



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

**ESTUDO SOBRE A PROPAGAÇÃO DOS SISTEMAS
CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE O SUDESTE DO
BRASIL: UM ENFOQUE NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Rebeca Fonseca de Oliveira Pereira

Itajubá, MG, Brasil

2014

**ESTUDO SOBRE A PROPAGAÇÃO DOS SISTEMAS
CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE O SUDESTE DO
BRASIL: UM ENFOQUE NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

por

Rebeca Fonseca de Oliveira Pereira

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

Orientador: Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho

Coorientador: Dr. Alan James Peixoto Calheiros

Itajubá, MG, Brasil

2014

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

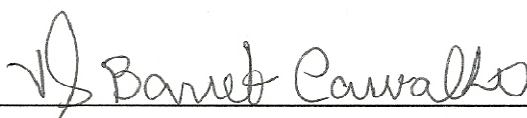
**ESTUDO SOBRE A PROPAGAÇÃO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS
DE MESOESCALA SOBRE O SUDESTE DO BRASIL :**
UM ENFOQUE NO ESTADO DE MINAS GERAIS

elaborada por

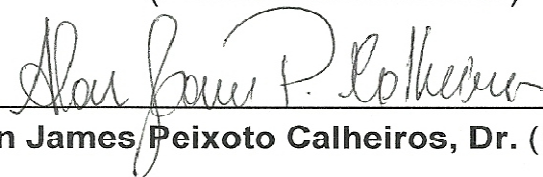
Rebeca Fonseca de Oliveira Pereira

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas


Comissão Examinadora:



Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dr^a. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Alan James Peixoto Calheiros, Dr. (DSA, INPE)



Marcelo de Paula Corrêa, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 31 de outubro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por serem exemplos de pessoas corretas em minha vida, pela dedicação e esforço para que eu e minha irmã pudéssemos nos formar em uma boa faculdade, e pelo amor, carinho e incentivo que sempre recebi;

Aos meus irmãos, Alexandre e esposa Elisandra, e Raquel, pelo apoio e companheirismo não só no período de faculdade, como também em toda minha vida. Ao Willer Marcondes, por sempre apoiar minhas ideias e objetivos e estar presente em todos os momentos de minha vida, compartilhando amor e carinho.

Ao Dr. Alan James Peixoto Calheiros pelo auxílio, incentivo e extrema dedicação para a conclusão deste projeto, juntamente com o apoio do Dr. Daniel Alejandro Vila;

Ao ex-coordenador do curso de Ciências Atmosféricas e também professor, Dr. Marcelo de Paula Corrêa, assim como à atual coordenadora e também professora, Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho, pela dedicação ao curso e preocupação com os alunos, tratando todos com muito carinho, amizade e profissionalismo;

Aos colegas e amigos, em especial: Amanda Balbino, Bruno Campos, Carolina Bernardes, Cleverson Freitas, Débora Martins, Diego Santos, Heloisa Pereira, Igor Stivanelli, Josielli Simões e Rodolfo Pereira pelo companheirismo, apoio, amizade, imenso aprendizado e momentos inesquecíveis nesses quatro anos de faculdade.

Aos professores do curso: Dr. Arcilan Assireu, Dra. Fabrina Martins, Dr. Marcos Bernardes, Dra. Michelle Reboita, Dr. Roger Torres e Dra. Sâmia Garcia Calheiros pelo exemplo de profissionais, pela dedicação ao curso, empenho nas aulas e por sempre motivar nós alunos a alcançar nossos objetivos.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos: estudar a propagação dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) sobre a região Sudeste do Brasil, descrever as direções predominantes e regiões de ocorrência desses sistemas sobre a região de estudo. Tal análise é baseada na caracterização da variação temporal e espacial dos campos de nebulosidade via satélite. Além disso, foram estudadas as características radiativas dos sistemas observados e, por fim, realizada a análises descritivas de sistemas que propiciam eventos de chuva extrema. A caracterização e monitoramento dos sistemas foram realizadas com o auxílio do algoritmo ForTraCC (*Forecasting and Tracking of the evolution of the Cloud Clusters*), o qual utiliza como dados de entrada imagens do satélite GOES no canal 4 (infravermelho), disponibilizadas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) a cada trinta minutos. O período de análise corresponde aos verões de 2011 a 2013 e as variáveis analisadas foram: tamanho médio, temperatura mínima média, distância percorrida, número de células convectivas e expansão máxima. Observou-se que os sistemas que apresentaram um maior tempo de duração, também apresentaram maior tamanho, concluindo que em dezembro, os sistemas se apresentam com maiores tamanhos. Para a variável de temperatura de brilho (Tb) mínima, os sistemas com maior tempo de duração apresentaram uma menor temperatura mínima. Os meses de novembro foram os que registraram os sistemas mais frios, isto é, aqueles com menores valores de temperatura de brilho mínima, associados a topos mais altos. A relação entre duração e distância percorrida mostrou que os sistemas com maior tempo de duração percorreram as maiores distâncias. Para a relação entre classes e número médio de células convectivas, foi observado que os eventos com menor duração apresentaram os maiores números de células convectivas. Por fim, também foi analisada a tendência do crescimento e desenvolvimento dos SCMs, por meio das curvas de expansão/dissipação da área dos sistemas, em função de seu ciclo de vida, que mostrou que existe uma necessidade de adaptações do modulo de previsão do ForTraCC a variações sazonais. O número de sistemas convectivos tem diminuído ao longo dos anos e sua posição preferencial é sobre o centro de Minas Gerais, com direção predominante para leste de sua origem.

ABSTRACT

The main goals of this study were to understand the propagation of the Mesoscale Convective Systems (MCS) over the southeastern region of Brazil. This study describes the prevailing directions and regions of occurrence of these systems over the analyzed area. The characterization of the temporal and spatial cloudiness satellite variation was applied. The characterization and monitoring of systems were performed using the ForTraCC algorithm (Forecasting and Tracking of the Evolution of the Cloud Clusters), which uses satellite images (thermal infrared) as input data, provided by the Satellites Division and Environmental Systems (DSA) every 30 minutes. The analyzed period was related to the 2011 to 2013 summers. It was observed that systems with a longer duration also showed greater size, whereas the highest values were taken during December. Moreover, the minimum values of the brightness temperature were related to systems with longer life cycle. Also, the minimum values were more frequently during November. The relationship between duration and distance showed that systems with longer life moved the longest distances. The number of convective cells, we observed that the events of shorter durations showed the highest number. Furthermore, we also analyzed the MCS growth trend and development, adjustment on the ForTraCC algorithm is probably necessary to improve the forecasting between the seasons. The number of SCM tend to decrease over the analyzed area. The most of the system happened over the center of Minas Gerais state, with main direction to east from the original position.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Página</u>
1 – Estrutura de um Sistema Convectivo	04
2 – Representação da Fase Cúmulos	05
3 - Representação da Fase de Maturação	06
4 - Representação da Fase de Dissipação	07
5 – Corte vertical esquemático de uma Linha de Instabilidade	11
6 – Padrão de refletividade do deslocamento de um SCM	13
7 – Representação climatológica da precipitação durante o verão	16
8 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de novembro	17
9 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de dezembro	18
10 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de janeiro	20
11 – Ilustração da identificação de um SC pelo ForTraCC	22
12 – Representação esquemática das situações de rastreamento	24
13 - Representação esquemática do deslocamento previsto para o centro de massa	26
14 – Valores médios de expansão	27
15 - Relação entre a duração e o tamanho médio dos sistemas convectivos (para todos os verões)	31
16 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos (mensal)	32
17 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos (anual).....	33
18 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos (para todos os verões)	35
19 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos (mensal)	37
20 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos (anual)	38

21 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos (para todos os verões)	39
22 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos (mensal)	41
23 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos (anual)	42
24 - Relação entre a duração e número total de CCs dos sistemas convectivos	43
25 - Relação entre os meses e o número total de eventos convectivos	45
26 - Relação entre duração e expansão máxima para os três estágios do ciclo de vida dos eventos convectivos	46
27 - Número de sistemas convectivos (áreas coloridas) em uma grade de 0,5x0,5° sobre a área de estudo e a direção predominante (vetor vermelho) para os meses de: (a) novembro; (b) dezembro; e (c) janeiro.....	48
28 - Número de sistemas convectivos (áreas coloridas) em uma grade de 0,5x0,5° sobre a área de estudo e a direção predominante (vetor vermelho) para os verões de: (a) 2011; (b) 2012; e (c) 2013	49

SUMÁRIO

	<u>Página</u>
LISTA DE FIGURAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1. Sistemas Convectivos	03
2.2. Ciclo de Vida	04
2.2.1. Fase Cúmulos (Iniciação)	04
2.2.2. Fase de Maturação	05
2.2.3. Fase de Dissipação	06
2.3. Tipos de Sistemas Convectivos de Mesoescala	07
2.3.1. Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM)	07
2.3.2. Linhas de Instabilidade	09
2.3.3. Outros Sistemas Convectivos de Mesoescala (<i>Nonsquall</i>)	11
2.4. Propagação dos SCM	11
2.5. Identificação dos SCM	13
2.6. Análise de Precipitação	15
2.6.1. Climatologia	15
2.6.2. Precipitação Acumulada Mensal	16
3. METODOLOGIA	21
3.1. Satélite GOES	21
3.2. O algoritmo ForTraCC	21
3.2.1. Identificação dos SCM	22
3.2.2. Técnica de Rastreamento	23
3.2.3. Técnica de Previsão	25

3.3. Filtro	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1. Tamanho Médio	29
4.1.1. Análise dos Verões	29
4.1.2. Análise Mensal	31
4.1.3. Análise Anual	33
4.2. Temperatura Mínima Média	34
4.2.1. Análise dos Verões	34
4.2.2. Análise Mensal	36
4.2.3. Análise Anual	37
4.3. Distância Média Percorrida	38
4.3.1. Análise dos Verões	38
4.3.2. Análise Mensal	40
4.3.3. Análise Anual	41
4.4. Número Total de Células Convectivas	42
4.4.1. Análise dos Verões	42
4.5. Número Total de Eventos Convectivos	44
4.6. Expansão Média	45
4.7. Áreas de Atuação e Deslocamento dos SC.....	46
5. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO:

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são responsáveis, na maioria das vezes, pelo excesso de chuvas na primavera e verão da América do Sul (VELASCO e FRITSCH, 1987; VILA, 2008). Causam, por exemplo, condições de tempo extremo ou eventos críticos sobre o Sudeste do Brasil, e sua frequência pode ser o fator principal que determina a variabilidade interanual do clima. O monitoramento da evolução e deslocamento de sistemas convectivos profundos, bem como o diagnóstico das características estruturais de seu desenvolvimento, é de grande interesse na região tropical (ROMATSCHKE e ROSSOW, 2010), onde a maior fração de precipitação média anual provém de nuvens cumuliformes. Entender as características desses eventos sobre uma determinada região é uma das fases do desenvolvimento de um sistema de previsão a curtíssimo prazo (*Nowcasting*). Todas as atividades humanas, em particular a sua própria segurança, dependem do monitoramento e previsibilidade de tempestades severas.

Trabalhos recentes mostram que o número de eventos extremos de precipitação tem aumentado na última década (MARENGO et al., 2010 e SILVA DIAS et al., 2013) e estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas a partir de modelos numéricos de clima mostram que existe uma tendência de aumento desses eventos nos próximos anos (SILLMANN et al., 2013). Os eventos convectivos que atingiram a região sudeste do Brasil, em particular o Estado de Minas Gerais, no último ano provocaram grandes danos a sociedade e economia local. Enchente e deslizamentos, assim como a presença de granizo, foram registrados na região Norte do Estado (CPTEC, 2014). Esforços do governo e órgãos de tomada de decisão têm sido intensa de modo que novas redes de observações foram instaladas, incluindo um radar meteorológico que será de grande utilidade na determinação da severidade dos eventos precipitantes. Contudo, o acompanhamento dos SCM, devido a sua grande extensão espacial, só pode ser realizado por imagens de satélite geoestacionário, ou a integração de vários radares. Atualmente este último não é possível de ser aplicado devido à baixa densidade desses equipamentos.

O algoritmo de Previsão e Acompanhamento da Evolução de Sistemas Convectivos (ForTraCC) tem o objetivo de determinar as trajetórias e os ciclos de vida desses sistemas, utilizando como base de dados imagens de satélites geoestacionários (GOES). Atualmente, no Brasil, esse algoritmo é utilizado pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

Os objetivos deste trabalho, utilizando-se das observações realizadas nos últimos 3 verões sobre a região sudeste do Brasil, são:

- Estudar a propagação dos sistemas convectivos;
- Quantificar a frequência de eventos convectivos sobre o Sudeste do Brasil;
- Descrever as direções predominantes desses sistemas sobre região de estudo;
- Identificar áreas propícias à formação de SCM;
- Caracterizar a variação temporal e espacial dos campos de nebulosidade via satélite;
- Estudar as características radiativas dos sistemas observados;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

2.1. Sistema Convectivo:

Segundo Wallace e Hobbs (2006) e Cotton et al. (2011), o termo Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) descreve um sistema de convecção profunda, que se faz maior que células de tempestades individuais, e que muitas vezes se desenvolve horizontalmente na alta troposfera apresentando nuvens estratiformes nas extremidades da bigorna.

Outra característica distinta é a existência de precipitação convectiva e estratiforme em um mesmo sistema. A região de nuvens convectivas pode durar de seis a doze horas, porém a região estratiforme pode perdurar por muito mais tempo. Segundo Houze (1993), os SCM podem conter desde circulações de mesoescala à grande escala, e estão associados a grandes tempestades que proporcionam altos índices pluviométricos.

Além disso, esses sistemas também produzem grande parte da precipitação observada na superfície e que conseqüentemente são importantes para o regime climático de uma determinada região. Um maior índice de precipitação pode ser observado quando sistemas convectivos como linhas de instabilidade, complexos convectivos ou outros sistemas de mesoescala estão associados à presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (CARVALHO et. al, 2002). Essa zona de convergência se estende desde a região do estado do Amazonas até o Sudeste do Brasil, dissipando-se no Oceano Atlântico. A ZCAS, quando observada, ocorre durante o verão do Hemisfério Sul, podendo variar sua intensidade e direção de deslocamento.

Uma célula convectiva possui como características estruturais (Figura 1) uma extensão vertical de 10 a 12 km, ocorrência do processo de *overshooting*, correntes ascendentes quentes e correntes descendentes frias, precipitação convectiva e estratiforme, e o formato visual de uma bigorna.

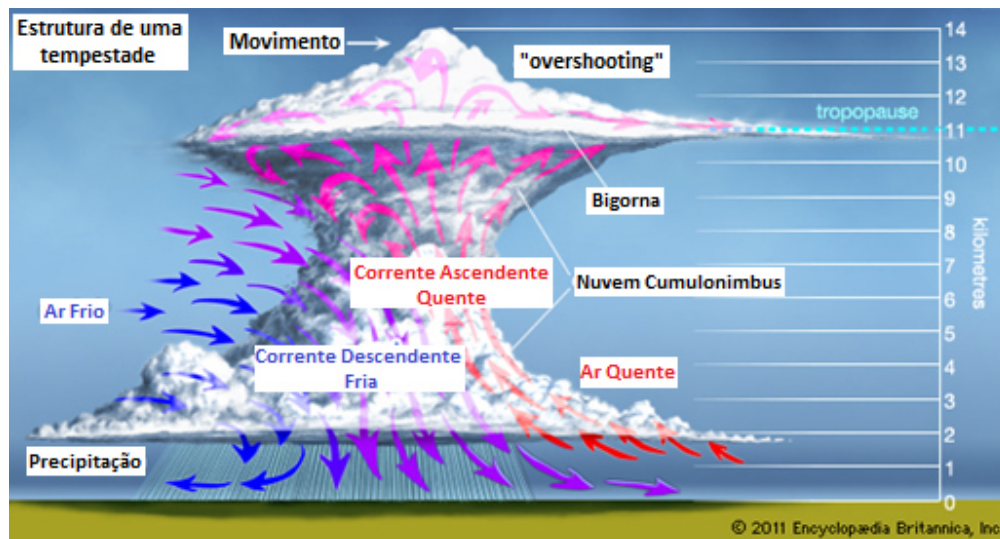


Figura 1 - Estrutura de um Sistema Convectivo. Fonte: adaptado de Encyclopædia Britannica, (2011).

2.2. Ciclo de Vida:

Byers e Braham (1949) identificaram três fases de evolução em uma nuvem cumulonimbus, são elas: Fase Cúmulos, Fase Madura e Fase de Dissipação.

2.2.1. Fase Cúmulos (Iniciação):

Nesta fase, ocorre o processo de formação de nuvens cúmulos em uma atmosfera instável (Figura 2), que são alimentadas pela convecção de umidade da superfície para o nível de formação da nuvem. Esse transporte vertical de umidade é realizado pelas correntes ascendentes, as quais são características importantes dessa fase. Na lateral da nuvem ocorre o processo de entranhamento, que faz com que haja um influxo de ar seco para o interior da nuvem. Já no topo do sistema, as correntes descendentes começam a se formar, porém com pouca intensidade e, pode haver a ocorrência de precipitação apenas na região acima do nível de condensação (isoterma de 0 °C) (BYERS e BRAHAM, 1949).

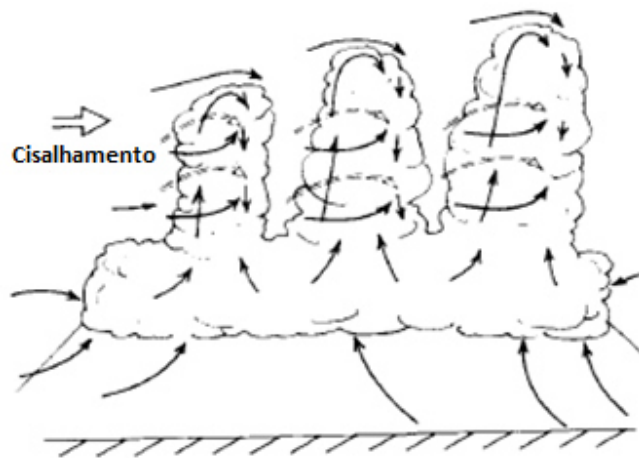


Figura 2 - Representação da Fase Cúmulos, esquematizando as correntes ascendentes na base até o topo, as correntes descendentes localizadas apenas no topo e o entranchamento lateral. Fonte: Cotton e Anthes, (1989).

2.2.2. Fase Madura:

Com o desenvolvimento das nuvens cúmulos e intensificação de suas correntes, todas as nuvens formadas anteriormente fundem-se por meio da colisão de suas correntes descendentes, formam um único sistema ainda mais extenso e intenso e que apresenta correntes ascendentes e descendentes praticamente com a mesma proporção (Figura 3). É nesta fase que o sistema se estende verticalmente, atingindo altos níveis da atmosfera e podem apresentar de 10 à 12 km de altura nos trópicos. Em alguns casos, suas correntes ascendentes são tão intensas que acabam ultrapassando a troposfera, atingindo a tropopausa e resultando no *overshooting*. Já as correntes descendentes que divergem próximo a superfície, formam uma rajada de ar frio associado a evaporação das gotas de chuva e gotículas de nuvem e, derretimento das partículas de gelo presentes no sistema. Essa frente faz com que o ar quente e úmido estagnado abaixo do sistema ascenda pela atmosfera e se condense, formando novas nuvens cúmulos. As novas nuvens se integrarão ao sistema já existente e farão com que este se renove, o que dá origem a propagação da tempestade. A precipitação convectiva é característica desta fase, porém, também pode haver a ocorrência de precipitação estratiforme na região da bigorna. Em alguns casos a precipitação estratiforme não chega a superfície devido a evaporação na atmosfera (BYERS e BRAHAM, 1949).

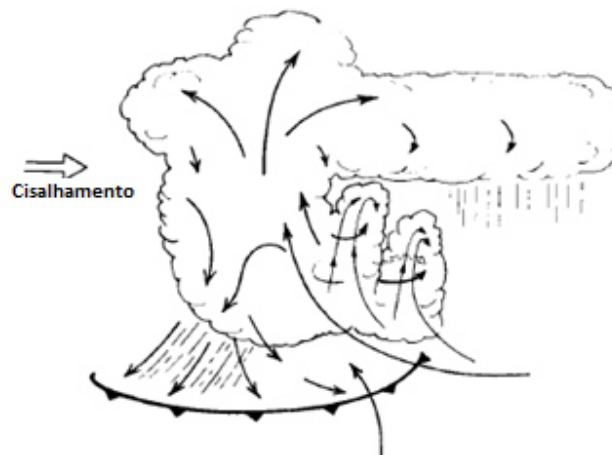


Figura 3 - Representação da Fase Madura, esquematizando as correntes ascendentes e descendentes, a frente de rajada de ar frio, a renovação do sistema com novas cúmulos, a precipitação intensa na parte inferior da nuvem e a precipitação estratiforme na parte superior da nuvem. Fonte: Cotton e Anthes, (1989).

2.2.3. Fase de Dissipação:

Nesta fase o sistema não apresenta mais as características adquiridas durante a fase madura, uma consequência da intensificação das correntes descendentes que faz com que o sistema comece a perder altitude (Figura 4). As correntes ascendentes podem ser encontradas apenas na parte superior do sistema, em regiões denominadas de bolsa de correntes ascendentes. Na lateral do sistema ainda ocorre o processo de entranhamento de ar seco, que faz com que o processo de evaporação das gotas e derretimento das partículas de gelo ocorra em maior intensidade e esfrie ainda mais as correntes descendentes, intensificando-as. Deste modo, a rajada de ar frio próximo à superfície se torna cada vez mais forte e mais fria, alcançando assim uma área ainda mais extensa. Em consequência dessa intensificação da rajada de vento, o ar quente e úmido localizado próximo à superfície se eleva e forma novas nuvens cúmulos, como citado anteriormente. Porém, essas nuvens não irão se integrar ao sistema, pois acabam se formando longe do sistema convectivo. Ainda em razão da intensificação das correntes descendentes, a precipitação gerada pelo sistema passa de convectiva para estratiforme, e pode ter uma duração de algumas até várias horas. Assim, a precipitação característica dessa fase é a precipitação estratiforme (BYERS e BRAHAM, 1949).

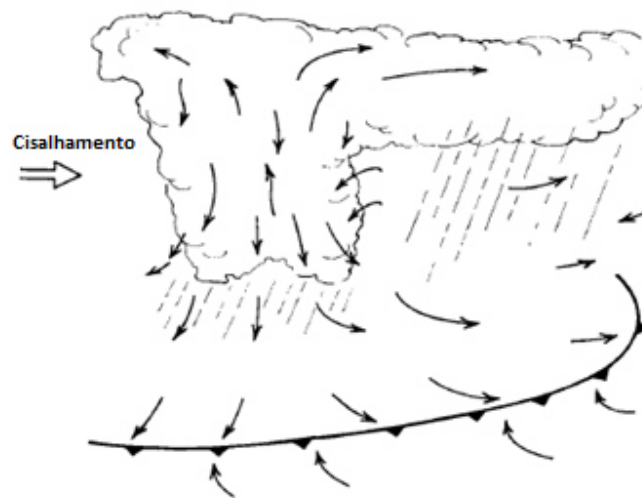


Figura 4 - Representação da Fase de Dissipação, esquematizando as correntes descendentes, a bolsa de correntes ascendentes convectivas na parte superior da nuvem, a frente de rajada de ar frio com uma área de alcance maior e a precipitação estratiforme.

Fonte: Cotton e Anthes, (1989).

2.3. Tipos de Sistemas Convectivos de Mesoescala:

2.3.1. Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM):

Os Complexos Convectivos de Mesoescala são definidos como um aglomerado de nuvens cumulonimbus que se apresentam em um formato circular, se formam rapidamente e seu tempo de duração varia entre 6 à 12 horas. Baseado no realce das imagens de satélites no espectro de onda do infravermelho (IR), Maddox (1980) definiu os CCMs localizados em latitudes médias como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Definição de um CCM a partir de imagens no IR.

Características Físicas	
Tamanho:	A – Aglomerado de nuvens com temperatura IR contínua $\leq -32^{\circ}\text{C}$ devem ter uma área $\geq 100\,000\text{ km}^2$ B – Região fria no interior da nuvem com temperatura $\leq -52^{\circ}\text{C}$ deve ter uma área $\geq 50\,000\text{ km}^2$
Início:	Definições dos tamanhos A e B são satisfeitas em primeiro lugar
Duração:	Definições dos tamanhos A e B devem ter um período ≥ 6 horas
Extensão máxima:	Aglomerado de nuvens frias (com temperatura IR $\leq -32^{\circ}\text{C}$) atinge seu tamanho máximo
Forma:	Excentricidade (menor eixo / maior eixo) ≥ 0.7 no momento de máxima extensão
Término:	Definições dos tamanhos A e B não mais satisfeitas

Fonte: adaptado de Maddox (1980).

Na Tabela 1 tem-se que o tamanho dos CCM pode ser estimado por duas formas: A) aglomerados de nuvens que apresentam temperatura no IR menor ou igual a -32°C que possuem uma área de extensão maior ou igual a 100.000 km^2 ; B) região fria no interior da nuvem com temperatura menor ou igual a -52°C possui uma área de extensão maior ou igual a 50.000 km^2 . A duração do ciclo de vida dos dois tipos de SCM ultrapassa a 6 horas.

Os CCMs se formam em regiões favoráveis a forte convecção, isto é, regiões em que a superfície apresenta alto aquecimento radiativo. O processo de convecção ocorre quando as parcelas de ar próximas a essa superfície são aquecidas por condução, se expandem, se tornam menos densa e, conseqüentemente, ascendem na atmosfera. Porém, além das correntes ascendentes, é necessário a advecção de umidade em baixos níveis [geralmente causada pela presença de Jatos de Baixos Níveis (JBN, SALIO et al., 2007)], que darão suporte à formação do CCM. Portanto, os CCMs são frequentemente formados durante o período de fim de tarde e início da noite, pois é quando o gradiente de temperatura entre a superfície e a atmosfera é maior.

Como os CCMs são formados por um conjunto de nuvens cumulonimbus, é natural que esses sistemas apresentem um ciclo de vida semelhante ao dessas nuvens, o qual foi citado na seção anterior. No entanto, algumas características específicas podem ser observadas. Durante a fase inicial, se a região de formação possui topografia elevada e apresenta um forte aquecimento radiativo, esses fatores contribuirão ainda mais para o desenvolvimento e formação de novas

células de tempestade. Durante a fase de maturação a região convectiva do CCM é caracterizada por um ambiente úmido e com fraco cisalhamento vertical do vento. A região convectiva é alimentada pelo transporte vertical de umidade, dos baixos níveis para os altos níveis da troposfera, que é realizado pelas intensas correntes ascendentes. Na fase de dissipação o CCM começa a se deslocar para regiões em que a intensidade do JBN já não é suficientemente grande para alimentá-lo e, além disso, existe a possibilidade de que esses sistemas se desloquem para regiões em que a atmosfera esteja seca e estável, sendo assim, diminuindo o transporte vertical de umidade e, conseqüentemente, acelerando sua dissipação (MADDOX, 1980). No Brasil, além das características observadas anteriormente, segundo Guedes e Silva Dias (1985), os CCMs se formam em regiões que apresentam além de um alto aquecimento radiativo, uma advecção de ar quente e úmido em baixos níveis (850 mb) provenientes da Amazônia.

2.3.2. Linhas de Instabilidade:

As Linhas de Instabilidade (LI) são sistemas convectivos identificados por imagens de satélites como sistemas que possuem centenas de quilômetros de extensão. São formados por um conjunto de nuvens cumulonimbus organizadas em forma de linha e, possuem um tempo de duração que pode variar horas ou até dias. Apresentam precipitação convectiva, associada às correntes ascendentes e descendentes de escala convectiva e, precipitação estratiforme, associada às correntes descendentes de mesoescala (HOUZE, 1993). Em regiões próximas aos trópicos, a precipitação convectiva pode persistir por várias horas.

Em superfície, minutos antes da chegada de uma LI, é possível observar uma forte queda de temperatura acompanhada de fortes rajadas de ventos, características as quais procedem a precipitação torrencial. Essa queda de temperatura é causada pelas intensas correntes descendentes. Por meio de imagens de satélite ou radar meteorológicos, é possível observar que essas correntes descendentes influenciam diretamente no processo de propagação e renovação da LI, pois, como estão resfriadas, apresentam uma temperatura menor que a temperatura do ambiente, provocam a elevação forçada do ar quente e úmido presente na região adjacente do sistema, resultando na formação de novas nuvens cúmulos. E, por fim, as novas nuvens juntam-se ao sistema antigo, provocando sua propagação e renovação.

A junção das correntes ascendentes e descendentes faz com que o sistema apresente em média 600 km de largura. As correntes de escala convectiva são caracterizadas pela ocorrência de

intensa precipitação convectiva, a qual se localiza na região frontal do sistema. Essa região frontal é composta pelas torres convectivas no estágio de maturação, e pode apresentar de 10 à 20 km de largura. As correntes ascendentes de escala convectiva exercem a função de transportar a umidade e energia presentes na superfície para os níveis mais altos da troposfera e alimentar o sistema. Uma LI apresenta uma extensa região denominada de bigorna, a qual é formada pelas correntes ascendentes de escala convectiva que, dependendo de sua intensidade, não conseguem ultrapassar o limite da troposfera e acabam se deslocando horizontalmente nos altos níveis da atmosfera. A medida que o sistema se desenvolve, as correntes ascendentes localizadas na região da bigorna perdem sua intensidade e essa região passa a apresentar somente correntes descendentes de mesoescala que, conseqüentemente, provocam a precipitação estratiforme. A região estratiforme de um sistema de LI pode apresentar de 100 à 500 km de largura e é caracterizada pela precipitação estratiforme, a qual pode perdurar por vários dias (HOUZE, 1977).

A Figura 5 representa a seção vertical de uma linha de instabilidade, em que todos os elementos citados anteriormente podem ser observados. Neste sistema, as correntes ascendentes se localizam na vanguarda (região de deslocamento), onde novas nuvens cúmulos são formadas e agregadas ao sistema antigo. A torre convectiva é caracterizada pelo estágio de maturação e também apresenta correntes descendentes. Nota-se que os núcleos convectivos profundos estão localizados na região de maior índice de refletividade do radar. A região estratiforme do sistema se localiza na região da bigorna (*Anvil Region*), e é caracterizada pela baixa refletividade do radar, exceto na altura da banda brilhante, que localiza-se abaixo da isoterma de 0 °C. Por fim, também é possível notar que a região estratiforme normalmente se localiza na retaguarda do sistema (HOUZE, 1977).

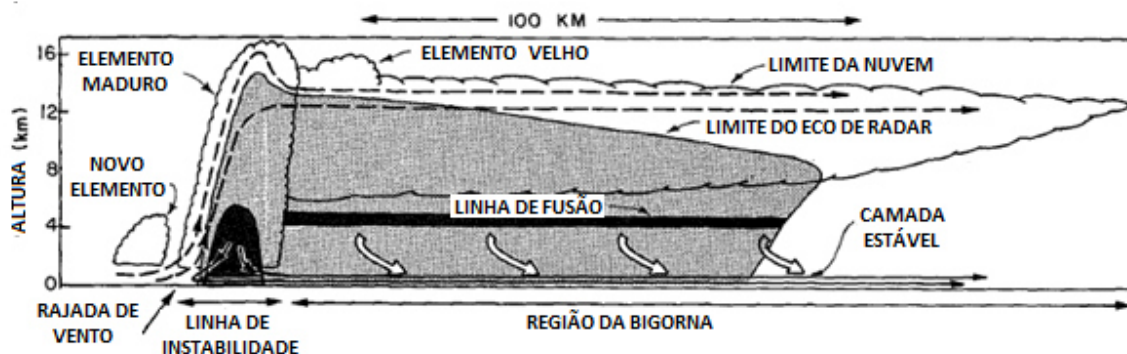


Figura 5 – Corte vertical esquemático de uma linha de instabilidade. As linhas tracejadas mostram as correntes ascendentes, linhas sólidas escuras indicam as correntes descendentes de escala convectiva associadas a fase madura do sistema. Linhas sólidas claras mostram as correntes descendentes de mesoescala abaixo da bigorna. O sombreado escuro forte indica o eco de radar contendo precipitação intensa, enquanto o sombreado escuro mais fraco indica precipitação mais fraca.

Fonte: adaptado de Houze (1977).

2.3.3. Outros Sistemas Convectivos de Mesoescala (*Nonsquall*):

Apesar das linhas de instabilidade serem os SCMs mais intensos e os que produzem maior taxa de precipitação, os sistemas *nonsquall* são sistemas convectivos mais frequentes (COTTON e ANTHERS, 1989). Esse tipo de sistema não se apresenta de forma organizada, isto é, não possuem uma extensão horizontal suficientemente grande para ser considerado um CCM, e não se apresenta em forma linear para ser considerado como uma linha de instabilidade.

Em comparação estrutural com as linhas de instabilidade, a única semelhança entre esses dois sistemas é a região estratiforme. Seu ciclo de vida possui as mesmas características que os outros SCMs com estágio inicial, em que as torres convectivas prevalecem; estágio de maturação, caracterizado pelas intensas correntes ascendentes e precipitação convectiva; e o estágio de dissipação, caracterizado pelas correntes descendentes e precipitação estratiforme (COTTON e ANTHERS, 1989).

2.4. Propagação dos SCM:

Segundo Houze (2004), os SCM podem se propagar por três modos diferentes.

a) Piscina fria:

A propagação mais frequente dos SCMs ocorre pelo sistema dinâmico do tipo piscina fria. Nessa forma de propagação, o ar resfriado pela evaporação das gotas de água e derretimento do gelo de dentro da nuvem chega à superfície por meio das correntes descendentes. Como a superfície está mais quente e úmida, a corrente descendente irá empurrar a massa de ar quente e fará com que essa se ascenda na atmosfera e forme novas nuvens cúmulos. As novas nuvens formadas irão se agregar ao sistema maior por meio de suas correntes ascendentes e fará com que este se renove e se desloque. Este processo pode contribuir plenamente para o movimento de pequenas nuvens cumulonimbus individuais. Assim, a combinação entre a piscina fria e as correntes descendentes do sistema pode influenciar a velocidade de propagação do SCM por meio da ascensão forçada do ar quente e úmido localizado na superfície próxima ao sistema (HOUZE, 2004).

b) Camada Overturning:

O sistema de propagação piscina fria não considera a dinâmica de mesoescala da atmosfera que se localiza acima da camada limite, e sim a massa de ar contida próxima à superfície e a periferia do SCM. Na teoria de propagação desses sistemas, deve-se também considerar o deslocamento horizontal troposférico do sistema que ocorre por meio do sistema *overturning*.

Segundo a teoria de Moncrieff (1978), é necessário que um gradiente de pressão exista em níveis médios e que o SCM esteja estacionário em um ambiente com cisalhamento vertical e potencialmente instável. Essas características do ambiente irão influenciar na velocidade de propagação do sistema. Uma vez que o SCM se organiza e se mantém não estacionário, a camada *overturning* deve propagar o sistema em uma determinada taxa de velocidade para manter sua consistência dinâmica. Deste modo, pode-se usar a energia potencial disponível pelo ambiente (i.e. CAPE) associadas as correntes descendentes e ascendentes para converter em energia cinética de movimento da tempestade (HOUZE, 2004).

c) Propagação Discreta:

As duas propagações citadas anteriormente descrevem uma propagação contínua para os SCMs. Porém, em alguns casos, os grupos ou linhas de células convectivas realizam um discreto

salto a partir do momento em que novas células convectivas começam a se formar na parte frontal da frente de rajada. Um exemplo desta propagação é representada pela Figura 6, em que as partes em azul claro se referem as regiões com baixa refletividade radar causada pela mudança brusca do índice de refração da parte frontal da piscina fria. Novas células são formadas a uma distância de 10-30 km à frente do sistema (HOUZE, 2004).

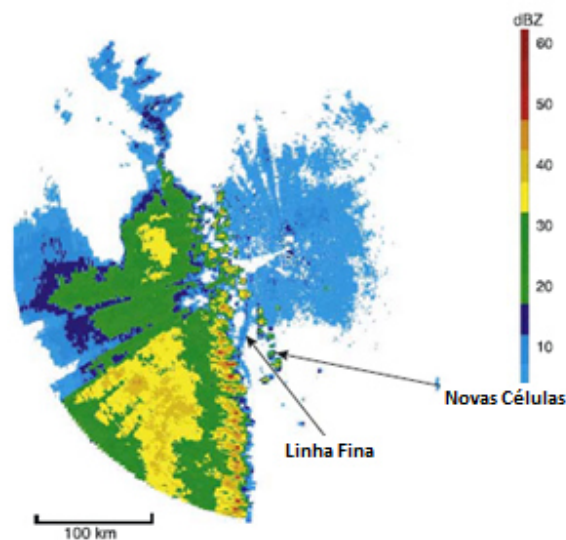


Figura 6 - Refletividade radar no dia 21 de junho de 2003, às 0700 UTC em Oklahoma. Nesta imagem é observado o SCM com maiores índices de refletividade e novas células convectivas sendo formadas na parte frontal da linha de rajada do sistema.

Fonte: adaptado de Houze (2004).

2.5. Identificação dos SCMs:

Os satélites são utilizados para o reconhecimento dos SCMs, pois são, juntos com os radares meteorológicos, as únicas ferramentas capazes de definir o tamanho dos sistemas e da área de precipitação com maior precisão. Os SCMs são identificados em imagens de satélite por sua temperatura de brilho e pelo seu topo, quando este atinge o nível da tropopausa, causando o *overshooting*. A identificação dos sistemas convectivos por satélite é importante pelo fato de que os sistemas que possuem maior área de extensão apresentam uma grande área coberta por topos de nuvens frias. Para os sistemas de mesoescala na região dos trópicos, a área coberta por topos

de nuvens frias está correlacionada com grande quantidade de precipitação provenientes desses mesmos sistemas (HOUZE, 1993).

Jirak et. al. (2003) baseando-se na disponibilidade de dados de imagens de satélite no IR durante um período de 3 anos sobre a região central dos Estados Unidos, classificaram os SCMs a partir do tempo de duração e de um limiar de -52° C de temperatura de brilho do topo do sistema.

Os SCMs com grande extensão são classificados em dois grupos: os que possuem formato circular e são definidos como CCM; e os sistemas lineares, que são definidos como Sistemas Alongados Convectivos Persistentes (PECS). Os sistemas menores também são divididos em duas classes com os mesmos critérios: um para sistemas circulares e outro para sistemas lineares. Os critérios de tempo de duração e o limiar de temperatura de -52° C deixam de ser características dos sistemas menores, porém o critério de excentricidade continua o mesmo. Segundo Parker e Johnson (2000) o tempo médio de duração dos SCM em latitudes médias é de 3 horas. Assim, o critério de duração para os sistemas menores é ≥ 3 horas. A extensão dos sistemas menores é um pouco mais difícil de definir, porém alguns estudos como Houze (1993) sugerem que este limiar seja um raio de 100 km. Sistemas que possuem um eco de radar de 100 km ou mais de comprimento, geralmente possuem um aglomerado de nuvens de pelo menos 30.000 km^2 (aproximadamente a área de um círculo com um raio de aproximadamente 100 km) logo, o limiar de tamanho aproximado de um sistema pequeno foi definido como sendo $\geq 30.000 \text{ km}^2$.

A metodologia para definir os estágios de vida dos sistemas são as mesmas definidas por Maddox (1980): o início do sistema é quando seu tamanho mínimo for identificado pela primeira vez, sua maturação ocorre quando sua extensão é máxima e sua dissipação ocorre quando o SCM não satisfaz mais os padrões de tamanho e temperatura (VILA et al., 2008).

A Tabela 2 define as quatro classes de SCM, segundo o estudo de Jirak et al (2003), de acordo com suas características nas imagens de satélite no canal do infravermelho: MCC (CCM em inglês), PECS, M β CCS para Sistemas Convectivos Menores e Circulares e M β ECs para Sistemas Convectivos Menores e Lineares. Os sistemas convectivos maiores possuem um tempo de duração maior, porém apresentam um critério de definição de tamanho menos detalhado. Já os sistemas convectivos menores necessitam de um menor tempo de ciclo de vida para serem identificados, porém em termos de tamanho, precisam se enquadrar nos critérios de área mínima e área máxima.

Tabela 2 - Definições dos tipos de SCMs de acordo com a análise de imagens de satélite no IR.

Definições de SCM com base na análise de dados de satélite IR			
Categoria SCM	Tamanho	Duração	Forma
MCC	Região fria da nuvem $\leq - 52^{\circ}\text{C}$ com uma área $\geq 50\ 000\ \text{km}^2$	Definição do tamanho persistiu por ≥ 6 horas	Excentricidade ≥ 0.7 no momento de máxima extensão
PECS			$0.2 \leq \text{Excentricidade} < 0.7$ no momento de máxima extensão
M β CCS	Região fria da nuvem $\leq - 52^{\circ}\text{C}$ com uma área $\geq 30\ 000\ \text{km}^2$ e seu tamanho máximo deve ser $\geq 50\ 000\ \text{km}^2$	Definição do tamanho persistiu por ≥ 3 horas	Excentricidade ≥ 0.7 no momento de máxima extensão
M β ECS			$0.2 \leq \text{Excentricidade} < 0.7$ no momento de máxima extensão

Fonte: adaptado de Jirak et. al, (2003).

2.6. Análise da Precipitação:

2.6.1. Climatologia:

Na Figura 7 observa-se o comportamento climatológico da precipitação durante o verão para todo o Brasil (Fonte: CPTEC/INPE). É notável um padrão associado a ZCAS a qual se estende desde a região Norte até a região Sudeste, com altos índices de precipitação. Analisando mais detalhadamente, na região Sudeste nota-se que o estado de Minas Gerais é aquele que sofre maior influência dessa faixa de precipitação (Possivelmente associada a ZCAS), se comparado com os outros estados: São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Normalmente, seus índices de precipitação variam de 500 a 1000 mm durante a estação chuvosa. No entanto, os outros estados da região de estudo apresentam valores médios climatológicos de precipitação menores, que variam entre 400 a 800 mm. Os valores de precipitação podem variar de acordo com o posicionamento da ZCAS (QUADROS et a., 2012) em determinados anos.

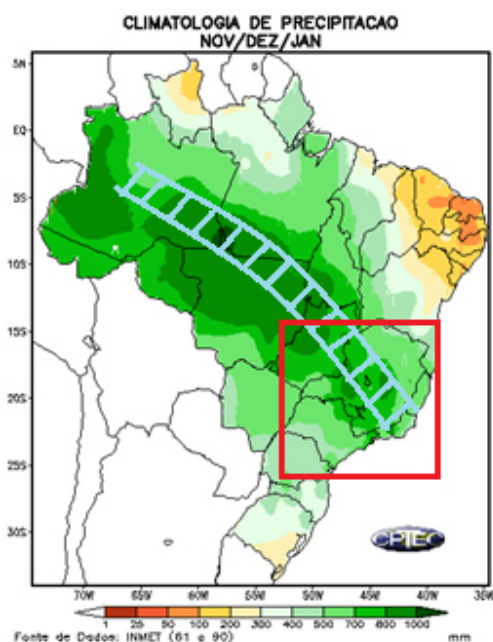
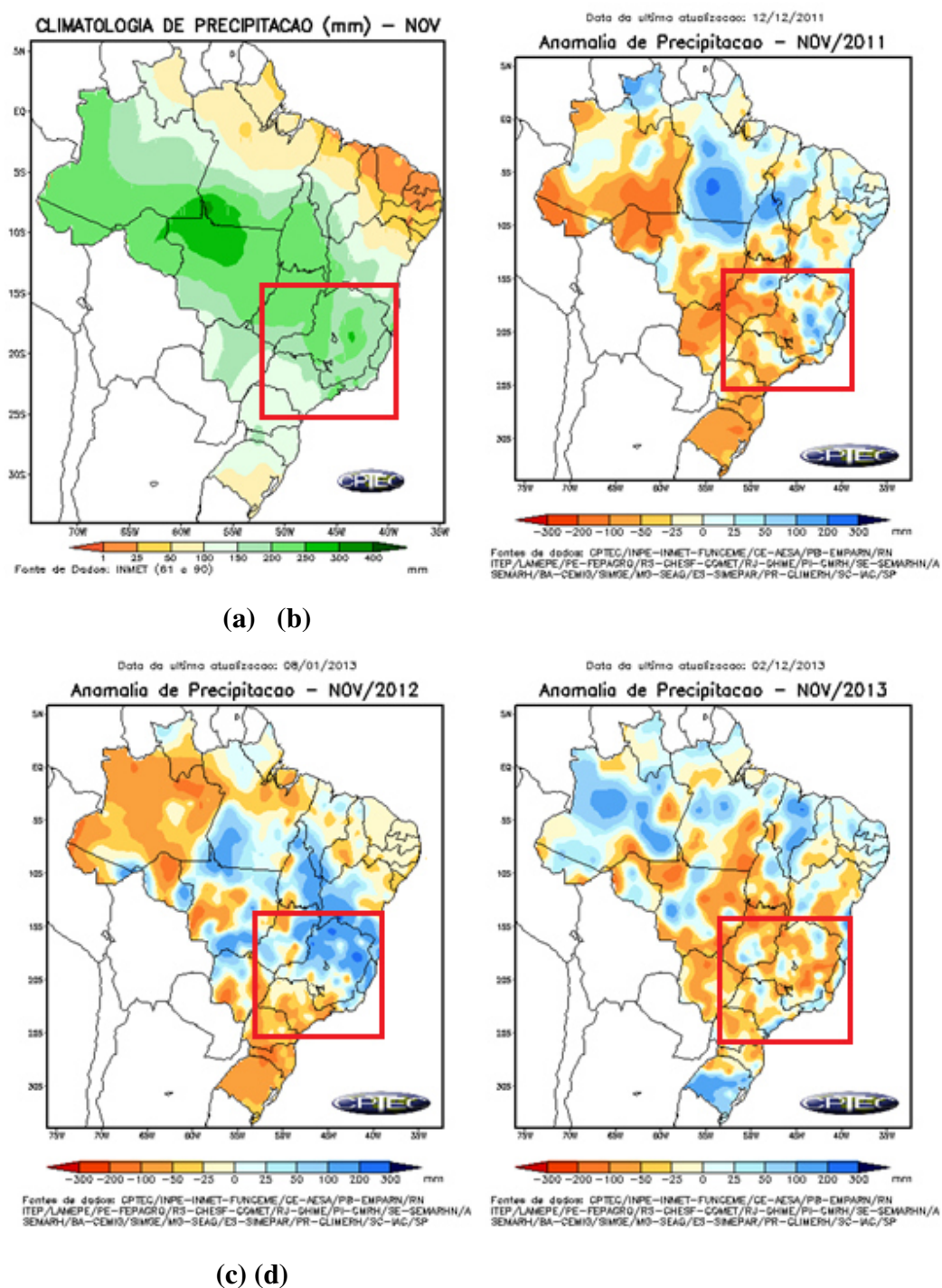


Figura 7 - Representação da climatologia de precipitação durante o verão. A região de estudo está localizada dentro do quadrado vermelho, a ZCAS está demarcada de azul claro. Fonte: adaptado de CLIMA/CPTEC, (2014).

2.6.2. Anomalias de Precipitação Acumulada Mensal:

a) Novembro:

A Figura 8 representa a climatologia mensal e as anomalias de precipitação para o mês de novembro. Pela Figura 8a observa-se na região Norte do Brasil altos valores de precipitação, porém, durante esse período para a região Sudeste do Brasil, as anomalias variam de 100 a 250 mm. A Figura 8b mostra que o ano de 2011 apresentou anomalias negativas de precipitação para a metade da região Sudeste do Brasil. A região centro-sul de Minas Gerais e o estado de São Paulo apresentaram anomalias negativas se comparados com a outra parte da região Sudeste, a qual apresentou valores de anomalias próximos a zero. Durante o ano de 2012 (Figura 8c) houve um aumento de precipitação, em que grande parte de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo apresentaram valores altos de anomalias positivas. No entanto, durante o ano de 2013 (Figura 8d), uma maior porção da região Sudeste apresentou um comportamento parecido com o ano de 2011, com destaque as anomalias negativas de precipitação.



(a) (b)

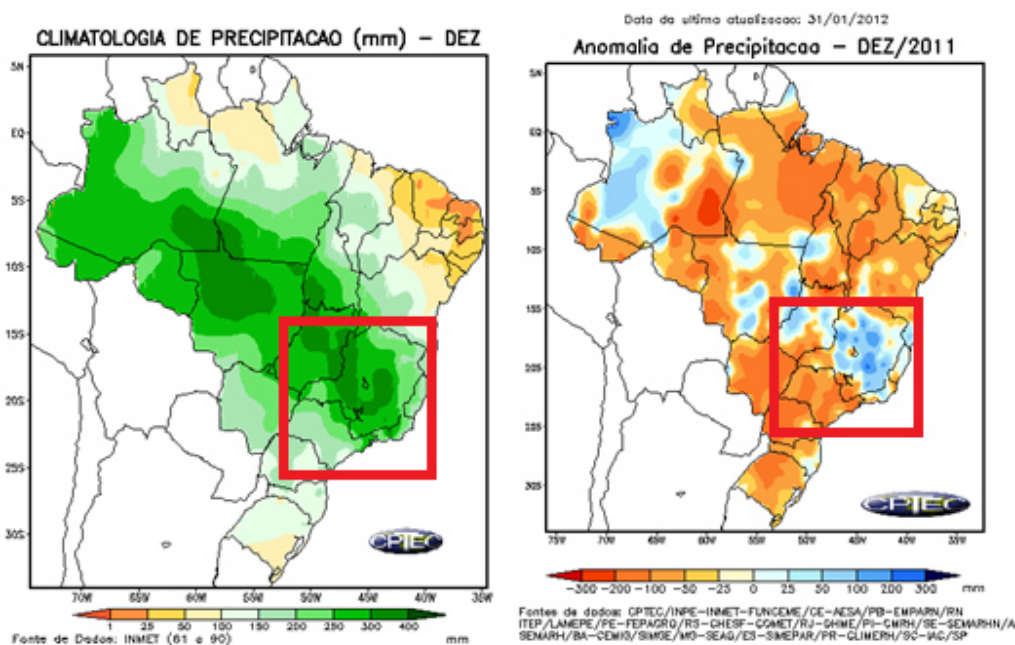
(c) (d)

Figura 8 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de novembro, sendo que: (a) climatologia mensal; (b) anomalia para 2011; (c) anomalia para 2012; (d) anomalia para 2013.

Fonte: CLIMA/CPTEC, (2014).

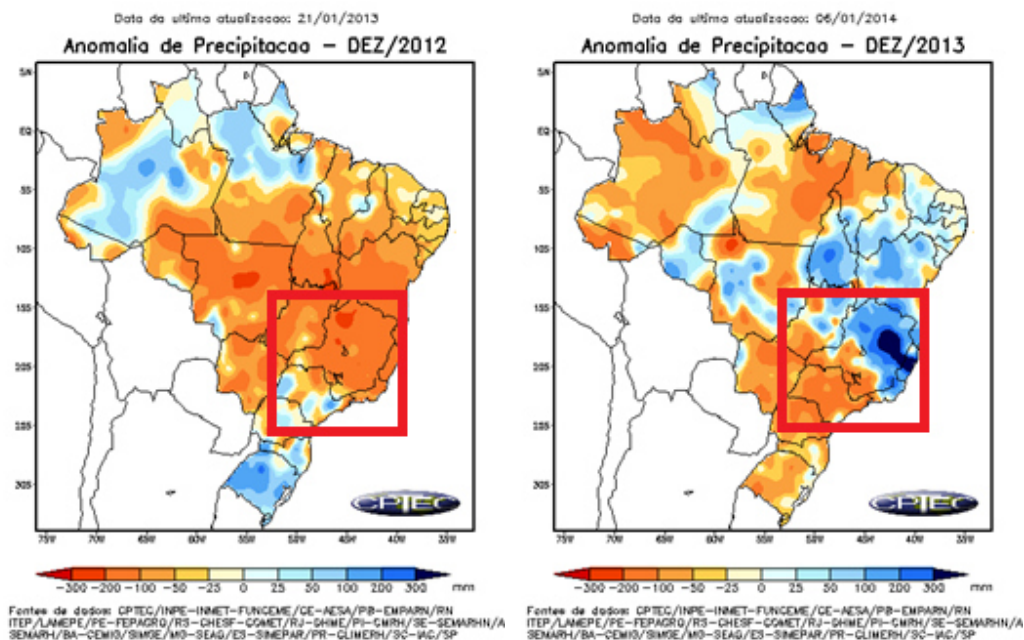
b) Dezembro:

A Figura 9 mostra o comportamento da precipitação de acordo com sua climatologia para o mês de dezembro (Figura 9a), e de acordo com as anomalias apresentadas durante os verões estudados (Figuras 9b, 9c e 9d). Analisando os dados de climatologia (Figura 9a), observa-se anomalias que podem estar associadas a ZCAS, se estendendo desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil, com valores máximos de precipitação se comparados com as outras regiões. Durante dezembro de 2011, representado pela Figura 9b, observa-se que apesar da maior parte do Brasil ter registrados valores negativos de anomalia de precipitação, grande parte do Sudeste brasileiro apresentou os valores esperados pela climatologia. Já durante o verão de 2012 (Figura 9c), as anomalia de precipitação foram negativas para quase todo o sudeste do Brasil, o que pode está associado a um enfraquecimentos, ou até mesmo a ausência da ZCAS. Durante este período apenas a região sul do estado de São Paulo apresentou anomalias positivas. Porém, em dezembro de 2013 (Figura 9d), nota-se anomalias positivas de precipitação mais a norte da região sudeste, o que pode está associado a um deslocamento da ZCAS para norte de sua posição preferencial, o que consequentemente proporcional altos índices pluviométricos em que grande parte de Minas Gerais, se comparado a climatologia. Nesta região, devido a presença do excesso de precipitação, foram observados casos enchentes e desabamentos de encostas.



(a) (b)

Figura 9 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de dezembro, sendo que: (a) climatologia mensal; (b) anomalia para 2011; (c) anomalia para 2012; (d) anomalia para 2013.

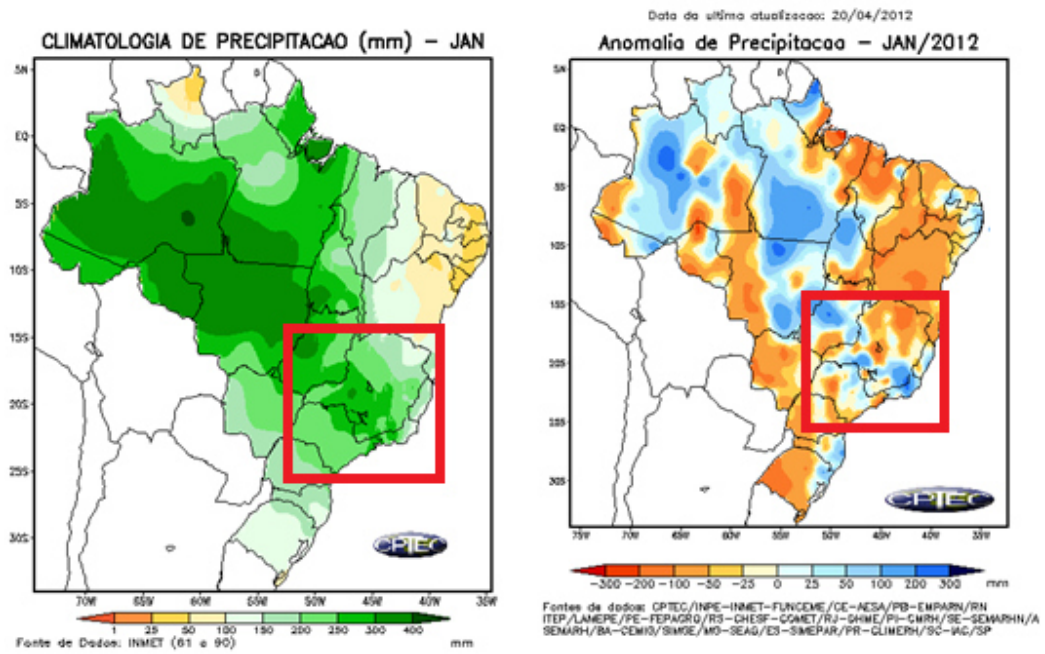


(c) (d)

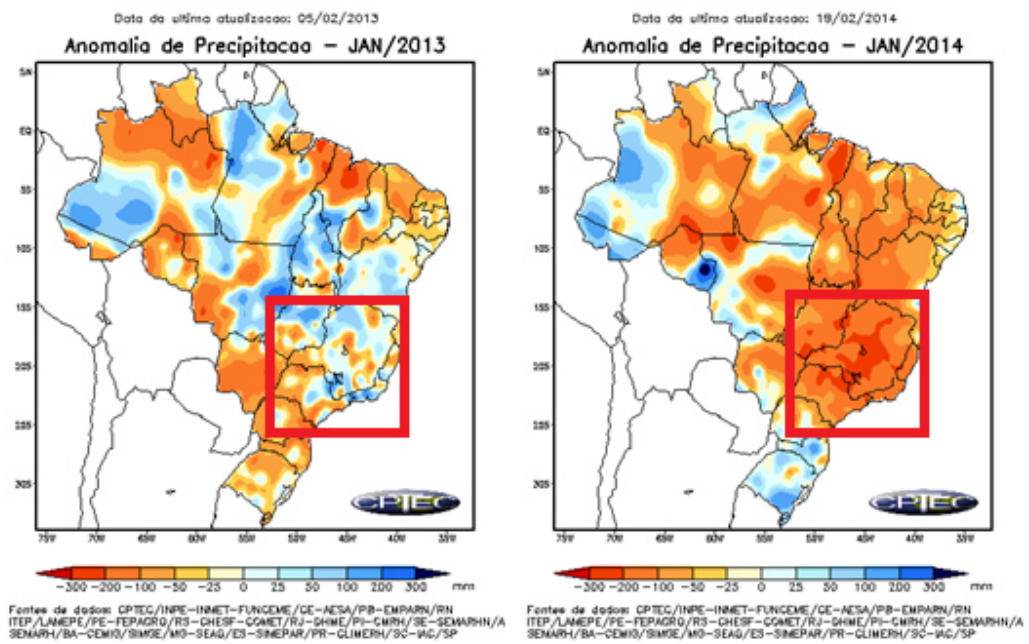
(Continuação Figura 9. Fonte: CLIMA/CPTEC, (2014).)

c) Janeiro:

A Figura 10 representa o comportamento da precipitação durante os meses de janeiro. Na Figura 10a observa-se a diminuição dos índices de precipitação para a região Sudeste, se comparado a dezembro. Para os anos de 2012 (Figura 10b) e 2013 (Figura 10c), com relação a região Sudeste, observa-se que os índices de precipitação aumentaram entre os anos, e apenas algumas área específicas apresentaram anomalias negativas. Tais anomalias negativas (~300 mm), podem ter resultado na escassez de água em alguns dos principais reservatórios hídricos da região. Em janeiro de 2014 (Figura 10d) observou-se valores negativos de anomalias para a maior parte do Brasil, o que resultou no mês mais seco do período de estudo sobre a região em análise.



(a)(b)



(c)(d)

Figura 10 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de janeiro, sendo que: (a) climatologia mensal; (b) para 2012; (c) anomalia para 2013; (d) anomalia para 2014.

Fonte: CPTEC/INPE, (2014).

3. METODOLOGIA:

Definidas as características radiativas e morfológicas dos sistemas identificados pelo ForTraCC (MACHADO e ROSSOW, 1993 e MACHADO et al., 1998), descreveu-se em detalhes o deslocamento, a frequência dos sistemas convectivos e a variação espacial e temporal dos parâmetros físicos identificados via satélite, como: expansão, direção, ciclo de vida e a temperatura do topo das nuvens. O período de análise foi relacionado aos verões de 2011 a 2013 e, para melhor análise e interpretação dos resultados, os SCMs foram divididos em classes de acordo com cada tempo de duração, representado pela Tabela 3:

Tabela 3: Definição das Classes.
Duração
Classe I Até 1 hora
Classe II Entre 1 e 2 horas
Classe III Entre 2 e 4 horas
Classe IV Acima de 4 horas

As escolhas das classes não seguem uma análise física do ciclo de vida dos diferentes sistemas, e sim uma caracterização estatística, análises mais profundas sobre o tipo de sistema precisam ser aplicadas, e só são possíveis a partir do uso de radares meteorológicos, não disponíveis até o presente momento.

3.1) Satélite GOES:

Para o processamento de dados, a técnica ForTraCC utiliza imagens geradas pelo *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES - Operação de Satélites Ambientais Geoestacionários), disponibilizados pela NOAA. Para o período de análise foram utilizados os satélites da série GOES (12 e 13) que promoveram o monitoramento de toda a América do Sul nos últimos anos. O canal utilizado pelo ForTraCC é o canal 4, que é centralizado no comprimento de onda do 10,8 μm .

3.2) O algoritmo ForTraCC:

A descrição dos processos realizados pelo ForTraCC, que serão apresentados nesta seção, foi baseada em estudos de Vila et al. (2008). Os principais passos deste algoritmo para a identificação e acompanhamento da evolução dos sistemas convectivos são os seguintes: 1) um método de detecção de clusters de nuvens baseado em um limiar de tamanho e limite de temperatura; 2) um módulo estatístico para identificar parâmetros morfológicos e radiativos de cada SCM; 3) a técnica de rastreamento com base em áreas de sobreposição entre imagens sucessivas de SCM; e 4) um módulo de previsão (Não utilizado neste estudo) com base na evolução dos SCM observada em passos de tempo anteriores.

3.2.1) Identificação dos SCM:

O algoritmo ForTraCC identifica um cluster de nuvens como um Sistema Convectivo, a partir dos seguintes limiares: temperatura de brilho (< 235K), tamanho (> 150 pixels – 4kmx4km) e sobreposição (25%). Como ilustrado e exemplificado na Figura 11:

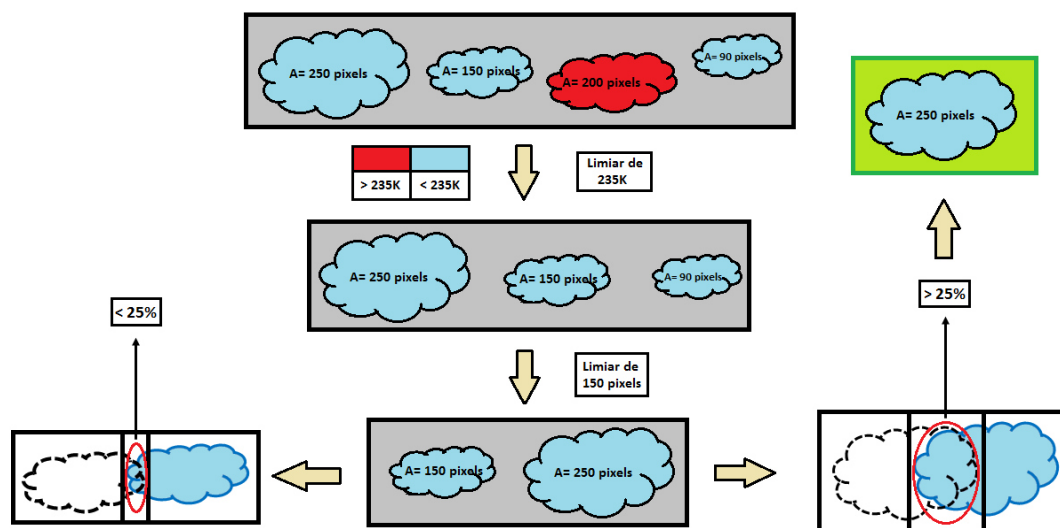


Figura 11 – Representação da metodologia de identificação de um sistema convectivo aplicada pelo algoritmo ForTraCC.

Como ilustrado na Figura 11, o algoritmo ForTraCC primeiramente identifica os possíveis SC por um limiar de temperatura, o qual se dá para T_b menores ou iguais a 235K. Logo após essa identificação, o algoritmo utiliza um limiar de tamanho, onde serão considerados possíveis SC apenas os sistemas que apresentam um tamanho mínimo de 150 pixels. Por fim, definidos os dois limiares citados anteriormente, o ForTraCC realiza uma sobreposição de suas imagens de satélite consecutivas, em que a área sobreposta entre uma imagem e outra deve conter, pelo menos, 25% da área total encontrada na primeira imagem. Com isso, após todos os limiares definidos e obedecidos, o sistema considerado inicialmente como um cluster pode, enfim, ser considerado um SC segundo a metodologia do ForTraCC (MACHADO e LAURENT, 2004; CARVALHO e JONES, 2001; MACHADO et al., 1993; MAPES e HOUZE, 1992).

3.2.2) Técnica de Rastreamento:

Após identificar os pixels contínuos que cumprem o limiar de temperatura de brilho e tamanho mínimo, essas regiões são separadas em diferentes grupos de nuvens (ou clusters de pixels). Cada um desses grupos recebe um número de identificação que irá permitir a geração de informações estatísticas sobre cada SCM, e sua identificação ao longo de seu ciclo de vida.

Existem cinco tipos de situações possíveis que podem ser obtidas com este algoritmo:

1) GERAÇÃO ESPONTÂNEA (N)

Na comparação entre duas imagens sucessivas, a primeira imagem não apresenta nenhum SCM e, já a segunda, um SCM é identificado. Esta situação é considerada como uma geração espontânea e o início de um novo ciclo de vida do SCM.

2) DISSIPACÃO NATURAL (NOR)

Contrário ao caso anterior, um SCM é identificado em uma imagem, porém, em uma imagem consecutiva, o SCM não está mais presente. Esta situação é considerada como uma dissipação natural de um ciclo de vida do SCM.

3) CONTINUIDADE (C)

Numa comparação de duas imagens sucessivas, existe uma sobreposição de apenas um SCM, representado pela Figura 12(a).

4) SEPARAÇÃO (S)

Esta situação ocorre quando apenas um SCM é identificado na primeira imagem e este, na segunda imagem, aparece como sendo mais de um SCM. Neste caso a superfície de maior sobreposição entre o primeiro e o segundo SCM encontrado na segunda imagem determina qual SCM foi escolhido para continuar o ciclo de vida do sistema identificado na imagem anterior, enquanto o SCM de menor sobreposição representa o início de um novo ciclo de SCM (iniciação por *split*). Este processo está representado pela Figura 12(b).

5) FUSÃO (M)

Esta situação ocorre quando em uma primeira imagem, dois SCM são identificados, porém, em uma imagem sucessiva, apenas um SCM está presente. A superfície de sobreposição maior determina qual SCM foi escolhido para continuar o ciclo de vida do único SCM, enquanto sobreposições menores (no caso de haver mais do que um SCM presente) representam uma dissipação dos ciclos de vida desses SCMs (dissipação através da fusão). Este processo está representado pela Figura 12(c).

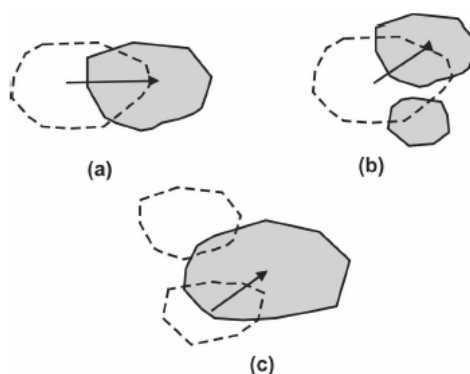


Figura 12 - Representação esquemática das situações de rastreamento. As linhas pontilhadas representam SCMs na primeira imagem, enquanto linhas contínuas representam uma imagem consecutiva. As setas representam evolução SCM. Os processos representados são (a) continuidade, (b) separação, e (c) fusão.

Fonte: Vila et al. (2008).

3.2.3) Técnica de Previsão:

Apesar de não ser utilizada neste trabalho, análises sobre o comportamento dos parâmetros que definem a previsão foram realizadas, de modo que ajustes possam ser aplicados ao sistema de previsão atualmente em operação na DSA ou outro centro que utilize esta metodologia.

3.2.3.1) Estimativa de Deslocamento do Centro de Massa de um SCM

Com a realização da identificação do SCM e seu rastreamento em três tempos consecutivos ao longo de seu ciclo de vida ($t - 2\Delta t$; $t - \Delta t$; t), a estimativa do deslocamento de um SCM é realizada através da aplicação do procedimento a seguir:

A estimativa do vetor de deslocamento do SCM em um intervalo de tempo precedente, $\mathbf{V}(t-1)$, é realizada considerando o deslocamento do centro de massa da elipse no intervalo de tempo entre $t - 2\Delta t$ e $t - \Delta t$ (Figura 13). Considerando que este deslocamento não muda muito (em magnitude ou direção) em uma escala de trinta minutos, um vetor da velocidade prevista $\mathbf{VP}(t)$ é gerado. Ao mesmo tempo, o deslocamento real do SCM, $\mathbf{V}(t)$, também é calculado considerando o intervalo de tempo de $t - \Delta t$ a t . A estimativa do vetor de deslocamento do SCM, $\mathbf{VE}(t + 1)$, é realizada como a diferença entre o deslocamento real, $\mathbf{V}(t)$, e a velocidade prevista, $\mathbf{VP}(t)$, ou seja, $\Delta\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}(t) - \mathbf{VP}(t)$.

No caso de não haver a disponibilidade de imagens sucessivas em dois intervalos de tempo, o vetor deslocamento do SCM é estimado como sendo o deslocamento do centro de massa durante o intervalo de $t - \Delta t$ e t . Este processo é aplicável apenas para condições de continuidade (C), pois os processos de fusão e separação apresentam falsos centros de massa. Com isso, nos casos de continuidade e geração espontânea (N), o vetor deslocamento é estimado como sendo uma média ponderada baseado no deslocamento dos SCMs vizinhos. De modo a evitar esse tipo de erro, apenas sistemas contínuos foram analisados neste trabalho.

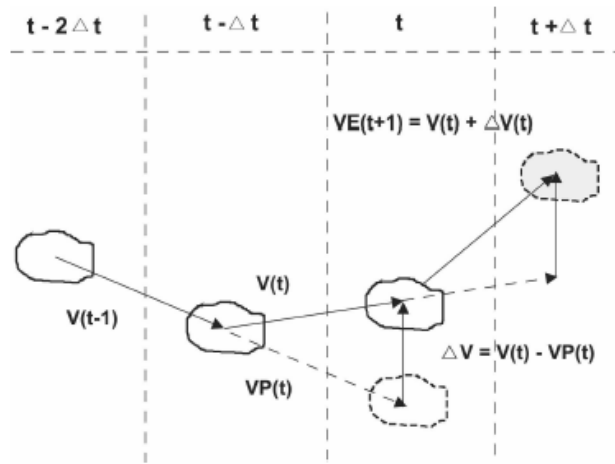


Figura 13 - Representação esquemática do deslocamento previsto para o centro de massa do SCM. As linhas pontilhadas verticais separam os diferentes passos de tempo. O SCM pontilhado indica a posição prevista do sistema de nuvem.

Fonte: Vila et al., (2008).

3.2.3.2) Fase do Ciclo de Vida de um SCM (CRESCIMENTO-DECAIMENTO)

A fase do ciclo de vida de um SCM é avaliada por meio da expansão ou decaimento de uma área normalizada. Segundo Machado et al. (1998) e Machado e Laurent (2004), este parâmetro pode ser expresso como: $\Delta E = 1/A(\delta A/\delta t)$, em que A é a área de um determinado SCM num determinado momento com $T_b < 235K$. Os valores positivos indicam que o SCM está em um processo de expansão e os valores negativos indicam que o SCM está diminuindo seu tamanho.

Ciclos de vida gerados espontaneamente, sem fusão ou separação, e com a dissipação normal foram usados para obter significativos valores de ΔE .

Segundo Machado e Laurent (2004), o ciclo de vida de um SCM pode ser estimado utilizando a seguinte equação:

$$A(t) = \alpha e^{at^2+bt+c}, \quad (2)$$

em que A(t) é a área do SCM no momento t do ciclo de vida e a, b, e c são parâmetros que devem ser definidos de acordo com a duração do ciclo de vida.

Baseado na equação (2), ΔE normalmente são linhas retas representadas por:

$$\Delta E = 1/A(\delta A/\delta t) = at + b, \quad (3)$$

em que a, que representa a inclinação, e b, intercepção, dependerão da duração total do ciclo de vida do SCM.

Baseado em estudos estatísticos obtidos durante o experimento WETAMAC, os SCM foram divididos em quatro classes, em que cada uma dependia do tempo de duração do ciclo de vida, isto é: SCM com ciclo de vida de duração inferior a 2 horas, SCM com duração entre 2 e 4,4 horas, entre 4,4 e 8,4 horas, e aqueles com duração superior a 8,4 horas. Para cada um destes quatro grupos, três valores médios de ΔE foram avaliados: (a) o valor médio de ΔE no primeiro instante de vida de cada um dos SCM (iniciação), (b) o valor médio de ΔE na maturação do SCM, e (c) o valor médio de ΔE no instante do final do SCM (dissipação). A disposição destes pontos está representada pelas diferentes linhas da Figura 14, as quais representam o comportamento das quatro classes. Em geral, uma vez que cada classe pode ser representada por meio de uma equação linear, é possível obter uma família de curvas em $t-\Delta E$, a qual representa a evolução de todos os SCM possíveis (da iniciação até a dissipação). Usando esse modelo, cada ponto do espaço $(t_i, \Delta E_i)$ está relacionada com uma única curva que representa a evolução do ciclo de vida de um SCM em um determinado momento durante todo seu ciclo de vida.

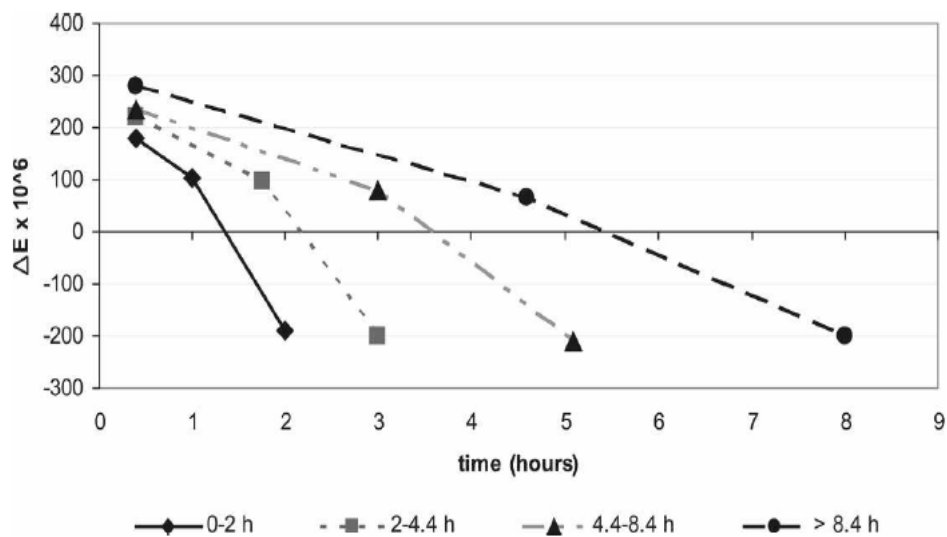


Figura 14 - Valores médios de ΔE durante o início, maturação e dissipação de um SCM para diferentes durações do ciclo de vida: 0-2; 2-2,4; 4,4-8,4; e mais de 8,4 horas.

Fonte: Vila et al., (2008).

Baseado na abordagem mencionada acima, uma única equação linear é selecionada, a partir da família de curvas, a qual representa a possível evolução de todos os SCM. A inclinação e interceptação (a_{est} e b_{est}) representam a evolução do ciclo de vida do SCM e são utilizadas para a previsão de seu tamanho. A previsão é obtida por meio da aplicação desses coeficientes durante o próximo passo de tempo da equação (3), representado por: $\Delta E = a_{est}t_{1+1} + b_{est}$. Se $t_1 = 30$ minutos, a expansão inicial é utilizada para estimar o tamanho da evolução do SCM, tal como sugerido em Machado e Laurent (2004).

3.3) Filtro

Neste trabalho, de modo a diminuir os erros inerentes a classificação dos sistemas pelo algoritmo ForTraCC, apenas sistemas que tiveram as seguintes características foram analisados:

- Ciclo de vida total dentro da área de análise;
- Eventos contínuos, sem a junção ou separação ao longo do ciclo de vida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Durante o período de análise foram observados sobre o Sudeste do Brasil 5825 SCMs, com suas características listadas na Tabela 4:

Tabela 4: Características dos SCM sobre o Sudeste do Brasil.	
Verão de 2011	12.603 SCMs
Verão de 2012	1.899 SCMs
Verão de 2013	1.323 SCMs
Duração Média	2 horas e 39 minutos
Velocidade Média	32,04 km/s
Direção Média	91° (para leste)
Distância Média Percorrida	226,3 km
Tamanho Médio	8.120,15 km ²
Número de CCA	Até 31 Cbs

Com esses dados, observa-se que o número de SCMs tem diminuído nos últimos 3 anos e, em 2013 especificamente, observou-se um índice de precipitação abaixo do esperado na região de estudo (CPTEC), o que pode ter contribuído para o agravamento do período de estiagem observado este ano sobre as bacias hidrográficas no Sudeste do Brasil. De modo a analisar o comportamento dos sistemas com a relação à duração do seu ciclo de vida foram determinadas classes que representam a duração dos eventos, como descrito na metodologia.

4.1. Tamanho Médio:

4.1.1. Análise dos Verões:

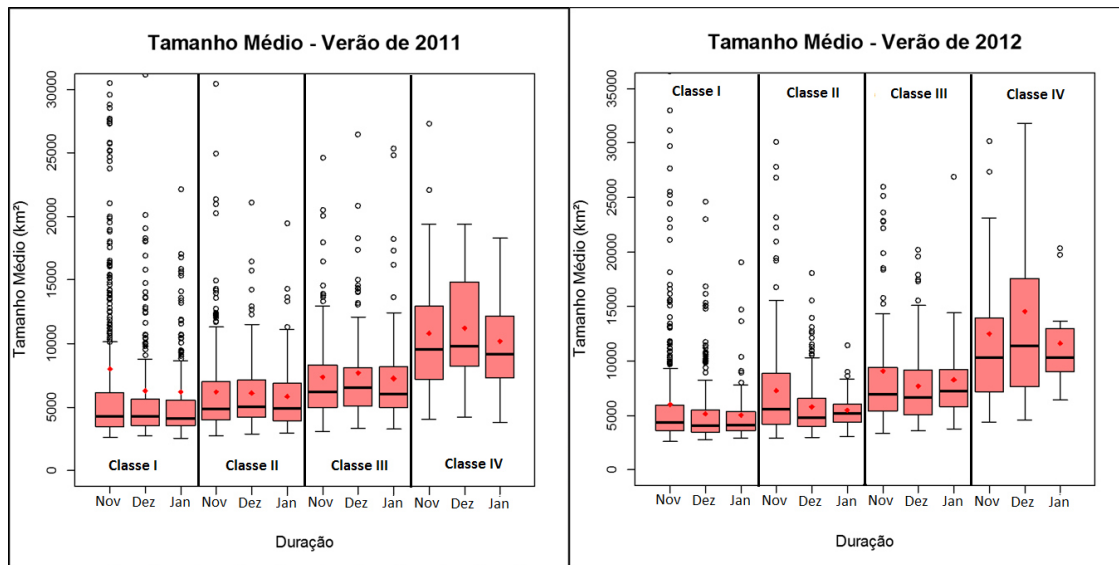
Analisar o tamanho dos sistemas convectivos com seu ciclo de vida é fundamental no desenvolvimento de técnicas para a determinação da severidade (enchentes, deslizamentos, tempo para formação de granizo e altos índices pluviométricos) desses sistemas, pois dependendo

do tipo de sistema, a quantidade de chuva pode ser proporcional ao seu tempo de vida e a sua cobertura.

Analisando o comportamento dos eventos convectivos durante o período de estudo e sobre a região sudeste do Brasil, observou-se que os sistemas maiores apresentaram maior tempo de vida. A Figura 15 mostra os diagramas de caixa (*boxplot*) com valores de tamanhos médios para cada sistema observado, separados para cada mês e tempo de duração. No *boxplot* os dados contidos dentro dos retângulos representam 50% da quantidade total. O limite superior de cada retângulo representa 75% do total de dados, enquanto o limite inferior representa 25%. A linha horizontal dentro dos retângulos representa a mediana e, o ponto em vermelho representa a média. Os valores extremos superiores e inferiores do retângulo representam os tamanhos máximos e mínimos da série, respectivamente, registrados para cada mês e, por fim, os pontos fora do gráfico representam os *outliers*.

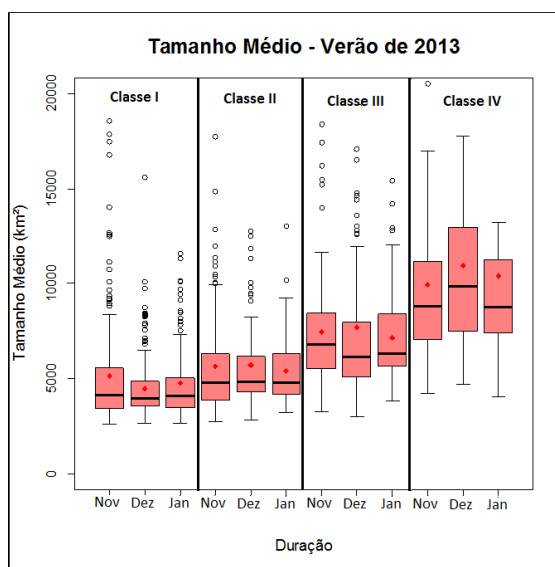
Na Figura 15a, observa-se que os sistemas que ocorreram durante o verão de 2011 apresentaram um comportamento médio semelhante para os três meses, o que pode estar associado a um padrão atmosférico dominante durante este período. Durante o verão de 2012, Figura 15b, nota-se que durante o mês de dezembro, os maiores sistemas observados estão associados àqueles que apresentaram o maior tempo de vida. Para o verão de 2013 (Figura 15c), assim como em 2011, os sistemas apresentaram um comportamento similar, contudo o mês de novembro apresentou os maiores sistemas para as classes de menor duração. Nota-se que, para todos os meses, as medianas ficaram próximas umas das outras de acordo com cada classe, o que mostra que os eventos são semelhantes para cada classe. Além disso, o número de *outliers* diminui à medida que o tempo de duração dos sistemas aumenta, ou seja, quanto maior o sistema menor é a ocorrência e cada vez mais agrupado.

Nota-se também que à medida que o ciclo de vida aumenta, os valores das medianas, mínimos, máximos e médios também aumentam, ou seja, fica evidente nas figuras que existe um aparente crescimento do tamanho dos sistemas em função do seu ciclo de vida. Tal comportamento pode ser parametrizado de modo a prever com maior precisão a taxa de crescimento desses sistemas. Contudo, é necessário que se façam maiores estudos sobre as características termodinâmicas associadas ao crescimento e manutenção desses sistemas convectivos.



(a)

(b)



(c)

Figura 15– Características dos sistemas convectivos referentes à variável de tamanho médio, representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelhos representam os valores médios. Os valores foram divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.

4.1.2. Análise Mensal:

A Figura 16 mostra os valores médios (pontos em vermelho) de tamanho para cada mês de todos os anos. A média dos três meses de estudo apresenta o mesmo comportamento citado anteriormente, em que os sistemas com maior tempo de duração também apresentam um maior

tamanho médio. Observa-se também que, o mês de novembro apresentou os maiores valores para os sistemas com ciclo de vida menor que 4 horas. Para os sistemas com maior tempo de duração, o mês com maior tamanho médio foi dezembro, seguido de novembro e janeiro. Isto mostra que o mês de dezembro é aquele mais convectivamente ativo sobre a área de estudo, para o período de anos estudados. O mês de janeiro apresentou os menores valores médios para todas as classes, o que pode estar associado à influência dos pequenos eventos observados em janeiro de 2014, que consequentemente proporcionaram anomalias negativas de precipitação sobre o Sudeste do Brasil neste mês, como mostrou a Figura 10d.

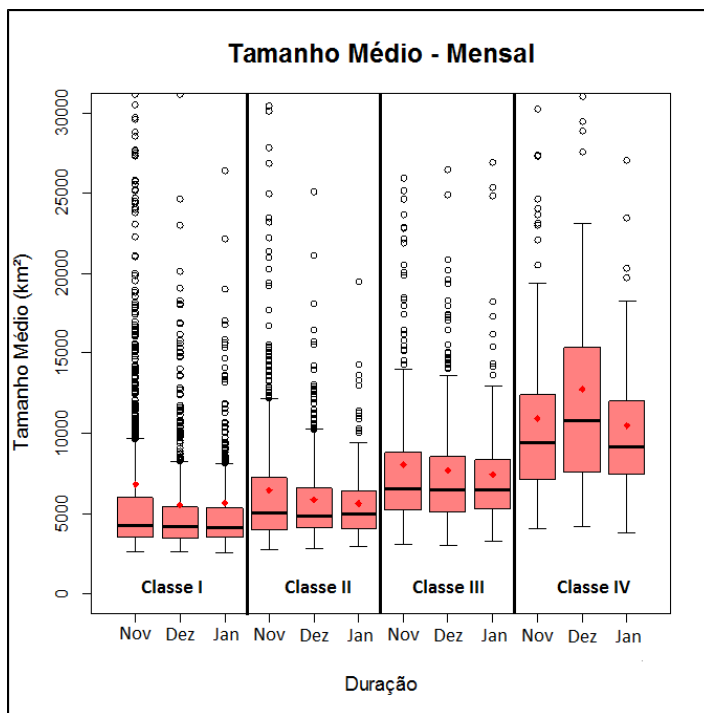


Figura 16 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada mês, para os três verões de estudo. Os valores estão representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelho se referem aos valores médios.

4.1.3. Análise Anual:

A Figura 17 mostra os valores médios (pontos em vermelho) dos tamanhos para cada ano (verão) do período de análise. É possível notar que, à medida que o tempo de duração dos sistemas aumenta, há uma diminuição do número de dados *outliers*, isso significa que os sistemas tendem a ter uma característica semelhante dentro da própria série. Nota-se que o verão de 2012 apresentou os sistemas com os maiores tamanhos médios para todas as classes, exceto para aqueles com menor duração. Logo, para a Classe I, o verão de 2011 apresentou a maior média. Apesar do verão de 2013 ter apresentado os menores tamanhos médios, durante o mês de dezembro alguns eventos extremos foram observados, como aqueles que podem estar associados ao posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) mais ao norte de sua posição climatológica. Tais eventos proporcionaram sobre o Norte de Minas Gerais altos índices pluviométricos, que mostraram uma anomalia positiva superior a 300 mm (Figura 10d), os quais acarretaram na ocorrência de enchentes e desabamentos sobre a região.

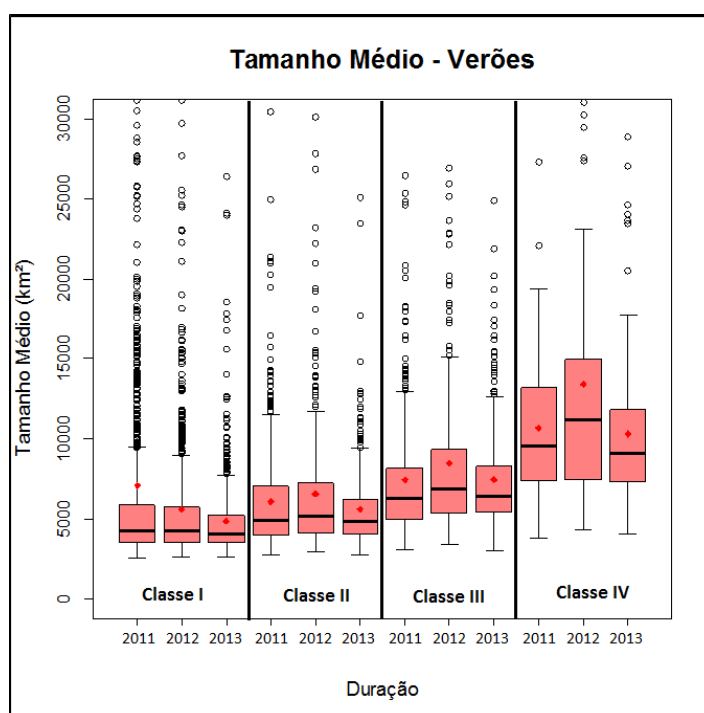


Figura 17 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada verão, para os três anos de estudo. Os valores estão representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelho se referem aos valores médios.

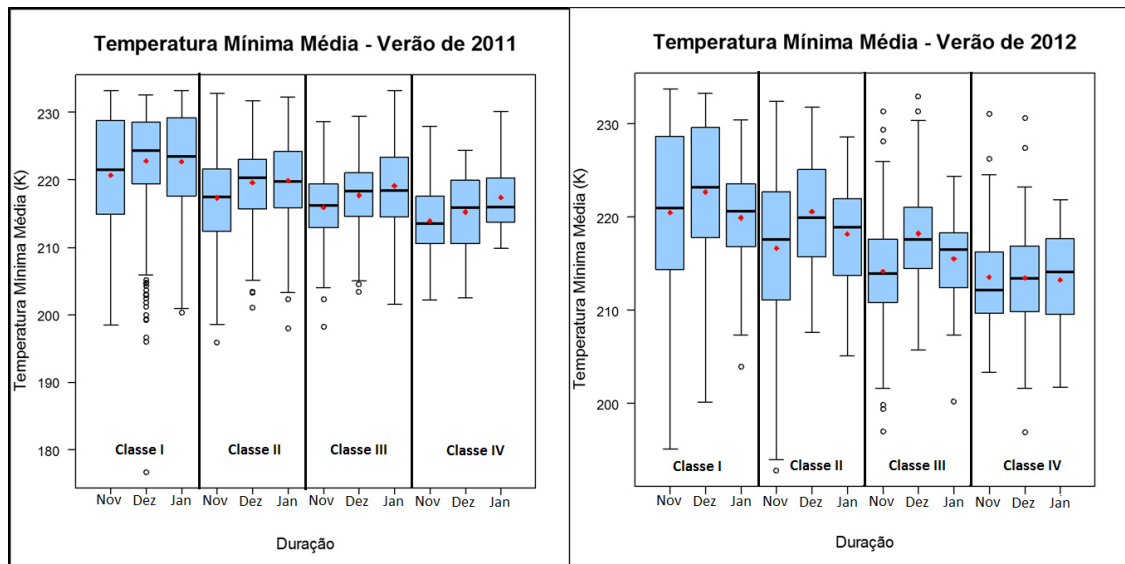
4.2. Temperatura Mínima Média:

4.2.1. Análise dos Verões:

Analisar o ciclo de vida dos eventos convectivos com relação à temperatura mínima do topo das nuvens é de suma importância na previsão a curtíssimo prazo por satélites meteorológicos (CALHEIROS, 2008), uma vez que essa temperatura pode representar além da camada de nuvens, como também a quantidade de chuva, a partir de medidas realizadas no espectro de onda do infravermelho. Alguns modelos empíricos de estimativa de precipitação, a partir de imagens de satélites, utilizam a relação entre a T_b e a taxa de chuva (HIDROESTIMADOR, VICENTE et al., 1998).

A Figura 18 apresenta os boxplots referentes à análise da variável de T_b de cada sistema, com relação ao seu tempo de duração. Nota-se que, para esta variável, o número de *outliers* é bem menor se comparado com a variável tamanho médio, sendo assim, essa variável tem uma maior uniformidade dentro da série. Observa-se também que, no geral, os eventos observados em todos os verões apresentaram o mesmo comportamento, isto é, quanto maior é o tempo de duração dos sistemas, menor é sua temperatura mínima, ou seja, sistemas com topos mais altos. Tal observação implicaria que existe uma maior camada de nuvens que pode provocar a formação de granizo nesses sistemas (HOUZE, 2004). Nota-se na Figura 18a que durante o mês de novembro, foram observados os sistemas com os menores valores de T_b mínima e, conseqüentemente, os sistemas mais intensos durante verão de 2011. Para o verão de 2012, Figura 18b, novembro também apresentou as menores médias (pontos em vermelho) com exceção da classe IV, em que dezembro registrou os sistemas com topos mais frios. O verão de 2013, Figura 18c, também apresentou as menores médias durante o mês de novembro, seguido de dezembro e janeiro. Contudo, segundo as análises das anomalias de precipitação, em uma média geral o mês de dezembro foi aquele com os maiores índices pluviométricos, o que sugere que eventos estratiformes e de chuva quente, não identificados por imagens de satélites utilizando o limiar de 235K, podem ter ocorrido e em parte serem responsáveis pelas precipitações observadas. Lembrando que o terceiro estágio do ciclo de vida de um sistema convectivo (dissipação) pode ser subestimado em observações no infravermelho, e é justamente neste estágio que existe a predominância de chuva estratiforme.

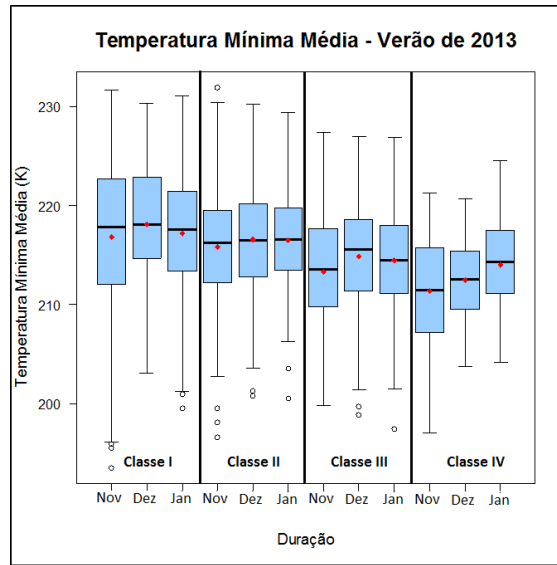
Os sistemas convectivos com menores valores de temperatura mínima apresentam tops mais altos, o que reflete a uma maior severidade. Uma vez que a coluna atmosférica é superior, a formação de chuva pode ser favorecida pelo maior tempo na geração de grandes hidrometeoros (WALLACE e HOBBS, 2006). Com isso, de acordo com os gráficos da Figura 18c, o verão de 2013 apresentou os sistemas mais severos. Contudo, os dados observacionais mostram que durante esses meses, a maior parte do sudeste do Brasil registrou anomalias negativas de precipitação, exceto em dezembro, o que pode estar associado a um menor número de eventos convectivos em 2013, como analisaremos posteriormente.



(a)

(b)

Figura 18– Características dos sistemas convectivos referentes à variável de temperatura mínima média, representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelhos representam os valores médios. Os valores foram divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.



(c)

(Continuação da Figura 18.)

4.2.2. Análise Mensal:

A Figura 19 apresenta os valores de T_b mínima para cada mês. Nota-se que o mês de novembro apresentou os sistemas com menores médias (pontos em vermelho), apesar da menor atividade convectiva neste mês. Os valores de T_b mínima podem representar que apesar de uma maior camada, as características termodinâmicas durante este período não são ideais para geração de sistemas intensos com grande índice pluviométrico. O mês de dezembro, apesar de ser o mês com maior atividade convectiva, apresentou os maiores valores médios para as três primeiras classes. Porém, para os sistemas com maior tempo de duração, o mês de janeiro registrou o maior valor, o que converge com os maiores tamanhos e esta associação produziria sistemas cujas taxas de precipitação podem ser altas, uma vez que eles podem durar mais e ter uma camada mais profunda.

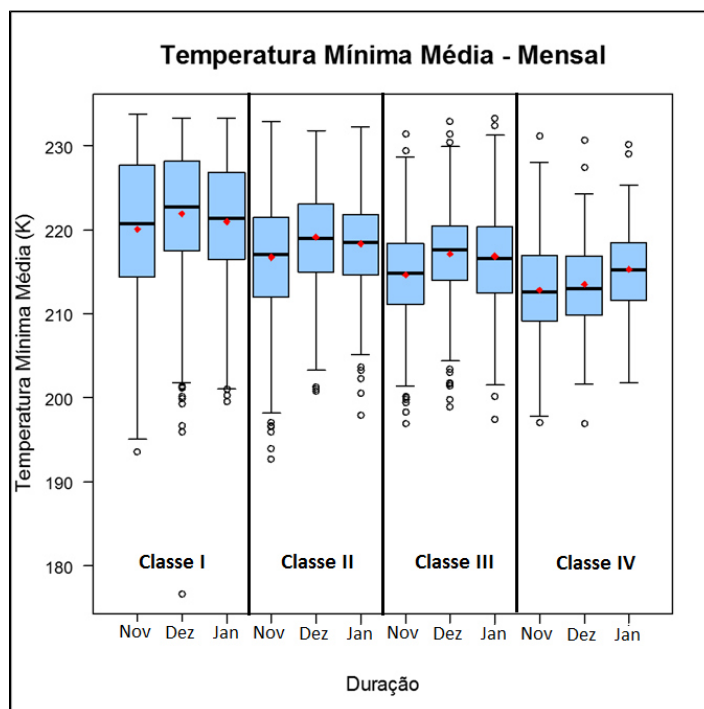


Figura 19 - Relação entre duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada mês, para os três verões de estudo. Os valores estão representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelho se referem aos valores médios.

4.2.3. Análise Anual:

A Figura 20 apresenta os valores médios (pontos em vermelho) de T_b mínima para todos os verões estudados. Observa-se nesta figura que no verão de 2013, apesar de ter apresentado um índice de precipitação abaixo do esperado [exceto para dezembro sobre a região Norte de Minas de Gerais (Figura 9d)], mostrou os menores valores de temperatura mínima, os quais estão associados a eventos de precipitação intensa observados na ZCAS. Os verões de 2011 e 2012 apresentaram valores médios próximos para as duas primeiras classes, porém, para os sistemas com maior tempo de duração, o verão de 2011 apresentou a maior média. Observa-se que à medida que o ciclo de vida se alonga, há uma diminuição do número de SC registrados pelo ForTraCC. Esse comportamento pode ser notado pela diminuição do tamanho dos retângulos, os quais representam 50% do total de dados. Nota-se ainda que existem similaridades para os eventos com maior duração, o que mostra que eventos com ciclos de vida mais longos e

consequentemente maiores, como foi avaliado nas seções anteriores, são mais dependentes de uma condição de maior escala, se comparados com eventos de menor duração, onde o ciclo diurno pode ser o fator dominante para a organização da convecção.

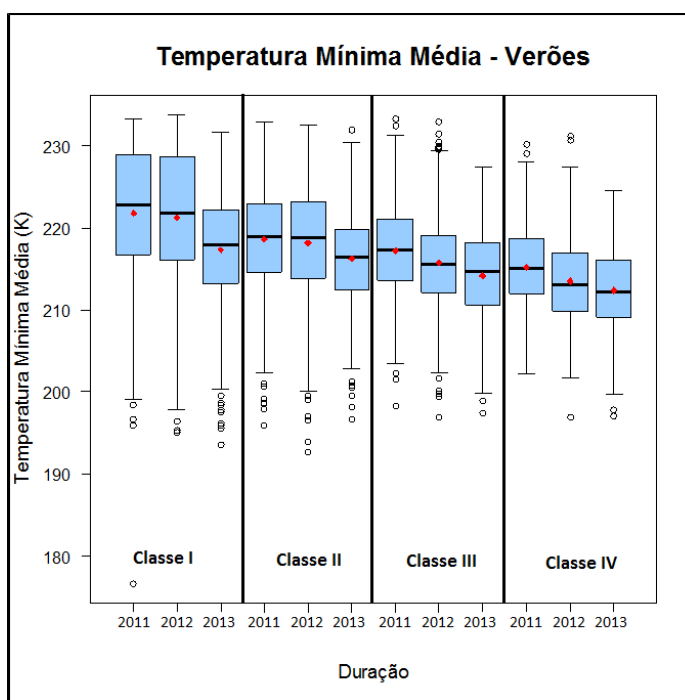


Figura 20 - Relação entre duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada verão, para os três anos de estudo. Os valores estão representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelho se referem aos valores médios.

4.3. Distância Média Percorrida:

4.3.1. Análise dos Verões:

Com relação à propagação dos eventos convectivos, determinar a distância percorrida por esses sistemas em função de sua duração é importante para entender os processos de manutenção e geração de novas células ao longo do ciclo de vida. Tais informações podem ser utilizadas em previsões de tempo em curto prazo, já que é possível extrapolar no tempo e no espaço a estrutura do topo das nuvens medidas via satélites, gerando assim, informações suficientes para o

desenvolvimento de ferramentas de alerta em um sistema de tomada de decisões. A Figura 21 mostra o comportamento dos dados de distância média percorrida (km), associadas ao centro de massa dos sistemas convectivos sobre a área de estudo, distribuídos no boxplots. Nota-se na Figura 21a que, durante o verão de 2011, em geral, os sistemas atuantes durante o mês de janeiro percorreram as maiores distâncias médias. No entanto, analisando detalhadamente o mês de dezembro, nota-se que este apresentou as menores médias (pontos em vermelho) para as três primeiras classes, porém, para a classe IV, sua média se aproximou da registrada em janeiro. Nota-se nas outras figuras (Figura 21b e 21c) que não há um comportamento padrão na relação entre a distância percorrida e o tempo de duração dos sistemas. Isso mostra que para definir a variável de distância média percorrida, não é necessário analisar apenas as características do sistema, como também as características dinâmicas e termodinâmicas do ambiente em que o sistema se encontra.

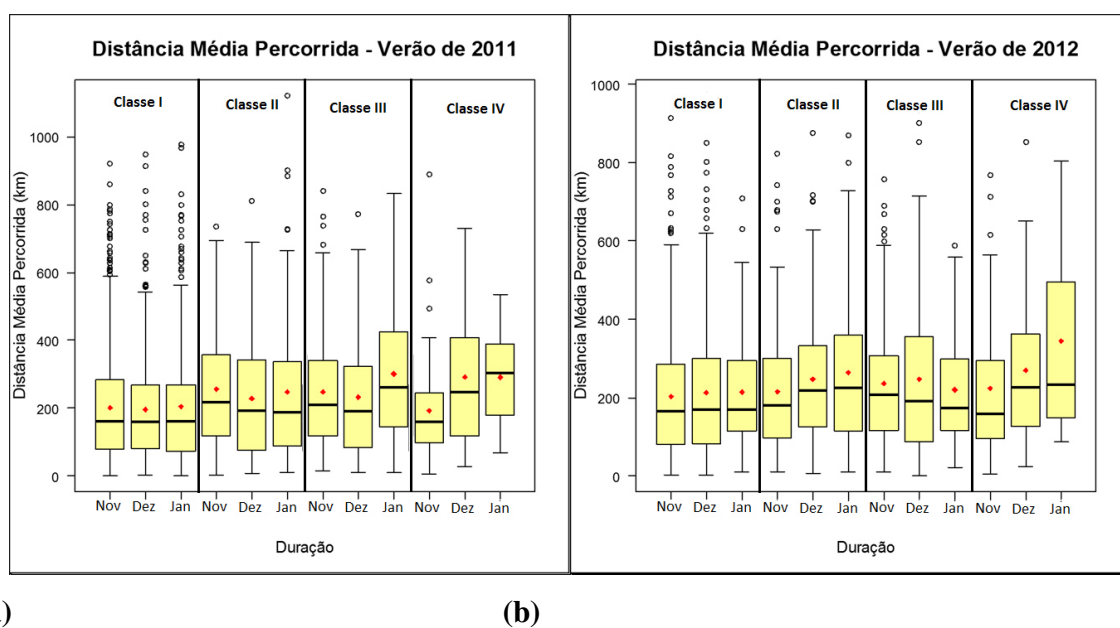
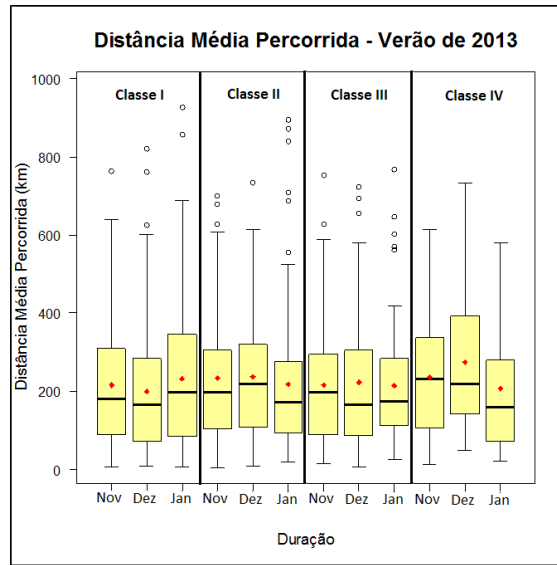


Figura 21– Características dos sistemas convectivos referentes à variável de distância média percorrida, representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelhos representam os valores médios. Os valores foram divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.



(c)

(Continuação da Figura 21.)

4.3.2. Análise Mensal:

Pela Figura 22, observa-se que o mês de novembro registrou os menores valores de distância média percorrida para todas as classes, exceto a III. Janeiro apresentou as maiores médias (pontos em vermelho) para as três primeiras classes, enquanto dezembro apresentou a maior distância média percorrida para os sistemas com maior tempo de duração. Tais características podem estar associadas ao deslocamento dos SC dentro de sistemas frontais e sua evolução durante o verão. Nota-se que os valores máximos e mínimos de distância média percorrida não variam muito de acordo com o aumento do tempo de duração dos sistemas, ou seja, os sistemas que atuaram durante os três verões estudados tenderam a percorrer valores máximos semelhantes entre as classes. A partir desses resultados, para os três verões analisados, observou-se que os sistemas tendem a percorrer maiores distâncias no mês de janeiro, se comparado com os outros meses. Deste modo, a partir do uso de sistemas de rastreamento, como o ForTraCC, é possível criar meios de alertar a população para eventos que atuam sobre áreas de risco, onde deslizamentos e enchentes podem ocorrer devido ao posicionamento de sistemas precipitantes e sua permanência sobre essas regiões.

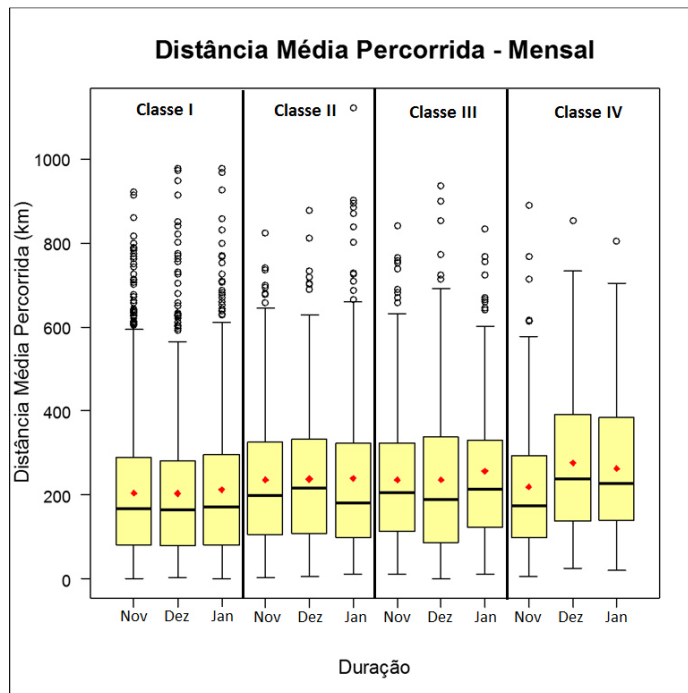


Figura 22 - Relação entre duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada mês, para os três verões de estudo. Os valores estão representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelho se referem aos valores médios.

4.3.3. Análise Anual:

Pela Figura 23, nota-se que para a classe I, o verão de 2013 apresentou os maiores valores médios (pontos em vermelho). Porém, para as classes II e III, as maiores médias foram registradas durante o verão de 2011. Já para a classe IV, o verão de 2012 apresentou a maior distância média percorrida. Esse comportamento não definido entre duração e distância média percorrida, mostra que para definir o deslocamento dos sistemas, necessita-se realizar uma análise das características dinâmica e termodinâmica do ambiente envolvendo o SC. Contudo, nenhuma análise foi realizada até o momento sobre o efeito de grande escala e do escoamento apresentado em médios níveis, ou seja, na camada de nuvens, que podem explicar essa variabilidade observada.

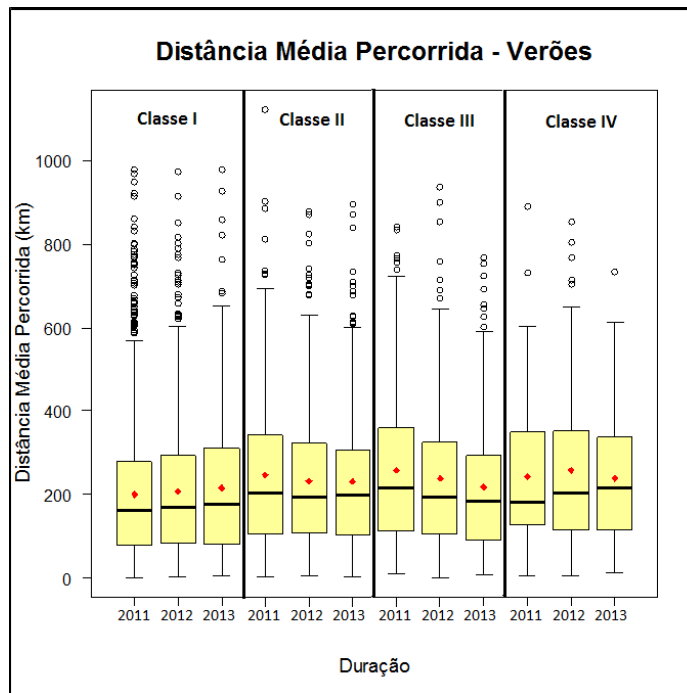


Figura 23 - Relação entre duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada verão, para os três anos de estudo. Os valores estão representados pelos boxplots, em que os pontos em vermelho se referem aos valores médios.

4.4. Número Total de Células Convectivas:

4.4.1. Análise dos Verões:

O número total de células convectivas (CC) registrado para cada verão pode ser observado na Figura 24. Nota-se na Figura 24a que os meses do verão de 2011 apresentaram o mesmo comportamento no que diz respeito ao número de células convectivas. Já em 2012 (Figura 24b) existe uma grande variação nos valores médios, observada também em dezembro (Figura 24c). Essa variabilidade pode ser explicada apenas por análises que levem em consideração as características termodinâmicas, como as correntes verticais dentro da nuvem, cisalhamentos e características microfísicas/macrofísica dos sistemas e ambiente circundante, que podem servir na manutenção e organização dos eventos, e assim, nos processos de separação e junção de sistemas e sua duração. Neste sentido, sugere-se análises multiespectrais sobre a estrutura do topo de

nuvens a partir de canais no espectro do visível, e dentro da nuvem utilizando o micro-onda ativo e passivo. Contudo, fica evidente que os meses de novembro são aqueles com o maior número de CCs, principalmente associado a eventos que menor duração, e que conseqüentemente não evoluem a eventos maiores e com maior ciclo de vida.

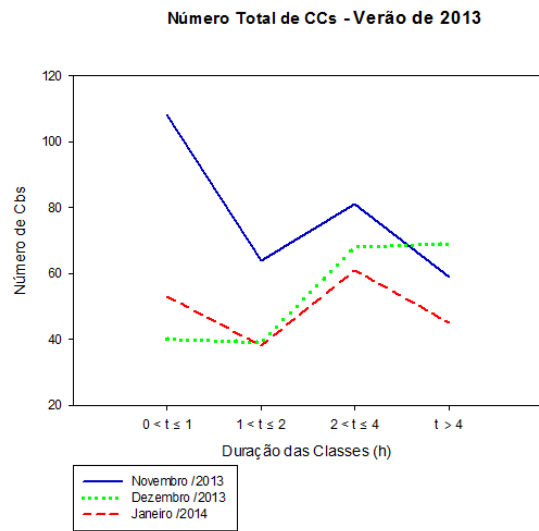
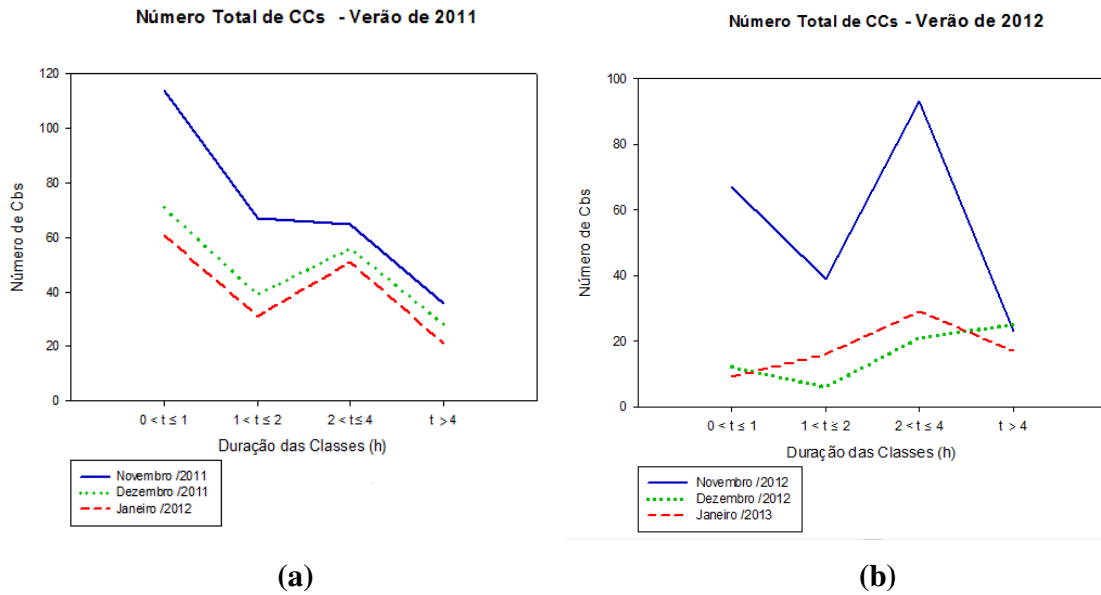


Figura 24 - Relação entre a duração e número total de CCs dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.

4.5. Número Total de Eventos Convectivos:

A Figura 25 mostra o número total de sistemas convectivos para cada verão durante o período de análise em função das observações mensais. Pela Figura 25, nota-se uma diminuição do número de eventos convectivos ao longo do verão. Os meses de novembro apresentam o maior número de eventos convectivos, possivelmente associados aos eventos com menor duração e maior quantidade de células convectivas, como analisado anteriormente. Já os sistemas em dezembro tendem a ser maiores e conseqüentemente se apresentam em menor número, contudo o índice pluviométrico registrado para este mês é maior, o que remete a eventos mais severos. Em janeiro, a atividade convectiva diminui e, portanto o número de eventos também. Em 2014 as bacias hidrográficas ao Sul do Sudeste do Brasil apresentaram déficit com relação aos anos anteriores, tal situação pode estar relacionada a um padrão de precipitação no qual a ZCAS possa ter se deslocado mais a norte de sua posição climatológica, e conseqüentemente os sistemas convectivos observados neste período seguiram o mesmo padrão. Contudo, observou-se também uma diminuição do número de SC (Figura 25) ao longo dos anos analisados, o que reflete diretamente no total de precipitação sobre essas localidades. Além disso, segundo a Climanálise do CPTEC (CPTEC, 2014), o número de sistemas frontais que adentraram o território brasileiro durante os verões de 2011 e 2012, se deu em um total de 19 eventos, sendo que apenas 6 desses sistemas atingiram a região sudeste do Brasil, ou seja, o número de frentes que penetram sobre a região e que não definem a ZCAS também é importante na quantificação dos SC.

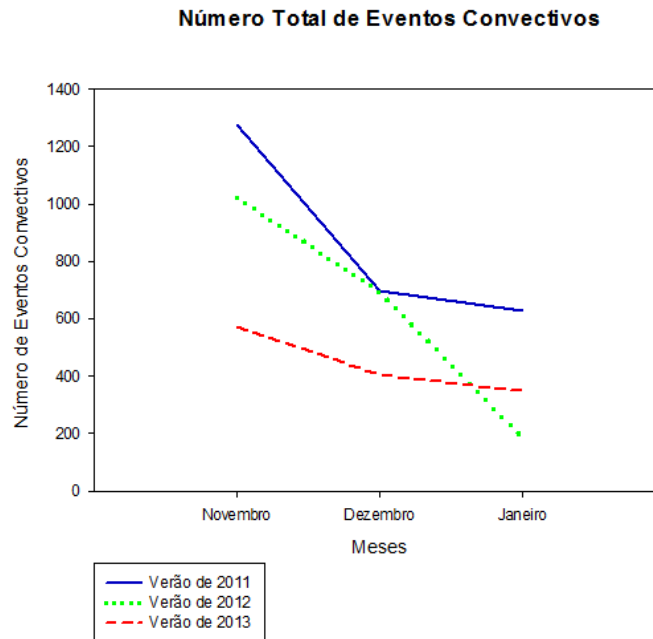


Figura 25 - Relação entre os meses e o número total de eventos convectivos, registrados durante os três verões de estudo.

4.6. Expansão Máxima:

O modelo de previsão do ForTraCC necessita de informações sobre a tendência de crescimento e desenvolvimento dos sistemas convectivos para realizar previsões a curto prazo, o que torna necessário construir curvas que representam a expansão/dissipação da área desses sistemas em função do ciclo de vida dos mesmos. A construção dessa relação é de suma importância para a regionalização dos modelos de modo a melhorar o desempenho relacionado à extrapolação espacial e temporal dos sistemas convectivos na previsão a curtíssimo prazo. Tal relação é baseada na variável $\frac{1}{A} \cdot \left(\frac{\delta A}{\delta t} \right)$, em que **A** é a área do sistema convectivo e **δt** o tempo entre imagens consecutivas. A Figura 26 apresenta as três relações encontradas para os três verões de análise. Assim, observa-se nas curvas que, ao longo dos anos, o tempo de duração de cada estágio tem aumentado. Os valores médios de expansão máxima foram semelhantes para os anos de 2011 e 2012 durante o estágio inicial, enquanto o verão de 2013 apresentou a menor média. Fica evidente na figura que o tempo para chegar à maturação tem aumentado, o que leva a

entender que os sistemas precisam de mais tempo para chegar ao seu estágio mais ativo. Sendo esta última característica também observada na dissipação. Tal observação pode ser um indicativo da necessidade de adaptações dos modelos de previsão a atualizações em seus coeficientes que podem melhorar o desempenho do modelo.

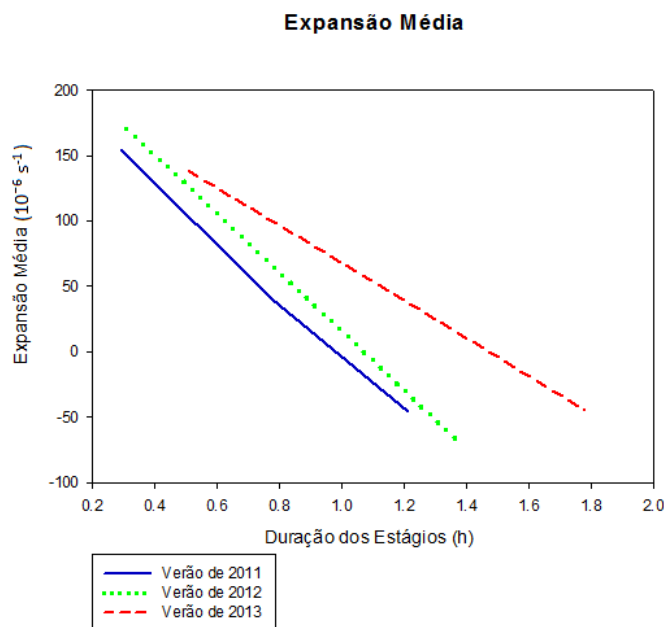


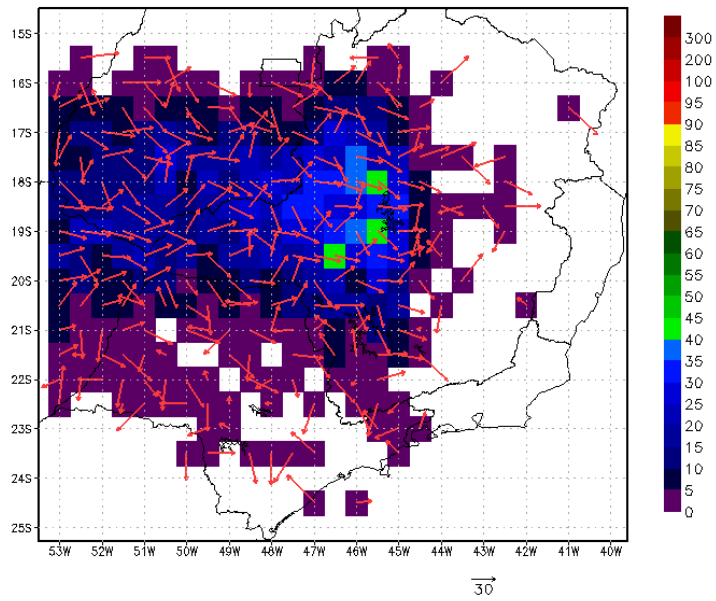
Figura 26 - Relação entre duração e expansão máxima para os três estágios do ciclo de vida dos eventos convectivos durante os três verões de estudo. Os estágios são: Iniciação, Maturação e Dissipação.

4.7 Áreas de Atuação e Deslocamento dos SC

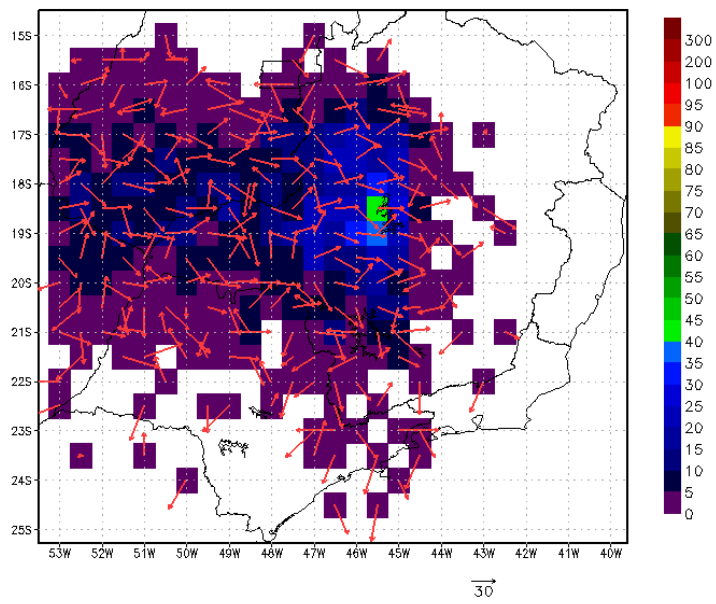
Nesta seção foram analisados os posicionamentos médios dos sistemas convectivos e as direções predominantes durante seus ciclos de vida sobre a região de análise. Para contabilizar os sistemas que ocorrem sobre uma determinada área, foi criada uma grade de 0.5x0.5 grau, onde os sistemas cujos centros de massa médios foram co-localizados no espaço. Assim como o vetor deslocamento baseado na direção e velocidade média dos sistemas sobre um determinado pixel. Cabe ressaltar que a área de atuação desses sistemas pode ser bem maior do que o amostrado, uma que apenas o centro de massa é analisado.

A Figura 27 mostra que os sistemas que apresentam todo o ciclo de vida e não são gerados a partir de fusão ou separação de outros eventos sobre a região Sudeste do Brasil se

concentraram especificamente sobre o centro e oeste do Estado de Minas Gerais. Assim como discutido nas seções anteriores, o número de sistemas é maior em novembro e dezembro do que em janeiro. A região mais próxima da costa é afetada principalmente por sistemas associados a presença de sistemas frontais, que devido a seu formato alongado fazem com que o centro de massa seja deslocado para uma área de atuação fora daquela especificada neste trabalho, conseqüentemente não sendo contabilizados. Ainda, ressalta-se que tais eventos são associados com muitos processos de fusão e separação, o que também limitou sua análise neste estudo devido às limitações no algoritmo de rastreamento. Próximos estudos levarão em consideração sistemas com essas características, uma vez que a quantidade chuva proporcionada por tais eventos é de suma importância para o total observado. Nota-se ainda que o deslocamento médio desses SC, principalmente aqueles centrados na latitude de -19°S , é orientado para leste com velocidades superiores a 30 km/h para todos os meses. Esse resultado mostra que os eventos analisados tendem a se direcionar e atingir regiões em específico, o que pode ajudar a criar um sistema que determine as áreas de atuações preferenciais de sistemas convectivos sobre o Sudeste do Brasil, que ajudará na previsão desses eventos. A Figura 28 mostra o posicionamento e a direção do deslocamento médio para os períodos de cada verão em análise. Nota-se que o número de eventos diminuiu ao longo dos anos e que a direção média dos sistemas apresenta variações distintas, onde os eventos dos verões de 2011 e 2012 foram mais rápidos e cujas direções foram para leste em sua maioria, já eventos no verão de 2013 apresentaram um deslocamento predominante para sudoeste e com velocidades mais baixas.

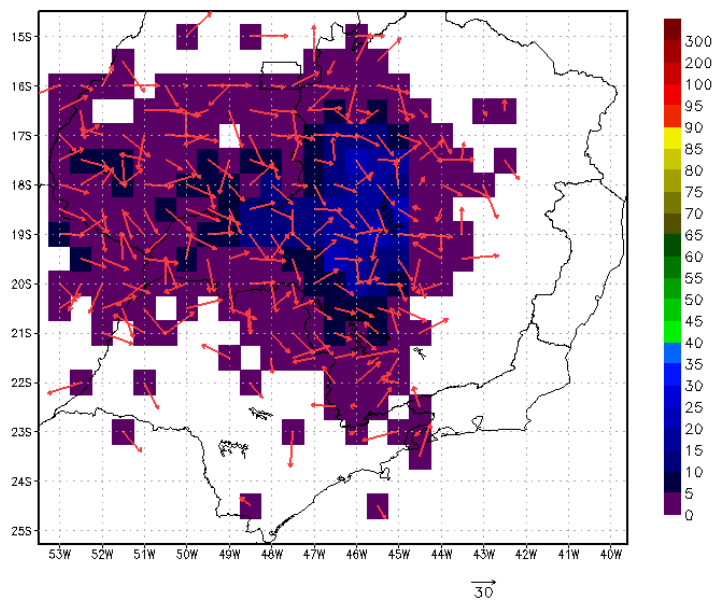


(a)



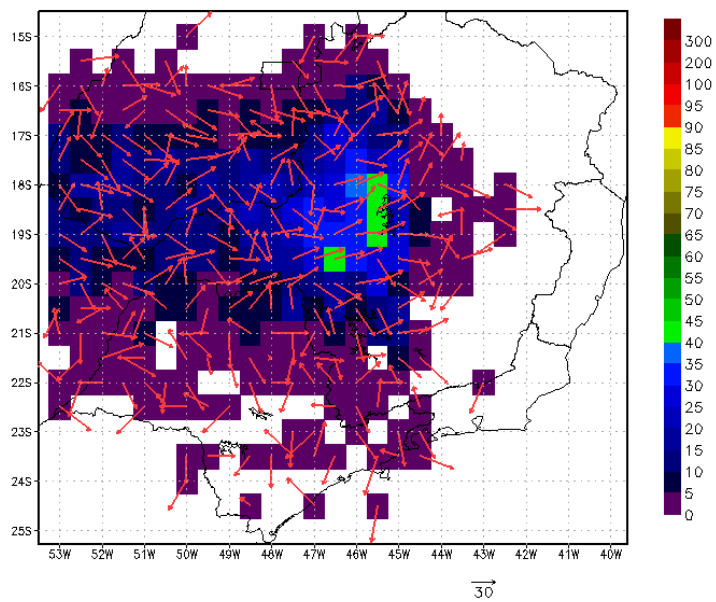
(b)

Figura 27– Número de sistemas convectivos (áreas coloridas) em uma grade de 0,5x0,5° sobre a área de estudo e a direção predominante (vetor vermelho) para os meses de: (a) novembro; (b) dezembro; e (c) janeiro.



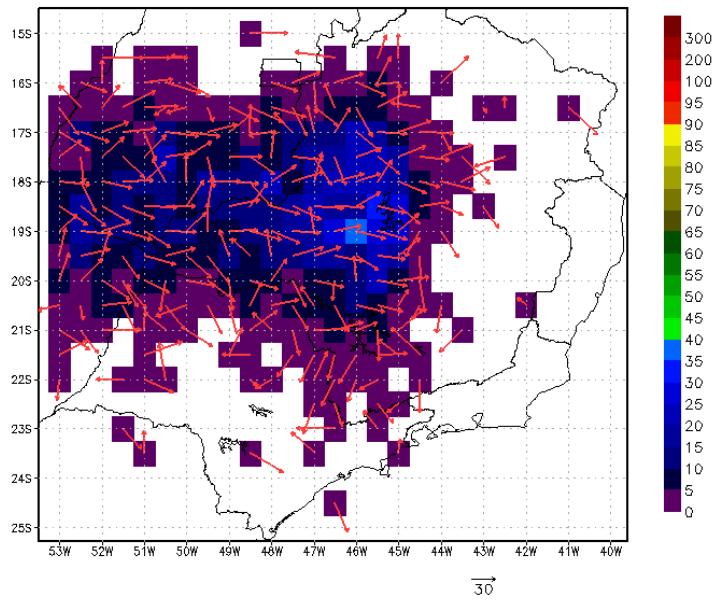
(c)

(Continuação da Figura 27.)

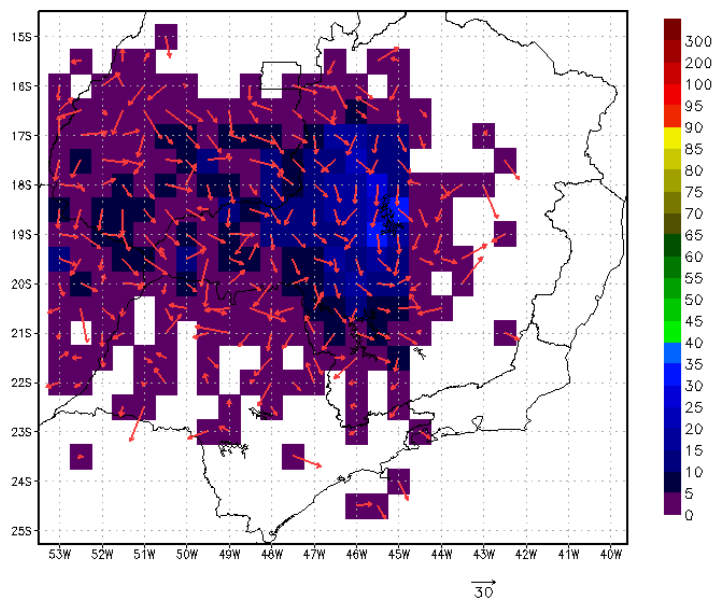


(a)

Figura 28 – Número de sistemas convectivos (áreas coloridas) em uma grade de $0,5 \times 0,5^\circ$ sobre a área de estudo e a direção predominante (vetor vermelho) para os verões de: (a) 2011; (b) 2012; e (c) 2013.



(b)



(c)

(Continuação da Figura 28)

5. CONCLUSÃO:

Com este estudo foi possível realizar uma análise aproximada do comportamento dos sistemas convectivos atuantes sobre o Sudeste do Brasil durante a estação de verão, para os anos de 2011, 2012 e 2013. Com os resultados, conclui-se que os eventos convectivos apresentaram as seguintes características:

Tabela 5 – Características observadas dos SCM atuantes no Sudeste do Brasil, durante os verões de 2011, 2012 e 2013.

Novembro- Menores Tb mínimas;
- Maior número de CCs.

Dezembro- Maiores tamanhos médios;
- Maior atividade convectiva.

Janeiro- Percorrem maiores distâncias.

Também foi observado que o número de eventos convectivos tem diminuído ao longo dos três verões estudados e que o tempo de duração para cada estágio do ciclo de vida tem aumentado. Consequentemente o total de precipitação observado sobre as regiões atingidas por esses eventos também tem diminuído, como foi possível notar nos últimos meses pelo déficit de água armazenada nas principais bacias hidrográficas do Sudeste do Brasil. Fica evidente, para os verões estudados, que as características observadas mostram uma dependência das condições de grande escala, como o posicionamento das zonas de convergências e o número de sistemas frontais. Maiores estudos sobre as características dinâmicas e termodinâmicas do ambiente e, sua influência no deslocamento e crescimento dos sistemas convectivos precisam ser realizados, de modo a melhorar os modelos de previsão e o próprio conhecimento sobre esses sistemas, tanto pelo fato que esses eventos proporcionam grandes danos sociedade (enchentes, deslizamentos, descargas elétricas, granizo, etc), mas também porque eles são essenciais a vida humana, devido a quantidade de precipitação associada.

REFERÊNCIAS:

BYERS, H. R. e BRAHAM, R. R.; **The Thunderstorm**. U.S. Weather Bur. Washington D.C. , 1949;

CARVALHO, L., e JONES, C., 2001: **A satellite method to identify structural properties of mesoscale convective systems based on the maximum spatial correlation tracking technique (MASCOTTE)**.*J. Appl. Meteor.*, 40,1683–1701.

CARVALHO, L., JONES, C. e LIEBMANN, B., **The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall**. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88-108, 2004;

CALHEIROS, A. J. P.: **Sistema de previsão imediata da precipitação: o Hydrotrack**. *Dissertação de Mestrado, INPE*. Cachoeira Paulista, 2008;

CLIMA, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/>>. Acessado em: 08 de julho de 2014;

CLIMANÁLISE, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>>. Acessado em: 08 de julho de 2014;

COTTON, W. R. e ANTHES, R. A. Storm and Cloud Dynamics. *Academic Press*. 1 ed. 883 p. 1989;

COTTON, W. R., BRYAN, G. H. e HEEVER, S. C.; **Storm and Cloud Dynamics**. *International Geophysics Series*. Vol. 99; 2 ed. 826 p., 2011;

GUEDES, R. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; **The observed synoptic scale structure in the presence of mesoscale convective complexes over South America**.*2nd Meeting of the Brazil-USA Cooperative Program on the Role of Convection in the Amazon Region*; p. 5-7, 1985;

HOUZE Jr, R. A., **Structure and Dynamic of a Tropical Squall-Line System.** *Monthly Weather Review*, Vol. 105, 1540-1567 p., 1977;

HOUZE, R. A., Jr. **Clouds Dynamics.** *International Geophysics Series.* Vol. 53. 606 p. 1993;

HOUZE Jr, R. A., **Mesoscale Convective Systems.** *Reviews of Geophysics*, Vol. 42, 43 pp, 2004;

JIRAK, I. L.; COTTON, W. R. e McANELLY, R. L.; **Satellite and Radar Survey of Mesoscale Convective System Development.** *Monthly Weather Review.* Vol 131; 2428-2449, 2003;

LAURENT, H., MACHADO, L. A. T., MORALES, C., e DURIEUX, L.: **Characteristics of Amazonian mesoscale convective systems observed from satellite and radar during the WETAMC/LBA experiment.** *J. Geophys. Res.*, 107,8054, 2002;

MADDOX, R. A. **Mesoscale Convective Complexes.** *Bulletin American Meteorological Society.* Vol. 61; 1374-1387, 1980;

MACHADO, L. A. T., and LAURENT, H.: **The convective system area expansion over Amazonia and its relationships with convective system life duration and high-level wind divergence.** *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 714–725, 2004;

MAPES, B. E., e R. A. HOUZE Jr., 1992: **An integrated view of 1987 Australian monsoon and its mesoscale convective systems. Part I: Horizontal structure.** *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118,927–963.

MACHADO, L. A. T e W. B. ROSSOW. **Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters.** *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3234-3260, 1993;

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

MARENGO, J.A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O.; RENOM, M.; **An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends.** *Climatic Change*, v. 98, n. 3-4, p. 509-529, Oct. 2010.

QUADRO, M.F.L; SILVA DIAS, M.A.F; HERDIES, D.L. and GONCALVES, L.G.G.**Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises.** *Rev. bras. meteorol.* [online]. 2012, vol.27, n.2, pp. 152-162. ISSN 0102-7786.

ROMATSCHKE, ULRIKE,, HOUZE, R. A. Jr.: **Extreme Summer Convection in South America.***J. Climate*, 23, 3761-3791, 2010;

SALIO, P., NICOLINI, M., and ZIPSER, E.J.**Mesoscale Convective Systems over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet.** *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1290–1309, 2007.

SILLMANN, J.; KHARIN, V.V.; ZWIERS, F.W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. **Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections.***J. Geophys. Res. Atmos.*, v. 118, p. 2473–2493, Mar. 2013.

SILVA DIAS, M.A.F.; DIAS, J.; CARVALHO, L.M.V.; FREITAS, E.D.; SILVA DIAS, P.L. **Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil.***Climatic Change*, v. 116, n. 3-4, p. 705 – 722, feb. 2013.

SILVA DIAS, M. F.; **Sistemas de Mesoescala e Previsão do Tempo à Curto Prazo.** *Revista Brasileira de Meteorologia*. Vol. 2. 133-150. 1987;

VELASCO, I. e FRITSCH, J. M., **Mesoscale convective complexes in the Americas.***J. Geophys. Res.* 92, 9591–9613, 1987;

VICENTE, G. A.; SCOFIELD, R. A.; MENZEL, W. P. **The operational GOES infrared rainfall estimation technique.***Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 9, pp. 1883-1898, 1998;

VILA, D. A.: **Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre Sudamerica: Ciclos de vida y circulación en gran escala asociada (Rainy mesoscale convective systems over South America: Life cycle and the associated large scale environment).**Ph.D. thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 132 pp, 2005;

VILA, D. A., and L. A. T. MACHADO: **Shape and radiative properties of convective systems observed from infrared satellite images.***Int. J. Remote Sens.*, 25, 4441–4456, 2004;

VILA, D., L. A. T. MACHADO, H. LAURENT e I. VELASCO: **Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation.** *Weather and Forecasting*, v. 23, n. 2, PP. 233-245, 2008;

WALLACE, J. e HOBBS, P.; **Atmospheric Science - An Introduction Survey.***International Geophysics Series*. Vol. 92. 505 p. 2006;