UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - POSMARH

CARACTERIZAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

JOÃO GABRIEL MARTINS RIBEIRO

Itajubá, MG, Brasil 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - POSMARH

JOÃO GABRIEL MARTINS RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte das exigências obrigatórias para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos **Área de concentração**: Meio Ambiente e Recursos Hídricos **Vinculação:** APQ-00884-18 (FAPEMIG) — DPI 785 (Interno)

> Itajubá, MG, Brasil 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E **RECURSOS HÍDRICOS - POSMARH**

CARACTERIZAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

JOÃO GABRIEL MARTINS RIBEIRO

de Mestrado Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte das exigências obrigatórias para obtenção do título de Mestre.

data: 16/02/2023

À Banca Examinadora composta pelos membros:

Eurique Vieira Matho Dr. Enrique Vieira Mattos (Orientador) – UNIFEI

Dr. Weber Andrade Gonçalves - UFRN

Michelle S. Rebrita

Dra. Michelle Simões Reboita - UNIFEI

Itajubá, MG, Brasil 2023

Dedico à minha esposa Alana Vieira e à minha filha, Arya Ribeiro, que me ensinam diariamente o que é felicidade e amor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que me concedeu forças e me deu capacidade de superar diversos desafios durante esse período como mestrando. Sem Ele não seria possível terminar este trabalho nem ao menos começar.

Quero agradecer à minha família: Minha esposa Alana Vieira, que sempre me ajuda nos momentos mais difíceis durante minha trajetória e a minha filha Arya Ribeiro, que com toda simplicidade me faz encontrar uma razão para ser melhor a cada dia. Foram essas bases que me mantiveram firmes durante esse percurso. Agradeço aos meus pais: José Raimundo e Maria Geni, sendo meus maiores exemplos de honestidade, perseverança, humildade e dignidade.

Agradeço aos meus "irmãos" de vida: Gabriel Alves, George Pereira, Washington Fernando, Willian Fernando de Melo e Thales Henrique Campos (*In memoriam*) que me acompanham nessa trajetória, incentivando e aconselhando nos momentos difíceis, agradeço por serem verdadeiros irmãos de alma.

Agradeço também a Vívian Ribeiro e William que sempre foram exemplos de dedicação, não somente na área acadêmica, mas na vida do dia-a-dia. Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, ao meu orientador, professor Doutor Enrique Vieira Mattos, que me orientou com maestria e compreensão, me direcionando para ser um melhor cientista, pesquisador e como pessoa. Agradeço também à professora Doutora Michelle Simões Reboita que mesmo sem ser minha orientadora, me permitiu participar de várias pesquisas e oportunidades acadêmicas.

Por fim agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto número APQ-00884-18, e com registro DPI 785 na UNIFEI o qual este trabalho está inserido. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

"And if you feel it, it's fine I give you everything that's mine I give you my heart and my precious time"

(Unconditional I – Arcade Fire)

RESUMO

RIBEIRO, João Gabriel Martins. **Caracterização das Tempestades Elétricas na Região Sudeste do Brasil**. 2023. 106 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

Anualmente, tempestades que ocorrem no Sudeste do Brasil geram diversos transtornos à sociedade. Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) geram perdas materiais e vidas humanas, por meio da produção de alagamentos, queda de árvores, granizos e relâmpagos. A distribuição espacial de relâmpagos e as propriedades destas tempestades possuem grande variação dentro desta região. No entanto, ainda há uma carência na literatura sobre o comportamento dos relâmpagos intranuvem e sua relação com as propriedades das tempestades. Assim, o presente trabalho visa caracterizar as ocorrências de relâmpagos entre 2015 e 2021 e avaliar as diferenças físicas e elétricas nos SCM com e sem relâmpagos entre 2015 e 2017 na região Sudeste do Brasil. Para isso foram utilizadas informações do satélite meteorológico Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-13), com informações de relâmpagos da Rede Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN). A identificação e rastreamento dos SCM foi realizada empregando o algoritmo Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC). A primeira etapa do trabalho consistiu na avaliação da distribuição espaço-temporal dos relâmpagos. Os máximos de relâmpagos ocorrem próximo às regiões montanhosas de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (IN: 80 relâmpagos ano⁻¹ km⁻² e NS-: 18 relâmpagos ano⁻¹ km⁻²), concentrados a partir do período da tarde (12:00 hora local), com máximo às 16:00 hora local (47 mil, 2300 e 73 ocorrências de relâmpagos IN, NSe NS+), e principalmente nas estações de primavera e verão (valores máximos de: 4011, 1025 e 35 relâmpagos IN, NS- e NS+). O pico de corrente apresenta máximos na primavera e outono (~40 kA para os NS+) e menor quantidade no período de inverno (~20 kA dos NS-). Na segunda etapa, foram avaliadas as diferenças físicas e elétricas entre os SCM com e sem relâmpagos. As principais diferenças físicas e elétricas entre estes grupos mostram que os SCM sem relâmpagos possuem menor área (diferença de 1920 km²), duração (entre 30 e 60 min), taxa de expansão (40 x 10⁻⁶ s⁻¹) e temperaturas mais altas (diferença de 11,5 K) que os SCM com relâmpagos. O comportamento do ciclo de vida dos relâmpagos mostra maiores ocorrências momentos antes da maturação (máximos de IN: 116, NS-: 21 e NS+: 0,75 ocorrências por 30 min). Estas análises são importantes para melhorar a previsibilidade destas tempestades e consequentemente a tomada de decisão, proporcionando a minimização dos prejuízos ligados aos efeitos danosos dessas tempestades.

Palavras-chave: Relâmpagos, Sistemas Convectivos de Mesoescala, ForTrACC

ABSTRACT

RIBEIRO, João Gabriel Martins. Characterization of Electrical Thunderstorms in the Southeast Region of Brazil. 2023. 106 f. Master of Science (Master in Environment and Water Resources – Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2023.

Annually, storms that occur in the Southeast of Brazil generate several disturbances to society. The Mesoscale Convective Systems (MCS) generate material losses and human lives, through the production of flooding, falling trees, hail and lightning. The spatial distribution of lightning and the properties of these storms vary greatly within this region. However, there is still a lack in the literature on the behavior of intracloud lightning and its relationship with the properties of storms. Thus, the present work aims to characterize the occurrences of lightning between 2015 and 2021 and to evaluate the physical and electrical differences in the MCS with and without lightning between 2015 and 2017 in the Southeast region of Brazil. For this, information from the meteorological satellite Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-13) was used, with lightning information from the Earth Network's Total Lightning Network (ENTLN). The identification and tracking of MCS was carried out using the algorithm Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC). The first stage of the work consisted in evaluating the space-time distribution of lightning. Maximum of lightning occur near the mountainous regions of São Paulo, Minas Gerais and Rio de Janeiro (IC: 80 occurrences year⁻¹ km⁻² and -CG: 18 year⁻¹ km⁻²), concentrated from the period of afternoon (12:00 local time), with a maximum at 16:00 local time (47,000, 2,300 and 73 occurrences of IC, -CG and +CG), and mainly in the spring and summer (maximum values of 4011, 1025 and 35 flashes IC, -CG and +CG). The current peak shows maximums in spring and autumn (~40 kA for the +CG) and a lower amount in the winter period (~20 kA for the -CG). In the second stage, the physical and electrical differences between the MCS with and without lightning were evaluated. The main physical and electrical differences between these groups show that the MCS without lightning has a smaller area (difference of 1920 km²), duration (between 30 and 60 min), expansion rate (40 x 10⁻⁶ s⁻¹) and higher temperatures (11.5 K difference) than MCS with lightning. The life cycle behavior of lightning shows higher occurrences moments before maturation (maximum of IC: 116, -CG: 21 and +CG: 0.75 occurrences 30 min⁻¹). These analyses are important to improve the predictability of these storms and consequently the decision-making, providing the minimization of damages linked to the harmful effects of these storms.

Keywords: Lightning, Mesoscale Convective Systems, ForTrACC

LISTA DE FIGURAS

Figura 5 - Fluxograma da metodologia aplicada no presente estudo......32

Figura 7 – Densidade de relâmpagos anuais nuvem-solo negativo (NS-, painéis à esquerda) e positivo (NS+, painéis à direita) (ocorrências por km²) da rede Earth Networks Total Lightning Network para a região Sudeste do Brasil para os anos de (a-g) 2015 a 2021. O valor numérico indicado na parte inferior direita de cada figura representa o total de relâmpagos daquele ano.

Figura 10 - Distribuição espacial média do pico de corrente (kA) (2015-2021) dos relâmpagos: (a) Nuvem-Solo negativo (NS-) e (b) Nuvem-Solo positivo (NS+) da rede Earth Networks Total Lightning Network para a região Sudeste do Brasil. O valor numérico indicado na parte inferior direita de cada figura representa o valor médio de pico de corrente para a região Sudeste....41 **Figura 17 -** Ciclo diurno (Hora Local) da quantidade (relâmpagos IN, curva preta; NS+, curva vermelha e NS-, curva azul) e pico de corrente (PC-: nuvem-solo negativo, curva azul tracejada e PC+: nuvem-solo positivo, curva vermelha tracejada) dos relâmpagos que ocorreram na região Sudeste do Brasil detectados pela rede Earth Networks Total Lightning Network.49

Figura 18 - Primeiros cinco hotspots (municípios com maiores valores de relâmpagos anuais) de relâmpagos: (a) intranuvem (IN), (b) nuvem-solo negativo (NS-) e (c) nuvem-solo positivo (NS+) da rede Earth Networks Total Lightning Network para a região Sudeste do Brasil. Os valores nas caixas representam a quantidade de relâmpagos (ocorrências por km² por ano). .51

Figura 21 - Ciclo de vida da área (km²) dos SCM: (a) sem relâmpagos e (b) com relâmpagos para cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação),

iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50 e a área em cinza-claro o percentil 90.

Figura 27 - Ciclo de vida do pico de corrente médio (em kA) dos relâmpagos: nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha) para os cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).

Figura 28 - Distribuição espacial do local de gênese dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) na região Sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017 identificados pelo algoritmo ForTraCC separados naquelas tempestades: i) sem relâmpagos (círculos azuis), com relâmpagos ii) intranuvem (IN, triângulos vermelhos) e (iii) nuvem-solo (NS, estrelas roxas).

Figura 29 - Histograma de frequência relativa (%) da duração (em horas) dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM): (a) sem relâmpagos, (b) relâmpagos intranuvem (IN) e (c) relâmpagos nuvem-solo (NS) para a região sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017.67

Figura 31 - (a) Histograma de frequência relativa (%) e (b) boxplot e violinplot da taxa de expansão inicial (10^{-6} s^{-1}) dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM): sem relâmpagos (linhas azuis), relâmpagos intranuvem (IN, linhas vermelhas) e relâmpagos nuvem-solo (NS, linhas roxas) para a região sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017. Os valores mostrados na legenda da Figura a) representa o valor médio da propriedade sendo analisada......70

Figura 33 - Comparação do ciclo de vida da quantidade de relâmpagos (em ocorrências 30 min⁻¹): intranuvem (IN, linha preta), nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha), para tempestades que geraram apenas relâmpagos IN e NS, respectivamente. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).

......74

Figura 34 - Comparação do ciclo de vida da densidade de relâmpagos (em ocorrências km⁻² 30 min⁻¹): intranuvem (IN, linha preta), nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha), para tempestades que geraram apenas relâmpagos IN e NS, respectivamente. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).

Figura 35 - Comparação do ciclo de vida do pico de corrente médio (em kA) dos relâmpagos: nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha), para tempestades que geraram apenas relâmpagos IN e NS, respectivamente. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio

Figura 36 - Comparação do ciclo de vida da área (km²) para os SCM: (a) apenas com relâmpagos intranuvem (IN) e apenas relâmpagos nuvem-solo (NS) durante o ciclo de vida. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). A linha

Figura 37 - Comparação do ciclo de vida da taxa de expansão (10^{-6} s^{-1}) para os SCM: (a) com relâmpagos, (b) apenas com relâmpagos intranuvem (IN), apenas relâmpagos nuvem-solo: (c) nuvem-solo negativo (NS-) e (d) nuvem-solo positivo (NS+) durante o ciclo de vida. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50, a área em cinza-claro o percentil 90 e a linha vermelha contínua representa taxa de expansão de 0 10^{-6} s^{-1}79

LISTA DE TABELAS

Fabela 1- Lista das características dos SCM estimadas pelo Algoritmo ForTraCC processada	S
este trabalho2	5

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cb	-	Cumulonimbus
CC	-	Célula Convectiva
ССМ	-	Complexo Convectivo de Mesoescala
CPTEC	-	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DIS	-	dissipação
EN	-	entre-nuvem
ENOS	-	El Niño-Oscilação Sul
ENTLN	-	Earth Networks Total Lightning Network
ES	-	Espírito Santo
ForTraCC	-	Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters
GLD360	-	Vaisala Global Lightning Dataset 360
GOES	-	Geostationary Operational Environmental Satellite
HL	-	Hora Local
IN	-	intranuvem
INI	-	iniciação
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LF	-	Low Frequency
LI	-	Linha de Instabilidade
LINET	-	Lightning Detection Network
LIS	-	Lightning Imaging Sensor
LLS	-	Lightning Locating System
MAT	-	Maturação
MG	-	Minas Gerais
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
NS	-	nuvem-solo
NS-	-	nuvem-solo negativo
NS+	-	nuvem-solo positivo
P50	-	percentil 50
P90	-	percentil 90
PC-	-	pico de corrente negativo
PC+	-	pico de corrente positivo

RINDAT	-	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas
		Atmosféricas
RJ	-	Rio de Janeiro
RMSP	-	Região Metropolitana de São Paulo
SC	-	Sistema Convectivo
SCA	-	Sistema Convectivo Alongado
SCM	-	Sistema Convectivo de Mesoescala
SN	-	solo-nuvem
SP	-	São Paulo
STARNET	-	Sferics Timing and Ranging Network
T2	-	tempo 2
T4	-	tempo 4
Tmed	-	Temperatura média
Tmin	-	Temperatura mínima do kernel 9
Tmin9	-	Temperatura mínima
TRMM	-	Tropical Rainfall Measuring Mission
VHF	-	Very High Frequency
WWLLN	-	World-Wide Lightning Location Network
ZCAS	-	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 HIPÓTESE	15
3 OBJETIVO	15
3.1 Objetivos Específicos	15
4 REFERENCIAL TEÓRICO	16
5 DADOS E METODOLOGIA	22
5.1 Região de Estudo	22
5.2 Dados de Relâmpagos da rede ENTLN	23
5.3 Dados do satélite GOES-13	24
5.4 Algoritmo ForTraCC	24
5.5 Caracterização Espacial e Temporal dos Relâmpagos	29
5.6 Avaliação das propriedades físicas e elétricas das tempestades	29
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
6.1 Distribuição espacial e temporal dos relâmpagos na região Sudeste do Brasil	33
6.1.1 Distribuição Anual dos Relâmpagos	33
6.1.2 Ciclo Anual dos Relâmpagos	42
6.1.3 Ciclo Diurno dos Relâmpagos	46
6.1.4 Hotspots de Relâmpagos no Sudeste do Brasil	49
6.2 Relação Entre as Propriedades dos Sistemas Convectivos de Mesoescala e os Relâmpagos	52
6.2.1 Ciclo de Vida das Tempestades Com e Sem Relâmpagos	52
6.2.2 Análise das Tempestades: Sem Relâmpagos, IN e NS	65
7 CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A região Sudeste do Brasil sofre frequentemente com a ocorrência de desastres naturais decorrentes de eventos de precipitação intensa, principalmente em grandes centros urbanos (MARENGO *et al.*, 2020a, 2020b). Dentre tais danos, destacam-se os alagamentos, enxurradas, destruição de carros, casas e vias de transporte terrestres decorrentes da queda de granizo, dentre outros (TOMINAGA *et al.*, 2009; JACOBI *et al.*, 2013; NOBRE *et al.*, 2016; MARTINS *et al.*, 2017). Conforme o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013) a região Sudeste concentrou 34% das inundações entre 1991 e 2012 com relação às demais regiões e atingindo mais de 6 milhões de pessoas, registrando 175 mortes. O Sudeste concentra ainda os maiores índices de alagamentos do Brasil, cerca de 43% de todos os registros, com 1,5 milhão de atingidos e 21 mortes dentro desse período. O Estado do Rio de Janeiro é o Estado onde mais ocorreram mortes, onde foram registrados 316 óbitos relacionados a desastres naturais no geral. Recentemente, desastres em grandes cidades brasileiras foram registrados, principalmente em cidades do Sudeste do Brasil (PICOLO, 2018; VEMADO; PEREIRA FILHO, 2016) decorrentes de tempestades. Estes desastres, desde 2010, somam perdas econômicas na ordem de US\$3.365.500 no país, e acarretaram a morte de 1.559 pessoas (CEPED, 2013).

Eventos de precipitação intensa, são provocados por nuvens de tempestades, que geralmente também podem produzir alta taxa de relâmpagos. O Brasil, devido à sua localização geográfica e extensão territorial, é uma das regiões que apresentam as maiores taxas de relâmpagos do mundo, em especial na região Sudeste (PINTO; PINTO JR., 2003; ALBRECHT *et al.*, 2016). Estima-se que no Brasil ocorram anualmente aproximadamente 96 milhões de relâmpagos (ODA *et al.*, 2022). Diversos setores da economia são afetados pela ocorrência de relâmpagos, como o setor de geração, distribuição e transmissão de energia elétrica e de telefonia. Anualmente os prejuízos são de aproximadamente R\$500 milhões no Brasil (CARDOSO *et al.*, 2014; LIMA; GOMES, 2009). Os relâmpagos ainda são responsáveis pela morte de dezenas de bovinos no setor agropecuário, além de provocar a morte de 132 pessoas anualmente (CARDOSO *et al.*, 2014).

Os relâmpagos são formados no interior das nuvens de tempestades (do tipo Cumulonimbus - Cb) através da colisão entre *graupel* e cristais de gelo em regiões de fortes correntes ascendentes (REYNOLDS *et al.*, 1957). A colisão destes hidrometeoros provoca a separação de cargas elétricas e a consequente eletrificação das nuvens Cb, aumentando assim o campo elétrico no interior das nuvens, e possibilitando a ocorrência dos relâmpagos. É comum que estas nuvens estejam embebidas em sistemas maiores, como os conhecidos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). Os SCM são sistemas atmosféricos com potencial de produzir precipitação intensa. Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, cerca de 20 a 30 SCM ocorrem a cada ano (CECIL; BLANKENSHIP, 2012), devido a isso, os problemas e transtornos tornam-se sempre constantes. Estes e outros fatores mostram que os efeitos destas tempestades necessitam de um olhar especial no campo científico para uma melhor tomada de decisão e evolução conceitual.

Com o surgimento dos satélites meteorológicos na década de 60 foi possível monitorar a evolução temporal das tempestades. Os canais que operam na faixa do infravermelho dos satélites meteorológicos geoestacionários possibilitaram a obtenção de informações sobre o topo das nuvens, como a área, temperatura e taxa de crescimento (HOUZE, 1977; GOODMAN; MACGORMAN, 1986; MADDOX, 1980; CARVALHO; JONES, 2001; BOLLIGER; BINDER; ROSSA, 2003; MACHADO; LAURENT, 2004; VILA et al., 2008). Em contrapartida, o monitoramento da atividade elétrica das tempestades apresentou avanço significativo com o desenvolvimento das redes de relâmpagos em solo (do inglês, Lightning Locating System — LLS). Atualmente o Brasil abrange seis LLS que são: i) Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas atmosféricas (BrasilDAT, NACCARATO et al., 2014), ii) Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT, BOURSCHEIDT et al., 2014), iii) Sferics Timing and Ranging Network (STARNET, MORALES et al., 2014), iv) Lightning Detection Network (LINET, MORALES, 2018), v) Vaisala Global Lightning Dataset 360 (GLD360, SAID et al., 2013) e vi) World-Wide Lightning Location Network (WWLLN, BURGESSEUR, 2017) (VILA et al., 2022). Com o desenvolvimento das LLS foi possível avaliar a distribuição espacial e temporal da quantidade de relâmpagos, polaridade e pico de corrente numa região e determinar as regiões que possuem maior vulnerabilidade de ocorrência de relâmpagos. Por outro lado, foi possível associar estas informações ao monitoramento das tempestades por satélite.

Diversos estudos têm demonstrado a existência de uma forte relação entre as características do topo das tempestades e as propriedades dos relâmpagos (AMORATI *et al.*, 2000; LAING; FRITSCH; NEGRI, 1999; MACHADO *et al.*, 2009; MATTHEE; MECIKALSKI, 2013; MECIKALSKI; BEDKA, 2006; MECIKALSKI *et al.*, 2008; MATTOS; MACHADO, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2021). De uma maneira geral, os resultados destes estudos mostram alta ocorrência de relâmpagos associada a tempestades com forte crescimento inicial e com baixa temperatura do seu topo, propiciando intensa formação de gelo no interior das nuvens. Em termos de ciclo de vida, tipicamente as tempestades são dominadas por relâmpagos intranuvem durante a iniciação, relâmpagos nuvem-solo negativos próximos da maturação e positivos na dissipação (MONTEIRO *et al.*, 2021). Provavelmente as diferenças

entre as características físicas e morfológicas entre as tempestades seja um plausível fator para essas diferenças notadas. Contudo, na literatura são ausentes estudos que abordem através de uma extensa base de dados as diferenças entre tempestades que não produzem relâmpagos, daquelas que produzem apenas relâmpagos intranuvem, nuvem-solo positivo e negativo.

2 HIPÓTESE

A primeira hipótese a ser avaliada neste trabalho é que o comportamento da distribuição espacial e temporal dos relâmpagos na região Sudeste do Brasil difere dependendo da polaridade dos relâmpagos (isto é, intranuvem, nuvem-solo negativo e positivo). Em termos das tempestades, a segunda hipótese a ser avaliada neste trabalho é que as diferenças nas propriedades físicas e morfológicas das tempestades seriam responsáveis pelas diferenças observadas entre a polaridade dos relâmpagos predominantes nas tempestades. Para testar ambas as hipóteses serão empregadas dados de tempestades e relâmpagos na região Sudeste do Brasil, utilizando dois conjuntos de dados: satélite geoestacionário e sensores de relâmpagos em solo para o período de 2015 a 2021.

3 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar o comportamento temporal e espacial das propriedades elétricas e físicas nas tempestades ocorridas na região sudeste do Brasil.

3.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

a) Avaliar a distribuição espacial e temporal de relâmpagos na região Sudeste entre 2015
e 2021.

b) Avaliar as diferenças nas propriedades físicas e morfológicas entre tempestades sem relâmpagos, com relâmpagos intranuvem (IN), relâmpagos nuvem-solo (NS) entre 2015 e 2017.

c) Caracterizar a evolução das propriedades físicas e elétricas das tempestades ao longo do ciclo de vida dos SCM entre 2015 e 2017.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

As tempestades estão geralmente associadas a nuvens convectivas de grande extensão vertical, conhecidas como nuvens Cumulonimbus (Cb). Esta categoria de nuvem é caracterizada pela existência de fortes correntes ascendentes, e são normalmente constituídas por aglomerados de nuvens Cb em mesoescala que apresentam área com precipitação contínua maior que 100 km², forma variada e duração entre 6 e 12 horas, conhecidos como Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM, HOUZE, 1993). Estas tempestades de mesoescala podem ainda ser divididas em: Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), Linhas de Instabilidade (LI) e Sistemas Convectivos Alongados (SCA) (COTTON; ANTHES, 1989). A classificação considera a forma atingida pela tempestade ao longo do seu ciclo de vida. Os CCM foram primeiramente identificados e definidos por Maddox (1980) em 1978 nos Estados Unidos através de imagens de satélite no canal infravermelho. Nesta classificação, os CCM foram definidos como tempestades com temperatura de brilho menor do que -32 °C numa área maior que 100.000 km² e, no interior desta, um centro de temperatura menor do que -52 °C em uma área maior do que 50.000 km². Além disso, os CCM devem possuir excentricidade maior que 0,7 no estágio de máximo desenvolvimento. Assim como os CCM, as LI são sistemas que atuam em mesoescala e constituem-se de linhas de nuvens convectivas contínuas ou aproximadamente contínuas em diferentes estágios de ciclo de vida. Novas células se formam à frente dos sistemas, enquanto as células na fase madura enfraquecem na retaguarda (Houze, 1993).

Os SCM possuem considerável desenvolvimento vertical, atingindo alturas entre 9 e 18 km, ocorrendo principalmente durante o verão. As nuvens convectivas associadas aos SCM possuem forma de torre, que se expandem lateralmente no topo, assumindo a configuração de uma "bigorna" (VIANELLO; ALVES, 1991). As velocidades verticais podem atingir valores de aproximadamente 100 km h⁻¹ e possuem comumente três estágios bem definidos: i) iniciação ou estágio *Cumulus*: marcado por movimentos verticais predominantemente ascendentes, há suprimento de calor e umidade, e um cisalhamento moderado, que contribui para o desenvolvimento vertical; ii) maturação: fase mais intensa onde coexistem movimentos ascendentes e descendentes, inicia-se a chuva a partir da base da nuvem e a extensão vertical atinge seu máximo; e iii) dissipação: constituída principalmente por movimentos descendentes e a nuvem começa a se dissipar. Estes sistemas são relacionados a eventos de precipitação intensa, granizo, ventos fortes e relâmpagos, que podem gerar condições de tempo adverso e danos à sociedade (VELASCO; FRITSCH, 1987; MACHADO *et al.*, 1998; SILVA DIAS, 1987; SILVA DIAS, 1999).

Nos Estados Unidos os SCM são responsáveis pelas inundações principalmente de abril a junho (estação chuvosa) onde as tempestades possuem maior organização e precipitação por área, condicionando condições iniciais de solo mais úmido, e assim, produzem maiores condições de inundação (HU; FENG; LEUNG, 2022). Mais especificamente, nas regiões tropicais da América do Sul (AS), os SCM são mais comuns durante os meses de novembro a fevereiro, responsáveis por grande parte da precipitação nestes meses (VELASCO; FRITSCH, 1987; VILA, 2004). Através dos estudos de Mota (2003) foi possível identificar que a contribuição dos SCM de longa duração na precipitação pode superar 50% em diversas áreas da região subtropical da América do Sul. Da mesma forma, os CCM foram responsáveis por 11 a 20% do total de precipitação na estação quente da AS durante os anos de 1998 e 2007 (DURKEE et al., 2009). Além da associação com a precipitação, os SCM estão relacionados também à produção de relâmpagos (MACGORMAN; RUST, 1998; SAUNDERS, 1993; MATTOS; MACHADO, 2011). Os SCM condicionam a eletrificação das tempestades, indicando o estágio do ciclo de vida e a severidade do sistema. Alguns estudos foram desenvolvidos visando-se obter um melhor entendimento sobre os SCM (WALKER et al., 2012; KOLIOS; FEIDAS, 2013). Apesar disso, ainda há desafios no que se refere a diminuição dos danos destes sistemas na sociedade. Assim, o monitoramento do deslocamento e evolução dos SCM é de grande importância para a previsão do tempo e de fenômenos meteorológicos adversos.

Os SCM formados na região Sudeste do Brasil ocorrem devido a processos sinóticos e de mesoescala que contribuem para o desencadeamento inicial da convecção. Com o suporte dinâmico, a formação dos aglomerados de convecção necessita de forçantes radiativas, mais intensas nos meses de primavera e verão. Assim, a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos principais mecanismos de formação destes sistemas. Além disso, a atuação dos jatos de baixos níveis, frentes frias e efeitos locais (brisa marítima e topografia) também contribuem para a formação dos SCM. Estes mecanismos atuam como fonte de umidade e calor do Atlântico tropical e região Amazônica para a região Sudeste (VELASCO; FRITSCH, 1987; SILVA DIAS, 1996; FERREIRA *et al.*, 2003).

Visando aprimorar o conhecimento do ciclo de vida, previsão e também das características físicas e morfológicas dos SCM foram desenvolvidas técnicas de acompanhamento dos mesmos. Os trabalhos de Mecikalski e Bedka (2006) e Mecikalski *et al.* (2008) foram pioneiros na detecção de tempestades em mesoescala utilizando dados de satélites do ponto de vista da iniciação convectiva dos sistemas. Estes estudos documentaram uma previsão em torno de 1 hora antes da formação das tempestades utilizando 8 combinações de

dados dos canais do infravermelho e visível para diferentes localidades nos Estados Unidos. Com relação às características morfológicas dos SCM, muitos trabalhos relacionaram os aspectos físicos dos SCM (como tamanho, duração, área, etc.) visando encontrar padrões semelhantes ao longo do ciclo de vida (MACHADO *et al.*, 1994; JOSHUA *et al.*, 2009, dentre outros); outros estudos avaliaram o comportamento ambiental da atmosfera em relação aos SCM (NACHAMKIN; COTTON, 2000; MATTOS *et al.*, 2020). No Brasil, alguns estudos avaliaram a climatologia de ocorrência dos SCM. A região sul do Brasil registra as maiores ocorrências de SCM, principalmente durante a estação quente e no início da tarde (DURKEE; MOTE, 2009; MACHADO *et al.*, 1998; MARTINS *et al.*, 2017; VELASCO; FRITSCH, 1987; ZIPSER *et al.*, 2006). Porém, há uma lacuna em relação aos estudos dos SCM considerando as propriedades elétricas no ciclo de vida destas tempestades, incluindo informações de relâmpagos IN.

Os relâmpagos estão geralmente associados a estas tempestades, formados devido à presença e colisões de hidrometeoros congelados e super-resfriados (graupel, granizo e cristais de gelo). A partir da separação de cargas elétricas e do aumento do campo elétrico nestas nuvens, o potencial para quebrar a rigidez dielétrica do ar é alcançado, gerando assim uma descarga elétrica (WALLACE; HOBBS, 2006). Em suma, os relâmpagos são descargas elétricas que ocorrem em aproximadamente meio segundo, com extensão média de 5 a 10 km e possuem uma corrente elétrica (chamada também de pico de corrente) capaz de alcançar temperatura da ordem de 30.000 °C (PINTO JR., 2005). O pico de corrente pode ser positivo (transportando cargas positivas) ou negativo (transportando cargas negativas) e representa a intensidade dos relâmpagos. Dessa forma, os relâmpagos, são classificados segundo sua região de formação para a nuvem (solo-nuvem, SN); dentro de uma mesma nuvem (intranuvem, IN); entre duas ou mais nuvens (entre-nuvens, EN; OGAWA, 1995).

A análise das propriedades físicas e elétricas dos relâmpagos mostram que a utilização de informações de satélites geoestacionários, combinados com dados de relâmpagos de sensores de solo, podem ser úteis para caracterizar a atividade convectiva e elétrica das tempestades, melhorando o entendimento das ocorrências de relâmpagos (LAING; FRITSCH; NEGRI, 1999; MACHADO *et al.*, 2009; MATTHEE; MECIKALSKI, 2013; MECIKALSKI *et al.*, 2013) e podendo ser promissor para diagnóstico e prognóstico dessas ocorrências (MATTOS; MACHADO, 2011). Aliado a isso, a detecção de relâmpagos através de redes de sensores possibilita um melhor entendimento do ciclo de vida das tempestades com relação ao comportamento elétrico (AMORATI *et al.*, 2000; LAING; FRITSCH; NEGRI, 1999;

MACHADO *et al.*, 2009; MATTHEE; MECIKALSKI, 2013). Nesse sentido, Matthee e Mecikalski (2013) analisaram 63 tempestades em mesoescala na região equatorial da África (30 tempestades sem relâmpagos e 33 com relâmpagos). As análises indicaram que 8 de 10 combinações de canais do imageador do satélite geoestacionário diferem-se significativamente entre tempestades com e sem relâmpagos. Tempestades sem relâmpagos possuem correntes ascendentes pelo menos 50% mais fracas, e possuem pouco ou nenhum conteúdo de gelo em relação às tempestades com relâmpagos (MATTHEE; MECIKALSKI, 2013).

Mattos e Machado (2011) avaliaram a atividade elétrica de 720 SCM entre 2007 e 2009 no Estado de São Paulo. A máxima atividade elétrica ocorreu durante a fase de crescimento dos SCM próximo à maturação. Os autores ainda documentaram uma forte correlação positiva entre os relâmpagos, tamanho e conteúdo de gelo (MATTOS; MACHADO, 2011). Mais recentemente, o trabalho de Monteiro *et al.* (2021) avaliando a relação entre as propriedades físicas e elétricas dos SCM na região Sudeste do Brasil, constatou que existem diferenças físicas e morfológicas entre as tempestades com e sem relâmpagos. Os SCM que possuem relâmpagos (IN e/ou NS), em média, tendem a durar mais (cerca de 42 minutos) e há uma relação linear positiva com o tamanho das tempestades e a quantidade de relâmpagos IN e NS, porém tempestades menores possuíam maior densidade de relâmpagos. Mesmo dentro de um mesmo Estado ou região, as propriedades das tempestades podem variar largamente; e com isso impactar a distribuição espacial-temporal dos relâmpagos produzidos por estas tempestades.

Nesse contexto, Parker *et al.* (2001) identificaram que os máximos de relâmpagos NS ocorrem antes da máxima área dos sistemas, porém os NS+ tendem a depender mais da forma da convecção dos sistemas. Os SCM associados com linhas convectivas com precipitação estratiforme tendem a possuir maiores quantidades de relâmpagos NS+ e as maiores taxas destes relâmpagos tendem a ocorrer no início e fim de seu ciclo de vida. Em Oklahoma, EUA, o trabalho de Makowski *et al.* (2013) avaliou o comportamento de 30 SCM utilizando informações de satélites e sensores de relâmpagos em solo. Os autores identificaram que a eficiência de produção de relâmpagos nos SCM depende do horário de iniciação e o formato do sistema (SCM simétricos tendem a ter maiores taxas de relâmpagos). Além disso, foi possível inferir que a maioria dos relâmpagos ocorrem antes da maior área dos SCM e nas regiões de menor temperatura de brilho do satélite (regiões com temperaturas próximas de -52 °C) decorrentes das intensas correntes ascendentes nestas regiões que promovem choque dos hidrometeoros.

Por exemplo, na região Nordeste do Brasil, o trabalho de De Abreu *et al.* (2021) relacionou a ocorrência de relâmpagos e as características das nuvens de tempestade. Foi obtida

uma maior ocorrência de relâmpagos em tempestades com refletividades maiores que 36 dBZ, valores mais altos de *Ice Water Path* (IWP, > 38,9 kg m⁻²), *Rain Water Path* (>2 kg m⁻²), precipitação convectiva (>5 mm h⁻¹) e precipitação em superfície (>7 mm h⁻¹). No trabalho de Hui, Zhou e Yan (2022), os autores encontraram uma relação entre a máxima ocorrência de relâmpagos NS e a orografia. Durante a monção tibetana (junho a setembro), a maior disponibilidade de vapor d'água na atmosfera promove maior atividade de relâmpagos. Além disso, foi encontrada uma relação entre maiores ocorrências de NS+ e o cisalhamento do vento (maior cisalhamento vertical do vento leva ao movimento ascendente das cargas positivas e promove maior a ocorrência de raios NS+). Para a região Nordeste novamente, o trabalho de Jacinto, Eoi e Sakamoto (2022) analisaram as principais características dos SCM utilizando um algoritmo para rastreamento de aglomerados convectivos. Foi possível identificar que houve em média 321 SCM no Nordeste do Brasil entre 2000 e 2016. Estes se formam principalmente durante o dia e possuem tempo de vida (tamanho) médio de 7 h (50020 km²).

Mais recentemente o trabalho elaborado por Rehbein e Ambrizzi (2023) mostrou o comportamento dos SCM com relação ao futuro frente as projeções climáticas para a bacia amazônica. Este estudo identificou que os SCM tendem a ter uma diminuição de 2,9% ao ano para o futuro próximo (2014-2050) em comparação ao passado (1950–1960) e principalmente de setembro a dezembro. Entretanto, o estudo mostra uma tendência de aumento de ocorrências de SCM no inverno (junho a agosto) e maior contribuição de precipitação relacionada à estes sistemas, principalmente durante o verão austral (2,9%) e inverno austral (1,7%).

Associando os SCM a produção de relâmpagos e utilizando sensores em solo, o estudo de DiGangi *et al.* (2022) mostrou que para a América do Sul os relâmpagos mais intensos ocorrem no norte da Argentina (40% a 50% de NS+) e um forte mínimo localizado ao norte de São Paulo (entre 0 e 10% de NS+). No Sudeste do Brasil a distribuição espacial de relâmpagos mostra um predomínio de eventos nas regiões montanhosas e entre os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Estudos utilizando dados de satélite constataram estes locais com máximas ocorrências com aproximadamente 20 a 30 relâmpagos por km² por ano, durante os meses de primavera e verão e entre 15:00 e 21:00 hora local (ALBRECHT *et al.*, 2016; ODA *et al.*, 2021).

Mais especificamente, no Estado de Minas Gerais, os máximos valores de relâmpagos ocorrem na região da Zona da Mata Mineira (IN e NS-: 16 e 10 ocorrências por 16 km² ano⁻¹, respectivamente) e triângulo mineiro (NS+: 0,6 relâmpagos por 16 km² ano⁻¹), com maiores ocorrências no verão (10, 5 e 0,4 relâmpagos por km² por estação para os relâmpagos IN, NS-

e NS+, respectivamente) e porcentagens menores que 1% de ocorrências no inverno em relação às demais estações (PREISSER, 2019). Além disso, foi documentado que os máximos de ocorrência de relâmpagos no estado ocorrem entre as 16 e 18 hora local (PINTO JR. *et al.*, 2003).

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) os valores máximos de relâmpagos superam 15 ocorrências por km² ano⁻¹ e maiores ocorrências entre 15 e 16 hora local (NACCARATO,2005; MATTOS, 2009). Através das análises das informações fornecidas pelo sensor *Lightning Imaging Sensor* (LIS) a bordo do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), entre 1998 e 2010 estudos mostraram máxima ocorrência superior a 15 relâmpagos por km² ano⁻¹ na região oeste do Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais (NACCARATO; ALBRECHT; PINTO JR., 2011). Utilizando dados da RINDAT (relâmpagos NS- e NS+) no período de 16 anos (2001–2016), Paulucci *et al.* (2019) encontraram máximos de relâmpagos nos regiões montanhosas do Rio de Janeiro (porção norte do Estado) com 64,3% dos relâmpagos no verão e entre 18:00 e 19:00 hora local. Pinto Jr. e Pinto (2021) identificaram máximas incidências (acima de 18 relâmpagos por km² ano⁻¹) na região Sudeste (norte do Rio de Janeiro, Zona da Mata Mineira e RMSP) no ano de 2020.

Embora os estudos supracitados mostrem importante avanço no entendimento da relação entre as propriedades dos SCM e relâmpagos, ainda são escassos estudos que utilizem um amplo período de dados de diferentes tipos de relâmpagos, como IN, NS- e NS+ com as ocorrências de SCM na região Sudeste. Além disso, a literatura carece de estudos que demonstram as diferenças da distribuição espacial e temporal de relâmpagos separados por polaridade (isto é, separados em IN, NS- e NS+) e as diferenças entre tempestades sem relâmpagos, com predominância de relâmpagos IN, NS- e NS+.

5 DADOS E METODOLOGIA

5.1 Região de Estudo

O presente trabalho abrange a região Sudeste do Brasil (Figura 1). Pertencem à região sudeste os Estados do Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Rio de Janeiro (RJ) e São Paulo (SP), totalizando uma área de aproximadamente 924.558,3 km². A população dessa região é estimada em aproximadamente 89,6 milhões de habitantes, sendo caracterizada como a região mais habitada, e a segunda região com menor extensão territorial, ocupando 12% do território brasileiro (IBGE, 2021). A região Sudeste também abriga diversos biomas brasileiros e possui grande diversificação climática devido sua posição geográfica, topografia e aspectos dinâmicos da atmosfera. Um dos principais sistemas que contribui para os máximos de precipitação nessa região é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no verão, e as frentes Frias no inverno (REBOITA *et al.*, 2010; FERREIRA; REBOITA, 2022). Em média, o início da estação chuvosa ocorre em meados de outubro, durando até março, totalizando precipitação de aproximadamente 572 mm no verão e 105,9 mm no inverno (ALVES *et al.*, 2005; DA SILVA; REBOITA, 2013).

Para a realização deste trabalho foram empregados dados de ocorrência de relâmpagos nuvem-solo e intranuvem proveniente da rede *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN) (Figura 1) e imagens do canal infravermelho do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-13). Maiores detalhes sobre estes dados são explicados nas seções seguintes.

Figura 1 - (a) Mapa do Brasil com os estados e contorno em vermelho destacando a região Sudeste e (b) mapa de elevação (em metros) da região Sudeste do Brasil. As estrelas em vermelho representam as localizações dos sensores de relâmpagos da rede Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN) que estão próximos à região Sudeste.



5.2 Dados de Relâmpagos da rede ENTLN

Para a análise da distribuição espacial/temporal de relâmpagos (2015 a 2021) e a avaliação do impacto das propriedades das tempestades nos relâmpagos (2015 a 2017) foram utilizados os dados da rede ENTLN. Como 2017 foi o ano final de operação do satélite GOES-13, o estudo que envolve as propriedades das tempestades e relâmpagos é limitado até 2017.

A rede ENTLN é uma rede em superfície de detecção de relâmpagos IN e NS, capturando a emissão de radiação eletromagnética produzida pelos relâmpagos entre 10 Hz e 10 MHz. Os relâmpagos são identificados através dos sensores por meio da detecção de ondas LF (*Low Frequency*) e VHF (*Very High Frequency*). As informações da rede ENTLN foram dispostas em: data e localização, polaridade (positiva e negativa) e pico de corrente das descargas de retorno (do inglês, *return strokes*) IN e NS. A rede conta com cerca de 70 sensores e cobre um total de 11 estados das regiões: Sudeste, Sul, Centro-oeste e parte da região Nordeste do Brasil. Na região sudeste do Brasil, a concentração de sensores permite uma maior eficácia de detecção de cerca de 90% e precisão superior a 500 m para os relâmpagos nuvem-solo (PINTO JR.; PINTO, 2021). Além disso, a utilização desta rede deve-se ao fato da possibilidade de detecção de relâmpagos que ocorrem no interior das nuvens (IN) sendo uma informação inovadora destas análises. Os dados foram fornecidos para finalidade de pesquisa pela empresa CLIMATEMPO (MONTEIRO *et al.*, 2021). Os dados de ocorrência de relâmpagos utilizados

na presente pesquisa são de descarga de retorno, e doravante serão nomeados com a terminologia relâmpagos.

5.3 Dados do satélite GOES-13

A identificação e rastreamento das tempestades sobre a região de estudo foi realizada através dos arquivos de temperatura de brilho do satélite GOES-13. Os dados do satélite GOES-13 foram fornecidos pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e reprocessados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). O satélite GOES-13 esteve alocado em 60° Oeste e possuía uma frequência temporal de 30 minutos (OSCAR, 2020). Dentre os sensores disponíveis, o satélite possuía o sensor *GOES Imager*, que contava com cinco canais espectrais, sendo eles: visível (0,65 µm), infravermelho (3,9 µm, 10,7 µm e 13,35 µm) e vapor d'água (6,55 µm). No presente trabalho foi utilizado dados de temperatura de brilho do canal infravermelho em 10,7 µm com resolução espacial de 4 km. Arquivos em formato binário são disponibilizados gratuitamente pelo CPTEC/INPE em: http://ftp.cptec.inpe.br/goes/goes13/retangular_4km/ch4_bin/.

5.4 Algoritmo ForTraCC

O algoritmo *Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters* (ForTraCC, VILA *et al.*, 2008) é um produto de rastreamento automático de nuvens convectivas através de imagens sucessivas do canal infravermelho. No presente trabalho e para o ForTraCC, imagens são arquivos binários no formato de matriz, contendo informações de latitude, longitude e temperatura de brilho de cada *pixel* da imagem. Com base nas características morfológicas (reconhecimento de padrões) e superposição de áreas entre essas imagens de satélite, o ForTraCC determina diversas propriedades das tempestades. Com o algoritmo é possível estimar as propriedades físicas e radiativas dos SCM e prever sua evolução temporal, utilizando limiares de temperatura de brilho e tamanho. O ForTraCC fornece as propriedades dos SCM listadas na Tabela 1. No presente estudo o ForTraCC foi utilizado na identificação e rastreio dos SCM na região de estudo aplicado para imagens de satélite do GOES-13 entre 2015 e 2017.

Para o rastreamento das tempestades foi considerado um tamanho mínimo de 75 pixels (1200 km²) e um limiar de temperatura de 235 K e 210 K para a detecção dos SCM e Células Convectivas (CC), respectivamente (VILA *et al.*, 2008). A delimitação superior de tamanho para os SCM é condicionada pelas limitações descritas a seguir. Para a pesquisa foram utilizadas apenas: tempestades que tiveram início e fim na região de estudo (Figura 1); apresentaram

pouca falta de imagens e não apresentaram divisão ou união com outras tempestades durante o ciclo de vida. Estas limitações são essenciais para assegurar que o crescimento inicial das tempestades está associado à própria dinâmica interna desses sistemas (MACHADO; LAURENT, 2004). Dessa forma, foi possível obter as características físicas dos SCM ao longo de seu ciclo de vida, descritos na Tabela 1. Embora o ForTraCC calcule a excentricidade dos SCM, a versão utilizada no presente trabalho não possui esta variável.

SYS	Número de identificação do Sistema Convectivo (SC)			
XLAT	Latitude do centro de massa do SC			
XLON	Longitude do centro de massa do SC			
TIME	Intervalo de tempo em relação ao horário da imagem			
SIZE	Tamanho do SC em <i>pixels</i>			
DSIZE	Taxa de expansão do SC			
TMED	Temperatura média do SC			
DTMED	Taxa de variação da temperatura média do SC			
TMIN	Temperatura mínima do SC			
DTMIN	Taxa de variação da temperatura mínima do SC			
TMIN9	Média do kernel de 9 pixels (análise da vizinhança)			
DTMIN9	Taxa de variação de TMIN9			
VEL	Velocidade calculada do centróide do SC com o SC da imagem anterior			
DIR	Direção de deslocamento do centro de massa do SC			
FRAC	Fração convectiva do SC			

Tabela 1- Lista das características dos SCM estimadas pelo Algoritmo ForTraCC processadas neste trabalho.

Um exemplo dos recursos da utilização do ForTraCC é mostrado nas Figuras 2 e 3. Foi escolhida uma tempestade no banco de dados deste estudo para mostrar como funciona a delimitação do contorno do sistema e a contabilização dos relâmpagos. A Figura 2 mostra o rastreamento do SCM que ocorreu no dia 23 de dezembro de 2017 a partir das 20:00 UTC e em seguida a Figura 3 mostra a evolução do ciclo de vida de algumas propriedades da tempestade e dos relâmpagos. Assim, na Figura 2 são mostradas a temperatura de brilho (GOES-13, 10,7

 μ m), a localização dos relâmpagos totais (IN + NS) em círculos azuis e o contorno da delimitação do algoritmo ForTraCC em vermelho. Com o rastreamento é possível verificar a evolução temporal da área da tempestade e os locais das ocorrências de relâmpagos. A tempestade iniciou-se entre o Estado de Minas Gerais e Rio de Janeiro às 20:00 UTC, produzindo aproximadamente 294 relâmpagos (Figura 3a). Com o passar do tempo a tempestade se manteve na região de gênese, porém sua área aumentou, atingindo à maturação às 23:00 UTC com 375 relâmpagos. O máximo de relâmpagos (1180 relâmpagos) da tempestade ocorreu às 21:30 UTC.

Figura 2 - Exemplo do rastreamento de um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) realizado pelo ForTraCC no dia 23/11/2017 entre 20:00 e 04:00 UTC. Tons em cinza representam a temperatura de brilho (GOES-13, 10,7 µm) e círculos azuis indicam a localização dos relâmpagos da rede ENTLN. A região mascarada em vermelho representa a delimitação feita pelo algoritmo ForTraCC.

GOES-13 IR (CH4, 10,7 µm) + ForTraCC + ENTLN 2017-12-23 às 20:00 UTC 2017-12-23 às 20:30 UTC 2017-12-23 às 21:00 UTC 2017-12-23 às 21:30 UTC b а d 21°S 22°S 23°S ENTLN = 294 ENTLN = 203 ENTLN = 688 ENTLN = 1180 2017-12-23 às 22:30 UTC 2017-12-23 às 23:00 UTC 2017-12-23 às 23:30 UTC 2017-12-23 às 22:00 UTC g h 21°S 22°S 23°S ENTLN = 531 ENTLN = 375 ENTLN = 1021 ENTLN = 257 2017-12-24 às 00:00 UTC 2017-12-24 às 00:30 UTC 2017-12-24 às 01:00 UTC 2017-12-24 às 01:30 UTC k 21°S 22°S 23°S ENTLN = 202 ENTLN = 291 ENTLN = 367 ENTLN = 296 0 0 2017-12-24 às 02:00 UTC 2017-12-24 às 02:30 UTC 2017-12-24 às 03:00 UTC 2017-12-24 às 03:30 UTC m n 21°S 22°S 23°S ENTI N **ENTLN = 327** ENTLN ENTLN 484 = 36 44°W 43°W 45°W 44°W 43°W 45°W 44°W 43°W 44°W 43°W 45°W 45°W 2017-12-24 às 04:00 UTC q 21°S

22°S

23°S

ENTLN

43°W

44°W

45°W

A Figura 3a mostra que a evolução da área da tempestade apresentou um valor máximo (20000 km²) às 23:00 UTC (maturação). Nesta figura, a evolução das temperaturas de brilho (Figura 3b): média (Tmed), mínima (Tmin) e mínima do *kernel* 9 (Tmin9, média da temperatura do *kernel* de 9 *pixels*) extraídas do algoritmo ForTraCC mostra que a temperatura do sistema atingiu um valor mínimo de aproximadamente 210 K (-63,15 °C). Essa temperatura mínima é tipicamente encontrada em sistemas com características de tempo severo, ou seja, rajadas de vento, precipitação intensa e granizo (THIEL *et al.*, 2020). A evolução temporal da taxa de relâmpagos (Figura 3c) mostra que os primeiros 30 minutos a tempestade apresentou aproximadamente 200 relâmpagos IN e conforme a temperatura foi diminuindo (atingindo valores de 210 K), é possível observar um aumento na taxa de relâmpagos IN (815) e NS- (414), isso indica que quanto mais frio o topo das nuvens, maior a probabilidade de ocorrência de relâmpagos (THIEL *et al.*, 2020). É possível verificar também que o máximo de relâmpagos e a temperatura mínima do sistema ocorrem antes da maturação, corroborando assim com a literatura (MATTOS; MACHADO, 2011; MAKOWSKI *et al.*, 2013).

Figura 3 - Evolução temporal das propriedades físicas estimadas pelo ForTraCC da tempestade ocorrida no dia 23/11/2017: (a) área (km²); (b) temperatura média (Tmed), mínima (Tmin), média do *kernel* dos 9 *pixels* mais frios (Tmin9) e (c) frequência de relâmpagos (ocorrências a cada 30 min) intranuvem (IN) e nuvem-solo negativo (NS-).



5.5 Caracterização Espacial e Temporal dos Relâmpagos

A primeira etapa da metodologia do presente trabalho foi avaliar a distribuição espacial e temporal dos relâmpagos entre 2015 e 2021. O diferencial desta etapa é compreender se as regiões com máxima ocorrência de relâmpagos IN, difere em termos de localidade das regiões com máxima ocorrência de relâmpagos NS. Análise semelhante foi realizada para o pico de corrente dos relâmpagos NS negativos e positivos. Para isto, primeiramente os dados de relâmpagos da rede ENTLN foram interpolados para uma grade regular de 4 km de resolução horizontal (mesma resolução espacial das imagens do canal infravermelho do satélite GOES-13) pelo método de interpolação linear. Essa interpolação foi necessária para a união posterior com os dados de satélite. Após realizada a interpolação, os dados de relâmpagos foram separados por tipo em: relâmpagos i) IN, ii) NS- e iii) NS+.

Para cada tipo de relâmpago foram realizadas análises espaciais e temporais da quantidade (ocorrências por quilômetro quadrado por unidade de tempo) e pico de corrente (kA), separando as análises nas escalas: i) anual (ocorrências por km²), ii) mensal (ocorrências por km² por mês) e iii) horária (ocorrências por km² por hora) de relâmpagos. Além disso, foi realizada a análise para determinar os municípios *hotspot* de relâmpagos. Esses municípios foram definidos como aqueles possuindo as maiores ocorrências de relâmpagos. Para isto foi utilizado o valor anual médio de relâmpago e extraído o *pixel* (localização contendo latitude e longitude) das ocorrências. As ocorrências foram dispostas em ordem decrescente e a latitude e longitude foi relacionada à abrangência do contorno de cada município. Assim, foi possível determinar os cinco municípios que apresentam as maiores ocorrências de relâmpagos IN e NS na região sudeste.

5.6 Avaliação das propriedades físicas e elétricas das tempestades

Na segunda etapa do trabalho foi avaliada a relação entre as propriedades das tempestades e os relâmpagos. Para isto, os relâmpagos da ENTLN que foram interpolados para a grade de 4 km de resolução espacial e foram posteriormente combinados com as tempestades obtidas pelo processamento do algoritmo ForTraCC. Dessa forma, foram contabilizados os relâmpagos que ocorreram dentro de cada *pixel* correspondente dos *clusters* das tempestades (contorno de latitude e longitude correspondente das tempestades). Assim, os relâmpagos foram acumulados temporalmente no intervalo de 30 min, centrado nas imagens de satélite, isto é, os relâmpagos foram acumulados considerando o tempo de 15 min antes e 15 min depois do horário da imagem e para o pico de corrente foi extraído valor médio. Esses cálculos foram empregados para cada etapa do ciclo de vida das tempestades e dentro da área de cada SCM. A

partir da união das duas bases de dados (tempestades e relâmpagos) foram separados os eventos de tempestades, a delimitação dos tipos de tempestades foi disposta em duas partes principais:

i) Parte I: Análise das tempestades com e sem relâmpagos; e

ii) Parte II: Análise das tempestades sem relâmpagos, com apenas relâmpagos IN e apenas relâmpagos NS.

A parte I considera apenas dois grupos de tempestades: as que não produziram relâmpagos (denominadas sem relâmpagos) e as que produziram ao menos um tipo (podendo ser IN, NS- ou NS+) de relâmpago (denominadas com relâmpagos). Esse primeiro tipo de delimitação visa entender as diferenças entre os dois tipos de tempestades, avaliando o comportamento físico e morfológico das mesmas durante o ciclo de vida. Para as tempestades com relâmpagos nessa parte, foi obtido a caracterização elétrica dos relâmpagos (IN, NS- e NS+) durante o ciclo de vida.

Na parte II, realizou-se uma segregação dos SCM com relâmpagos, onde foram considerados dois grupos: apenas as tempestades com relâmpagos IN (tempestades com 100% de relâmpagos IN) e outro com apenas relâmpagos NS (tempestades contendo 100% de relâmpagos NS- ou NS+). Essa delimitação possibilitou compreender as diferenças físicas e morfológicas no ciclo de vida destes dois grupos, preservando suas características internas (MACHADO; LAURENT, 2004). As análises físicas e morfológicas que abrangem este trabalho são parte da saída do algoritmo ForTraCC, sendo elas: a duração, a área do sistema, a taxa expansão e as temperaturas: média, mínima e mínima média do kernel de 9 *pixels* (análise de vizinhança). Em seguida, para as tempestades que produziram relâmpagos foi avaliado o comportamento da quantidade e densidade de relâmpagos e o pico de corrente médio ao longo do ciclo de vida. Os procedimentos metodológicos estão sumarizados na Figura 5.

Para a avaliação do ciclo de vida dos SCM, foi realizada uma divisão do ciclo de vida em 5 estágios das tempestades, essa divisão é semelhante à encontrada em Mattos e Machado (2011). Com relação aos estágios, o primeiro, denominado INI (iniciação), representa o primeiro momento do ciclo de vida, ou seja, o momento em que a tempestade alcançou o limiar para identificação de SCM (gênese). O estágio final da tempestade, denominado DIS (dissipação), representa o estágio de dissipação, ou seja, o último momento em que o SCM respeitava os critérios de identificação. O estágio MAT (maturação) representa o estágio de maturação da tempestade, sendo caracterizado pelo estágio onde a tempestade alcançou seu máximo desenvolvimento (máxima área). Os estágios T2 e T4 representam estágios intermediários entre a iniciação e maturação (T2 - Tempo 2) e maturação e dissipação (T4 -Tempo 4). Ambos representam o tempo médio entre estes dois intervalos. Para as comparações entre os tipos de tempestades são apresentados dois tipos de gráficos: o histograma, que apresenta a frequência relativa (em barras) e o valor médio (linha contínua) da distribuição analisada e o gráfico *boxplot* (diagrama de caixa) com *violinoplot* (linhas de distribuição de frequência). Uma descrição mais detalhada destes gráficos pode ser encontrada no trabalho de Monteiro (2022), sendo uma forma eficaz de encontrar padrões entre diferentes grupos. De maneira geral, o *boxplot* é útil na comparação de frequência de amostras e mostram a centralização e distribuição dos dados ao longo de um intervalo. Quanto ao comportamento da distribuição de frequência, o *violinoplot* permite a visualização da densidade dos dados, a junção destes dois gráficos é mostrada na Figura 4.



Figura 4 - Explicação dos elementos de um gráfico *boxplot* (destacado na cor verde) e *violinoplot* (destacado na cor vermelha).

Fonte: Monteiro (2022).

Assim, estes gráficos mostram algumas informações importantes. A caixa principal representa a concentração de 50% dos dados, onde a linha horizontal central representa a mediana da distribuição ou segundo Quartil (Q2) que separa os 50% dos valores inferiores dos 50% dos valores superiores. A linha inferior da caixa representa o primeiro Quartil (Q1) que separa os 25% dos valores inferiores dos 75% dos valores superiores. A linha horizontal superior da caixa mostra o terceiro Quartil (Q3) que separa os 75% dos valores inferiores dos 25% dos valores superiores. Já o Intervalo Interquartílico (IQR) é definido como a diferença
entre o terceiro quartil (Q3) e o primeiro quartil (Q1) e os outliers são os dados que se diferenciam drasticamente de todos os outros e estão acima (abaixo) do limite superior (inferior), os quais são definidos como o máximo (mínimo) valor da amostra.



Figura 5 - Fluxograma da metodologia aplicada no presente estudo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Distribuição espacial e temporal dos relâmpagos na região Sudeste do Brasil

A primeira parte dos resultados deste trabalho refere-se às análises espaço-temporal dos relâmpagos da rede ENTLN. Os resultados foram subdivididos em: distribuição anual, mensal, horária e *hotspots*. Para as análises, cada tipo de relâmpago foi processado separadamente, isto é, foram separados em: relâmpagos IN, NS- e NS+ para o período de 2015 a 2021.

6.1.1 Distribuição Anual dos Relâmpagos

A evolução do acumulado anual dos relâmpagos (ocorrências por km²) na região Sudeste do Brasil para o período de 2015 a 2021 para os relâmpagos IN, NS- e NS+ são mostradas nas Figuras 6 e 7. Para os relâmpagos IN (Figura 6), os valores acumulados para a região Sudeste do Brasil ultrapassam 500 mil ocorrências por ano (2016, 2019, 2020 e 2021). Entre 2015 a 2017 os valores acumulados para a região de estudo foram de aproximadamente 473 mil, 586 mil e 450 mil relâmpagos, respectivamente. É possível observar um aumento gradual nas ocorrências totais de relâmpagos de 2018 para 2020 (aproximadamente: 473 mil, 586 mil, 760 mil e 861 mil ocorrências, respectivamente). As ocorrências por *pixel* apresentam valores máximos superiores a 60 relâmpagos por ano em algumas regiões preferenciais no extremo sul de SP seguindo uma faixa litorânea em direção ao Vale do Paraíba, alcançando a região da Zona da Mata em MG e bifurcando para o RJ na porção litorânea (regiões montanhosas de cada estado).

Os relâmpagos NS- (Figura 7, painéis à esquerda) apresentam valores acumulados totais superiores a 100.000 ocorrências por ano a partir de 2016. A distribuição espacial assemelhase aos padrões dos relâmpagos IN (Figura 6), porém com menores valores em termos frequência de ocorrência (máximo de 18 ocorrências por ano *versus* 90 ocorrências por ano, respectivamente). Em relação aos relâmpagos NS+ (Figura 7, painéis à direita), o comportamento espacial difere-se em relação aos relâmpagos IN e NS-. Por exemplo, observase que entre 2015 e 2018 a máxima ocorrência de relâmpagos ocorrem próximo à região do triângulo mineiro e na região noroeste de São Paulo, com máximos próximos a 0,9 ocorrências por ano. A partir de 2019 a máxima ocorrência de relâmpagos se estende do extremo oeste da região para o centro de SP e MG. Os relâmpagos NS+ superam 4.400 ocorrências por ano em 2015 e 2016, e apresentam valores crescentes entre 2019 e 2020 (7.336,25 e 10.663,5 ocorrências, respectivamente).

Com relação ao valor acumulado, nos anos de 2019 (IN: ~760 mil, NS-: ~187 mil e NS+: ~7 mil ocorrências), 2020 (IN: ~861 mil, NS-: ~192 mil e NS+: ~10 mil ocorrências) e

2021 (IN: ~771 mil, NS-: ~163 mil e NS+: ~9 mil ocorrências) encontram-se os maiores valores para os três tipos de relâmpagos, enquanto os menores valores são encontrados 2015 (IN: ~474 mil, NS-: ~97 mil e NS+: ~4 mil ocorrências) e 2018 (IN: ~423 mil, NS-: ~136 mil e NS+: ~5 mil ocorrências). Os menores valores podem ser relacionados aos bloqueios atmosféricos que causaram diminuição de ocorrências de tempestades, principalmente no sudeste do Brasil (MARENGO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2020). Já o aumento a partir de 2019 pode estar evidenciando um aumento na eficiência de detecção da rede ENTLN, quanto pode estar ligado ao enfraquecimento da La Niña (fase fria do fenômeno El Niño-Oscilação Sul -ENOS) (INMET, 2018).

De maneira geral, o comportamento espacial dos relâmpagos IN e NS- segue um padrão semelhante, porém com intensidades diferentes. As localizações dos máximos de relâmpagos são semelhantes àquelas documentadas em estudos anteriores (NACCARATO; PINTO JR.; PINTO, 2005; INPE, 2020) e podem ser relacionados ao relevo da região (topografia elevada: ORVILLE et al., 2001; GOMES, 2003), à atuação de fenômenos meteorológicos como sistemas frontais e ZCAS (PARMEZANI et al., 1998; SOLORZANO; PINTO JR.; FERREIRA, 1999), à convecção local decorrentes de ilhas de calor (NACCARATO; PINTO JR.; PINTO, 2003; COELHO; DINIZ, 2009) e à maior ocorrência de SCM na região (SCAGLIONE, 2006). Em contrapartida, o comportamento espacial dos relâmpagos NS+ apresenta padrão diferente aos demais. Isso pode ser explicado devido ao fato que os relâmpagos positivos podem estar associados a uma estrutura elétrica diferente das tempestades que produzem NS- (modelo tripolar invertido: carga positiva mediando cargas negativas no superior e inferior das nuvens de tempestade, (RUST et al., 2002; BRUNING et al., 2014) que, no entanto, é controlada por suas características termodinâmicas, microfísicas e parâmetros ambientais (altura da base da nuvem, umidade e concentração de aerossóis: STOUGH et al., 2021; EDDY et al., 2021). Além disso, os NS+ ocorrem comumente em regiões estratiformes das tempestades (RUTLEDGE; PETERSEN, 1994; ZIPSER et al., 2006; PINTO JR. et al., 2009) e ao longo de planícies (EDDY et al., 2021).

Acumulado Anual: Relâmpagos IN (2015-2021) 2015 2016 b 15°S **a** 18°S 21°S 24°S Qtde: 473,862.19 Qtde: 586,464.88 2017 2018 d 90 15°S **C** 80 18°S -70 21°S 60 24°S Qtde: 450,376.06 Qtde: 423,422.06 2019 2020 f 15°S **e** 30 18°S 20 21°S 10 24°S Qtde: 760,222.38 Qtde: 861,688.88 0 2021 15°S **9** 18°S 21°S 24°S Qtde: 770,967.94

51°W

48°W

45°W

42°W

indicado na parte inferior direita de cada figura representa o total de relâmpagos daquele ano.

Figura 6 – Densidade de relâmpagos intranuvem anuais (IN, em ocorrências por km²) da rede Earth Networks Total Lightning Network para a região Sudeste do Brasil para os anos de (a-g) 2015 a 2021. O valor numérico

Figura 7 – Densidade de relâmpagos anuais nuvem-solo negativo (NS-, painéis à esquerda) e positivo (NS+, painéis à direita) (ocorrências por km²) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil para os anos de (a-g) 2015 a 2021. O valor numérico indicado na parte inferior direita de cada figura representa o total de relâmpagos daquele ano.



A seguir é analisada a distribuição média anual (2015-2021) de relâmpagos IN, NS- e NS+ (Figura 8) para a região sudeste do Brasil. Nota-se que o máximo de relâmpagos IN e NS- ocorre próximo ao extremo sul de São Paulo, na extensão da Serra da Mantiqueira e Serra do Mar (valores acima de 80 e 18 ocorrências ano⁻¹ km⁻², respectivamente). Os relâmpagos NS+ (Figura 8c) apresentam maiores valores na região noroeste de São Paulo e Triângulo Mineiro com valores máximos acima de 0,75 ocorrências ano⁻¹ km⁻². Dentre os três tipos, os relâmpagos IN (Figura 8a) corresponderam a 79,46% (aproximadamente 618,14 mil ocorrências por ano) dos relâmpagos totais detectados no período estudado. Na sequência, os relâmpagos NS- (Figura 8b) apresentaram um percentual de 19,66% (aproximadamente 152,91 mil ocorrências por ano) e os NS+ (Figura 8c) a um total de 0,88% (aproximadamente 6,83 mil ocorrências por ano) em relação aos demais tipos de relâmpagos.

Os resultados da distribuição anual média (Figura 8) mostraram coerência espacial com os resultados documentados por Naccarato (2005). O referido autor documentou para os mesmos lugares uma alta taxa de relâmpagos NS (aproximadamente 7,6 relâmpagos por km² por ano). Pinto Jr. e Pinto (2021) também encontraram alta taxa de relâmpagos totais (valores acima de 18 relâmpagos por km² por ano), porém ambos autores não distinguiram o tipo de relâmpago. A porcentagem de relâmpagos IN em relação aos demais, também é consistente com o encontrado na literatura, descrita como sendo cerca de 80% dos relâmpagos totais (RUST, 1989); porém para o Brasil estudos sobre relâmpagos IN são incipientes. Apenas recentemente o trabalho de DIGANGI *et al.* (2022) mostrou uma porcentagem de aproximadamente 80-90% de relâmpagos IN para a mesma região. Para o NS+ o trabalho de Zhao *et al.* (2022) encontrou máximos parecidos para o sudoeste da China.

Além disso, é perceptível a diferença no padrão espacial dos NS+ em relação aos IN e NS- onde seus máximos não coincidem com os máximos IN e NS-. Isso também é observado nas figuras do pico de corrente a seguir (Figuras 9 e 10). Esse fato pode ter relação com a estrutura termodinâmica das tempestades que geram relâmpagos NS+ nessas regiões, uma vez que tempestades com instabilidades mais fracas seriam responsáveis por maior produção de relâmpagos NS+ (EDDY, 2018; MACGORMAN et al., 2018). No trabalho de Hui, Zhou e Yan (2022) foi possível obter uma relação entre a dinâmica e microfísica dos sistemas que produzem relâmpagos NS+. O cisalhamento vertical do vento mais intenso e a menor quantidade do total de água líquida na nuvem podem promover maior ocorrência de relâmpagos NS+. O tipo de aerossol presente nas regiões de maior quantidade de relâmpagos NS+ também seria um plausível fator modulador da predominância de relâmpagos NS+. Nessa região podem ocorrer maior quantidade de aerossóis provenientes de queimadas (MARTINS et al, 2020). Esse tipo de aerossol seria responsável por estreitar o espectro de gotas, que conduziria as partículas de graupel a se carregarem positivamente entre -10° C e -20° C na tempestade (LYONS *et al.*, 1998; MURRAY et al., 2000). Essas hipóteses para a explicação das ocorrências de NS+ em locais diferentes dos IN e NS- necessitam de uma maior investigação para conclusões mais detalhadas. **Figura 8** - Densidade anual média (2015 a 2021) dos relâmpagos (ocorrências por km² por ano): (a) intranuvem (IN), (b) nuvem-solo negativo (NS-) e (c) nuvem-solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil. Os valores numéricos indicados na parte inferior direita de cada figura representam o total de relâmpagos e a porcentagem relativa (%) daquele tipo de relâmpago.



A distribuição espacial do pico de corrente anual dos relâmpagos NS- e NS+ são mostrados na Figura 9. O pico de corrente dos relâmpagos NS- e NS+ apresentam diferentes comportamentos entre si. Por exemplo, o pico de corrente dos relâmpagos NS- (denominado PC-, Figura 9: painéis à esquerda) apresenta comportamento anual com valores médios abaixo de 20 kA entre 2015 e 2017, um aumento nos valores entre 2018 e 2019 (acima de 20 kA) e um decréscimo no valor médio em 2020 e 2021 (19,77 e 17,63 kA). Os valores máximos ocorrem

da porção central de Minas Gerais para o norte do Estado e região oeste de São Paulo, nessas regiões os valores encontram-se acima de 35 kA. Porém, valores entre 10 e 20 kA prevalecem em toda porção central da região Sudeste, em especial no encontro entre São Paulo, sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro (regiões da Serra da Mantiqueira e região costeira). Alguns trabalhos documentaram valores semelhantes para o pico de corrente de relâmpagos NS- (ORVILLE *et al.*, 1987; MONTANDON; AHNEBRINK; BENT, 1992).

O comportamento do pico de corrente dos relâmpagos NS+ (denominado PC+) apresenta valores crescentes de 2015 a 2018 (acima de 30 kA), nos anos de 2019 e 2020 os valores médios mantêm-se acima de 35 kA. Valores anuais médios acima de 40 kA são encontrados em grande parte do estado de São Paulo e Triângulo Mineiro, expandindo as regiões destes máximos a partir de 2017. Os menores valores são encontrados principalmente na porção mais ao norte do estado de Minas Gerais, onde boa parte dessa região possui valores abaixo de 20 kA e com algumas regiões alcançando valores de 0 kA. Os máximos e mínimos valores são semelhantes ao encontrado no campo de média anual (Figura 10), explicados a seguir, porém, torna-se evidente a diferença tanto no comportamento espacial, quanto no valor médio do PC- e PC+, uma vez que o PC+ possui valor médio maior que o PC- e principalmente seus mínimos valores em locais diferentes.

Figura 9 - Distribuição espacial da média anual do pico de corrente (kA) dos relâmpagos nuvem-solo negativo (NS-, à esquerda) e nuvemsolo positivo (NS+, à direita) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil para os anos de (a-g) 2015 a 2021. O valor numérico indicado na parte inferior direita de cada figura representa o valor médio de pico de corrente para a região Sudeste daquele ano.



A média anual (2015-2021) do pico de corrente é mostrado na Figura 10. Os valores são semelhantes aos valores anuais descritos na Figura 9. Os valores médios encontram-se entre 34,85 e 19,45 kA para o PC+ e PC-, respectivamente. De maneira geral, nota-se que os relâmpagos positivos possuem pico de corrente superior em relação aos relâmpagos negativos (40-45 *versus* 30-35 kA), conforme descrito em estudos anteriores (NACCARATO *et al.*, 2001). O motivo pelo qual os relâmpagos NS+ são mais intensos que os NS- ainda não é claro na literatura científica, porém estudos sugerem que uma intensa e rápida descarga positiva após a iniciação dos relâmpagos, gera estes relâmpagos mais intensos que os demais (WANG *et al.*, 2021). Também, um forte campo elétrico descendente perto do solo é essencial para a produção de NS+ mais fortes (WU *et al.*, 2022). Em adição, os relâmpagos NS- mais intensos (30-35 kA) ocorrem na parte oeste do estado de São Paulo e norte de Minas Gerais, enquanto uma distribuição espacial mais homogênea é observada para a intensidade dos relâmpagos NS+

(valores de aproximadamente 30-45 kA) porém com maiores valores na porção central de São Paulo e sul de Minas Gerais. As localizações de máximo PC- podem estar relacionadas à termodinâmica dos sistemas presentes nestas regiões de máximos e o tipo de aerossol e a poluição (NACCARATO; PINTO JR.; PINTO, 2003; FARIAS *et al.*, 2009). Enquanto para o PC+, a presença de aerossóis provenientes de queimadas tem sido sugerida como uma explicação plausível (LYONS *et al.*, 1998).

Figura 10 - Distribuição espacial média do pico de corrente (kA) (2015-2021) dos relâmpagos: (a) Nuvem-Solo negativo (NS-) e (b) Nuvem-Solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil. O valor numérico indicado na parte inferior direita de cada figura representa o valor médio de pico de corrente para a região Sudeste.



O ciclo interanual da quantidade e pico de corrente dos relâmpagos para a região Sudeste são mostrados na Figura 11. Nota-se que para os três tipos de relâmpagos há um aumento no número total de relâmpagos na região Sudeste de 2015 (IN: 473,9 mil; NS-: 96,7 mil e NS+: 4,4 mil relâmpagos) para 2020 (IN: 861,7 mil; NS-: 192,6 mil e NS+: 10,7 mil relâmpagos). Com relação ao pico de corrente, há uma variação elevada nos valores médios anuais de 2015 (PC-: 18 kA e PC+: 32,4 kA) para 2020 (PC-: 19,8 kA e PC+: 35,3 kA), porém em 2021 para o PC- o valor volta a diminuir (17,5 kA).

Esse aumento de relâmpagos para os três tipos é observado também nos trabalhos de Pinto Jr. e Pinto (2021) e para o pico de corrente também pode ser encontrado padrão semelhante. De maneira geral, nota-se que os relâmpagos se tornaram mais frequentes e mais intensos, principalmente para o NS+ (visto o aumento no valor do PC+). Isso evidencia que alguns fatores contribuem para a intensificação da eletrificação das tempestades e consequentemente maior frequência/intensidade de relâmpagos, como, por exemplo, relação com às mudanças climáticas, onde as alterações na temperatura da superfície e o tipo de aerossol podem modular a energia e a severidade das tempestades no planeta (YANG *et al.*, 2018; WILLIAMS; GUHA, 2019; ROMPS *et al.*, 2014).

Figura 11 - Ciclo interanual da quantidade (relâmpagos intranuvem IN, curva preta; nuvem-solo negativo NS-, curva azul; nuvem-solo positivo NS+, curva vermelha) e pico de corrente (PC-: nuvem-solo negativo, curva azul tracejada e PC+: nuvem-solo positivo, curva vermelha tracejada) dos relâmpagos que ocorreram na região Sudeste do Brasil detectados pela rede *Earth Networks Total Lightning Network*.



6.1.2 Ciclo Anual dos Relâmpagos

O ciclo anual dos três tipos de relâmpagos é mostrado na Figura 12. Por brevidade os resultados são mostrados em termos do mês de máxima ocorrência de relâmpagos. Tanto para os relâmpagos IN (Figura 12a), quanto para os relâmpagos NS- (Figura 12b) as regiões que abrangem o extremo sul do Estado de Minas Gerais, centro e litoral de São Paulo, sul do Rio de Janeiro e parte do litoral do Espírito Santo concentram as maiores ocorrências durante o verão (dezembro a fevereiro, representado pela cor vermelha). Em grande parte do Estado de Minas Gerais, oeste de São Paulo, norte do Rio de Janeiro e grande parte do Espírito Santo, os

meses de maior ocorrência são predominantemente de setembro a novembro (meses de primavera, representado pela cor amarela no mapa). Isso ocorre, pois tanto na primavera quanto no verão há maior disponibilidade de umidade e instabilidade nessas regiões, possibilitando assim, um maior número de tempestades eletricamente carregadas nestas duas estações do ano. Já a diferenciação dos máximos está associada aos fenômenos meteorológicos, como ZCAS, que quando configurada promove mais tempestades na porção norte da região (ESCOBAR, 2018) e sistemas frontais e SCM que geram tempestades mais carregadas na parte sul da região (SATYAMURTY; MATTOS, 1989; CUSTÓDIO; HERDIES, 1994; ROGRIGUES *et al.*, 2004). Outros trabalhos também encontraram valores máximos de ocorrências nesses meses (PINTO JR. *et al.*, 2003).

Em contrapartida, para os relâmpagos NS+ (Figura 12c) verifica-se uma distribuição espacial com maior quantidade concentrada nos meses de outono (março a maio, cores cinzas) e inverno (junho a agosto, cores azuis) espalhados em grande parte da região Sudeste. Os meses de verão são predominantes em grande parte da região litorânea de São Paulo e Rio de Janeiro, extremo norte do Espírito Santo e parte do norte de Minas Gerais. Os meses de primavera predominam em boa parte do Triângulo Mineiro/sudoeste de Minas Gerais e oeste/sudoeste de São Paulo. Os máximos de relâmpagos NS+ nos meses de outono e inverno podem ser explicados pela relação entre esse tipo de relâmpago com ambientes convectivos menos intensos e com tempestades isoladas e frentes frias (EDDY, 2018; MACGORMAN *et al.*, 2018).



Figura 12 - Mês de máxima ocorrência de relâmpagos (a) intranuvem (IN), (b) nuvem-solo negativo (NS-) e (c) nuvem-solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil.

A Figura 13 mostra o mês do máximo pico de corrente para os relâmpagos NS- e NS+ para a região Sudeste do Brasil. Os meses de máximos valores de pico de corrente são predominantemente nos meses de primavera e verão (cores vermelhas e amarelas, respectivamente). As regiões com os meses de máximos seguem as mesmas configurações do mês de maiores ocorrências de relâmpagos NS- (Figura 12b). Em contrapartida, o pico de corrente dos relâmpagos positivos, pode-se notar a presença de máximos valores nos meses de outono e inverno (cores cinzas e amarelas, respectivamente) assim como também na configuração espacial dos meses de maiores ocorrências de relâmpagos NS+ (Figura 12c).



Figura 13 - Mês do máximo pico de corrente dos relâmpagos: (a) nuvem-solo negativo (NS-) e (b) nuvem-solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil.

A Figura 14 mostra o ciclo anual médio da quantidade de relâmpagos e pico de corrente médio. Os meses de primavera e verão são os meses de predomínio das ocorrências (valores máximos de: 4011, 1025 e 40 relâmpagos IN, NS- e NS+, respectivamente) e os mínimos ocorrem nos meses de outono e inverno (23, 4 e 0,5 relâmpagos IN, NS- e NS+, respectivamente). Para o pico de corrente, observa-se que no início da primavera há um aumento para o PC+ (42,8 kA) e para o PC- os máximos valores se encontram no começo do outono (23,3 kA). Tanto os valores do ciclo mensal dos relâmpagos quanto para a intensidade do pico de corrente corroboram com os resultados obtidos por Naccarato et al. (2001) e Naccarato (2005). Nesse aspecto, os máximos de relâmpagos na primavera e verão estão relacionados com a maior disponibilidade de umidade e calor que gera instabilidade para formação de tempestades (PINTO JR. et al., 2003; NACCARATO, 2005; MATTOS, 2009; PAULUCCI et al., 2019), além disso, os sistemas atmosféricos atuantes nestes períodos formam tempestades com maior potencial de produzir relâmpagos (SELUCHI; MARENGO, 2000; CAZES-BOEZIO et al., 2003). Em termos do pico de corrente, os valores mais intensos do PC+ ocorrem no final do inverno e início da primavera (máximos acima de 40 kA), e pode ter relação com a maior emissão de aerossóis provenientes de queimadas que induz uma maior concentração de cargas positivas nas nuvens de tempestade (LYONS et al., 1998). No PC- a menor quantidade no período de inverno (abaixo de 20 kA) relaciona-se com o período de queimadas, onde a intensidade dos relâmpagos NS- estão inversamente relacionados (FERNANDES, 2005). A hipótese postulada por alguns autores é que se não houvessem queimadas, o comportamento do PC- seria mais constante ao longo do ano (NACCARATO, 2005).

Figura 14 - Ciclo anual médio da quantidade de relâmpagos (intranuvem IN, curva preta; nuvem-solo positivo NS+, curva vermelha; nuvem-solo negativo NS-, curva azul) e pico de corrente (PC-: nuvem-solo negativo, curva azul tracejada e PC+: nuvem-solo positivo, curva vermelha tracejada) dos relâmpagos que ocorreram na região Sudeste do Brasil detectados pela rede *Earth Networks Total Lightning Network*.



6.1.3 Ciclo Diurno dos Relâmpagos

A Figura 15 mostra os horários (em Hora Local - HL) de máxima ocorrência de relâmpagos: IN (Figura 15a), NS- (Figura 15b) e NS+ (Figura 15c). Para os três tipos de relâmpagos, os horários de maiores ocorrências são predominantemente a partir do período da tarde (15:00 UTC ou 12:00 HL) até à noite (23:00 UTC ou 20:00 HL). Os relâmpagos IN e NS-são predominantes entre 15:00 e 18:00 UTC (entre 12:00 e 15:00 HL). As tempestades no Sudeste do Brasil ocorrem preferencialmente no período da tarde e começo da noite devido ao efeito de aquecimento superficial, esse resultado é semelhante ao encontrado por Mattos *et al.* (2011) e Albrecht *et al.* (2016).

Figura 15 - Horário (Hora Local) de máxima ocorrência de relâmpagos: (a) intranuvem (IN), (b) nuvem-solo negativo (NS-) e (c) nuvem-solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil.



Os horários de pico de corrente máximo são mostrados na Figura 16 (PC-: Figura 16a e PC+: Figura 16b). O comportamento dos horários de máximos valores do pico de corrente seguem o mesmo comportamento dos mostrados para os horários de máxima ocorrência de relâmpagos (Figura 15b e 15c). Pode-se inferir que tanto para o mês de máximos quanto para o horário de máximos valores do pico de corrente, os respectivos máximos acompanham os máximos de ocorrências de relâmpagos.



Figura 16 - Horário (Hora Local) do máximo pico de corrente dos relâmpagos: (a) nuvem-solo negativo (NS-) e (b) nuvem-solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil.

O ciclo diurno da quantidade total de relâmpagos e do pico de corrente médio para a região Sudeste é representado na Figura 17. Observam-se valores crescentes de relâmpagos totais a partir das 12:00 HL e máximas ocorrências às 16:00 HL (47 mil, 2300 e 73 ocorrências de relâmpagos IN, NS- e NS+, respectivamente). O comportamento horário do pico de corrente médio mostra relativa constância no PC+, com valores entre 35 e 37 kA e máximos valores entre 07:00 e 10:00 HL. Da mesma forma, os valores de PC- variam entre 19 e 21 kA, porém sem um pico de valores máximos bem definido.

Este resultado mostra um aumento de relâmpagos a partir do início da tarde, das 12:00 HL e máximos valores próximo às 16:00 hora local. Estes resultados são semelhantes ao encontrado por outros autores, que relacionaram este aumento devido ao aquecimento solar que impulsiona a convecção, gerando instabilidade e crescimento das tempestades (PINTO JR. *et al.*, 2003; NACCARATO, 2005; MATTOS, 2009; PAULUCCI *et al.*, 2019). Já no comportamento do pico de corrente positivo, observa-se maior relação dos máximos com a origem e evolução das tempestades ao longo do dia. Estes relâmpagos estão mais relacionados às tempestades que possuem maiores durações, que produzem relâmpagos NS+ próximo à dissipação (período da manhã: FUQUAY, 1982; NACCARATO, 2005).

Figura 17 - Ciclo diurno (Hora Local) da quantidade (relâmpagos IN, curva preta; NS+, curva vermelha e NS-, curva azul) e pico de corrente (PC-: nuvem-solo negativo, curva azul tracejada e PC+: nuvem-solo positivo, curva vermelha tracejada) dos relâmpagos que ocorreram na região Sudeste do Brasil detectados pela rede *Earth Networks Total Lightning Network*.



6.1.4 Hotspots de Relâmpagos no Sudeste do Brasil

Nesta etapa será determinado e analisado os cinco municípios que apresentam as maiores ocorrências de relâmpagos por tipo na região Sudeste do Brasil entre 2015 e 2021, denominados como municípios hotspots. Para a contabilização deste *ranking* foi utilizado o campo anual médio (Figura 8). Para cada *pixel* com máximos valores, foi extraída a localização geográfica (municípios) destas ocorrências. Os municípios com mais de um *pixel* de máxima ocorrência, foi atribuído apenas o maior valor, com o objetivo de classificar no total cinco diferentes municípios neste *ranking*.

Dessa forma, a Figura 18 mostra a localização dos cinco municípios com os maiores valores anual médio de relâmpagos IN (Figura 18a), NS- (Figura 18b) e NS+ (Figura 18c) e seus respectivos valores. A localização dos *hotspots* de máximos relâmpagos é coerente com aquele documentado na Figura 8. Primeiramente, o máximo IN ocorreu em Valença - RJ, cidade montanhosa entre Minas Gerais e Rio de Janeiro, com um valor médio de 95,69 ocorrências por km² por ano. Os NS- apresentam localização dos máximos parecidas com o IN, com o maior valor na cidade de Volta Redonda - RJ (20,40 ocorrências por km² por ano). Já os NS+, os máximos estão mais distribuídos na região, porém mais localizados na porção oeste. O maior valor NS+ foi em Aspásia - SP com 0,61 ocorrências por km² por ano.

Os *hotspots* dos relâmpagos IN e NS- ocorrem em regiões montanhosas, principalmente dos relâmpagos IN, onde estes ocorrem entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira. Alguns estudos apresentam relação entre as ocorrências de relâmpagos e terrenos acidentados (NACCARATO; PINTO, 2012; ALBRECHT *et al.*, 2016; ABREU, 2018). Nos NS- os máximos ocorrem também nas regiões montanhosas, porém o 4° hotspot ocorre na região metropolitana de São Paulo - SP com 18,56 ocorrências por km² por ano. Esse máximo poderia estar associado ao efeito da ilha de calor e atuação dos aerossóis emitidos pela poluição urbana na microfísica destas tempestades (NACCARATO *et al.*, 2001; NACCARATO; PINTO JR.; PINTO, 2003; COELHO; DINIZ, 2009). No caso dos NS+ os máximos ocorrem nas regiões com maior concentração de aerossóis provenientes de queimadas (LYONS *et al.*, 1998; MURRAY *et al.*, 2000).

Figura 18 - Primeiros cinco *hotspots* (municípios com maiores valores de relâmpagos anuais) de relâmpagos: (a) intranuvem (IN), (b) nuvem-solo negativo (NS-) e (c) nuvem-solo positivo (NS+) da rede *Earth Networks Total Lightning Network* para a região Sudeste do Brasil. Os valores nas caixas representam a quantidade de relâmpagos (ocorrências por km² por ano).



51

6.2 Relação Entre as Propriedades dos Sistemas Convectivos de Mesoescala e os Relâmpagos

A seguir será analisado o ciclo de vida de relâmpagos e das propriedades dos SCM na região Sudeste do Brasil entre 2015 e 2017. Primeiramente serão realizadas comparações entre tempestades que produziram algum tipo de relâmpago (não importando o seu tipo, isto é IN, NS- ou NS+) das que não produziram nenhum tipo de relâmpago durante o ciclo de vida (seção 6.2.1). Na segunda etapa é realizado uma comparação entre SCM sem relâmpagos e aqueles com predominância de relâmpagos IN (100% de relâmpagos IN) e SCM com relâmpagos NS (100% de relâmpagos NS) (seção 6.2.2). As descrições mais aprofundadas serão apresentadas a seguir no início de cada seção.

6.2.1 Ciclo de Vida das Tempestades Com e Sem Relâmpagos

Nesta etapa foram identificados os SCM ocorridos na região de estudo conforme as limitações descritas anteriormente. A Figura 19 mostra a localização da gênese dos SCM sem relâmpagos (círculos azuis) e com relâmpagos (estrelas vermelhas). Com relação ao número total de SCM foram identificadas 2302 tempestades. As tempestades com relâmpagos apresentaram um total de 1514 SCM, enquanto tempestades sem relâmpagos apresentaram maiores ocorrências (716 ocorrências a mais ou 65,77% dos SCM), enquanto as tempestades sem relâmpagos representaram um total de 34,23%. Estes resultados indicam que para os critérios estabelecidos, a maioria dos SCM têm condições de produzir relâmpagos. De maneira geral, a distribuição espacial dos SCM não apresenta um padrão de ocorrências na região Sudeste. Tanto as tempestades com relâmpagos, quanto as que não produzem relâmpagos possuem uma distribuição espacial homogênea na região de estudo, com exceção na porção norte da região Sudeste, onde é possível observar um espaçamento maior entre as ocorrências de tempestades.

A quantidade de tempestades com relâmpagos em comparação com tempestades sem relâmpagos depende da região de estudo analisada, mas neste trabalho é importante ressaltar que algumas outras delimitações podem estar influenciando. Por exemplo, as delimitações do tamanho dos SCM eliminam tanto a presença de sistemas em escala sinótica, quanto sistemas locais devido às limitações de tamanho mínimo estabelecidas no processamento do ForTraCC (VILA *et al.*, 2008). Em adição, a quantidade de tempestades com relâmpagos pode ser explicada pelo fato que tempestades que possuem capacidade de alcançar tamanho e temperatura para serem classificadas como SCM possuem características propícias para

gerarem relâmpagos (MAKOWSKI *et al.*, 2013). Por outro lado, as que não produziram relâmpagos podem ser explicadas pelo fato que essas tempestades não apresentam durações suficientes para se desenvolverem e formarem relâmpagos (MATTOS; MACHADO, 2011). Essas características para os dois grupos de tempestades serão explicadas mais adiante.

As características espaciais mostram que as tempestades dos dois grupos são mais frequentes na metade inferior da Figura 19, visto o maior espaçamento entre as tempestades no norte de Minas Gerais e norte do Espírito Santo. Essas menores frequências na porção norte da região mostram que os SCM são menos comuns comparados com a porção sul da região Sudeste. Assim, essas maiores ocorrências podem ser explicadas devido ao fato de que essa região possui maior propensão de tempestades proveniente dos sistemas meteorológicos atuantes e por convecções isoladas devido à sistemas de grande escala como, por exemplo, a ZCAS (SILVA DIAS, 1996; FERREIRA *et al.*, 2003).

Figura 19 - Distribuição espacial do local de gênese dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) na região Sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017 identificados pelo algoritmo ForTraCC separados em: i) sem relâmpagos (círculos azuis) e ii) com relâmpagos (estrelas vermelhas). SCM com relâmpagos são tempestades que apresentaram ao menos um tipo de relâmpago (IN, NS- ou NS+).



A seguir é apresentada a distribuição de frequência relativa (em %) da duração (em horas) dos SCM sem (Figura 20a) e com relâmpagos (Figura 20b). Verifica-se que as tempestades sem relâmpagos possuem duração média (máxima) de 1,8 h (7,0 h), enquanto as tempestades com relâmpagos têm duração média (máxima) de 2,3 h (10,0 h). Estes resultados indicam que as tempestades com relâmpagos duram na média 0,5 horas a mais que aquelas sem relâmpagos e possuem duração máxima 3,0 h maior. Nota-se ainda que aproximadamente 80% das tempestades com relâmpagos possuem duração de até 2 h (Figura 20b). Outros autores encontraram durações semelhantes na comparação de tempestades com e sem relâmpagos para o Sudeste do Brasil (MATTOS; MACHADO, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2021)

De maneira geral, as tempestades com relâmpagos são formadas em ambientes com condições de instabilidades mais intensas e isso permite que possuam correntes ascendentes mais intensas e consequentemente maiores desenvolvimentos verticais, estendendo assim a duração dos sistemas (SALIO *et al.*, 2007; REHBEIN *et al.*, 2018; MONTEIRO *et al.*, 2021).





A área das tempestades é uma característica importante que possui relação com a dinâmica interna das tempestades, em que seus valores podem indicar o grau de desenvolvimento da tempestade. A Figura 21 mostra o ciclo de vida da área (em km²) dos SCM

sem (Figura 21a) e com relâmpagos (Figura 21b). Neste estudo a área representa o tamanho do topo da nuvem, sendo determinada contabilizando-se a quantidade de *pixels* pertencentes a tempestade, e multiplicando-a por 16 km² (tamanho do pixel do infravermelho para o satélite GOES-13). Para a contabilização do ciclo de vida das tempestades, fez-se necessário um filtro para que as tempestades contivessem 5 ou mais tempos (mais de 2 horas, lembrando que as imagens do GOES-13 são a cada 30 min). Assim, das 1514 (788) tempestades com (sem) relâmpagos, após a aplicação do filtro foi obtido um total de 1512 (293) com (sem) relâmpagos.

Os resultados mostram que as tempestades sem relâmpagos possuem área inicial média de aproximadamente 2000 km², assim como as tempestades com relâmpagos. Porém, nos estágios T2 e MAT as tempestades sem relâmpagos possuem área média de 3000 e 4000 km², enquanto as tempestades com relâmpagos possuem maior área média, alcançando valores de 3800 e 5000 km² (T2 e MAT). No estágio T4 os SCM sem (com) relâmpagos possuem área média de aproximadamente 3500 (4060 km²). A área média na dissipação das tempestades com e sem relâmpagos apresenta valores próximos a 2000 km². Em conformidade com os valores médios, os percentis 50 e 90 indicam também que as tempestades com relâmpagos possuem maior área que as tempestades sem relâmpagos, principalmente na maturação.

Assim, os SCM com relâmpagos possuem de maneira geral áreas maiores, atingindo valores superiores a 6000 km² (P50). Essa característica dos SCM foi encontrada também nos trabalhos de Mattos (2009) e Mattos e Machado (2011). Além disso, os sistemas de maior duração tendem a ter também maiores áreas (MACHADO; LAURENT, 2004, TADESSE; ANAGNOSTOU, 2009), sendo consistente com a maior duração encontrada para as tempestades com relâmpagos (Figura 20b).

Figura 21 - Ciclo de vida da área (km²) dos SCM: (a) sem relâmpagos e (b) com relâmpagos para cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50 e a área em cinza-claro o percentil 90.



A área da tempestade é uma informação muito importante para a caracterização da sua dimensão espacial instantânea, porém torna-se importante avaliar a taxa de mudança da área das tempestades entre uma imagem e a seguinte. Essa propriedade é conhecida como a taxa de expansão, e refere-se à taxa de variação da área, indicando crescimento (decaimento) do SCM se seu valor é positivo (negativo). A Figura 22 mostra a comparação da evolução da taxa de expansão para tempestades sem (Figura 22a) e com relâmpagos (Figura 22b) nos cinco estágios do ciclo de vida das tempestades. Os SCM sem relâmpagos possuem taxa de expansão inicial de aproximadamente 200 x 10^{-6} s⁻¹, enquanto os SCM com relâmpagos têm valor superior a 250 x 10^{-6} s⁻¹. No segundo estágio do ciclo de vida a taxa de expansão nas tempestades com (sem) relâmpagos é de 220 x 10^{-6} s⁻¹ (180×10^{-6} s⁻¹). Na maturação e nos demais estágios do ciclo de vida não se encontram diferenças significativas na taxa de expansão das duas tempestades, porém na dissipação a taxa de expansão das tempestades com relâmpagos (-210 x 10^{-6} s⁻¹).

Comparando os dois grupos de tempestades, percebe-se que tanto no início quanto no estágio T2 do ciclo de vida, os SCM com relâmpagos possuem maior expansão da área (valores acima de 200 x 10^{-6} s⁻¹) que os sem relâmpagos. Porém, é perceptível que o decaimento das

tempestades com relâmpagos é mais acentuado que as sem relâmpago, visto a inclinação dos valores médios e uma taxa de expansão mais negativa na dissipação. Esses resultados estão em sintonia com as observações sobre a área e duração (Figuras 20 e 21), uma vez que estas variáveis são bem correlacionadas. As tempestades com relâmpagos possuem maior taxa de expansão inicial, indicando que estes SCM possuem processos convectivos mais intensos e possuindo correntes ascendentes mais fortes durante a iniciação. Além disso, uma maior taxa de expansão inicial permite uma maior duração destes sistemas. Estas condições proporcionam altas taxas de condensação e maior desenvolvimento em escala vertical e horizontal do tamanho da tempestade (MACHADO *et al.*, 1998; MACHADO; LAURENT, 2004; MATTOS; MACHADO, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2021).





A Figura 23 mostra o ciclo de vida das temperaturas média (Tmed), mínima (Tmin) e mínima média do *kernel* de 9 *pixels* (Tmin9) dos SCM sem (Figura 23a) e com relâmpagos (Figura 23b). Em comum nota-se que as menores temperaturas ocorrem no segundo momento

do ciclo de vida (T2) e a diferença entre Tmed e Tmin é mais expressiva que a diferença entre Tmin e Tmin9. De forma geral, as temperaturas dos SCM com relâmpagos são menores que as temperaturas dos SCM sem relâmpagos. Por exemplo, comparando a Tmed no estágio T2, os SCM sem relâmpagos apresentaram valores de aproximadamente 228 K, enquanto tempestades com relâmpagos de 224 K (ou seja, uma diferença de 4 K). Em contrapartida, ao comparar a Tmin, a diferença entre SCM sem e com relâmpagos é de aproximadamente 8 K (222 e 214 K nos SCM sem e com relâmpagos, respectivamente). Da mesma forma, a Tmin9 apresentou uma diferença de 7 K (224 e 217 K nos SCM sem e com relâmpagos, respectivamente).

Essas características mostram que os SCM com relâmpagos possuem temperaturas menores que os sem relâmpagos em todo o ciclo de vida, porém nos dois primeiros estágios as diferenças são mais acentuadas. Isso mostra que o topo das nuvens de SCM com relâmpagos são mais frios que os sem relâmpagos. Os trabalhos de Machado *et al.* (2009), Mattos e Machado (2011) e Makowski *et al.* (2013) confirmam essas características. De maneira geral, nas tempestades com relâmpagos, as correntes ascendentes intensas elevam a altura do topo das nuvens que, consequentemente, produz um maior aprofundamento do topo da tempestade, acarretando menor temperatura e maior concentração de hidrometeoros glaciados, tendendo a promover uma produção de relâmpagos mais intensos (MAKOWSKI *et al.*, 2013).

Além disso, é possível observar que o mínimo de temperatura ocorre no T2, momentos antes da maturação. Esse mínimo é encontrado tanto nos SCM sem, quanto nos com relâmpagos. Porém, nas tempestades com relâmpagos essa diferença entre a INI e T2 é mais expressiva (Tmed: 1 K, Tmin: 2 K, Tmin9: 2 K de diferença). Esse decaimento de temperatura com mínimo antes da maturação corresponde ao momento em que as tempestades apresentam maior conteúdo de gelo decorrente dos movimentos ascendentes que permitem que o conteúdo de água das nuvens se eleve na atmosfera e encontre temperaturas mais frias (REYNOLDS *et al.*, 1957). Esses resultados também sugerem que a taxa de decaimento da temperatura na fase inicial da tempestade poderia ser um bom indicador da probabilidade de a tempestade produzir relâmpagos.

Figura 23 - Ciclo de vida das temperaturas (em Kelvin): Média (Tmed, linha laranja), Mínima (Tmin, linha azulclaro) e média do *kernel* dos 9 *pixels* mais frios (Tmin9, linha azul) dos SCM: (a) sem relâmpagos e (b) com relâmpagos durante cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



Os resultados de Mattos e Machado (2011) mostraram que a Tmin9 possui melhor correlação com os relâmpagos que a Tmed e Tmin. Assim torna-se importante analisar a variável Tmin9 de uma maneira mais detalhada (Figura 24), através da análise dos percentis de 50 e 90%. Nota-se que a evolução da Tmin9 segue os padrões da figura anterior (Figura 23), porém aqui é possível observar que os SCM sem relâmpagos possuem temperaturas mais elevadas que os SCM com relâmpagos tanto no valor médio, quanto nos percentis de 50%, onde os valores são superiores a 220 K. Em adição, os SCM com relâmpagos alcançam valores de percentil de 50% inferiores a 215 K. Ou seja, na Tmin9 cerca de 50% das tempestades com relâmpagos podem alcançar valores semelhantes ao valor médio da Tmin (Figura 23) no estágio T2 (214 K). Isso evidencia ainda mais a diferença nas temperaturas do topo das nuvens entre tempestades com e sem relâmpagos.

Figura 24 - Ciclo de vida da temperatura mínima do kernel dos 9 pixels (Tmin9, em Kelvin) dos SCM: (a) sem relâmpagos e (b) com relâmpagos para cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50 e a área em cinza-claro o percentil 90.



Enfatizando agora as tempestades com relâmpagos, será mostrada a evolução das características dos relâmpagos ao longo do ciclo de vida. Para a contabilização da quantidade de relâmpagos (Figura 25) foi obtido em cada estágio do ciclo de vida os valores dos três tipos de relâmpagos (IN, NS- e NS+), e calculado o valor médio. Para os três tipos de relâmpagos, os máximos valores ocorrem no segundo estágio do ciclo de vida (T2), e o segundo maior valor ocorre durante o estágio de iniciação dos SCM. Para os relâmpagos IN, os valores médios na iniciação e T2 foram 115 e 116 ocorrências30 min⁻¹, respectivamente. Os relâmpagos NS-(NS+) apresentaram valores de 20,5 e 21 ocorrências 30 min⁻¹ (0,6 e 0,75 ocorrências 30 min⁻¹, respectivamente), respectivamente. No momento da maturação, a quantidade de relâmpagos IN e NS- apresentaram menos da metade do valor no T2 (IN: 43 e NS-: 10 ocorrências/30 min), enquanto os NS+ apresentaram valor próximo a 0,4 ocorrências por 30 minutos.

A comparação dos três tipos de relâmpagos evidencia que os relâmpagos IN ocorrem em maior quantidade que os NS- e NS+ (máximo de 116, contra 20,5 e 0,75 ocorrências/30 min para os relâmpagos IN, NS- e NS+). Esse resultado corresponde ao apresentado anteriormente no comportamento espacial dos relâmpagos (Figura 8). Ao analisar o pico de relâmpagos no estágio T2 do ciclo de vida, esse resultado é encontrado por outros autores (MATTOS; MACHADO, 2011; MAKOWSKI *et al.*, 2013; MONTEIRO *et al.*, 2021), onde o máximo de relâmpagos ocorrem momentos antes da maturação. Isso ocorre provavelmente devido ao fato que momentos antes da máxima área das tempestades (maturação) as correntes ascendentes apresentam sua máxima intensidade, a temperatura decai e permite a formação de maior conteúdo de gelo (cristais de gelo e *graupel*). Esses dois ingredientes são os principais responsáveis para a formação de relâmpagos, uma vez que as correntes ascendentes promovem o choque destes hidrometeoros e assim a carregamento e separação de cargas no interior das nuvens de tempestade (WILLIAMS, 1989).

Figura 25 - Ciclo de vida da quantidade de relâmpagos (ocorrências por 30 min) intranuvem (IN, linha preta), nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha) para os cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



Quantidade de relâmpagos dos SCM

Uma forma adicional de analisar o ciclo de vida dos relâmpagos é avaliar a evolução temporal da densidade de relâmpagos, sendo obtida pela divisão da quantidade de relâmpagos

(ocorrências a cada 30 min) pela área da tempestade (km²) (Figura 26). A maior densidade de relâmpagos para os três tipos ocorre no primeiro tempo da tempestade (INI) com valores de 0,055, 0,0175 e 0,00922 ocorrências/km² para IN, NS- e NS+, respectivamente. Estes resultados indicam que a maior produção de relâmpagos por km² ocorre nos estágios iniciais das tempestades; ou seja, quando as tempestades são menores elas são mais eficientes em produzir relâmpagos. No trabalho de Mattos e Machado (2011) foi obtido resultados semelhantes. Estes resultados sugerem que os processos de convecção durante os primeiros estágios do ciclo de vida dos SCM são mais localizados, levando à ocorrência de relâmpagos NS+ evidencia a menor ocorrência e também a sua relação com porções estratiformes dos SCM, que abrangem maiores áreas (RUTLEDGE; PETERSEN, 1994; ZIPSER *et al.*, 2006; PINTO JR. *et al.*, 2009).

Os resultados ainda mostram uma queda mais abrupta na densidade de relâmpagos entre T2 e MAT, onde os relâmpagos IN apresentaram valores de densidade na MAT próximos à densidade dos NS- na INI (~0,01 ocorrências x km⁻²), os relâmpagos NS- (NS+) apresentaram valor de 2 x 10⁻³ (5 x 10⁻⁵) ocorrências x km⁻² na MAT. No estágio MAT para a DIS a densidade de relâmpagos apresenta uma queda menos acentuada, com mínimos valores na DIS. Os valores de densidade de relâmpagos encontrados no trabalho de Mattos e Machado (2011) mostram comportamento semelhante, porém com valores menos intensos na iniciação (0,0045 ±0,0015 ocorrências x km⁻²). **Figura 26** - Ciclo de vida da densidade de relâmpagos (ocorrências por km² em 30 min): intranuvem (IN, linha preta), nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha) para os cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



Por fim, uma análise inovadora no ciclo de vida dos SCM com relâmpagos no Sudeste do Brasil é o comportamento do pico de corrente dos relâmpagos nuvem-solo (NS- e NS+). Essa análise mostra a característica de intensidade dos relâmpagos que tocam o solo, sendo uma informação importante para tomadores de decisão e em diversos setores (MCDANIEL, 2006; MIYAZAKI; OKABE, 2009). A seguir é mostrada a evolução dos valores médios de pico de corrente (kA) no ciclo de vida para os relâmpagos NS- (linha azul) e NS+ (linha vermelha, Figura 27). Nesta análise foi utilizada como referência o valor de pico de corrente do percentil de 50% para cada tempestade. Nota-se uma diferença expressiva dos valores de pico de corrente médio do início das tempestades para o final das tempestades para ambos tipos de relâmpagos (isto é, NS- e NS+). No início dos SCM, o PC- apresenta valor de -11,75 kA com uma leve diminuição de intensidade no estágio T2 (-11,25 kA), porém a partir do estágio MAT os valores apresentam um aumento quase exponencial de intensidade de pico de corrente, com máximo valor na dissipação (-13,95 kA). O PC+ apresenta configuração semelhante ao PC-, mas com

valores crescentes de pico de corrente desde a INI (32,2 kA) até a DIS (37,08 kA) com uma curva de aumento semelhante à uma função logarítmica.

O comportamento do pico de corrente mostra que os relâmpagos NS (NS- e NS+) no início das tempestades, apesar de apresentarem maior quantidade (Figura 25), são menos intensos que os do fim das tempestades. A física por trás deste resultado é devido ao fato que no final das tempestades há maior acúmulo de cargas e menos choques de hidrometeoros (correntes ascendentes mais fracas), causando um menor número de relâmpagos, porém mais intensos (MONTANYÀ *et al.*, 2009).

Figura 27 - Ciclo de vida do pico de corrente médio (em kA) dos relâmpagos: nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha) para os cinco estágios i) INI (iniciação), ii) T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), iii) MAT (maturação), iv) T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e v) DIS (dissipação).



6.2.2 Análise das Tempestades: Sem Relâmpagos, IN e NS

Na seção anterior (6.2.1) foi realizada uma comparação entre as propriedades físicas e elétricas dos SCM sem e com algum tipo de relâmpago (IN ou NS). Porém, existem tempestades que produzem preferencialmente relâmpagos IN, e outras relâmpagos NS. Assim, torna-se importante entender as diferenças nas propriedades dessas tempestades. A Figura 28 mostra a localização espacial da gênese dos SCM: (i) sem relâmpagos (círculos azuis), com relâmpagos: (ii) intranuvem (IN, triângulos vermelhos) e nuvem-solo (NS, estrelas roxas). No total, foram identificados 1667 SCM nas delimitações especificadas anteriormente, sendo: 788 sem relâmpagos, 199 com relâmpagos IN e 680 com relâmpagos NS.

As tempestades sem relâmpagos representaram 47,27% do total de SCM, as com relâmpagos NS apresentaram um total de 40,79%, enquanto as IN representaram 11,94%. Isso mostra que as tempestades sem relâmpagos ocorrem em maior quantidade que tempestades de um tipo específico de relâmpago (IN ou NS). Porém, tempestades com relâmpagos (IN+NS) representam um total de 52,73% do total, mostrando que os SCM possuem condições para formação de relâmpagos. Novamente, os padrões espaciais não mostram uma região preferencial de formação de SCM.

Figura 28 - Distribuição espacial do local de gênese dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) na região Sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017 identificados pelo algoritmo ForTraCC separados naquelas tempestades: i) sem relâmpagos (círculos azuis), com relâmpagos ii) intranuvem (IN, triângulos vermelhos) e (iii) nuvem-solo (NS, estrelas roxas).



Com relação à duração dos SCM, a Figura 29 mostra a distribuição de frequência (em %) da duração (em h) dos três tipos de SCM: sem relâmpagos (Figura 29a), relâmpagos IN (Figura 29b) e NS (Figura 29c). Comparando a duração destes três diferentes tipos de SCM, é possível observar uma diferença no padrão de duração de sistemas sem relâmpagos para os dois grupos de SCM com relâmpagos. Como explicado anteriormente, os SCM sem relâmpagos tendem a ter menor duração (média: 1,8 h e máxima: 7,0 h). Porém, comparando as durações dos SCM sem relâmpagos e com relâmpagos IN, essa diferença não é tão expressiva, visto que a duração média (máxima) dos sistemas IN é de 1,8 h (8,5). Ou seja, na média, a duração de tempestades sem relâmpagos e com relâmpagos IN são semelhantes, apesar de uma maior frequência de durações superiores a 3,5 h.

Já na comparação de SCM sem relâmpagos com os NS é possível observar uma maior diferença. As tempestades sem relâmpagos tendem a durar cerca de 1,0 h a menos que

tempestades NS (duração média: 2,8 h e máxima: 9,5 h). Essa diferença é também observada na mediana (2,5 h para NS e 1,5 h para os sem relâmpagos) e na moda (2,0 h para NS e 1,0 h para os sem relâmpagos). Além disso, a distribuição de frequência dos NS mostra uma maior contribuição de durações superiores a 3,0 h (cerca de 43% das ocorrências), visto a configuração da curva de frequência mais achatada para direita.

Essa diferença de duração de sistemas com relâmpagos NS foi também observada no trabalho de Monteiro *et al.* (2021), onde os autores encontraram valores para duração média de 2,3 h em tempestades com relâmpagos NS. Essa maior diferença na duração de sistemas NS ocorre devido que estas tempestades ocorrem em ambientes de maior instabilidade e com forçantes convectivas mais intensas (MATTOS; MACHADO, 2011).




A seguir, serão apresentadas as comparações da área, taxa de expansão inicial e de temperatura dos SCM sem relâmpagos, com relâmpagos IN e NS. A Figura 30 apresenta a comparação da área (em km²) dos três grupos de tempestades: sem relâmpagos (cores azuis nos gráficos), relâmpagos IN (cores vermelhas) e NS (cores roxas) com relação à distribuição de frequência (Figura 30a) e a dispersão dos dados (boxplot) e sua distribuição (violinoplot) (Figura 30b). Os valores da área e temperatura referem-se aos valores absolutos destas variáveis em todo o ciclo de vida das tempestades. Os SCM sem relâmpagos possuem menores áreas (Figura 30a), e existe uma maior contribuição de SCM com menores áreas (com pico de valores médios próximos a 1700 km², com cerca de 40% das ocorrências em torno deste valor e valor médio de 2614,07 km²). Nos SCM com relâmpagos IN os valores médios possuem um pico em torno de 2200 km², contendo cerca de 30% das ocorrências e média de 2591,76 km² (Figura 30a). Nas tempestades NS, é possível observar uma média de 3308 km² (cerca de 35% das ocorrências) (Figura 30a). Isso mostra que os SCM sem relâmpagos possuem em média áreas maiores que os IN (cerca 22.31 km²) porém com menor distribuição de frequência de áreas maiores, visto pelo pico de ocorrências inferiores ao IN. Já em comparação com os NS, a diferença no valor médio é de cerca de 700 km² a menos. Na análise da Figura 30b é possível observar que a distribuição de frequência dos SCM sem relâmpagos tende a ter área abaixo da mediana, nos IN em torno da mediana e nos NS maior contribuição de frequências acima da mediana. O Intervalo Interquartílico (IQR) mostra que nos SCM sem relâmpagos 50% das tempestades se concentram entre 1800 e 3100 km². Já a concentração dos 50% dos SCM com relâmpagos IN (NS) apresenta intervalo entre 1900 e 3000 km² (2300 e 3800 km². Isso evidencia que os SCM com relâmpagos possuem maior área, em especial os SCM com relâmpagos NS.

Estas comparações mostram que tempestades sem relâmpagos tendem a possuir menores áreas que os SCM com relâmpagos IN e estes, por sua vez, possuem menores áreas que os NS, como mostrado por Monteiro *et al.* (2021) comparando SCM sem relâmpagos e NS. Foi constatado assim que os SCM que produzem apenas relâmpagos NS possuem maiores áreas, que pode ser explicado devido ao maior desenvolvimento vertical comparado com os SCM sem relâmpagos e IN, aumentando assim a divergência em altos níveis (aumento da área horizontal) e maior probabilidade de atingir a tropopausa (MACHADO *et al.*, 1998; MACHADO; LAURENT, 2004).

Figura 30 - (a) Histograma de frequência relativa (%) e (b) boxplot e violinplot da área (km²) dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM): sem relâmpagos (linhas azuis), relâmpagos intranuvem (IN, linhas vermelhas) e relâmpagos nuvem-solo (NS, linhas roxas) para a região sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017. Os valores mostrados na legenda da Figura a) representa o valor médio da propriedade sendo analisada.



Comparação da Área dos SCM

A Figura 31 mostra a distribuição de valores para a taxa de expansão dos SCM. Comparando os três grupos, nota-se que as maiores diferenças ocorrem entre a distribuição de frequência relativa entre SCM sem relâmpagos e SCM com relâmpagos NS. O pico no valor médio de frequência para os SCM sem relâmpagos foi de 90 10^{-6} s⁻¹ (cerca de 37% das ocorrências), enquanto para os NS o valor é superior a 250 10^{-6} s⁻¹ (cerca de 32%). Os SCM com relâmpagos IN apresentaram valor no pico de frequência intermediário aos dois grupos anteriores, com valor de 180 10^{-6} s⁻¹ (cerca de 27%). O valor médio encontrado para a distribuição foi de 176,4, 200,95 e 258,26 10^{-6} s⁻¹ para os SCM sem relâmpagos, IN e NS, respectivamente. Na análise da Figura 31b observa-se que as diferenças na taxa de expansão inicial são ainda mais marcantes. Os 50% dos SCM sem relâmpagos estão abaixo de 250 e acima de 80 10^{-6} s⁻¹ com mediana em 150 10^{-6} s⁻¹. Os IN estão abaixo de 280 e acima de 110 10^{-6} s⁻¹ com mediana em 185 10^{-6} s⁻¹ e os NS estão abaixo de 340 e acima de 180 10^{-6} s⁻¹ com

mediana em 250 10⁻⁶ s⁻¹. Além disso, a distribuição dos sem relâmpagos possui maior concentração de ocorrências abaixo da mediana, enquanto os IN e NS apresentam distribuição mais uniforme em torno da mediana e com relativa maior distribuição acima da mediana nos NS.

A taxa de expansão inicial maior nos SCM com relâmpagos mostra que essas tempestades tendem a crescer mais rápido que tempestades sem relâmpagos. Como observado por Mattos e Machado (2011). Nesse contexto, as tempestades com relâmpagos possuem crescimento abrupto devido à contribuição das intensas correntes ascendentes que permitem que a tempestade se desenvolva vertical e horizontalmente mais rapidamente que tempestades sem relâmpagos. Porém, neste trabalho, foi possível observar que a taxa de expansão inicial dos SCM com relâmpagos NS se diferencia ainda mais dos SCM sem relâmpagos.

Figura 31 - (a) Histograma de frequência relativa (%) e (b) boxplot e violinplot da taxa de expansão inicial (10⁻⁶ s⁻¹) dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM): sem relâmpagos (linhas azuis), relâmpagos intranuvem (IN, linhas vermelhas) e relâmpagos nuvem-solo (NS, linhas roxas) para a região sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017. Os valores mostrados na legenda da Figura a) representa o valor médio da propriedade sendo analisada.



Comparação da Taxa de Expansão Inicial dos SCM

A Figura 32 mostra a comparação da Tmed (Figura 32a-b), Tmin (Figura 32c-d) e Tmin9 Tmed (Figura 32e-f) dos SCM sem relâmpagos, com relâmpagos IN e NS. A Tmed (Figura 32a-b) possui pico de ocorrência em 230 K para os SCM sem relâmpagos, enquanto os SCM com relâmpagos possuem pico em 226 K (225 K) para os IN (NS). A distribuição dos dados mostra que as tempestades sem relâmpagos possuem menor variação e com distribuição levemente mais concentrada acima da mediana e os 50% dos dados entre 231 e 227 K. Os SCM com relâmpagos IN mostram distribuição com variação dos 50% dos dados entre 227 e 224 K, com distribuição mais simétrica em torno da mediana. Os NS apresentam 50% dos dados entre 226 e 221 K, com distribuição de valores abaixo da mediana.

Na Tmin (Figura 32c-d) a distribuição de frequência apresentou pico em 224 K, 217 K e 214 K para tempestades sem relâmpagos, com IN e NS, respectivamente. O comportamento dos dados mostra que 50% dos dados se concentram entre 225 e 219 K para os SCM sem relâmpagos, entre 220 e 213 K para os IN e entre 217 e 210 K para os NS. Além de que, nos NS, a concentração dos dados novamente apresenta concentração de valores abaixo da mediana. A Tmin9 apresentou valores médios de 224, 219, e 216,39 K para os SCM sem relâmpagos, IN e NS, respectivamente. Os 50% dos dados se concentraram entre 227 e 222 K para os SCM sem relâmpagos, entre 223 e 215,3 K para os IN e entre 220 e 212,6 K para os NS.

A partir destas análises é possível verificar uma diferença mais marcante entre os SCM sem relâmpagos e com relâmpagos NS, principalmente em relação à variável Tmin. Nessa variável, os valores médios apresentaram uma diferença de 7,97 K. Essa diferença mostra que as tempestades com relâmpagos NS apresentam temperaturas mais frias em relação às tempestades sem relâmpagos. Entre os SCM sem relâmpagos e IN é perceptível temperaturas mais frias nos IN, porém essa diferença é menor (4,7 K) comparada com os NS. As temperaturas mais frias para as tempestades com predomínio de relâmpagos IN mostram que o resfriamento dessas tempestades é maior, devido ao comportamento principalmente das correntes ascendentes que geram topos mais frios e elevam a probabilidade de se encontrar maiores quantidades de gelo no interior destas tempestades, e assim, maior propensão de formação de relâmpagos por colisão de hidrometeoros (REYNOLDS *et al.*, 1957).

Figura 32 - Histograma de frequência relativa (%) e boxplot e violinplot das temperaturas (em Kelvin): (a-b) Média, (c-d) Mínima e (e-f) média do kernel dos 9 pixels mais frios dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM): sem relâmpagos (linhas azuis), relâmpagos intranuvem (IN, linhas vermelhas) e relâmpagos nuvem-solo (NS, linhas roxas) para a região sudeste do Brasil no período de 2015 a 2017. Os valores mostrados na legenda da Figura a) representa o valor médio da propriedade sendo analisada.



Comparação da Temperatura dos SCM

Com relação ao comportamento elétrico das tempestades com relâmpagos no ciclo de vida, as próximas figuras mostram a comparação da quantidade, densidade e pico de corrente dos SCM com relâmpagos IN e NS. Os relâmpagos NS- e NS+ das tempestades apenas com relâmpagos NS atingem valor máximo no estágio T2 do ciclo de vida, com valores médios de 29 e 1,2 ocorrência/30 30 min (Figura 33). Já os relâmpagos IN apresentaram comportamento diferente, o pico ocorreu no estágio de iniciação, com valor médio próximo a 3,4 ocorrência em 30 minutos.

Nesse aspecto, os relâmpagos NS- apresentam maior quantidade média em todo o ciclo de vida. Esperavam-se maiores quantidades de relâmpagos IN, porém, isso ocorreu principalmente devido a forma da delimitação do SCM. A configuração dos relâmpagos NS- e NS+ no ciclo de vida dos SCM puramente NS mostra comportamento semelhante comparado aos SCM com relâmpagos (Figura 25). Em contrapartida, a maior quantidade de relâmpagos IN no primeiro tempo das tempestades mostra que as tempestades puramente intranuvem possuem uma configuração diferencial de ocorrência de relâmpagos. Esse resultado sugere haver maior quantidade de relâmpagos IN no início dos SCM, isso ocorre devido à velocidade vertical e ao crescimento das partículas de gelo no início das tempestades, assim como documentado por vários autores (WILLIAMS *et al.*, 1989; STOLZENBURG *et al.*, 2015; Mattos *et al.* (2017).

Figura 33 - Comparação do ciclo de vida da quantidade de relâmpagos (em ocorrências 30 min⁻¹): intranuvem (IN, linha preta), nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha), para tempestades que geraram apenas relâmpagos IN e NS, respectivamente. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).



A densidade de relâmpagos (Figura 34) para os três tipos apresentou comportamento semelhante aos SCM com relâmpagos. Nos três tipos de relâmpagos, a maior densidade de relâmpagos ocorre na INI dos SCM (assim como na Figura 26). A diferença para a densidade dos relâmpagos nos sistemas puramente IN e NS é que os valores de densidade dos IN apresenta valores menores (0,88 nos SCM com relâmpagos contra 0,031 ocorrências x km⁻² nos sistemas IN no momento da iniciação). O contrário ocorre para os SCM puramente NS na INI, onde as densidades são maiores (0,196 e 0,007 ocorrências x km⁻² para os relâmpagos NS- e NS+,

respectivamente) nestes sistemas que nos sistemas com relâmpagos (0,175 e 0,0048 ocorrências x km⁻² para NS- e NS+, respectivamente). No restante do ciclo de vida, se mantém o padrão de comportamento apresentado na Figura 26. Novamente, esse maior valor nos NS pode ser explicado pelos processos de convecção no início das tempestades, onde a convecção ocorre em uma menor porção do sistema, levando a maiores ocorrências de relâmpagos em menores distâncias (MATTOS; MACHADO, 2011).

Figura 34 - Comparação do ciclo de vida da densidade de relâmpagos (em ocorrências km⁻² 30 min⁻¹): intranuvem (IN, linha preta), nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha), para tempestades que geraram apenas relâmpagos IN e NS, respectivamente. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).



Com relação à intensidade dos relâmpagos NS, a Figura 35 mostra o ciclo de vida do pico de corrente (kA) dos SCM puramente NS. A configuração do ciclo de vida dos SCM puramente NS no pico de corrente negativo (PC-, linha azul) mostra relativa semelhança ao PC-dos SCM com relâmpago (Figura 27). Os valores médios na INI e no T2 apresentaram valores semelhantes (-11,75 e -11,25 kA, respectivamente) aos SCM com relâmpagos, a diferença ocorre principalmente na MAT e no T4, onde os valores médios são maiores nos SCM puramente NS (-11,9 e -12,9 kA) em comparação aos SCM com relâmpagos (-11,55 e -12,4 kA). Na DIS, os SCM puramente NS apresentaram valores inferiores aos SCM com relâmpagos (-13,5 contra -13,87 kA).

No PC+ (linha vermelha) o comportamento segue um padrão semelhante. No início do ciclo de vida os valores se assemelham aos valores dos SCM com relâmpagos e a partir da MAT o pico de corrente nos NS apresentam valores maiores (36,7, 39,94 e 38,4 kA na MAT, T2 e DIS, respectivamente) do que os SCM com relâmpagos (36,1, 36,76 e 37,1 kA na MAT, T2 e DIS, respectivamente).

Assim, é possível concluir que nos SCM puramente NS, o PC- e PC+ são maiores, ou seja, mais intensos a partir da MAT. Pode-se observar também que há um pico de intensidade no T4 no PC+. Essa evolução de intensidade dos relâmpagos no ciclo de vida foi descrita por Montanyà *et al.*, 2009, que encontrou padrões semelhantes, onde este padrão foi relacionado à diminuição da quantidade de relâmpagos no final das tempestades e aumento da carga elétrica no interior das mesmas.

Figura 35 - Comparação do ciclo de vida do pico de corrente médio (em kA) dos relâmpagos: nuvem-solo negativo (NS-, linha azul) e nuvem-solo positivo (NS+, linha vermelha), para tempestades que geraram apenas relâmpagos IN e NS, respectivamente. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).



Enfatizando as análises físicas dos SCM, serão exploradas agora as diferenças dos SCM com relâmpagos IN e NS. Primeiramente, a comparação da área (em km²) dos SCM puramente IN (Figura 36a) e NS (Figura 36b) mostra que no início da tempestade, não há grandes diferenças entre estes dois grupos (50% dos SCM entre 1200 e 3000 km²). No entanto, nos momentos T2, MAT e T4 os sistemas NS apresentam maiores áreas (valores médios de 4320, 6240 e 4880 km² para os NS contra 3168, 4320 e 3600 km² nos IN, para os momentos T2, MAT e T4, respectivamente). Ou seja, o momento de máxima área dos IN se equipara à área do

momento T2 nos NS. Na dissipação a área dos dois tipos de tempestade se mantém semelhante, com a distribuição dos 50% dos SCM entre 1200 e 2560 km².

Neste caso, os SCM com relâmpagos puramente NS possuem maior área principalmente na maturação (diferença de 1920 km² no valor médio), permitindo que estes sistemas se configuram mais intensamente que os IN. Esse comportamento é observado nas observações de duração (Figura 29) e na distribuição de frequência (Figura 30), onde os sistemas de maior duração tendem a ter também maiores áreas (MACHADO; LAURENT, 2004; MATTOS, 2009; TADESSE; ANAGNOSTOU, 2009).

Figura 36 - Comparação do ciclo de vida da área (km²) para os SCM: (a) apenas com relâmpagos intranuvem (IN) e apenas relâmpagos nuvem-solo (NS) durante o ciclo de vida. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50 e a área em cinza-claro o percentil 90.



Além da área, a comparação da taxa de expansão (10^{-6} s^{-1}) dos SCM com relâmpagos puramente IN e NS é mostrada na Figura 37. As tempestades IN (Figura 37a) e NS (Figura 37b) apresentam valores médios semelhantes na iniciação (valores próximos a 230 10^{-6} s^{-1}), porém para os 50% dos SCM NS, os valores situam-se entre 203 e 250 10^{-6} s^{-1} . No T2 os sistemas NS ainda se mantêm com valores médios acima dos IN (210 contra 202 10^{-6} s^{-1}). Porém, no T4 e na DIS os sistemas NS possuem maior decaimento que os IN (-90 e -280 10^{-6} s^{-1} no T4 e DIS, respectivamente). Então, assume-se que os sistemas NS possuem uma expansão antes da maturação mais intensa que os sistemas IN, como observado na Figura 31. Porém, é possível observar aqui que, apesar de uma expansão inicial na área maior, os NS possuem um decaimento mais abrupto que os IN a partir da maturação. Isso pode ser explicado pelo fato que estes sistemas possuem processos dinâmicos no início do ciclo de vida que promovem o crescimento inicial e permitem que estes sistemas alcancem características propícias para gerar relâmpagos (MATTOS; MACHADO, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2021).

Figura 37 - Comparação do ciclo de vida da taxa de expansão (10^{-6} s^{-1}) para os SCM: (a) com relâmpagos, (b) apenas com relâmpagos intranuvem (IN), apenas relâmpagos nuvem-solo: (c) nuvem-solo negativo (NS-) e (d) nuvem-solo positivo (NS+) durante o ciclo de vida. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50, a área em cinza-claro o percentil 90 e a linha vermelha contínua representa taxa de expansão de 0 10^{-6} s^{-1} .



A análise das temperaturas dos SCM puramente IN (Figura 38a) e NS (Figura 38b) mostra novamente que a maior diferença da temperatura com relação aos dois grupos de tempestades ocorre na Tmin. Na Tmin dos sistemas IN houve valores iguais na INI e no T2 de 216 K, já nos NS a menor temperatura encontrada foi no T2 com 212,5 K. A Tmin9 nos dois grupos houve menor temperatura no T2 com 217,7 K (215 K) nos IN (NS). Na Tmed, a diferença entre os dois grupos no T2 foi de cerca de 2 K. Assim, a diferença nas temperaturas, principalmente na Tmin (3,5 K) mostra que os sistemas NS conseguem atingir menores

temperaturas e quanto menor a temperatura do topo das nuvens, maior a probabilidade de ocorrência de relâmpagos (MACHADO *et al.*, 2009).

Figura 38 - Comparação do ciclo de vida das temperaturas (em K): Média (Tmed, linha laranja), Mínima (Tmin, linha azul-claro) e média do kernel dos 9 pixels mais frios (Tmin9, linha azul) para os SCM: (a) com relâmpagos, (b) apenas com relâmpagos intranuvem (IN), apenas relâmpagos nuvem-solo: (c) nuvem-solo negativo (NS-) e (d) nuvem-solo positivo (NS+) durante o ciclo de vida. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).



Na observação da temperatura mínima do kernel de 9 pixels (Figura 39) comparando os sistemas IN (Figura 39a) e NS (Figura 39b) é possível observar que no T2 os NS possuem menor temperatura (215 K no valor médio). No restante do ciclo de vida, o comportamento os IN e NS possuem relativa semelhança. Apesar disso, os 50% dos NS alcançam um mínimo de 210 K. Novamente foi observado uma menor temperatura nos sistemas estritamente NS, principalmente no T2 do ciclo de vida. Ou seja, é ainda mais pronunciado o decaimento de temperatura estágios antes da maturação nos sistemas NS (SABBAS; SENTMAN, 2003; CORREOSO *et al.*, 2006).

Figura 39 - Comparação do ciclo de vida da temperatura média do kernel dos 9 pixels mais frios (Tmin9, em K) para os SCM: (a) com relâmpagos, (b) apenas com relâmpagos intranuvem (IN), apenas relâmpagos nuvem-solo: (c) nuvem-solo negativo (NS-) e (d) nuvem-solo positivo (NS+) durante o ciclo de vida. Onde: INI (iniciação), T2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), MAT (maturação), T4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). A linha contínua preta representa o valor médio, a área em cinza-escuro representa o percentil 50 e a área em cinza-claro o percentil 90.



7 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a relação entre as propriedades físicas e elétricas das tempestades na região Sudeste do Brasil. Foram feitas duas abordagens separadamente. Primeiramente foi realizada a análise da distribuição espacial e temporal dos relâmpagos na região Sudeste do Brasil entre os anos de 2015 e 2021. Na sequência foi avaliado as características das tempestades com e sem relâmpagos entre 2013 e 2017 na região Sudeste do Brasil através do algoritmo ForTraCC. Para isso foram utilizados os dados de temperatura de brilho do canal infravermelho proveniente do satélite geoestacionário GOES-13 e dados de relâmpagos da rede de detecção em solo ENTLN. O pioneirismo do presente estudo reside na utilização de uma extensa base de dados de tempestades e relâmpagos, e na caracterização dos relâmpagos IN em tempestades; análise esta que até o momento era ausente na literatura.

A análise da distribuição espacial e temporal dos relâmpagos mostrou que as maiores ocorrências de relâmpagos IN e NS- se encontram nas regiões montanhosas entre os Estados de MG, SP e RJ, abrangendo as regiões do Vale do Paraíba, Zona da Mata mineira e bifurcando para o RJ na porção litorânea. Os relâmpagos NS+ possuem máximos na porção oeste da região Sudeste. Na média anual os valores máximos para os três tipos de relâmpagos foram de 80, 18 e 0,75 ocorrências ano⁻¹ km⁻², para IN, NS- e NS+, respectivamente nas regiões descritas acima. Quanto à porcentagem de ocorrências, os relâmpagos IN representaram 79,46% (aproximadamente 618,14 mil ocorrências por ano) dos relâmpagos totais. Na sequência, os relâmpagos NS- apresentaram um percentual de 19,66% (aproximadamente 152,91 mil ocorrências por ano) e os NS+ um total de 0,88% (aproximadamente 6,83 mil ocorrências por ano). Assim, foi possível verificar que a maior parte dos relâmpagos ocorrem sem tocar o solo.

Em relação ao pico de corrente, o padrão médio anual mostra que os relâmpagos NS- e NS+ apresentam diferentes comportamentos de intensidade e localização. Os valores médios encontram-se entre 34,85 e 19,45 kA para o PC+ e PC-, respectivamente. Quanto à localização, os relâmpagos NS- mais intensos (30-35 kA) ocorrem na parte oeste do estado de São Paulo e norte de Minas Gerais, enquanto uma distribuição espacial mais homogênea é observada para a intensidade dos relâmpagos NS+ (valores de aproximadamente 30-45 kA) com maiores valores na porção central de São Paulo e sul de Minas Gerais.

Observou-se aumento para os três tipos de relâmpagos no período de 2015 (IN: 473,9 mil; NS-: 96,7 mil e NS+: 4,4 mil relâmpagos) para 2020 (IN: 861,7 mil; NS-: 192,6 mil e NS+: 10,7 mil relâmpagos), possivelmente devido a uma melhoria na eficiência de detecção da rede em solo. No ciclo mensal e horário foram observados máximos nos meses de primavera e verão para os IN e NS-, com um leve aumento de máximos na primavera e outono nos NS+, e com

valores máximos de relâmpagos a partir das 12:00 HL com pico às 16:00 HL. Para o PC- e PC+, os máximos mensais acompanham os máximos de relâmpagos e o ciclo mensal mostra maiores valores de PC+ no final do inverno e início da primavera (~40 kA) e para o PC- menor quantidade no período de inverno (~20 kA). Isso pode ter relação com a emissão de maior quantidade de aerossóis provenientes de queimadas. No ciclo horário o pico de corrente não apresenta variação significativa, apenas para o PC+ que apresenta máximos no início da manhã, que pode ser relacionado com a origem e evolução das tempestades ao longo do dia. Os *hotspots* de relâmpagos IN e NS- mostram que os máximos ocorrem na intersecção entre SP, MG e RJ nas cidades montanhosas (Valença - RJ), com exceção do *hotspot* do NS- que apresentou a cidade de São Paulo - SP na classificação de máximo. Nos relâmpagos NS+ os máximos se localizam nas cidades mais a oeste da região Sudeste e no extremo sul de São Paulo, onde os máximos de relâmpagos NS+ foram encontrados.

Em relação à segunda parte do trabalho, a partir dos SCM rastreados na região de estudo e o banco de dados de relâmpagos, a distribuição espacial da gênese dos SCM sem e com relâmpagos possui um caráter homogêneo. Com relação às características físicas dos SCM, foi possível obter uma diferenciação dos SCM sem e com relâmpagos. Os SCM com relâmpagos possuem menor duração em relação aos com relâmpagos (cerca de 30 minutos a menos) e os com apenas relâmpagos NS tendem a durar ainda mais (cerca de 1 h a mais que os IN e sem relâmpagos).

Com relação à comparação entre os três tipos de tempestades (isto é, sem relâmpagos, com relâmpagos IN e NS), foi observado que a área dos SCM sem relâmpago está limitada a uma área máxima de 3100 km² (cerca de 50% das ocorrências) e que a área dos SCM com relâmpagos NS possuem áreas muito maiores, alcançando valores de 3800 km² (50% das ocorrências). Na comparação da taxa de expansão inicial, foi possível constatar que em média, os SCM com relâmpagos NS possuem maiores taxas de expansão inicial (258,26 x 10^{-6} s⁻¹) em relação aos SCM sem relâmpagos (176,40 x 10^{-6} s⁻¹); indicando ser um parâmetro importante para diferenças tempestades sem e com relâmpagos. Já os SCM com relâmpagos IN apresentaram um valor entre estes dois tipos (200,95 x 10^{-6} s⁻¹). Além disso, a taxa de expansão dos SCM com relâmpagos apresentou valores superiores aos SCM sem relâmpagos, principalmente nos dois primeiros estágios do ciclo de vida (INI e T2), com expansão cerca de 40 x 10^{-6} s⁻¹ maior. Isso indica que os SCM com relâmpagos.

As temperaturas estudadas no presente trabalho também apresentaram diferenças nos tipos de tempestades. Foi possível observar que as temperaturas dos SCM sem relâmpagos são

mais altas que os com relâmpagos. A Tmin dos SCM com relâmpagos, é 11 K mais baixa que a dos SCM sem relâmpagos. As outras temperaturas (Tmed e Tmin9) mostraram o mesmo padrão, porém as maiores diferenças na temperatura de brilho das tempestades foram encontradas na Tmin. Importante ressaltar que as menores temperaturas foram encontradas no momento T2 da tempestade, ou seja, antes do estágio do ciclo de vida da maior área (maturação).

No comportamento elétrico das tempestades ao longo do ciclo de vida, foi possível observar que os SCM com relâmpagos possuem maiores valores para os três tipos (IN, NS- e NS+) antes da maturação. Foi observado máximos de relâmpagos no T2 do ciclo de vida (116, 21 e 0,75 ocorrências por 30 minutos, para os IN, NS- e NS+, respectivamente). A densidade de relâmpagos apresentou máximo na iniciação dos SCM com relâmpagos em maior quantidade que os SCM com um tipo específico de relâmpago (IN: 43 e NS-: 10 ocorrências por 30 minutos). Isso se deve ao fato que os SCM com qualquer tipo de relâmpagos possuem maiores ocorrências em um núcleo de convecção mais compacto. O pico de corrente dos SCM com relâmpagos apresentou característica de se intensificar nos momentos finais das tempestades a partir da maturação, indicando que os relâmpagos mais intensos ocorrem entre o T4 e a dissipação.

Assim, este trabalho mostrou que as tempestades com relâmpagos e sem relâmpagos possuem características distintas bem definidas na região Sudeste do Brasil. Através deste trabalho foi possível verificar que os SCM sem relâmpagos possuem menores durações, menores taxas de expansão e maiores temperaturas que os SCM com relâmpagos. O comportamento destas variáveis mostrou que no ciclo de vida ocorre um padrão semelhante. Foi possível compreender também os locais com maiores/menores ocorrências de relâmpagos para os três tipos (IN, NS- e NS+). Assim, uma análise inovadora para os relâmpagos IN é mostrada no presente estudo.

O melhor entendimento dos padrões espaciais dos relâmpagos e do ciclo de vida das tempestades podem promover a melhoria de ferramentas utilizadas na previsão de curtíssimo prazo de tempo (*nowcasting*). Porém, faz-se necessário ponderar que os complexos processos físicos associados aos relâmpagos necessitam de estudos mais detalhados, como, por exemplo, que envolvam a combinação simultânea de radares polarimétricos, metodologia de multicanais com dados de satélites com melhores resoluções espaciais (como o GOES-16) e redes de monitoramento de relâmpagos em solo em mais de uma dimensão. Assim, seria possível uma representação mais aprofundada destes processos.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. P. **Relâmpagos no Nordeste do Brasil:** ocorrência, variabilidade espaçotemporal e relação com microfísica das nuvens, 2018. 130f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J.; CHRISTIAN, H. J. Where are the lightning hotspots on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 11, p. 2051-2068, 2016. DOI: https://10.1175/BAMS-D-14-00193.1.

ALVES, L.M.; MARENGO, J.A.; CAMARGO JR., H.; CASTRO, C. Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 Estudos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 385-394, 2005.

AMORATI, R.; ALBERONI, P. 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. DOI: https://doi.org/10.1017/S1350482700001328.

BOLLIGER, M.; BINDER, P.; ROSSA, A. Tracking cloud patterns by METEOSAT rapid scan imagery in complex terrain. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 12, n. 2, p. 73-80, 2003.

BRUNING, E. C.; WEISS, S. A.; CALHOUN, K. M. Continuous variability in thunderstorm primary electrification and an evaluation of inverted-polarity terminology. **Atmospheric Research**, v. 135–136, p. 274-284, 2014. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.10.009.

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.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C. A satellite method to identify structural properties of Mesoscale Convective Systems. Journal of Applied Meteorology and Climatology, v. 40, n. 10, p. 1683-1701, 2001.

CAZES-BOEZIO, G.; ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Seasonal dependence of

ENSO teleconnections over South America and relationships with precipitation in Uruguay. **Journal of Climate**, v. 16, n. 8, p. 1159-1176, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)16<1159:SDOETO>2.0.CO;2.

CECIL, D. J.; BLANKENSHIP, C. B. Toward a Global Climatology of Severe Hailstorms as Estimated by Satellite Passive Microwave Imagers. **Journal of Climate**, v. 25, n. 2, p. 687-703, 2012.

CEPED - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais:** 1991 a 2012/Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl– Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

COELHO, C. W. G. A; DINIZ, A. M. Identificação de áreas de maior ocorrência de descargas atmosféricas em Belo Horizonte – período 2000 a 2002. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13, **Anais do...** Viçosa: SBGFA, 2009.

CORFIDI, S. F.; MERITT, J. H.; FRITSCH, J. M. Predicting the movement of mesoscale convective complexes. **Weather and Forecasting**, v. 11, n. 1, p. 41-46, 1996. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0041:PTMOMC>2.0.CO;2.

CORREOSO, J. F.; HERNÁNDEZ, E.; GARCÍA-HERRERA, R.; BARRIOPEDRO, D.; PAREDES, D. A 3-year study of cloud-to-ground lightning flash characteristics of Mesoscale convective systems over the Western Mediterranean Sea. **Atmospheric Research**, v. 79, n. 2, p. 89-107, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.05.002.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and Cloud dynamics**. San Diego, Ca: Academic, p. 883, 1989.

DA SILVA, E. D.; REBOITA, M. S. Estudo da Precipitação no Estado de Minas Gerais -MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, p. 120-136, 2013. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v13i0.33345.

DE ABREU, L. P.; GONÇALVES, W. A.; MATTOS, E. V.; MUTTI, P. R.; RODRIGUES, D. T.; DA SILVA, M. P. A. Clouds' Microphysical Properties and Their Relationship with

Lightning Activity in Northeast Brazil. **Remote Sensing**, v. 13, p. 4491, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13214491.

DIGANGI, E.; LAPIERRE, J.; STOCK, M.; HOEKZEMA, M.; CUNHA, B. Analyzing lightning characteristics in central and southern South America. **Electric Power Systems Research**, v. 213, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108704.

DURKEE, J. D.; MOTE, T. L. A climatology of warm-season Mesoscale Convective Complexes in subtropical South America. International Journal of Climatology, v. 30, p. 418-31, 2009. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.1893.

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. DOI: https://doi.org/10.1175/2009JCLI2858.1.

EDDY, A. Environmental Conditions Producing Thunderstorms with Anomalous Vertical Polarity of Charge Structure. 2018. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Norman, OK: University of Oklahoma, 2018.

ESCOBAR, G. C. J. Climatologia sinótica associada com episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). In: XX Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...** Maceió-AL, 2018.

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.

FARIAS, W. R. G., PINTO JR., O., NACCARATO, K. P., PINTO, I. R. C. A. Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects. **Atmospheric Research**, v. 91, p. 485-490, 2009.

FERNANDES, W. A. **Características dos relâmpagos gerados por nuvens de tempestades em ambientes sob a influência das queimadas em Rondônia**. 2005. 161 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

```
FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. Atmosphere, v. 13, p. 873, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos13060873.
```

FERREIRA, R. N.; RICKENBACH, T. M.; HERDIES, D. L.; CARVALHO, L. M. Variability of South American convective cloud systems and tropospheric circulation during January-March 1998 and 1999. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 5, p. 961-973, 2003.

GOMES, M. A. S. S. Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas. **Dissertação** (Mestrado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 151 f., 2003.

GOODMAN, S. J.; MACGORMAN, D. R. Cloud-to-ground lightning activity in mesoscale convective complexes. **Monthly Weather Review**, v. 114, p. 2320-2328, 1986.

HOUZE, R. A. Structure and dynamics of a tropical squall-line system. **Monthly** Weather Review, v. 105, p. 1540–1567, 1977.

HOUZE, R. A. Cloud Dynamics. Academic Press, p. 573, 1993.

HU, H.; FENG, Z.; LEUNG, L. R. Quantifying Flood Frequency Associated with Clustered Mesoscale Convective Systems in the United States. **Journal of Hydrometeorology**, v. 23, n. 11, p. 1685-1703, 2022. DOI: https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0038.1.

HUI, L.; ZHOU, Y.; YAN, Z. The Characteristics of Thunderstorms and Their Lightning Activity on the Qinghai-Tibetan Plateau. **Advances in Meteorology**, v. 2022, 2022. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/9102145.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Cidades e Estados**. Disponível em: <<u>https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/es.html></u>. Acesso em: 22 fev. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Notas Técnicas**, 2018. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas#>. Acesso em: 5 dez. 2022.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE. **Mapa do Biênio 2018/2019**, 2020. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/incidencia.de.descargas.no.pais.php>. Acesso em: 28 fey. 2021.

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, n. 1, p. 69-80, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-77863710062.

JACOBI, P. R.; DA PAZ, M. G. A.; LEÃO, R. S.; ESTANCIONE, L. M. B. Water governance and natural disasters in the Metropolitan Region of São Paulo, Brazil. **International Journal of Urban Sustainable Development**, v. 5, p. 77–88, 2013.

JOSHUA D. DURKEE, J. D.; THOMAS L. MOTE, T. L.; SHEPHERD, J. The Contribution of Mesoscale Convective Complexes to Rainfall across Subtropical South America. **Journal of Climate**, v. 22, p. 4590-4605, 2009.

KOLIOS, S.; FEIDAS, H. An automated nowcasting system of mesoscale convective systems for the Mediterranean basin using Meteosat imagery. Part II: Verification statistics. **Meteoro. Aplic.**, v. 20, p. 296-307, 2013. DOI:

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. 957-64, 1999. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0957:COMCCT>2.0.CO;2.

LIMA, K. C.; GOMES, R. G. Descarga de descargas elétricas modernas em sistemas convectivos com dados do SIMEPAR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, p. 5-16, 2009.

LOMBARDO, K.; KUMJIAN, M. R. Observations of the Discrete Propagation of a Mesoscale Convective System during RELAMPAGO–CACTI. **Monthly Weather Review**, v. 150, n. 8, 2022. DOI: https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0265.1.

LYONS, W. A.; NELSON, T. E.; WILLIAMS, E. R.; CRAMER, J. A.; AND TURNER, T. R. Enhanced Positive Cloud-To-Ground Lightning in Thunderstorms Ingesting Smoke from Fires. **Science**, v. 282, n. 5386, p. 77–80, 1998. DOI:10.1126/science.282.5386.77

MCCAUL JR., E. W.; GOODMAN, S. J.; LACASSE, K. M.; CECIL, D. J. Forecasting lightning threat using cloud-resolving model simulations. **Weather and Forecasting**, v. 24, p. 709-729, 2009.

MCDANIEL, J. **Lightning Protection of Distribution Lines:** Things to Consider for a Reliable Design. In: Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, p. 1229-1232, 2006. DOI: 10.1109/TDC.2006.1668682.

MACGORMAN, D. R.; EDDY, A. J.; HOMEYER, C. R.; WILLIAMS, E. Environmental Conditions Producing Thunderstorms with Anomalous Vertical Polarity of Charge Structure. In: 25th International Lightning Detection Conference & 7th International Lightning Meteorology Conference, **Proceeding...** Florida, USA, 2018.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. The electrical nature of storms, Oxford University Press, New York, 1998.

MACHADO, L. A. T.; GUEDES, R. L.; SILVEIRA, J. M. B.; WALTZ, R. C; ALVES, M. A. S. Ciclo de vida de sistemas convectivos. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET, **Anais...** 2, p. 323-326, 1994.

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, 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. 304-9, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.003.

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**,

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complex. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, p. 1374-1387, 1980.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, n. 1, p. 1-16, 2020a. DOI: https://10.1111/nyas.14307.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L. M.; BARRETO, N. J. C.; REBOITA, M. S.; RAMOS, A. M. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: causes and impacts. **Frontiers in Climate**, v. 2, n. 3, 2020b. DOI: https://10.3389/fclim.2020.00003.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014 -2015 em São Paulo. **Revista USP**, v. 106, p. 31-44, 2015. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44.

MARTINS, J.A.; BRAND, V. S.; CAPUCIM, M.N.; FELIX, R.R.; MARTINS, L.D.; FREITAS, E.D.; GONÇALVES, F.L.T.; HALLAK, R.; SILVA DIAS, M.A.F.; CECIL, D.J. Climatology of destructive hailstorms in Brazil. **Atmospheric Research**, Boulder, v. 184, p. 126-138, 2017.

MARTINS, G.; ROSA, A. S.; SETZER, A. W.; ROSA, W.; MORELLI, F.; BASSANELLI, A. Dinâmica Espaço-Temporal das Queimadas no Brasil no Período de 2003 a 2018. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 13, p. 1558-1569, 2020. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1558-1569.

MATTHEE, R.; MECIKALSKIi, J. R. Geostationary infrared methods for detecting lightning-producing cumulonimbus clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, p. 6580-6592, 2013.

MATTOS, E. V. Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas

com as descargas elétricas. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 247 f., 2009

MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T. Cloud-to-ground lightning and Mesoscale Convective Systems. **Atmospheric Research**, v. 99, p. 377-399, 2011.

MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T.; WILLIAMS, E. R.; GOODMAN, S. J.; BLAKESLEE, R. J.; BAILEY, J. C. Electrification life cycle of incipient thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 8, p. 4670–4697, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/2016JD025772.

MATTOS, E. V.; REBOITA, M. S.; LLOPART, M. P.; ENORÉ, D. P. Análise Sinótica e Caracterização Física de uma Tempestade Intensa Ocorrida na Região de Bauru-SP. **Anuário do Instituto de Geociências** - UFRJ, v. 43, ed. 1, p. 85-106, 2020.

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, p. 1593-1611, 2013. DOI: https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR-D-11-00268.1.

MECIKALSKI, J. R., BEDKA, K. M. Forecasting Convective Initiation by Monitoring the Evolution of Moving Cumulus in Daytime GOES Imagery. **Monthly Weather Review**, v. 134, ed. 1, 49-78, 2006.

MECIKALSKI, J. R.; BEDKA, K. M.; PAECH, S. J.; LITTEN, L. A. A Statistical Evaluation of GOES Cloud-Top Properties for Nowcasting Convective Initiation. **Monthly Weather Review**, v. 136, ed. 12, p. 4899-4914, 2008.

MECIKALSKI, J. R.; LI, X.; CAREY, L. D.; MCCAUL JR, E. W.; COLEMAN, T. A. Regional comparison of GOES cloud-top properties and radar characteristics in advance of first-flash lightning initiation. **Monthly Weather Review**, v. 141, n. 1, p. 55-74, 2013. DOI: https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00120.1.

MIYAZAKI, T.; OKABE, S. A Detailed Field Study of Lightning Stroke Effects on Distrubtion. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, p. 352-359, 2008.

MONTANDON, E.; AHNEBRINK, T.; BENT, R. B. Analysis of lightning strike density and recorded waveforms by the Swiss lightning position and tracking system. In: The Lightning People. Proceedings of the 20 th International Conference on Lightning Protection, Suiça, Sept. 1990, **Atmospheric Research Systems INC**, p.1-5, 1992.

MONTANYÀ, J.; SOULA, S.; PINEDA, N.; VELDE, O. D.; CLAPERS, P.; SOLÀ, G.; BECH, J.; ROMERO, D. Study of the total lightning activity in a hailstorm. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p.430-437, 2009. DOI: ff10.1016/j.atmosres.2008.06.008ff. ffhal-00441287f.

MONTEIRO, J. R.; MATTOS, E. V.; FLAUBER, W.; LIMA, 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.

MOTA, G. V. Characteristics of Rainfall and Precipitation Features Defined by the Tropical Rainfall Measuring Mission over South America. Tese de Doutorado, Universidade de Utah, Estados Unidos, 215 p., 2003.

MURRAY, N. D.; ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G. R. Effect of Pollution from Central American Fires on Cloud-To-Ground Lightning in May 1998. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 15, p. 2249-2252, 2000. DOI: 2249–2252. doi:10.1029/2000gl011656.

NACCARATO, K. P. Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do **Brasil**. 2005. 362 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

NACCARATO, K. P.; ALBRECHT, R. I.; PINTO JR., O. Cloud-to-ground lightning density over Brazil based on high-resolution lightning imaging sensor (LIS) data. In: XIV International Conference On Atmospheric Electricity. **Proceedings...** Rio de Janeiro, Brazil, 2011.

NACCARATO, K. P.; PINTO, O. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total Lightning Network (BrasilDAT). In: INTERNATIONAL

NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A.; CAZETTA FILHO, A.; AMORIM, G. E. Lightning characteristics in the southeastern region of Brazil: 1999-2000. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 7., 2001, Salvador, Brasil. **Proceedings...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), 2001.

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.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13, 2003. DOI:10.1029/2003GL017496.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O.; SLOOP, C. D.; HECKMAN, S.; LIU, C. Evaluation of BrasilDAT relative detection efficiency based on LIS observations and a numeric model. **2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, p. 1814-1819, 2014. DOI: 10.1109/ICLP.2014.6973423.

NACHAMKIN, J. E.; COTTON, W. R. Interactions between a developing mesoscale convective system and its environment. Part II: Numerical simulation. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 1225–1244, 2000.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; et al. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. Journal of Water **Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016.

Observing Systems Capability Analysis and Review Toll - OSCAR. **Satellite:** GOES-13, 2020. Disponível em: < https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/149>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ODA, P. S. S.; ENORÉ, D. P.; MATTOS, E. V.; GONÇALVES, W. A.; ALBRECHT, R. I. An initial assessment of the distribution of total Flash Rate Density (FRD) in Brazil from GOES-16 Geostationary Lightning Mapper (GLM) observations. **Atmospheric Research**, v. 270, 106081, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106081.

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.; HUFFINES, G. R.; NIELSEN-GAMMON, J.; ZHANG, R.; ELY, B.; STEIGER, S.; PHILLIPS, S.; ALLEN, S.; READ, W. Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 13, p. 2597-2600, 2001.

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.

PARMEZANI, J. M.; RIBEIRO, G. E.; RAPHAEL, J.; VADLAMUDI, B. R.; GUDES, R. L. Associação entre ZCAS e a ocorrência de El Nino e La Nina. In: Encontro de Iniciação Científica, 2. (INIC-98), São José dos Campos, p. 23, 1998.

PARKER, M. D.; RUTLEDGE, S. B.; JOHNSON, R. H. Cloud-to-Ground lightning in Linear Mesoscale Convective Systems. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 1232-1242, 2001.

PAULUCCI, T. B.; FRANÇA, G. B.; LIBONATI, R.; RAMOS, A. M. Long-Term Spatial– Temporal Characterization of Cloud-to-Ground Lightning in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro. **Pure and Applied Geophysics**, v. 176, p. 5161–5175, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00024-019-02216-1.

PICOLO, M. F. Atmospheric conditions observed during severe weather occurrences in the area of the SOS-CHUVA project. 307 f. Dissertação - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR., O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 65, n. 6, p. 733-737, 2003.

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

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

PINTO JR., O., PINTO, I. R. C. A., DE CAMPOS, D. R.; NACCARATO, K. P. Climatology of large peak current cloud-to-ground lightning flashes in southeastern Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D16105, 2009. DOI: https://doi.org/10.1029/2009JD012029.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C.A.; DINIZ, J. H.; CAZETTA Filho, A.; CHERCHIGLIA, L. C.L.; CARVALHO, A. M. A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in Southeastern Brazil. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial **Physics**, v. 65, n. 6, p.739-748, 2003.

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.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REHBEIN, A.; AMBRIZZI, T. Mesoscale convective systems over the Amazon basin in a changing climate under global warming. **Climate Dynamics**, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-022-06657-8.

REHBEIN, A.; AMBRIZZI, T.; MECHOSO, C.R. Mesoscale convective systems over the Amazon Basin. Part I: Climatological aspects. **Internacional Journal of Climatology**, v. 38, n. 1, p. 215-229, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.5171.

ROMPS, D. M.; SEELEY, J. T.; VOLLARO, D.; MOLINARI, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. **Science**, v. 346, p. 851-854, 2014. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1259100.

RUST, W. D. Utilization of a mobile laboratory for storm electricity measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13305, 1989. DOI: https://10.1029/jd094id11p13305.

RUST, W. D.; MACGORMAN, D. R. Possibly inverted-polarity electrical structures in thunderstorms during STEPS. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 12, p. 12-13, 2002. DOI: 10.1029/2001GL014303.

RUTLEDGE, S. A.; PETERSEN, W. A. Vertical radar reflectivity structure and cloud-toground lightning in the stratiform region of MCSs: further evidence for in situ charging in the stratiform region. **Monthly weather review**, v. 122, n. 8, p. 1760-1776, 1994.

SABBAS, F.T. S.; SENTMAN, D. D. Dynamical relationship of infrared cloudtop temperatures with occurrence rates of cloud-to-ground lightning and sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 30, p. 1236, 2003. DOI: 10.1029/2002GL015382.

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. DOI: 10.1175/MWR3305.1.

SAUNDERS, C. P. R. A review of thunderstorm electrification processes. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 32, n. 4, p. 642-55, 1993. DOI: https://doi. org/10.1175/1520-0450(1993)032<0642:AROTEP>2.0.CO;2.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological Lower Tropospheric Frontogeneis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 1355-1364, 1989.

SILVA, P. N.; CAPUCIN, B. N.; SILVA, B. A.; REBOITA, M. S. Características Anômalas do verão de 2019. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69492.

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. **Storms in Brazil**. Storms, R. Pielke Jr. e R. Pielke Sr., Ed. Routledge, 207-219, 1999.

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

SCAGLIONE, T. P. Análise convectiva no Sul da América do Sul. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 105 f., 2006.

SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A. Tropical–midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: Climatic aspects and examples of intense events. **International Journal of Climatology**, v. 20, p. 1167-1190, 2000. DOI: 10.1002/1097-0088(200008)20:10<1167::AID-JOC526>3.0.CO;2-T.

SOLORZANO, N. N.; PINTO JR., O.; FERREIRA, N. J. Meteorological aspects related to cloud-ground lightning occurrence in Minas Gerais during the Summer of 1995/1996. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, v. 6, p. 202-205, 1999.

STOUGH, S. M.; CAREY, L. D.; SCHULTZ, C. J.; CECIL, D. J. Examining conditions supporting the development of anomalous charge structures in supercell thunderstorms in the southeastern United States. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 16, 2021. DOI: 10.1029/2021JD034582.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C.; KREHBIEL, P. R. Initial electrification to the first lightning flash in New Mexico thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 11, p. 253–11,276, 2015. DOI: 10.1002/2015JD023988.

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, p. 36-46, 2009. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.05.009.

THIEL, K. C.; CALHOUN, K. M.; REINHART, A. E.; MACGORMAN, D. R. GLM and ABI characteristics of severe and convective storms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, 2020.

TOMINAGA, L.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais:** conhecer para prevenir. Instituto Geológico: São Paulo, 2009.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. 1. ed. Orlando: Academic Press, 1987. v. 39, p. 377, ISBN 0-12-708350-2, 1987.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. **Journal Geophysical Research**, v. 92, p. 9591-9613, 1987.

VEMADO, F.; PEREIRA FILHO, A. J. Severe weather caused by heat island and sea breeze effects in the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Advances in Meteorology**, Hindawi, v. 2016, p. 1-13, 2016.

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. **Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre Sudamérica:** Ciclos de vida y circulación en gran escala asociada. Buenos Aires, Argentina. Tese (Doutorado em Meteorologia), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 132 p., 2004.

VILA, D. B.; MACHADO, L. B. T.; LAURENT, H.; VELASCO, I. Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, p. 233-245, 2008.

VILA, D. A.; OLIVEIRA, R. A. J.; BISCARO, R. S.; MATTOS, E. V.; CECCHINI, M. A. Cloud processes of main precipitating systems over continental tropical regions. In: MICHAELIDES, S. **Precipitation Science:** Measurement, Remote Sensing, Microphysics and Modeling. Elsevier, p. 561-614, 2022. DOI:

https://doi.org/10.1016/C2019-0-04124-6.

WALKER, J.R.; MACKENZIE, W. M.; MECIKALSKI, J. R.; JEWETT, C. P. An Enhanced Geostationary Satellite–Based Convective Initiation Algorithm for 0–2-h Nowcasting with Object Tracking. **J. Appl. Meteoro. Climatol.**, v. 51, p. 1931-1949, 2012. DOI: https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0246.1.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science:** An Introductory Survey. Academic Press, ed. 2, p. 504, 2006.

WANG, D.; ZHENG, D.; WU, T.; TAKAGI, N. Winter positive cloud-to-ground lightning flashes observed by lma in Japan. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 16, n. 3, p. 402–411, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/tee.23310.

WILLIAMS, E.R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 94, n. D11, p. 13151-67, 1989. DOI: https://doi.org/10.1029/JD094iD11p13151

WILLIAMS, E.; GUHA, A. Lightning and Climate Change. In: Proceedings of the International Seminar on Lightning Protection. São Paulo: Institute of Energy and Environment of the University of São Paulo, **Proceedings...** São Paulo, 2019.

WILLIAMS, E. R.; WEBER, M. E.; ORVILLE, R. E. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13,213–13,220, 1989. DOI: 10.1029/JD094iD11p13213.

WU, T.; WANG, D.; TAKAGI, N. On the intensity of first return strokes in positive cloud-to-ground lightning in winter. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 127, e2022JD037282, 2022. DOI: https://doi.org/10.1029/2022JD037282

YANG, J.; LIU, N.; SATO, M.; LU, G.; WANG, Y.; FENG, G. Characteristics of thunderstorm structure and lightning activity causing negative and positive sprites. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, p. 8190-8207, 2018. DOI: https://doi.org/10.1029/2017JD026759.

ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J.; LIU, C.; NESBITT, S. W.; YORTY, D. P. Where are the most intense thunderstorms on Earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 8, p. 1057-72, 2006. DOI: https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057.

ZHAO, P.; ZHANG, Y.; LIU, C.; ZHANG, P.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Potential Relationship Between Aerosols and Positive Cloud-to-Ground Lightning During the Warm Season in Sichuan, Southwest China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.945100.