tempestade compreendendo nuvens do tipo Cumulonimbus. Esses sistemas são capazes de incorporar grandes áreas de intensa precipitação, podendo apresentar relâmpagos. Tais eventos, são capazes de causar: alagamentos, inundações, ventos fortes, granizo, prejuízos à economia e até mesmo causar a perda de vidas humanas. Assim o objetivo do presente estudo é caracterizar o comportamento espacial-temporal dos SC e correlacioná-los com as características elétricas dos SC que ocorreram no Brasil entre 2013 à 2017. A metodologia do trabalho é dividida em três etapas: i) avaliação da distribuição espacialtemporal dos SC para as 5 regiões do Brasil, ii) avaliação do ciclo de vida das tempestades e iii) avaliação das diferenças físicas e dinâmicas entre as tempestades com ou sem presença de atividade elétrica, essa última filtrada apenas para a região sudeste devido a melhor eficiência de detecção da rede de relâmpagos nessa região do Brasil. Foram utilizados dados do satélite GOES-13 no canal infravermelho (10,7 µm) e dados de relâmpagos da rede Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN). Essas informações foram utilizadas como dados de entrada no algoritmo de rastreamento de tempestades Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC). O ForTraCC rastreia as tempestades com base num limiar mínimo de área e temperatura de 1200 km² e 255 K, respectivamente. Ao todo 54.762 SC foram identificados e selecionados. A região Norte (62% SC) e Centro-oeste (19% SC) do Brasil apresentam as maiores frequências de gêneses de SC. Em relação aos resultados dos SC com (sem) relâmpagos foi observado que os SC com a predominância de relâmpagos nuvem-solo (NS) foram os que demonstraram maiores destaques nos estudos, apresentando maior área e menor temperatura. Além disso, esses sistemas apresentaram maior (menor) área (temperatura) antes do estágio de maturação das tempestades. Dentre esses o principal resultado encontrado foi que tempestades NS apresentaram maiores taxas de expansão inicial (258,7x10⁻⁶ s⁻¹), associadas a intensas correntes ascendentes que favorecem a formação de partículas de gelo e atividade elétrica sendo essas as mais perigosas. A identificação desses padrões, contribui diretamente para o aprimoramento de sistemas de monitoramento e previsão meteorológica. Esses avanços podem fornecer alertas mais precisos e em tempo hábil, permitindo que comunidades, gestores públicos e adotem medidas de mitigação, afim de salvar vidas.

Palavras-chave: Sistemas Convectivos. Relâmpagos. Nuvem-solo.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estágios de evolução de uma tempestade unicelular5
FIGURA 2 – Diferentes tipos de relâmpagos que ocorrem entre as nuvens e o solo: relâmpago
(a) NS positivo, (b) NS negativo, (c) SN positivo e (d) SN negativo8
FIGURA 3 - Mapa do Brasil mostrando em cores diferentes as regiões: sul (roxo), sudeste
(vermelho), nordeste (laranja), centro-oeste (verde) e norte (azul)10
FIGURA 4 - Exemplo do rastreamento de um Sistema Convectivo (SC) ocorrido no dia
23/11/2017 entre 20:00 e 04:00 UTC. Em vermelho mostra-se o SC, tons em
cinza representam a temperatura de brilho e círculos azuis indicam a localização
dos relâmpagos13
FIGURA 5 - Estimativa de eficiência de detecção e precisão de localização do conjunto de
dados do Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas
(BrasilDAT) (mesma rede que compõem a ENTLN) considerando o período de
2018 a 201915
FIGURA 6 - Distribuição espacial da gênese de Sistemas Convectivos no Brasil em a) 2013,
b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) acumulado entre 2013 e
201717
FIGURA 7 – Densidade anual da gênese de SC para cada região do Brasil: a) Sul, b) Nordeste,
c) Centro-oeste, d) Sudeste, e) Norte e f) densidade acumulada de toda extensão
do Brasil entre 2013 e 2017. Valores localizados na parte superior das barras
representam o acumulado de SC para cada ano, respectivo para cada
região18
FIGURA 8 – Distribuição mensal da gênese de SC para as cinco regiões do Brasil: Norte (azul),
centro-oeste (roxo), nordeste (vermelho), sudeste (amarelo) e sul
(verde)19
FIGURA 9 – Distribuição horária da gênese de SC para as cinco regiões do Brasil: Norte (azul),
centro-oeste (roxo), nordeste (vermelho), sudeste (amarelo) e sul
(verde)
FIGURA 10 – Histograma de frequência relativa (%) da duração do SC para as regiões: a) norte,
b) sul, c) nordeste, d) centro-oeste e e) sudeste. Os números dentro dos gráficos
representam a duração média, máxima, mínima e desvio padrão para cada
região23

LISTA DE TABELAS

TABELA – 1 Frequên	cia relativa (%)	da quantidade de S	C por estação do a	ano entre 2013 e 20	17 para as
cinco regiões do Brasi	1				20

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AS	-	América do Sul
BrasilDAT	-	Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas
Cb	-	Cumulonimbus
ССМ	-	Complexos Convectivos de Mesoescala
CPTEC	-	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos Espaciais
Cu	-	Cumulus
DIS	-	Dissipação
DOLs	-	Distúrbios Ondulatórios de Leste
DP	-	Desvio Padrão
ED	-	Eficiência de Detecção
ENTLN	-	Earth Networks Total Lightning Network
ForTraCC	-	Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters
GLM	-	Geostationary Lightning Mapper
GOES	-	Geoestationary Operational Envirionmental Satellite
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	-	Intra-nuvem
INI	-	Iniciação
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JBN	-	Jatos de Baixos Níveis
LF	-	Low Frequency
LI	-	Linhas de Instabilidade
LIS	-	Lightning Imaging Sensor
MAT	-	Maturação
NS	-	Nuvem-solo
NS-	-	Nuvem-solo negativo
NS+	-	Nuvem-solo positivo

OSCAR	-	Observing Systems Capability Analysis and Review Tool
PC	-	Pico de Corrente
SC	-	Sistema Convectivo
SCM	-	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SN	-	Solo-nuvem
SN-	-	Solo-nuvem negativo
SN+	-	Solo-nuvem positivo
SR	-	Sem Raios
TMED	-	Temperatura Média
TMIN	-	Temperatura Mínima
TMIN9	-	Temperatura Mínima Média do kernel de 9 pixels
TRMM	-	Tropical Rainfall Measuring Mission
T1	-	Pré-maturação
T2	-	Pós-maturação
VCAN	-	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
VHF	-	Very High Frequency
UTC	-	Universal Time Coordinated
ZCAS	-	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	-	Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 FORMAÇÃO DE NUVENS	4
2.2 SISTEMAS COVECTIVOS DE MESOESCALA	5
2.3 FORMAÇÃO DE RELÂMPAGOS	7
3. DADOS	10
3.1 ÁREA DE ESTUDO	10
3.2 DADOS DO SATÉLITE GOES-13	11
3.3 DADOS DA EARTH NETWORK	11
4. METODOLOGIA	12
4.1 IDENTIFICAÇÃO E RASTREAMENTO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS	12
4.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DAS TEMPESTADES PARA O BRA	SIL
4.3 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DAS TEMPESTADES E OS RELÂMPAGOS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL	13
5. RESULTADOS	16
5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS CONVECTIVOS POR REGIÃO BRASIL	DO 16
5.1.1 Distribuição espacial e temporal anual	16
5.1.2 Ciclo mensal e sazonal	18
5.1.3 Ciclo diurno	21
5.1.4 Diferenças entre as propriedades das tempestades entre as regiões do Brasil	22
5.2 DIFERENÇAS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS TEMPESTADES DA REC	JIÃO
SUDESTE EM FUNÇÃO DO TIPO DA TEMPESTADE	28
5.3 DIFERENÇAS NO CICLO DE VIDA DAS TEMPESTADES DA REGIÃO SUDI EM FUNÇÃO DO TIPO DA TEMPESTADE	ESTE 34
6. CONCLUSÃO	39
7. REFÊRENCIAS	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são extensos aglomerados de nuvens profundas, denominadas de *Cumulonimbus* (Cb), incorporar grandes áreas com intensa precipitação que podem ou não apresentar atividade elétrica. Esses sistemas têm sido cada vez mais estudados devido aos impactos que podem causar em poucas horas a uma região, como por exemplo: alagamentos, inundações, ventos fortes, granizo e diversos prejuízos à economia como: inundações, deslizamentos, destruição de casas e estruturas públicas e privadas por vento. Em termos de relâmpagos, estima-se que no Brasil todos os anos os relâmpagos causem 500 milhões de reais em prejuízos aos setores de energia e comunicação, além dos mesmos causarem aproximadamente 120 mortes todos os anos (Cardoso *et al.*, 2014). A compreensão do comportamento dessas tempestades intensas pode fornecer subsídios para futuramente tentar reduzir os seus impactos na sociedade.

Os SCM que atuam na América do Sul (AS) são maiores em áreas de precipitação e em duração, quando comparado com aqueles que ocorrem na América do Norte e na África (Durkee; Mote; Shepherd, 2009; Velasco; Fritsch, 1987; Ashley et al., 2003). Segundo Durkee, Mote e Shepherd (2009), no verão da AS os SCM contribuem com aproximadamente 30% da precipitação total. O Brasil é um dos países que apresentam a maior frequência dessas tempestades. Como o país apresenta um clima majoritariamente tropical, uma localização próxima ao Equador, e extensa área territorial; essas características fazem com que a disponibilidade de energia para convecção seja elevada no Brasil. Além disso, o calor latente atinge valores altos no país principalmente devido a umidade advinda da floresta Amazônia. Fatores como Jatos de Baixos Níveis (JBN), frente de rajadas, presença de frentes, são incrementos dinâmicos que aumentam a frequência de formação física das nuvens Cb, favorecendo assim o surgimento dos SCM principalmente nos meses de verão e outono (Durkee; Mote; Shepherd, 2009; Marengo et al., 2004; Zhou; Lau, 1998). Os SCM ainda podem ser separados em subclasses, como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e Linhas de Instabilidade (LI). Essas subclasses apresentam diferenças principalmente em suas extensões, formatos e excentricidade. As LI são um agrupamento de tempestades que se dispõe em forma de linha, e pode ser formada devido a entrada de frentes. Os CCM são aglomerados de tempestades Cb, que afetam significativamente o volume de precipitação em períodos de estação quente, por exemplo: 60% na região central dos Estados Unidos, 22% na faixa de Sahel na África e 30% na AS da precipitação é causada por esses sistemas (Durkee; Mote; Shepherd, 2009; Fritsch et al., 1986; Laing et al., 1999).

Ao longo das últimas décadas o monitoramento dos SCM tem sido realizado através das combinações de imagens de satélites (como as imagens do Geoestationary Operational Envirionmental Satellite (GOES)) e algoritmos de rastreamento de tempestades. Por exemplo, o algoritmo Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC, Vila et al., 2008) emprega imagens do canal infravermelho da temperatura de brilho do topo das nuvens, que é uma janela atmosférica, para rastrear de forma lagrangiana e prever o deslocamento das tempestades. O ForTraCC possibilita a obtenção de informações sobre as propriedades físicas e radiativas das tempestades, como: área, temperatura e fração convectiva (Machado et al., 1998). Em adição a utilização de informações sobre relâmpagos, pode expressar um indicativo sobre a intensidade convectiva dessas tempestades. Os relâmpagos se formam devido ao acúmulo de cargas positivas ou negativas dentro da nuvem, que por sua vez são geradas devido a colisão entre cristais de gelo e graupel. A atividade elétrica de nuvens está relacionada linearmente com a precipitação (Soula; Chauzy, 2001), o que reflete na profundidade e tamanho das células convectivas. Atualmente no Brasil os relâmpagos podem ser detectados tanto por sensores abordo de satélite como sensores de relâmpagos alocados em superfície. Em termos de sensores abordo de satélite o pioneiro nessa estimativa foi o sensor Lightning Imaging Sensor (LIS) que esteve abordo do satélite de órbita equatorial Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Atualmente existe o satélite GOES-16 que possui o sensor Geostationary Lightning Mapper (GLM) que é mais avançado que o LIS, fornecendo dados mais precisos e com resolução temporal melhor.

Os sensores em solo disponibilizados pela rede *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN), apresentam cerca de 70 sensores de raios espalhados por todo território brasileiro, que utiliza métodos de detecção de ondas para mensurar os parâmetros das descargas elétricas. Com os quais pode-se extrair as propriedades da localização, tipo de raio, ou seja, Intra-nuvem (IN) ou nuvem-solo (NS), pico de corrente (PC) e polaridade.

A integração de diferentes bases de dados para avaliar a relação entre os SCM e a ocorrência de relâmpagos no território brasileiro representa uma linha de pesquisa ainda pouco explorada. Há escassos registros de estudos que realizaram esse trabalho de maneira abrangente. Pesquisas como as de Durkee e Mote (2010), Shepherd (2009) e Velasco e Fritsch (1987) são exemplos de trabalhos que se concentraram exclusivamente na análise de SCM, sem considerar a ocorrência de relâmpagos de forma sistemática. Entretanto, é amplamente reconhecido que os relâmpagos são fenômenos essenciais nos SCM, sendo raras as tempestades de grande magnitude que ocorrem sem a presença de atividade elétrica.

Com os avanços tecnológicos e o aumento da densidade de sensores para a detecção de relâmpagos em tempo real, tornou-se possível correlacionar e analisar simultaneamente as propriedades dos SCM e dos relâmpagos de maneira mais detalhada e precisa. Essa combinação de dados permite um entendimento mais profundo da dinâmica dessas tempestades e do papel crucial dos relâmpagos em sua evolução. Além disso, a possibilidade de realizar esse tipo de análise no contexto brasileiro oferece uma oportunidade de ampliar o conhecimento sobre o comportamento das tempestades em diferentes regiões climáticas do país, contribuindo significativamente para o campo da meteorologia e para estratégias de monitoramento e mitigação de desastres naturais.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar os SCM (SC) através do algoritmo de rastreamento ForTraCC para as tempestades que ocorreram no Brasil entres os anos de 2013 a 2017, e correlacioná-los com dados de relâmpagos de estações em solo.

Como objetivos específicos tem-se:

- a) Caracterizar o comportamento espacial-temporal dos sistemas convectivos entre as regiões do Brasil em escalas anual, mensal e diurno entre 2013 e 2017.
- b) Avaliar as diferenças físicas e dinâmicas entre as tempestades: i) sem relâmpagos.
 ii) com relâmpagos IN, iii) com relâmpagos NS entre 2015 e 2017.
- c) Analisar os estágios do ciclo de vida das propriedades físicas e elétricas das tempestades entre 2015 e 2017.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Formação de nuvens

As nuvens são constituintes atmosféricos que contêm água nos seus três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. A sua formação está associada inicialmente à evaporação da água em superfície, e sua posterior ascensão na atmosfera através de movimentos verticais do ar. Devido ao resfriamento da parcela de ar quando a mesma ascende na atmosfera e devido a presença de aerossóis que agem como núcleos de condensação, o vapor de água atinge a saturação, proporcionando a formação das gotículas de água (Smithson; Addison; Atkinson, 2013; Wang *et al.*, 2016). Esta etapa caracteriza o início da formação da nuvem.

As nuvens Cumulunimbus (Cb) são as principais nuvens relacionadas as tempestades e que podem produzir relâmpagos (Yamasaki et al., 2006). Essas nuvens apresentam grande extensão vertical e horizontal, e geralmente podem produzir frente de rajadas, que provocam a ascensão do ar próximo à superfície e formam novas nuvens na sua dianteira. O ciclo de vida de uma típica nuvem de tempestade é dividido em três etapas: iniciação, maturação e dissipação No estágio inicial as nuvens são pequenas e apresentam correntes ascendentes de ar em seu interior, promovendo a elevação do seu topo com velocidades de aproximadamente 10 m s⁻¹. Essa ascensão provoca o resfriamento das partículas de água, promovendo a formação de gelo (Figura 1, Wallace; Hobbs, 2006). No segundo estágio do ciclo de vida da nuvem, denominado de maturação, destaca-se o surgimento das correntes descendentes. É nesse estágio que a nuvem encontra-se no momento mais intenso, o que aumenta a probabilidade de ocorrer granizo, intensa precipitação, relâmpagos e frentes de rajada. Durante esse estágio, a formação da bigorna da nuvem é observada, pois o topo da nuvem ultrapassa o limite da troposfera e atinge a tropopausa, resultando no deslocamento horizontal das partículas de gelo. No estágio de dissipação ocorre a redução da intensidade das correntes descendentes, que transportam ar supersaturado, inibindo a formação de novas gotículas; e por fim enfraquecendo as nuvens, e consequentemente dissipando a tempestade (Wallace; Hobbs, 2006).

As nuvens Cb isoladas são conhecidas também como tempestades unicelulares. Em termos de organização, existem ainda mais dois tipos de tempestades: multicelular e supercelular. A tempestade multicelular é composta por um conjunto de nuvens de tempestades. Neste tipo de tempestade, devido a descendência do ar frio da nuvem, induzida pela corrente de vento, denominada frente de rajada, essa corrente de ar encontra-se com o ar quente próximo à superfície. Esse choque força o ar quente a ascender, o que forma novas células de nuvens na dianteira da tempestade. Esses fatores conduzem a tempestade a possuir um maior tempo de

vida devido essa autossustentação. Em contrapartida, a tempestade supercelular é ainda mais intensa, podendo atingir 20 km de altura, e durar entre 2 e 6 horas. Possui como característica principal a presença de uma corrente ascendente com rotação, podendo assim induzir a formação de tornados (Wallace; Hobbs, 2006).





Fonte: Wallace e Hobbs (2006).

As tempestades podem possuir diferentes escalas temporal e espacial. Por exemplo, existem as tempestades que tem pequena extensão, e outras que podem ocupar o tamanho de estados ou países, como é o caso dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). No presente estudo todas serão doravante tratadas como Sistemas Convectivo (SC), independente do seu tamanho, tempo de vida, processos físicos e presença de relâmpagos. Essa mudança foi atribuída devido o termo SCM estar associado a tempestades com áreas e temperaturas entre limites estabelecidos pela literatura, enquanto SC realçam todas as tempestades analisadas nesse estudo.

2.2 Sistemas Convectivos de Mesoescala

Os SCM são tempestades que possuem extensa área convectiva horizontal, podendo atingir tamanho superior a 100 km² e possuem duração entre 6 e 12 horas (Houze, 1993). Essas tempestades apresentam um notável crescimento vertical, alcançando altitudes que variam entre 9 e 18 km, sendo a sua ocorrência mais frequente durante os meses de verão. Os SCM podem conter nuvens do tipo bigorna, que representam uma intensa e profunda coluna que se alarga

lateralmente ao SCM (Vianello; Alves, 1991). Notoriamente os SCM são acompanhados por intensa precipitação, e podem ser o principal responsável para o regime de chuva em diversas regiões de latitudes médias e tropicais durante a estação quente (Machado; Laurent, 2004; Velasco; Fritsch, 1987). Adicionalmente, os ventos produzidos pelos SCM são vigorosos e acompanhados por intensa atividade elétrica, com potencial para produzir granizo e tornados. O ciclo de vida de todo SCM é caracterizado de forma análoga a todo SC, apresentando três fases: i) cúmulo: instante inicial; ii) maturação: período de maior intensidade e iii) dissipação: término dos componentes que sustentam o sistema. Os SCM apresentam duas principais classificações: Linhas de Instabilidade (LI) e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM, Cotton; Anthes, 1989).

As LI são compostas por extensos sistemas convectivos em forma de linha contínua ou parcialmente contínua. A formação das células convectivas na LI consiste de nuvens sendo formadas à frente do sistema principal através de levantamento do ar; enquanto as nuvens na retaguarda se dissipam (Houze, 1993). Tipicamente as LI são formadas principalmente quando ocorre o encontro de massas quentes e frias, como: regiões costeiras ou entrada de frentes. Alguns estudos têm mostrado que as LI possuem tamanho entre 1000 e 3500 km, e possuem velocidades de aproximadamente 45 km h⁻¹, além de durar várias horas podendo durar dias (Greco *et al.*, 1990; Molion, 1987; Houze, 1977; Cotton; Anthes, 1989).

Os CCM foram pioneiramente identificados e estudados por Maddox (1980), como sistemas que possuem um formato quase circular. Devido seu interior ser composto por várias tempestades individuais que são interligadas por nuvens Cirrus, presentes no topo das bigornas de cada Cb, esses sistemas são os maiores, mais intensos e mais perigosos SCM. Segundo os critérios propostos por Maddox (1980), um CCM precisa ter as seguintes características: i) núcleo convectivo com área \geq 50.000 km² com temperatura \leq 221 K; ii) área total deve ser \geq 100.000 km², com temperatura \leq 241 K; iii) excentricidade \geq 0,7 durante sua máxima extensão. Na AS os CCM são os maiores e mais duradouros do mundo (Durkee; Mote, 2010). Isso devese ao fato da interação que esses sistemas apresentam com os Jatos de Baixos Níveis (JBN); que fornecem ar quente e úmido as tempestades, além da divergência de nível superior, induzindo o levantamento do ar (Laing; Fritsch, 2000; Velasco; Fritsch, 1987). Esses resultados são consistentes com Durkee, Mote e Shepherd (2009), que registraram a maior frequência de atividade de CCM no Paraguai, norte da Argentina e sul do Brasil, induzida pelo JBN a leste dos Andes.

Para os SCM que ocorrem no Brasil, estudos mostram que na região Nordeste os sistemas atmosféricos na região como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtice

Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), induzem a formação dessas tempestades (Lyra et al., 2014; Alves *et al.*, 2018). Segundo Jacinto, Eloi e Sakamoto (2022), que encontraram cerca de 5.300 SCM em 17 anos para a região, o Nordeste apresenta o máximo mensal de gêneses em março, enquanto seus mínimos ocorrem no inverno da região. Campos e Eichholz (2011) demonstraram em sua pesquisa, que a distribuição sazonal dos SCM que ocorrem entre os anos de 2004 a 2008 para o estado de Rio Grande do Sul foi de 50,33% para os períodos quentes do ano. Assim como Salio, Nicolini e Zipser (2007) que observaram que a região sudeste da AS apresenta as maiores frequências de iniciação entre os horários 1800-2100 UTC, quando a atmosfera já está saturada devido a processos evaporativos ocorridos durante o dia.

2.3 Formação de relâmpagos

As nuvens Cb são tempestades que possuem potencial de produzir relâmpagos. A maior probabilidade de produção de relâmpagos por esse tipo de nuvem, deve-se ao fato de possuírem intensas correntes ascendentes e formação de alta quantidade de cristais de gelo e *graupel* em seu interior. A formação das cargas elétricas no interior dessas nuvens ocorre através da colisão desses hidrometeoros congelados, em regiões com fortes correntes ascendentes. Conforme os processos de colisão e separação de cargas elétricas no interior da nuvem se intensificam, o campo elétrico aumenta, conduzindo a um aumento da diferença de potencial e quebra da rigidez dielétrica do ar, resultando na formação dos relâmpagos (Reynolds; Brook; Gourley, 1957; Wallace; Hobbs, 2006). Os relâmpagos podem possuir diversos tamanhos, formas e polaridades. Em média, os relâmpagos duram menos de um segundo, apresentam extensões de 5 km chegando a 10 km, podendo atingir temperatura superiores a 30.000 °C, e uma corrente elétrica de aproximadamente 30 kA (Uman; Krider, 1989; Pinto Jr., 2005).

Os relâmpagos são classificados em: i) no solo e ii) nas nuvens. Os relâmpagos no solo, podem ser subdivididos em: aqueles que propagam da nuvem para o solo (denominados relâmpagos nuvem-solo (NS)) e aqueles que saem do solo para a nuvem (denominados relâmpagos solo-nuvem (SN)). Os relâmpagos NS e SN possuem polaridade positiva ou negativa. A Figura 2 mostra as diferentes polaridades dos relâmpagos NS e SN. Os relâmpagos NS positivos (negativos) transferem para o solo cargas elétricas positivas (negativas), como indicado na Figura 2a (Figura 2b). Enquanto os relâmpagos SN positivos (negativos) propagam em direção ao centro positivo (negativo), como indicado na Figura 2d).

Por fim, os relâmpagos que se formam e dissipam no interior das nuvens, são denominados relâmpagos intra-nuvem (IN, Ogawa, 1995). Os relâmpagos IN são os mais

comuns de ocorrerem; representando aproximadamente 70% dos relâmpagos que ocorrem em tempestades. Enquanto os NS- ocupam a segunda colocação; sendo que os relâmpagos NS- representam 90% da ocorrência em comparação aos relâmpagos NS+ (Pinto Jr; Pinto, 2000).

Figura 2 – Diferentes tipos de relâmpagos que ocorrem entre as nuvens e o solo: relâmpago (a) NS positivo, (b) NS negativo, (c) SN positivo e (d) SN negativo.



Fonte: Mattos (2009).

Em termos de ciclo de vida, a máxima atividade elétrica de uma tempestade ocorre momentos antes do estágio da maturação (Mattos; Machado, 2011). O entendimento dos processos físicos dos relâmpagos, formação, localização e sua polaridade auxilia na análise do ciclo de vida dos SCM (Amorati *et al.*, 2000; Matthee; Mecikalski, 2013). Por mais que a formação desses dois fenômenos (tempestades e relâmpagos) seja indiferente às localidades de suas gêneses, esses processos podem variar em termos da quantidade de ocorrência para as diferentes regiões do Brasil.

Nesse contexto, a maioria dos trabalhos foram focados para a tempestades na região sudeste do Brasil, como os estudos realizados por Preisser (2019) e Ribeiro (2023). Esses estudos observaram que a maior frequência de relâmpagos para o estado de Minas Gerais acontece na área da Zona da Mata Mineira. Para a região metropolitana de São Paulo, Naccarato (2005) e Mattos (2009) verificaram que os relâmpagos possuem uma frequência de 15 ocorrências por km² por ano, sendo encontrada a máxima frequência entre 15 e 16 horas local. Em adição, Monteiro; Mattos; Lima (2021) encontrou diferenças em termos da estrutura física dos SCM para tempestades com e sem relâmpagos na região sudeste. Os autores encontraram que as tempestades que possuem relâmpagos apresentam maior tamanho e duração. Jacinto, Eoi e Sakamoto (2022) avaliaram 321 SCM entre os anos de 2000 e 2006 na região nordeste do Brasil. Eles observaram que os SCM apresentam uma duração média de aproximadamente 7 horas, além de ocorrerem majoritariamente durante o dia. Em adição, Rehbein e Ambrizzi (2023) analisaram a projeção climática em termos de ocorrência de SCM para a bacia amazônica. Os resultados apontaram uma possível diminuição de 2,9% ao ano entre os meses de setembro e dezembro para os anos de 2014 a 2050.

3. DADOS

3.1 Área de Estudo

O presente estudo avalia os SCM que ocorreram em todo o território brasileiro entre os anos de 2013 e 2017. Lembrando novamente que todos os SCM serão tratados como SC, afim de manter a integridade das comparações. O Brasil é o 5° maior país em extensão global, apresentando aproximadamente 8.510.417,771 km² de área, com uma população de 203 milhões de habitantes (IBGE, 2022). Ao todo o país possui 26 estados que representam 5 regiões (Figura 3), constituindo todo espaço geográfico. As regiões são: Norte (3.853.676,948 km²), Nordeste (1.544.291 km²), Centro-oeste (1.606.403 km²), Sudeste (924.620 km²) e Sul (576.774 km², IBGE, 2022).

A região sudeste representa cerca de 41,8% da população do país, sendo a principal região para a economia do país, devido a presença da Região Metropolitana São Paulo (IBGE, 2022). A região sudeste sofre a influência de diferentes sistemas atmosféricos como: Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no verão, frentes frias no inverno (Ferreira; Reboita, 2022), favorecendo a formação de tempestades e relâmpagos na região. O inverno da região é ameno, com níveis de precipitação que podem ficar abaixo de 100 mm. Durante essa estação, o valor da temperatura média pode chegar a menos de 14 °C em alguns locais. Em contraste, os verões são quentes, com médias acima de 25 °C e um grande volume de chuvas em alguns locais como o litoral norte de São Paulo (> 700 mm). No Sudeste as precipitações atingem anualmente valores dentre 700 a 2000 mm (Neto, 2005).

Figura 3 – Mapa do Brasil mostrando em cores diferentes as regiões: sul (roxo), sudeste (vermelho), nordeste (laranja), centro-oeste (verde) e norte (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Dados do satélite GOES-13

Foram utilizadas as informações do satélite Geoestationary Operational Environmental Satellite - 13 (GOES-13). O GOES-13 esteve em operação na América do Sul entre 2006 e 2019 e possuía uma resolução temporal de 30 minutos. O sensor GOES IMAGER operava em cinco (0,65; 3,9; 6,55; 10,7 e 13,35 µm) canais (OSCAR, 2024). Utilizou-se o canal 4infravermelho (10,7 µm), com resolução espacial de 4 km. Esse canal é utilizado para identificar as características do topo das nuvens, como tamanho e temperatura. Os arquivos binários foram disponibilizados pelo banco de dados do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos Espaciais (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o período de de 2013 janeiro a dezembro de 2017, disponível em: <https://ftp.cptec.inpe.br/goes/goes13/retangular_4km/>.

3.3 Dados da rede Earth Network

A rede *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN) é uma malha de sensores de relâmpagos implementada e operada pela empresa Earth Networks. Os sensores identificam relâmpagos através da detecção da radiação eletromagnética entre 10 Hz e 10 MHz, através das ondas LF (Low Frequency) e VHF (Very High Frequency; Saldanha, 2018). A rede de sensores é composta por aproximadamente 70 sensores dispostos por todo território do Brasil. Os dados fornecidos são: tipo do relâmpago (IN ou NS), data, horário, pico de corrente e polaridade dos relâmpagos NS. Foram utilizados os dados para o período entre 2013 e 2017. Esses dados foram fornecidos pela empresa CLIMATEMPO.

4. METODOLOGIA

4.1 Identificação e rastreamento dos sistemas convectivos

O Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC, Vila et al., 2008) rastreia as tempestades através da radiação infravermelha que é emitida pelo topo das nuvens. O limiar mínimo para o algoritmo considerar uma nuvem como sendo um SC, é apresentar no mínimo 75 pixels de área (1200 km²) e temperatura abaixo de 235 K (Vila et al., 2008). O ForTraCC produz uma série de parâmetros das tempestades, como: localização, duração, tamanho, taxa de expansão, temperatura média, temperatura mínima e temperatura mínima média do *kernel* de 9 *pixels*, fração convectiva, excentricidade, ângulo de inclinação e deslocamento de cada SC. A partir das saídas do ForTraCC foram incluídas as informações dos relâmpagos (IN e NS) detectados pela ENTLN, assim o banco de dados final é composto pelos SC e as informações dos relâmpagos de cada SC.

A partir deste banco de dados foram selecionadas apenas as tempestades que: i) nasceram e se dissiparam dentro de cada uma das 5 regiões do Brasil, ii) não apresentaram união e divisão ao longo do ciclo de vida, iii) não tiveram mais de 50% de falta de imagem e iv) apresentaram taxa de expansão positiva no início do ciclo de vida e negativa no final. Essas limitações foram aplicadas visando estudar apenas as tempestades que desenvolveram com sua dinâmica interna (Machado; Laurent, 2004).

Um exemplo de como o ForTraCC realiza o rastreamento é mostrado na Figura 4. Nesse exemplo é mostrado um SC que ocorreu na região sudeste do Brasil no dia 23 de dezembro de 2017 a partir das 20:00 UTC. Inicialmente o SC (tom avermelhado) (Figura 4a), se destaca das demais nuvens (tons cinza) devido a esse atender os critérios aplicados pelo ForTraCC. A evolução do sistema é demonstrada nas demais figuras do painel da Figura 4, sendo possível acompanhar a quantidade de relâmpagos (círculos em azul) que ocorre a cada passo de tempo.

Figura 4 - Exemplo do rastreamento de um Sistema Convectivo (SC) ocorrido no dia 23/11/2017 entre 20:00 e 04:00 UTC. Em vermelho mostra-se o SC, tons em cinza representam a temperatura de brilho e círculos azuis indicam a localização dos relâmpagos.



Fonte: Ribeiro (2023).

4.2 Distribuição espacial e temporal das tempestades para o Brasil

A partir do banco de dados dos SC que atenderam aos critérios aplicados (secção 4.1), contabilizou-se 54.762 SC para todo o Brasil. Primeiramente foi analisada a distribuição espacial das gêneses desses sistemas para todo o país, utilizando o processamento do ForTraCC que indica a localização geográfica do nascimento da tempestade. As tempestades foram

separadas por ano, entre 2013 e 2017; e em seguida foi realizado o acumulado de gêneses para todo período. Na segunda parte dessa etapa, realizou-se o agrupamento da quantidade de tempestades para a escala mensal para cada uma das regiões do país. Além disso, para analisar os períodos de maior formação de sistemas convectivos foi realizada a distribuição horária das gêneses dos SC para as 5 regiões.

Após separar as tempestades por região, foi realizada a análise de densidade anual das gêneses a fim de normalizar a frequência relativa de surgimentos de SC para cada região para cada ano. Novamente, foi realizado o acumulado utilizando a área do Brasil para o cálculo da densidade, fornecendo ao final a frequência relativa anual das gêneses de SC.

O estágio da maturação é o período do ciclo de vida de um SC no qual ele possui maior tamanho e intensidade. O algoritmo ForTraCC identifica esse instante no ciclo de vida de uma tempestade. Assim, foi possível avaliar as diferenças entre as cinco regiões em termos das seguintes propriedades das tempestades durante a maturação: i) área, ii) temperatura mínima (TMIN), iii) temperatura mínima média do *kernel* de 9 *pixels* (TMIN9) e iv) temperatura média (TMED). Além disso, foi realizado uma avaliação da distribuição da duração dos SC para cada região para o período de estudo.

4.3 Relação entre as propriedades das tempestades e os relâmpagos na região Sudeste do Brasil

A análise da relação entre as propriedades das tempestades e os relâmpagos foi centrada apenas nas tempestades que ocorreram na região sudeste do Brasil. Isso deve-se ao fato que a rede de relâmpagos ENTLN possui uma maior densidade de sensores de relâmpagos na região sudeste do Brasil, proporcionando assim uma maior eficiência de detecção (ED) nessa região. A Figura 5 mostra a estimativa da ED da rede ENTLN. Nota-se alta ED na região sudeste e nordeste do Brasil (Pinto Jr; Pinto, 2021). Além disso, os autores indicaram que os menores valores de erros de localização da rede ENTLN ocorrem principalmente na região sudeste. Assim, a avaliação das tempestades nessa etapa do trabalho considerou apenas os SC que nasceram e morreram na região sudeste durante 2013-2017.

Figura 5 - Estimativa de eficiência de detecção e precisão de localização do conjunto de dados do Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) (mesma rede que compõem a ENTLN) considerando o período de 2018 a 2019.



Fonte: Pinto Jr e Pinto (2021).

A partir dessa base de dados, os SC foram classificados em três grupos: i) tempestades com apenas relâmpagos IN, ii) tempestades com apenas relâmpagos NS e iii) tempestades sem relâmpagos. É importante destacar que para garantir a integridade da comparação física entre os SC e os diferentes tipos de relâmpagos ou a ausência deles, foram selecionados apenas SC com 100% de ocorrência em cada grupo. Ou seja, tempestades que apresentaram tanto IN quanto NS foram excluídas. Posteriormente foram realizadas análises através de histogramas de frequência relativa, além da aplicação de Boxplots (uma explicação detalhada sobre Boxplots pode ser encontrada em Monteiro, 2022) para avaliar as diferenças entre os três grupos de tempestades. Foram comparadas as seguintes variáveis: i) duração, ii) taxa de expansão inicial, iii) área na maturação, iv) mínimo valor no ciclo de vida para a mínima média do *kernel* de 9 *pixels* (TMIN9) e vi) mínimo valor no ciclo de vida para a temperatura média (TMED).

Na segunda parte dessa etapa foi avaliado em termos de ciclo de vida o comportamento dos SC que apresentam ou não relâmpagos. Para tanto, o ciclo de vida das tempestades foi separado em 5 etapas: i) iniciação (INI), ii) pré-maturação (T1), iii) maturação (MAT), iv) pós-maturação (T2) e v) dissipação (DIS). Como foi atribuído ao estudo 5 estágios diferentes, cada SC precisa ter no mínimo 5 imagens do GOES-13 em seu ciclo total de vida. Lembrando que a resolução temporal do satélite GOES-13 era de 30 minutos, ou seja, os SC precisam ter no mínimo 150 minutos de duração. Para os cinco estágios do ciclo de vida foi avaliado as seguintes propriedades das tempestades: área, TMED, TMIN, TMIN9 e a taxa de expansão. Esta avaliação foi realizada considerando os três grupos de tempestades (SR, IN e NS).

5. RESULTADOS

5.1 Características gerais dos sistemas convectivos por região do Brasil

5.1.1 Distribuição espacial e temporal anual

Seguindo a métrica da seção 4.1, após a aplicação desses critérios, foram contabilizadas 54.762 tempestades SC. Onde a quantidade de SC para cada região foi: sul com 1.319, sudeste com 3.634, centro-oeste com 10.462, nordeste com 5.441 e norte com 33.906 SC. A Figura 6 mostra a distribuição espacial dos SC no Brasil entre 2013 e 2017. Em termos quantitativo, observa-se pouca diferença entre os anos. A Figura 6f mostra o acumulado (soma total) dos SC para todo o período. A região norte e centro-oeste se destaca por serem as que apresentam a maior quantidade de SC; enquanto a região sul e nordeste representam os menores valores de gêneses. O estudo realizado por Anselmo et al. (2021) mostra que a região da Amazônia apresenta alta probabilidade de gênese de SC. Segundo Rehbein, Ambrizzi e Mechoso (2018) ocorrem em média aproximadamente 7.200 SC por ano sobre a bacia Amazônica (Figura 7e). Dong et al. (2024) em seu estudo, também encontrou maior frequência de gêneses de SC na região norte do Brasil. A região norte apresenta maior frequência de gêneses devido a sistemas atmosféricos que atuam na região. O local além de apresentar forte aporte de umidade (devido a floresta amazônica), apresenta alta insolação (baixa latitude), que proporciona a formação de tempestades de forma convectiva. Além disso, observam-se sistemas como Ondas de Kelvin e JBN de leste, que parte do Atlantico Tropical em direção ao norte da bacia Amazônica; são alguns dos sistemas que interagem na formação e proliferação dessas tempestades (Anselmo et al., 2021; Salio; Nicololini; Zipser, 2007; Durkee; Mote, 2010; Cohen; Silva Dias; Nobre, 1995).

A região sudeste apresenta pouca frequência em comparação com as regiões norte e centro-oeste. As gêneses dos SC dessa região estão interligadas com processos dinâmicos como: entrada de frentes frias e ações de brisas, divergência de temperatura entre terra e oceano (Siqueira; Marques, 2008). Enquanto a região sul apresenta menores frequências de gêneses de SC. Porém, Durkee, Mote e Shepherd (2009), Durkee e Mote (2010), Velasco e Fritsch (1987) e Moraes *et al.* (2020) mostraram em seus estudos que os mais intensos, mais perigosos e mais duradouros SC ocorrem na região sul do país. Essas tempestades severas, estão inteiramente associadas ao JBN a leste dos Andes, que fornecem umidade da Amazônia para esses sistemas (Moraes *et al.*, 2020; Salio; Nicololini; Zipser, 2007). Entretanto, trata-se de CCM, sendo uma variação mais intensa e maior do que os SC tratados no presente trabalho. Essas diferenças devem-se as diferenças para identificação de um SC. No presente trabalho, os SC foram

definidos como sendo aqueles que possuem área maior que 1200 km² e temperatura do topo da nuvem abaixo de 235 K.

Figura 6 - Distribuição espacial da gênese de Sistemas Convectivos no Brasil em a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) acumulado entre 2013 e 2017.



Por outro lado, sabemos que regiões maiores em termos de área podem apresentar maiores quantidade totais de SC que regiões menores, como é o caso da região norte (33.906 SC) e a região sul (1.319 SC). O total de ocorrência de SC para uma região está proporcionalmente relacionada a extensão daquela região; ou seja, regiões como norte e centro-oeste apresentaram maiores frequências devido serem as áreas de maior extensão do país, em comparação ao sul (menor região do país). Logo, para normalizar essa discrepância foi necessário empregar a densidade anual das gêneses (Figura 7). Esse cálculo é realizado considerando o total de ocorrências de SC de cada região por ano e dividindo pela respectiva área de extensão de cada região. Nota-se a imponência da região norte (maior densidade, Figura 7b). Comparando com o acumulado (Figura 7f), que foi realizado através do total de todas as áreas das regiões do Brasil, ou seja, toda extensão do país. A região norte apresenta maior

densidade em média ($2x10^{-3}$ densidade. anual⁻¹), provavelmente causada por sistemas atmosféricos já citados anteriormente.

A região sul apresenta as menores densidades de SC do país. Entretanto, os CCM que são comumente observados na região, apresentam tamanho de cerca de 100.000 km² (Durkee; Mote, 2010; Maddox, 1980). A densidade anual de gênese, mesmo baixa em comparação às outras regiões, é relativa pois se aplica ao ponto central dos SC e como os CCM da região apresentam grande extensão, considera também que há menores valores de densidade para a região.

Figura 7 – Densidade anual da gênese de SC para cada região do Brasil: a) Sul, b) Nordeste, c) Centrooeste, d) Sudeste, e) Norte e f) densidade acumulada de toda extensão do Brasil entre 2013 e 2017. Valores localizados na parte superior das barras representam o acumulado de SC para cada ano, respectivo para cada região.



5.1.2 Ciclo mensal e sazonal

O ciclo mensal da ocorrência de SC para as regiões do Brasil (Figura 8), mostra como as tempestades se comportam durante os meses. O período de surgimento dessas tempestades é registrado mais pronunciado no período de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) e começo de outono (março, abril e maio); enquanto seus mínimos são observados entre os meses de junho e julho (inverno, Tabela 1). O trabalho de Anselmo *et al.* (2021) e Esmaili *et al.* (2016) também registraram maiores valores de SC na região norte para os meses DJF, enquanto os menores valores ocorreram entre junho, julho e agosto (JJA). Os resultados se correlacionam com encontrado na literatura por Durkee, Mote e Shepherd (2009). Os pesquisadores encontraram que a região sul apresenta maior precipitação causada por CCM, ou seja, maior frequência de CCM, durante a estação quente do hemisfério sul para a Bacia da Prata que ocupa parte da

região sul, sendo os JBN os responsáveis por essas características. A análise de Siqueira e Marques (2021) encontraram para região sudeste valores iguais para verão (máximos) e inverno (mínimos). Os autores encontraram que os SC daquela região estão relacionados principalmente a frentes frias e processos convectivos diurnos entre oceano e continente.

Em adição, nota-se que a região nordeste apresenta o máximo de ocorrência de SC no mês de março (mês 3); resultados semelhantes foram encontrados por Costa *et al.* (2019). Devido ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para mais ao sul são fatores associados a esse aumento durante esse período Costa *et al.* (2019).

Figura 8 – Distribuição mensal da gênese de SC para as cinco regiões do Brasil: Norte (azul), centrooeste (roxo), nordeste (vermelho), sudeste (amarelo) e sul (verde).



A Tabela 1 mostra a frequência relativa de ocorrência de SC por região. A distribuição sazonal é padronizada para todas as regiões, sendo DJF e JJA os meses de máximas e mínimas ocorrências, respectivamente. Em geral, a região norte apresentou a menor amplitude entre esses dois extremos; grande parte da região está sobre a linha do Equador, que proporciona menor variabilidade na radiação solar entre as estações do ano, o que implica nessa menor amplitude. Por outro lado, locais mais ao sul do Brasil, como a região sul (43%) e sudeste (47%), têm maior amplitude entre os meses de DJF e JJA, resultado da variação anual da energia radiativa que é mais evidente em latitudes maiores. As estações de transição do hemisfério sul, representado pelos meses SON (primavera) e MAM (outono), seguem perfis diferentes para

cada região do país. De maneira geral, apenas a região nordeste apresenta uma maior diferença entre esses dois períodos. Novamente é observado o impacto do deslocamento mais ao sul da ZCIT, causando maior frequência na formação de SC (Costa *et al.*, 2019).

S	Sistemas Convectivos para as Regiões do Brasil						
<u>Centro-oeste</u>							
Ano	DJF (%)	MAM (%)	JJA (%)	SON (%)	Total		
2013	40	27	6	27	2206		
2014	41	31	3	25	2333		
2015	41	32	3	23	2387		
2016	54	19	5	22	1756		
2017	45	24	4	26	1780		
Média (%)	45	27	4	25			
		<u>Sul</u>					
Ano	DJF (%)	MAM (%)	JJA (%)	SON (%)	Total		
2013	47	16	14	22	218		
2014	57	17	12	14	284		
2015	55	19	9	16	306		
2016	56	18	11	15	257		
2017	54	19	8	19	254		
Média (%)	54	18	11	17			
Sudeste							
Ano	DJF (%)	MAM (%)	JJA (%)	SON (%)	Total		
2013	48	27	2	23	779		
2014	44	29	3	23	712		
2015	47	28	4	21	870		
2016	54	16	3	27	680		
2017	56	17	1	26	593		
Média (%)	50	23	3	24			
	1	Nordeste		1			
Ano	DJF (%)	MAM (%)	JJA (%)	SON (%)	Total		
2013	42	34	9	15	1204		
2014	42	43	3	11	1341		
2015	41	42	5	12	1058		
2016	54	25	3	18	902		
2017	48	29	6	17	936		
Média (%)	45	35	5	15			
Norte							
Ano	DJF (%)	MAM (%)	JJA (%)	SON (%)	Total		
2013	30	26	20	24	7348		
2014	31	30	17	23	7278		
2015	28	34	15	23	7197		
2016	34	26	19	21	5922		
2017	31	25	17	27	6161		
Média (%)	31	28	18	24			

Tabela 1 – Frequência relativa (%) da quantidade de SC por estação do ano entre 2013 e 2017para as cinco regiões do Brasil.

5.1.3 Ciclo diurno

A ocorrência de formação dos SC pode variar ao longo do dia. A Figura 9 mostra o ciclo diurno de gêneses dos SC para cada região do Brasil. As regiões apresentaram comportamentos similares; apresentando maior formação ao entardecer e início da noite (1700 a 1900 UTC). Pode-se correlacionar essa característica com o aquecimento radiativo diurno. Segundo o trabalho de Salio, Nicolini e Zipser (2007), os SC que ocorrem no sudeste brasileiro apresentaram os mesmos padrões diurnos desta pesquisa, com valores máximos de gêneses ocorrendo no início da noite (1800 a 2100 UTC) e valores mínimos entre 1500 e 1700 UTC.

A região norte apresenta o mesmo ciclo diurno que as demais regiões, entretanto às 0600 UTC há um pequeno aumento na gênese de SC. Os trabalhos de Salio, Nicololini e Zipser, (2007) e Pereira Filho *et al.* (2015) e Rehbein, Ambrizzi e Mechoso (2018) encontraram padrões semelhantes, além de observarem semelhante horário de máxima (1700 a 1900 UTC) e mínima (1200 a 1500 UTC) ocorrência de SC. O período de maior quantidade de iniciação de SC ocorrer durante a tarde, deve-se ao comportamento do aquecimento radiativo ao longo do dia. Durante o dia, a atmosfera é aquecida pela radiação solar, iniciando processos de convecção. À medida que o solo e o ar próximo à superfície se aquecem, o ar quente, menos denso, começa a subir, enquanto o ar mais frio, mais denso, desce para ocupar seu lugar. No entanto, para que tempestades se formem, esse processo convectivo precisa de tempo suficiente para se intensificar. Isso envolve a elevação do ar quente até níveis altos da atmosfera, onde ele pode encontrar condições favoráveis para a formação de nuvens Cb, que são essenciais para tempestades. Por isso, as tempestades são mais comuns no final da tarde, quando a convecção teve tempo suficiente para se desenvolver plenamente. Figura 9 – Distribuição horária da gênese de SC para as cinco regiões do Brasil: Norte (azul), centrooeste (roxo), nordeste (vermelho), sudeste (amarelo) e sul (verde).



Ciclo diurno das gêneses dos SC nas regiões do Brasil (2013-2017)

5.1.4 Diferenças entre as propriedades das tempestades entre as regiões do Brasil

A Figura 10 mostra a duração dos SC separados por região do Brasil. Ao todo, os SC das regiões apresentaram máxima duração ente 1 e 2 horas, demonstrando que os SC foram em grande maioria, de curta duração; indicando que são tempestades rápidas que ocorrem ao final da tarde e início da noite. Nota-se que há poucos SC que chegam a durar mais de 3 horas (Figura 9).

A região sul (Figura 10b) destaca-se pela maior frequência relativa (55%) de SC que duraram entre 1 a 2 horas. Sabe-se que essa região é caracterizada pela formação dos maiores e mais duradouros SC do mundo (Durkee; Mote; Shepherd, 2009). Porém, o resultado apresentou que a região norte (Figura 10a) possui o maior máximo (18,5 horas) de duração dentre as regiões. A extensa largura dos rios e o clima da região norte favorece para esses locais ocorrerem LI. Segundo a pesquisa de Greco et al. (1990), no qual analisaram LI na região amazônica, estimaram que esses SC chegaram a ter entre 24 a 48 horas de vida, devido sua característica morfológica de retroalimentação (Silva Dias, 1987). Entretanto, o máximo encontrado na região norte (máximo de 18.5 horas, Figura 10a) mostra valor menor do que encontra na literatura. Essa diferença pode ser devido as diferenças métricas de consideração de SC nesta pesquisa, além dos filtros espaciais, que podem ter eliminado valores ainda maiores. Assim, os autores estimam que a maior duração do norte se deve a uma LI que se formou durante a pesquisa. Em adição, a maior duração dos SC da região norte observada no presente estudo pode estar associada a maior extensão territorial dessa região.





A maturação representa o período de vida no qual os SC atingem seu máximo tamanho. Entender o comportamento em cada região é ideal para diferenciar o comportamento físico e as influências que cada local tem nos SC. A Figura 11 mostra a frequência relativa do tamanho das tempestades de cada região. Em geral, observa-se um comportamento semelhante entre as regiões, estando os maiores valores de área compreendidos entre 0.16x10⁴ e 0.32x10⁴ km² em todas as regiões. O resultado esperado era que a região sul tivesse SC com maiores áreas na maturação, devido ao local ser predominantemente formadores de CCM; logo na Figura 11b é possível observar tal fato. Além disso, em média os SC que ocorreram na região sul (Figura 11b) apresentaram maior área de maturação (4238,5 km²) e o maior mínimo (1280 km²) dentre as demais regiões. Novamente, como explicado anteriormente, o aporte de umidade trazido pelos JBN e a alta frequência frentes frias nessa região são responsáveis pela formatação de tempestades com larga extensão nessa região.

Figura 11 – Histograma de frequência relativa (%) da área dos SC no momento da maturação para as regiões: a) norte, b) sul, c) nordeste, d) centro-oeste e e) sudeste. Os números dentro dos gráficos representam a duração média, máxima, mínima e desvio para cada região.



Como visto anteriormente, a maturação é o período mais intenso de uma tempestade. À medida que a tempestade possui temperaturas mais baixas, maior é a concentração de gelo, consequentemente há uma maior probabilidade de formação de relâmpagos. A temperatura de brilho do topo dos SC indica essa característica, assim a Figura 12 demonstra a temperatura de brilho no momento da maturação dos SC para cada região.

Inicialmente observa-se uma diferença da região sul (Figura 12b) em relação as demais regiões. A região Sul apresentou SC com temperatura da maturação maiores que as demais regiões, além de possuir os maiores valores de frequência relativa do painel (>14%). Entretanto, o valor mínimo da região sul (207,9 K) ainda sim é baixo em relação às demais regiões. O que demonstra que para o período de estudo os SC do local foram em média mais quentes dentre as regiões. Ao todo, as demais regiões (sudeste, centro-oeste, norte e nordeste) apresentaram valores semelhantes. O resultado demonstrou pouca diferença na temperatura média dos SC dentre as regiões de suas respectivas formações, tendo todas maiores temperaturas médias entre 224 e 227 K.

Figura 12 – Histograma de frequência relativa (%) da temperatura média dos SC no momento da maturação para as regiões: a) norte, b) sul, c) nordeste, d) centro-oeste e e) sudeste. Os valores no interior das figuras representam a média, máxima, mínima e desvio padrão que cada região apresentou durante o período de 2013 a 2017.



A temperatura mínima de uma nuvem desempenha um papel crucial na formação de gelo e relâmpagos. A presença de gelo é essencial para o desenvolvimento de relâmpagos, pois as colisões entre cristais de gelo e *graupel* são fatores fundamentais para iniciar o processo de

eletrificação das nuvens de tempestade. Portanto, temperaturas suficientemente baixas nas nuvens são fundamentais para ambos os processos. A Figura 13 mostra a frequência relativa da temperatura mínima na maturação dos SC. De forma geral, as distribuições são semelhantes, apresentando valores de frequência próximos a 15%. Destaca-se novamente para região sul (Figura 13b) em que o perfil é mais deslocado para a direita. Já a região norte (Figura 13a) apresentou a menor temperatura mínima (190,1 K).

Figura 13 – Histograma de frequência relativa (%) da temperatura mínima dos SC no momento da maturação para cada região do Brasil: a) norte, b) sul, c) nordeste, d) centro-oeste e e) sudeste. Os valores dentro dos gráficos representam a média, máxima, mínima e desvio padrão, que cada região apresentou durante o período de 2013 a 2017.



A temperatura mínima média do *kernel* de 9 *pixels* na maturação do topo de um SC determinada pelo ForTraCC é crucial para a identificação de fenômenos meteorológicos severos. Esta variável pode ser útil para identificar regiões onde a formação de gelo é intensa. Temperaturas muito baixas no topo da nuvem indicam que a nuvem se estende a altitudes

elevadas, sugerindo a presença de tempestades severas e potencial desenvolvimento de relâmpagos.

A Figura 14 mostra a distribuição da temperatura para os SC. O padrão observado é semelhante das figuras anteriores (Figuras 12 e 13), isto é, a região sul (Figura 14b) se destaca em apresentar as frequências relativas deslocadas parcialmente à direita em relação ao eixo central (218 K). Representado assim que o topo das nuvens dos SC ocorridos na região, no momento mais intenso (maturação), foi mais quente em relação às demais regiões. É notado novamente que a região norte (Figura 14a), apresentou menor valor (mínima = 191,9 K) dentre todas as regiões, o que consequentemente pode-se gerar mais gelo e relâmpagos.

Figura 14 – Histograma de frequência relativa (%) da temperatura mínima média do *kernel* de 9 *pixels* mínima dos SC no momento da maturação para cada região do Brasil: a) norte, b) sul, c) nordeste, d) centro-oeste e e) sudeste. Os valores dentro dos gráficos representam a média, máxima, mínima e desvio padrão, que cada região apresentou durante o período de 2013 a 2017.



5.2 Diferenças nas propriedades físicas das tempestades da região Sudeste em função do tipo da tempestade

Ao aplicar esses critérios da seção 4.3 para SC apenas na região sudeste, foram contabilizados 3.634 SC, que foram separados em: i) 328 tempestades com IN, ii) 1.071 com NS e iii) 1.345 sem relâmpagos. A Figura 15 mostra a relação da duração dos SC em função dos três tipos de tempestades: i) sem relâmpagos (SR), com ii) relâmpagos IN e iii) relâmpagos NS. Nota-se que os SC que apresentaram apenas relâmpagos NS tem menor frequência dentre os três tipos (Figura 15a). Entretanto, esses foram os que tiveram maior duração (máximo de 10,5 h). A Figura 15b demonstra esse resultado, pois o quadro dos quartis junto a mediana (linha em vermelho Figura 15b) é deslocada mais à direita, representando que os valores de duração são maiores para os SC que houve apenas relâmpagos NS. Enquanto para os SC com apenas IN ou SR apresentaram valores semelhantes (médias de 1,8 h), demonstrando pouca variação na duração desses sistemas. O boxplot (Figura 15b) também mostra que os valores mínimos de das tempestades com IN e SR são semelhantes, já que as medianas estão próximas.

O trabalho de Monteiro, Mattos e Lima (2021) analisou as tempestades com relâmpagos NS, e encontraram valor semelhante para as tempestades com NS, em média de 2,3 horas. As tempestades NS se desenvolvem em ambientes com maior instabilidade e com forçantes convectivas mais intensas, o que resulta em durações maiores (Mattos; Machado, 2011). De maneira geral, tempestades que apresentam relâmpagos em sua formação são as que têm maior duração em comparação às que não tem raios devido à alta concentração de formação de gelo (Morales *et al.*, 2004). Assim como estudado por Tadesse e Anagnostou (2009), onde os autores ao analisarem SC encontraram também maior duração em tempestades que possuem ao menos um relâmpago, em relação aos SC sem relâmpagos.

Figura 15 – a) Frequência relativa (%) e b) boxplot para a duração das tempestades em função do tipo de tempestade: i) sem relâmpagos (SR), com ii) relâmpagos intra-nuvem (IN) e iii) relâmpagos nuvem-solo (NS).



Analisar o tamanho de um SC no instante de maior intensidade (maturação) para cada tipo de relâmpago, é importante para entender o comportamento dessas tempestades em relação a atividade elétrica (Figura 16a-b). Nota-se que as tempestades NS (Figura 16a) em média apresentam maior área na maturação (5.290,9 km²) em relação as tempestades IN e SR (3.087,0 e 3.123,3 km², respectivamente). Além disso, o máximo e mínimo da curva NS apresentaram valores maiores (38.384 km² e 1.360 km², respectivamente) em comparação com os valores das outras duas curvas. Ao analisar a Figura 16b nota-se o deslocamento dos valores maiores em área, identificado pela medida ser maior na caixa do NS do as IN e SR. Em adição, existe uma grande quantidade de outliers presentes na classe de NS. Representando que para a região sudeste há grandes tempestades em termos de área com presença de NS, o que pode afetar a vida da população nessa região. Ribeiro (2023), Mattos (2009) e Machado e Laurent, (2004) também encontraram que tempestades com a presença de relâmpagos são maiores em área do que aquelas que não apresentam relâmpagos, devido as intensas instabilidades em seu interior provida pelas correntes ascendentes e descendentes que resultam em maior área. Ademais, as tempestades que possuem maior duração tendem a ter áreas maiores (Tadesse; Anagnostou, 2009), correlacionando com a maior duração observada nas tempestades com relâmpagos (tópico 5.1.4).

A taxa de expansão de um SC está relacionada a mudança da área de uma tempestade entre uma imagem e a seguinte. Com o objetivo de entender o comportamento inicial das tempestades foram analisadas as taxas de expansão inicial das tempestades. A taxa de expansão inicial é aquela documentada no segundo tempo do ciclo de vida da tempestade. Essa característica demonstra a intensidade que um SC pode alcançar em sua formação nos primeiros momentos de seu ciclo de vida. Está diretamente relacionada à quantidade de fluxo de massa ou à taxa de condensação dentro dos SC, possuindo correlação com a formação de partículas de gelo e, por consequência, com a atividade elétrica (Machado; Laurent, 2004; Goodman; Macgorman, 1986). A curva das tempestades SR (Figura 16c-d) apresenta maior frequência relativa no início, devido possuir maior quantidade de eventos; enquanto as curvas das tempestades com relâmpagos IN e NS apresentam em média maior (197,1 e 258,7x10⁻⁶s⁻¹, respectivamente), taxa de expansão que as SR. Os valores máximos e mínimos de cada uma das curvas apresentaram valores diferentes, o mínimo de IN (9,7x10⁻⁶s⁻¹) foi o maior valor dentre as três curvas, por outro lado o máximo de SR (736,1x10⁻⁶s⁻¹) foi o maior dentre as tempestades.

A Figura 16d mostra que as tempestades SR e IN apresentaram suas medianas (linha vermelha) menores que das tempestades NS, seguido pela caixa das tempestades IN. De certa forma, tempestades com a presença de relâmpagos possuem maiores taxas de expansão em comparação com as que não tem relâmpagos, sendo que as tempestades com relâmpagos NS possuem as maiores taxa de expansão. Isso está associado ao fato que essas tempestades serem constituídas de intensas correntes ascendentes em sua iniciação, o que favorece uma maior taxa no tempo, favorecendo a essas tempestades maiores durações em seu tempo de vida, correlacionando com o que foi encontrado neste trabalho (Machado *et al.*, 1998; Machado; Laurent, 2004; Mattos; Machado, 2011; Monteiro *et al.*, 2021).

Figura 16 – a) Frequência relativa (%) da área na maturação, b) boxplot da área na maturação, c) frequência relativa (%) da taxa de expansão do segundo tempo e d) boxplot da taxa de expansão do segundo tempo paras as tempestades: i) sem relâmpagos (SR); ii) com relâmpagos intra-nuvem (IN) e iii) com relâmpagos nuvem-solo (NS).



A temperatura de um SC é diretamente proporcional à formação de partículas de gelo; que consequentemente auxilia na produção de relâmpagos (Orville *et al.*, 1987; Dotzek *et al.*, 2005). Dessa forma, compreender o comportamento das temperaturas dessas tempestades entre os diferentes tipos de tempestades (com e sem relâmpagos) é essencial no estudo de SC. A Figura 17 mostra o valor mínimo da temperatura ao longo do ciclo de vida das tempestades para temperatura: média, mínima e mínima média do *kernel* de 9 *pixels*. As tempestades que possuem relâmpagos NS foram as que apresentaram menor temperatura (Figura 17). Em contrapartida, as tempestades que não possuem relâmpagos, possuem maiores temperaturas. Novamente, observamos que as tempestades com IN estando entre os resultados de NS e SR, demonstrando que as tempestades que apresentaram somente esse tipo de relâmpago não são mais frias que as NS. O que sustenta esses resultados são os valores estatísticos de cada conjunto de dados, sendo: máximos, mínimos e médios de cada uma das figuras (Figura 17a, c, e). A Figura 17a, que representa a variável de temperatura mínima (TMIN), apresentou o valor estatístico mínimo (193,5 K) e médio (212,1 K) menor para o NS dentre as curvas SR e IN. O padrão se manteve para a Figura 17c (TMIN9) e Figura 17e (TMED), apresentado as estatísticas mínimas (198,3 e 210,9 K, respectivamente) e médias (214,4 e 223,1 K, respectivamente) de cada conjunto menor para a curva de NS em comparação com as demais. Os demais gráficos boxplot (Figuras 17b, d e f) mostram de forma mais visual que as caixas e medianas dos dados da classe NS estão alinhadas com valores de temperatura mais baixos em comparação aos dados das classes IN e SR.

Machado *et al.* (2009), Ribeiro (2023), Mattos (2009) e Makowski *et al.* (2013) também documentaram que as tempestades com relâmpagos (NS e IN), tipicamente possuem menores valores de temperatura do que as tempestades sem relâmpagos. Ademais, tempestades que possuem ao menos um relâmpago são caracterizadas por correntes ascendentes intensas que elevam o topo das nuvens, resultando em um maior aprofundamento da tempestade. Isso conduz a uma diminuição da temperatura e a um aumento na concentração de hidrometeoros, promovendo uma produção mais intensa de relâmpagos (Makowski *et al.*, 2013).

Figura 17 – a) Frequência relativa (%) do valor mínimo da TMIN para SC, b) boxplot do mínimo valor da TMIN, c) frequência relativa (%) do mínimo valor da TMIN9, d) boxplot do valor mínimo da TMIN9, e) frequência relativa (%) do mínimo valor da TMED e f) d) boxplot do valor mínimo da TMED para as tempestades: i) sem relâmpagos (SR); ii) com relâmpagos intra-nuvem (IN) e iii) com relâmpagos nuvem-solo (NS).



•

Valor Mínimo de TMED, TMIN e TMIN9

5.3 Diferenças no ciclo de vida das tempestades da região Sudeste em função do tipo da tempestade

Aplicando o limiar de duração (<= 150 min) para a segunda etapa da seção 4.3, foram contabilizados: 287 SC para SR, 69 para IN e 592 para NS. A Figura 18 mostra a evolução da distribuição da área ao longo do ciclo de vida das tempestades. Os SC com relâmpagos NS (Figura 18c) se destacam por terem maior área em seus estágios: T1, MAT e T2 (5000 km² \leq mediana \geq 5000 km²). Provavelmente isso deve-se ao fato dessas tempestades apresentarem maior duração e possuírem correntes ascendentes mais intensas, como observado em estudos anteriores (Machado; Laurent, 2004). Enquanto isso, as tempestades SR e IN (Figura 18a e b, respectivamente), tiveram menor desenvolvimento nos estágios T1 a T2, atingindo valores da mediana menores que 5000 km². Os estágios INI e DIS, apresentaram os menores valores do ciclo de vida em todos os tipos (Figuras 18a, b e c), devido serem os instantes de gênese e fim, o que reflete em menor área dos SC. Os trabalhos de Mattos (2009), Mattos e Machado (2011) e Ribeiro (2023) encontraram os mesmos resultados dessa análise.

Figura 18 – Boxplot da área dos SC ao longo do ciclo de vida para diferentes tipos de tempestades: a) sem relâmpagos (SR), b) intra-nuvem (IN) e c) nuvem-solo (NS). Os estágios do ciclo de vida são separados em: i) INI (iniciação), ii) T1 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T2 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



As Figuras 19, 20 e 21 mostram o ciclo de vida dos SC para as temperaturas TMED, TMIN e TMIN9. De maneira geral foi observado que dentre essas três figuras os SC com relâmpagos NS são mais frios, seguido pelas tempestades IN. Esses resultados estão em consistência com os resultados documentados na seção 5.2.3, que demonstrou que SC com a presença de relâmpagos são mais frios que as tempestades com a presença de relâmpagos (Machado *et al.*, 2009; Mattos; Machado, 2011; Makowski *et al.*, 2013). A Figura 19 da TMED não houve grande discrepância entre os estágios do ciclo de vida entre os três grupos, apenas a curva das tempestades NS que apresentou as medianas (linha vermelha) com menores valores em comparação com as do SR e IN.

Dentre os ciclos de vida, o momento pré-maturação (T1) foi o que teve menor temperatura nas três figuras, sendo mais evidente nas Figuras 20c e 21c, no boxplot da curva dos SC com relâmpagos NS, chegando a mediana quase atingir a temperatura de 210 K (Figura 20c). Esse resultado, mostra que no momento antes do ápice do desenvolvimento de um SC (maturação, MAT), as tempestades têm máxima profundidade. O motivo que conduz a esse declínio de temperatura, com um mínimo antes da maturação, corresponde ao momento em que as tempestades possuem a maior quantidade de gelo. Isso ocorre devido aos movimentos ascendentes, que movimenta o conteúdo de água das nuvens subindo-os na atmosfera o que resulta em seu congelamento, resfriando ainda mais o topo das nuvens (Reynolds; Brook; Gouley, 1957). Em contrapartida, percebe-se que em todas as imagens (Figuras 19, 20 e 21) no momento da dissipação (DIS) as temperaturas voltam a aumentar, devido às correntes ascendentes e descendentes das nuvens se encontrarem e se inibirem, resultando na perda de força do SC que por fim resulta na dissipação. Esse comportamento foi também encontrado por Ribeiro (2023).

A análise do ciclo de vida térmico dos SC permite identificar tempestades potencialmente severas com base no comportamento da temperatura, especialmente durante o estágio pré-maturação. Monitorar as temperaturas no topo das nuvens, associadas à presença de gelo e à intensidade dos movimentos ascendentes, pode ajudar a prever eventos mais severos, como relâmpagos NS, com maior antecedência.

Figura 19 – Boxplot da temperatura média (TMED) dos SC ao longo do ciclo de vida para diferentes tipos de tempestades: a) sem relâmpagos (SR), b) intra-nuvem (IN) e c) nuvem-solo (NS). Os estágios do ciclo de vida são separados em: i) INI (iniciação), ii) T1 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T2 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



Figura 20 – Boxplot da temperatura mínima (TMIN) dos SC ao longo do ciclo de vida para diferentes tipos de tempestades: a) sem relâmpagos (SR), b) intra-nuvem (IN) e c) nuvem-solo (NS Os estágios do ciclo de vida são separados em: i) INI (iniciação), ii) T1 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T2 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



Figura 21 – Boxplot da temperatura mínima média do *kernel* de 9 *pixels* (TMIN9) dos SC ao longo do ciclo de vida para diferentes tipos de tempestades: a) sem relâmpagos (SR), b) intra-nuvem (IN) e c) nuvem-solo (NS). NS Os estágios do ciclo de vida são separados em: i) INI (iniciação), ii) T1 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T2 (estágio intermediário entre maturação) e v) DIS (dissipação).



A taxa de expansão inicial de um SC é vital para a formação de tempestades intensas, sendo assim os demais estágios (T1, MAT, T2, DIS) do ciclo de vida foram dispensados, a fim de manter apenas a análise da iniciação (INI) para os três tipos de tempestades. O comportamento da taxa de expansão inicial de cada tempestade, com ou sem relâmpagos é mostrado na Figura 22. Nota-se uma maior taxa de expansão inicial para as tempestades com NS e IN; possuindo as medianas os valores de $300 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e $240 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Enquanto, os SC sem relâmpagos apresentaram taxa menor que $200 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Esse resultado já era previsto devido ao comportamento da seção (5.2.2.), pois já demonstrava que os SC com a presença de relâmpagos são os que detêm a maior taxa de expansão. Mais uma vez, percebe-se a importância do papel das correntes internas (ascendentes e descendentes) nessas tempestades com relâmpagos, que além de retroalimentar esses sistemas fornecem rápidas e intensas expansão, resultando nessa alta taxa de expansão em SC com a presença de relâmpagos (Mattos; Machado, 2011).

Figura 22 – Boxplot da taxa expansão para a iniciação (INI) dos SC em comparação aos diferentes tipos de tempestades: i) sem relâmpagos (SR), ii) intra-nuvem (IN) e iii) nuvem-solo (NS).



Iniciação da Taxa de Expansão para os diferentes tipos de relâmpagos

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou as tempestades que ocorreram no Brasil entre 2013 e 2017. Para isto foi utilizado uma combinação de um algoritmo de rastreamento de tempestades aplicados para os dados do satélite GOES-13 e informações da rede de relâmpagos em superfície denominada ENTLN. A análise da distribuição espacial e temporal das tempestades para todo Brasil contou com um total de 54.762 tempestades. Em contrapartida, como a rede de relâmpagos ENTLN possui uma melhor eficiência de detecção na região sudeste, as análises que envolveram os dados de relâmpagos se restringiram a essa região, totalizando assim 3634 tempestades.

Através dos critérios utilizados nesse trabalho para identificar os SC, foi constatado que o local que mais ocorrem tempestades foi a região norte; seguido pela região centro-oeste. Devido essas regiões apresentarem as maiores áreas do país, a frequência de formação de SC é influenciada pelo tamanho da região, induzindo esse resultado. Assim o perfil de densidade das localizações das gêneses dos SC foi realizado, com a finalidade de normalizar o estudo dentre as regiões do país, ressaltando a imponência da região norte na maior concentração de SC. A posição da floresta amazônica na região é o principal motivo desse resultado, que fornece umidade além de seu clima quente e tropical o que é mostrado no fluxograma abaixo.



Figura 23 - Fluxograma dos principais resultados das análises dos SC para cada região do Brasil.

As análises do ciclo mensal e diário mostraram que os SC ocorrem preferencialmente nos meses DJF e no final da tarde e início da noite, respectivamente. Os SC possuem maior frequência de ocorrência no verão e menor no inverno. Em relação ao ciclo diário, as maiores frequências ocorrem entre os horários 1800 e 2100 UTC; período do dia em que a atmosfera se encontra mais instável.

O resultado da análise morfológica mais interessante foi para o instante da maturação para a área dos SC. O estudo mostrou a ocorrência de uma maior frequência de tempestades possuindo áreas entre 1.600 km² e 3.200 km². As tempestades com as maiores áreas ocorrem na região sul (4.238,5 km²), mesmo tendo o menor índice de gêneses dentre as demais regiões, indicando que o local é o berço dos maiores sistemas convectivos.

Em termos da relação entre as propriedades das tempestades e os diferentes tipos de relâmpagos, as tempestades com presença de relâmpagos NS, são as maiores e mais intensas dentre as tempestades analisadas. Ou seja, tempestades com relâmpagos NS possuem temperaturas menores, taxa de expansão maior, maior duração e maior área no momento da MAT, do que as tempestades IN e SR. Em adição, foi documentado que as tempestades com presença de relâmpagos (NS+IN), se sobressaem nas análises em relação as tempestades sem relâmpagos (SR), mostrando que tempestades com a presença de relâmpagos são mais intensas que as sem relâmpagos.

Figura 24 – Fluxograma dos principais resultados das análises dos tipos de relâmpagos em relação com SC para região sudeste.



Este trabalho é de suma importância para o Brasil devido à abrangência e profundidade de suas análises sobre as tempestades que impactam o país. Primeiramente, ele oferece uma compreensão detalhada da distribuição espacial e temporal dos sistemas convectivos (SC), permitindo identificar as regiões e períodos mais propensos a eventos severos. Esse conhecimento é crucial para a formulação de políticas públicas e estratégias de mitigação de desastres naturais, especialmente em um país com dimensões continentais como o Brasil.

Outro ponto relevante é a análise da relação entre as propriedades das tempestades e os diferentes tipos de relâmpagos. Ao demonstrar que tempestades com relâmpagos NS são mais intensas, o estudo fornece subsídios para o aprimoramento de sistemas de monitoramento e previsão, com impactos diretos na segurança da população e na proteção de infraestruturas críticas.

Espera-se com a evolução dos sensores abordo de satélites (por exemplo GLM abordo do GOES-16), existe a possibilidade de uma melhor identificação dos SC com melhor refinamento e melhor quantidade de dados de relâmpagos para todo o Brasil. Para estudos futuros seria interessante avaliar as tempestades utilizando os sensores imageadores e de relâmpagos abordo dos satélites geoestacionários da terceira geração.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, J. M. B.; BARBOSA, A. C. B.; SILVA, E. M.; JUNIOR, F. C. V.; SILVA, M. L.; SANTOS, A. C. S.; LIRA, M. A. T.; SOMBRA, S. S. Oscilações intrassazonais convectivas entre as regiões índico-Pacífico e o Nordeste do Brasil: Algumas características observacionais e de modelagem. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 193-206, 2018.

AMORATI, R.; ALBERONI, P.; LEVIZZANI, V.; NANNI, S. IR-based satellite and radar rainfall estimates of convective storms over northern Italy. **Meteorological Applications**, v. 7, n. 1, p. 1-18, 2000.

ANSELMO, E. M.; MACHADO, L. A. T.; SCHUMACHER, C.; KILADIS, G. N. Amazonian mesoscale convective systems: Life cycle and propagation characteristics. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 7, p. 3968-3981, 2021.

ASHLEY, W. S.; MOTE, T. L.; DIXON, P. G.; TROTTER, S. L.; POWELL, E. J.; DURKEE, J. D. Distribution of mesoscale convective complex rainfall in the United States. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 12, p. 3003-3017, 2003.

CAMPOS, C. R. J.; EICHHOLZ, C. W. Características físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. Revista Brasileira de Geofísica, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011.

CARDOSO, I.; PINTO Jr, O.; PINTO, I. R. C. A.; HOLLE, R. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v. 135-136, p. 374-379, 2014.

COHEN, J. C.; SILVA DIAS, M. A.; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.

COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; GONÇALVES, W. A.; MATTOS, E. V. Mesoscale conevctive sytems associated to extreme rainfall events on Brazil Northeast Semiarid. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 1, p. 317-328, 25 mar. 2019. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/30449. Acesso em: 30 jul. 2024. http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_317_328.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and cloud dynamics**. San Diego: Academic Press, Inc. International Geophysics Series, v. 44, 1989.

CONCEIÇÃO, R. P.; ANDRÉ, I. R. N.; AZEVEDO, T. S. Espacialização das descargas elétricas atmosféricas no estado de São Paulo para os anos de 2005-2006, e suas consequências. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, 2013. DOI: 10.5380/abclima.v13i0.30971. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13715. Acesso em: 23 maio. 2024.

DONG, W.; ZHAO, M.; HARRIS, L.; CHENG K.; ZHOU, L.; RAMASWAMY, V. Contrasting Response of Mesoscale Convective Systems Occurrence Over Tropical Land and Ocean to Increased Sea Surface Temperature. **Geophysical Research Letters**, v. 51, n. 21, p. 1-11, 2024. DOTZEK, N.; RABIN, R. M.; CAREY, L. D.; MACGORMAN, D. R.; MCCORMICK, T. L.; DEMETRIADES, N. W.; MURPHY, M. J.; HOLLE, R. L. Lightning activity related to satellite and radar observations of a mesoscale convective system over Texas on 7–8 April 2002. **Atmospheric Research**, v. 76, n. 1-4, p. 127-166, 2005.

DURKEE, J. D.; MOTE, T. L.; SHEPHERD, J. M. The contribution of mesoscale convective complexes to rainfall across subtropical South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 17, p. 4590-4605, 2009.

DURKEE, J. D.; MOTE, T. L. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 30, n. 3, p. 418-431, 2010.

ESMAILI, R. B.; TIAN, Y.; VILA, D. A.; KIM, K. M. A Lagrangian analysis of cold cloud clusters and their life cycles with satellite observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 121, ed. 11, p. 723-738, 2016.

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A new look into the South America precipitation regimes: observation and forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 873, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos13060873. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/13/6/873. Acesso em: 19 maio. 2024.

FRITSCH, J. M.; KANE, R. J.; CHELIUS, C. R. The contribution of mesoscale convective weather systems to the warm-season precipitation in the United States. Journal of Applied v. 25, Meteorology and Climatology, n. 10, p. 1333-1345, 1986. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C1333:TCOMCW%3E2.0.CO;2. Disponível https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/25/10/1520em: 0450_1986_025_1333_tcomcw_2_0_co_2.xml. Acesso em: 11 maio. 2024.

GOODMAN, S. J.; MACGORMAN, D. R. Cloud to ground lightning activity in Mesoscale Complexes Convective. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 12, p. 2320-2328, 1986.

GRECO, S.; SWAP, R.; GARSTANG, M.; ULANSKI, S.; SHIPHAM, M.; HARRISS, R. C.; TALBOT, H. R.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, A. P. Rainfall and surface kinematic conditions over central Amazonia during ABLE 2B. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 95, n. D10, p. 17001-17014, 1990.

HOUZE, R. A. Structure and dynamics of a tropical squall–line system. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 12, p. 1540-1567, 1977. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105%3C1540:SADOAT%3E2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/105/12/1520-0493_1977_105_1540_sadoat_2_0_co_2.xml?tab_body=pdf. Acesso em: 11 maio. 2024.

HOUZE JR, R. B. Cloud dynamics. San Diego: Academic Press, 1993. 573p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Áreas Territoriais**, [2022]. Disponível em:https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html. Acesso em: 17 maio. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**, [2022]. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/panorama. Acesso em: 17 maio. 2024.

JACINTO, L. V.; ELOI, W. M.; SAKAMOTO, M. S. Características Climatológicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 69-80, 2022.

LAING, A. G.; FRITSCH, J. M.; NEGRI, A. J. Contribution of mesoscale convective complexes to rainfall in Sahelian Africa: Estimates from geostationary infrared and passive microwave data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 7, p. 957-964, 1999.

LAING, A. G.; FRITSCH, J. M. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 8, p. 2756-2776, 2000.

LYRA, G. B.; JUNIOR, O. J. F.; ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas State, Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 13, p. 3546-3558, 2014.

MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H. The convective system area expansion over Amazonia and its relationships with convective system life duration and high-level wind divergence. **Monthly weather review**, v. 132, n. 3, p. 714-725, 2004.

MACHADO, L. A.; LIMA, W. F.; PINTO JR., O.; MORALES, C. A. Relationship between cloud-to-ground discharge and penetrative clouds: A multi-channel satellite application. **Atmospheric Research**, v. 93, n. 1-3, p. 304-309, 2009.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998.

MADDOX, Robert A. Mesoscale convective complexes. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 61, n. 11, p. 1374-1387, 1980.

MAKOWSKI, J. A.; MACGORMAN, D. R.; BIGGERSTAFF, M. I.; BEASLEY, W. H. Total lightning characteristics relative to radar and satellite observations of Oklahoma Mesoscale Convective Systems. **Monthly Weather Review**, v. 141, n. 5, p. 1593-1611, 2013.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.

MATTHEE, R.; MECIKALSKI, J. R. Geostationary infrared methods for detecting lightningproducing cumulonimbus clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 12, p. 6580-6592, 2013. DOI: https://doi.org/10.1002/jgrd.50485. Disponível em: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jgrd.50485. Acesso em: 11 maio. 2024.

MATTOS, E. V. **Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas**. 2009. 245 p. (INPE-15767-TDI/1510). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T. Cloud-to-ground lightning and Mesoscale Convective Systems. **Atmospheric Research**, v. 99, n. 3-4, p. 377-390, 2011.

MOLION, L. C. B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 107-117, 1987.

MONTEIRO, J. D. R.; MATTOS, E. V.; LIMA, W. F. A. Propriedades Físicas e Elétricas de Tempestades na Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41700. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/41700. Acesso em: 15 abr. 2024.

MONTEIRO, J. D. R. **Relação entre relâmpagos e as propriedades físicas das tempestades**. 2022. 68 p. Tese (Trabalho Final de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.

MORAES, F. D. S.; AQUINO, F. E.; MOTE, T. L.; DURKEE, J. D.; MATTINGLY, K. S. Atmospheric characteristics favorable for the development of mesoscale convective complexes in southern Brazil. **Climate Research**, v. 80, n. 1, p. 43-58, 2020.

MORALES, C. A; FREDIANE, M. E.; MACHADO, L. B. T. Thunderstorm characteristics during the 2002 RACCI/LBA field campaign. In: CONFERENCE ON METEOROLOGICAL APPLICATIONS OF LIGHTNING DATA, 2005, Long Beach. Anais... Long Beach: American Meteorological Society, 2004. Disponível em: <<u>http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/85605.pdf</u>>. Acesso em: 30 jul. 2024.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. Cloud-to-ground lightning flash climatology of State of São Paulo: 1999-2004. In: **VIII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)**, 2005, São Paulo/SP. Proceedings of the VIII International Symposium on Lightning Protection. São Paulo/SP: Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE/USP), v. 1. p. 120-125, 2005.

NETO, J. L. S. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 43-60, 2005.

OGAWA, T. Lightning currents. In: Volland, H. ed. Handbook of atmospheric electrodynamics. Boca Raton: CRC Press. v. 1, Cap. 4, p. 93-136, 1995.

ORVILLE, R. E.; WEISMAN, R. A.; PYLE, R. B.; HENDERSON, R. W.; ORVILLE JR., R. E. Cloud-to ground lightning flash characteristics from June 1984 through May 1985. Journal of Geophysical Research, v. 92, n. D5, p. 5640-5644, 1987.

OSCAR - Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. **Satellite: GOES-13** [2024]. Disponível em:https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/goes_13. Acesso em: 14 maio. 2024.

PEREIRA FILHO, A. J.; CARBONE, R. E.; TUTTLE, J. D.; KARAM, H. A. Convective rainfall in Amazonia and adjacent tropics. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 5, n. 2, p. 137-161, 2015.

PINTO Jr., O.; PINTO, I. R. C. B. **Tempestades e relâmpagos no Brasi**l - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

PINTO Jr, O. A arte da guerra contra os raios. São Paulo: Oficina de Textos, p. 80, 2005.

PINTO JR., O; PINTO, I. R. C. A de. Brasil Campeão Mundial de Raios. Artliber, ed. 1, p. 88, 2021.

PREISSER, G. B. **Distribuição espacial e temporal de relâmpagos no Estado de Minas Gerais**. Monografia (graduação em Ciências Atmosféricas). Universidade Federal de Itajubá -MG, p. 49, 2019.

REHBEIN, A.; AMBRIZZI, T.; MECHOSO, C. R. Mesoscale convective systems over the Amazon basin. Part I: climatological aspects. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 1, p. 215-229, 2018.

REHBEIN, A.; AMBRIZZI, T. Mesoscale convective systems over the Amazon basin in a changing climate under global warming. **Climate Dynamics**, v. 61, n. 3, p. 1815-1827, 2023.DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-022-06657-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-022-06657-8#citeas. Acesso em: 12 maio. 2024.

REYNOLDS, S. E.; BROOK, M.; GOURLEY, F. Thunderstorm charge separation. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 14, n. 5, p. 426-436, 1957.

RIBEIRO, J. G. M. **Caracterização das tempestades elétricas na região Sudeste do Brasil**. 2023. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

SALDANHA, T. A. Análise da Correlação de Desligamento de Linhas Aéreas de Transmissão por Descargas Atmosféricas. 2018. 165 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2018.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 4, p. 1290-1309, 2007.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 133-150, 1987.

SILVA DIAS, M. A. F. Complexos convectivos de mesoescala sobre a região sul do Brasil. **Climanálise Especial**, v. 1, p. 173-179, 1996.

SMITHSON, P.; ADDISON, K.; ATKINSON, K. Fundamentals of the physical environment. 4.ed. Londres:Routledge, 2013. 792 p.

SIQUEIRA, J. R.; MARQUES, V. S. Occurrence frequencies and trajectories of mesoscale convective systems over southeast Brazil related to cold frontal and non-frontal incursions. **Australian Meteorological Magazine**, v. 57, n. 4, p. 345-357, 2008.

SIQUEIRA, J. R.; MARQUES, V. S. Tracking and short-term forecasting of mesoscale convective cloud clusters over southeast Brazil using satellite infrared imagery. Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science, v. 71, n. 1, p. 1-16, 2021.

SOULA, S.; CHAUZY, S. Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. **Atmospheric research**, v. 56, n. 1-4, p. 355-373, 2001.

TADESSE, A.; ANAGNOSTOU, E. N. Characterization of warm season convective systems over US in terms of cloud to ground lightning, cloud kinematics, and precipitation. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 1, p. 36-46, 2009.

UMAN, M. A.; KRIDER, E. P. Natural and artificially initiated lightning. Science, v. 246, n. 4929, p. 457-464, 1989.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. Michael. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, n. D8, p. 9591-9613, 1987.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. Universidade Federal de Viçosa. Imprensa Universitária.Viçosa- Minas Gerais, p. 449, 1991.

VILA, D. A.; MACHADO, A. T.; LAURENT, H. VELASO, I. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: Methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 2, p. 233-245, 2008.

YAMASAKI, J.; CAMARGO, E.; FISCH, G. **Estudo sobre a ocorrência de relâmpagos no Vale do Paraíba para o verão do ano de 2006**. São José dos Campos: X Encontro latino Americano de Iniciação Científica, [2006]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267153204_Estudo_sobre_a_ocorrencia_de_relamp agos_no_Vale_do_Paraiba_para_o_verao_do_ano_de_2006. Acesso em: 10 maio. 2024.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2006. 483 p.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. New York: Academic Press, 1977. 467 p.

WANG, J.; KREJCI, R.; GIANGRANDE, S. *et al.* Amazon boundary layer aerosol concentration sustained by vertical transport during rainfall. **Nature**, v. 539, n. 7629, p. 416-419, 2016. DOI: doi.org/10.1038/nature19819. Disponível em: https://www.nature.com/articles/nature19819#citeas. Acesso em: 09 maio. 2024

ZHOU, J.; LAU, K-M. Does a monsoon climate exist over South America?. Journal of climate, v. 11, n. 5, p. 1020-1040, 1998.