

## **ESTUDO SOBRE A PROPAGAÇÃO DOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE O SUDESTE DO BRASIL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Rebeca Fonseca de Oliveira Pereira (Universidade Federal de Itajubá,  
Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: rebfonpereira@gmail.com

Daniel Alejandro Vila (DSA/INPE, Orientador)

E-mail: daniel.vila@cptec.inpe.br

### **COLABORADORES**

Dr. Alan James Peixoto Calheiros (DSA/INPE)

14 de Julho de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Dr. Daniel Alejandro Vila pela orientação e pela grande oportunidade de realizar um estudo de Iniciação Científica vinculado com o INPE;

Agradeço também ao Dr. Alan James Peixoto Calheiros pelo auxílio, incentivo e extrema dedicação para a conclusão deste projeto.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo 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 foi relacionado aos verões de 2011 a 2013. Observou-se que os sistemas que apresentaram um maior tempo de duração, também apresentaram maior tamanho, sendo que os maiores valores se deram durante os meses de dezembro. Para a variável de temperatura de brilho 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 was to understand the propagation of the Mesoscale Convective Systems (MCS) over the southeastern region of Brazil, describing the prevailing directions and regions of occurrence of these systems over the analyzed area, this analysis were based on the characterization of the cloudiness satellite temporal and spatial variation. In addition, we studied the characteristics of the observed radiative systems and finally held descriptive systems with severe rainfall events. The characterization and monitoring of systems were performed with the aid of 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. In addition, the minimum values of the brightness temperature was related to systems with longer life cycle. Also, the minimum values were more frequent 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 duration showed the highest number. Moreover, we also analyzed the SCMs growth trend and development, adjustment on the ForTraCC algorithm is probably necessary to improve the forecasting between seasons. The number of SCM tend to decrease over the analyzed area. The most of the system happed 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 Cumulus .....	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 .....	14
7 – Representação esquemática das situações de rastreamento .....	20
8 - Representação esquemática do deslocamento previsto para o centro de massa .....	22
9 – Valores médios de expansão .....	24
10 – Representação climatológica da precipitação durante o verão .....	26
11 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de novembro .....	27
12 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de dezembro .....	29
13 - Representação do comportamento da precipitação durante o mês de janeiro .....	31
14 - Relação entre a duração e o tamanho médio dos sistemas convectivos (para todos os verões) .....	33
15 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos (mensal) .....	35
16 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos (anual).....	36
17 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos (para todos os verões) .....	38
18 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos (mensal) .....	39

19 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos (anual) .....	41
20 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos (para todos os verões) .....	42
21 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos (mensal) .....	44
22 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos (anual) .....	45
23 - Relação entre a duração e número total de CCs dos sistemas convectivos .....	46
24 - Relação entre os meses e o número total de eventos convectivos .....	48
25 - Relação entre duração e expansão máxima para os três estágios do ciclo de vida dos eventos convectivos .....	49
26 - 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.....	51
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 verões de: (a) 2011; (b) 2012; e (c) 2013 .....	52

## SUMÁRIO

	<b><u>Página</u></b>
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	03
2.1. Sistemas Convectivos .....	03
2.2. Ciclo de Vida .....	04
2.2.1. Fase Cumulus (Iniciação) .....	04
2.2.2. Fase de Maturação .....	05
2.2.3. Fase de Dissipação .....	06
2.3. Tipos de Sistemas Convectivos de Mesoescala .....	08
2.3.1. Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) .....	08
2.3.2. Linhas de Instabilidade .....	10
2.3.3. Outros Sistemas Convectivos de Mesoescala ( <i>Nonsquall</i> ) .....	12
2.4. Propagação dos SCM .....	12
2.5. Identificação dos SCM .....	14
3. METODOLOGIA .....	17
3.1. Satélite GOES .....	17
3.2. O algoritmo ForTraCC .....	17
3.2.1. Identificação dos SCM .....	18
3.2.2. Técnica de Rastreamento .....	18
3.2.3. Técnica de Previsão .....	20

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	25
4.1. Análise de Precipitação .....	25
4.1.1. Climatologia .....	25
4.1.2. Precipitação Acumulada Mensal .....	26
4.2. Tamanho Médio .....	32
4.2.1. Análise dos Verões .....	32
4.1.2. Análise Mensal .....	34
4.1.3. Análise Anual .....	35
4.3. Temperatura Mínima Média .....	36
4.3.1. Análise dos Verões .....	36
4.3.2. Análise Mensal .....	39
4.3.3. Análise Anual .....	40
4.4. Distância Média Percorrida .....	41
4.4.1. Análise dos Verões .....	41
4.4.2. Análise Mensal .....	43
4.4.3. Análise Anual .....	44
4.5. Número Total de Células Convectivas .....	45
4.5.1. Análise dos Verões .....	45
4.6. Número Total de Eventos Convectivos .....	47
4.7. Expansão Média .....	48
4.8. Áreas de Atuação e Deslocamento dos SC.....	50
5. CONCLUSÃO .....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54



## 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 (Defesa Civil), 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. 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 utilizada na determinação da severidade dos eventos precipitantes. Contudo, o acompanhamento dos SCM, devido a sua grande extensão espacial, só pode ser realizada por imagens de satélite geostacionário, ou

a integração de vários radares, atualmente este último não é possível de ser aplicado devido a 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 geostacionários (GOES). Atualmente, no Brasil, a Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) utiliza as imagens geradas pelo satélite GOES com um intervalo de 15/30 minutos e em cinco canais (1 visível e 4 no infravermelho) sobre a América do Sul, os quais permitem quantificar e observar características da nebulosidade. As principais características dos Sistemas Convectivos (SC) identificadas pelo ForTraCC são: os parâmetros morfológicos e radiativos de cada SC detectado pelas Temperaturas de Brilho (Tb) do topo das nuvens no infravermelho termal; e o ciclo de vida de cada SC. O processo de rastreamento é aplicado para dois limiares de Tb: a partir de 235K o algoritmo identifica a presença de SC e, a partir de 210K, são identificadas as células convectivas (CC).

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;
- Realizar análises descritivas de sistemas que proporcionaram eventos de chuva extrema;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:**

### **2.1. Sistema Convectivo:**

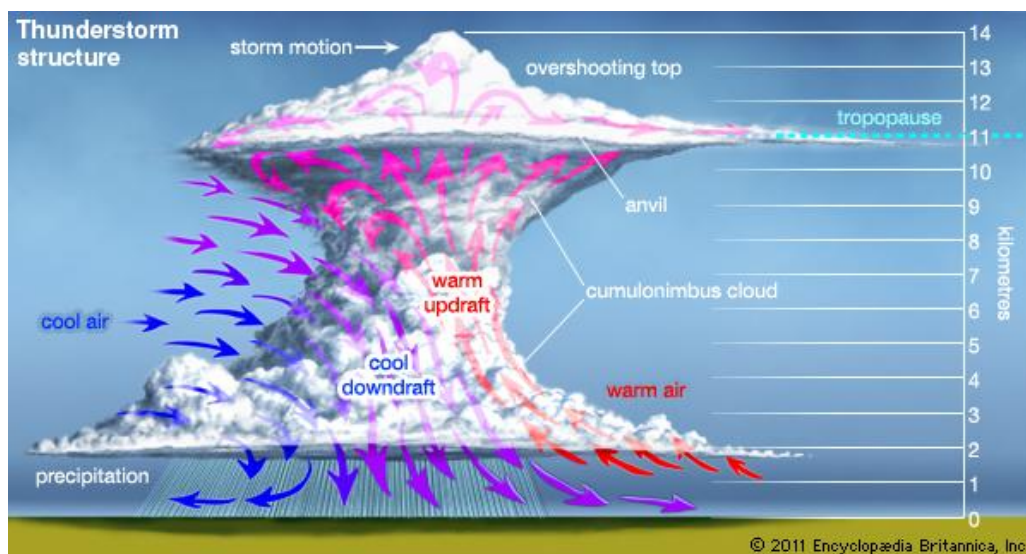
Segundo Wallace e Hobbs (2006) e Cotton et al. (2011), o termo Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) descreve um sistema de convecção profunda, que se faz maior que células de tempestades individuais, e que muitas vezes se desenvolve horizontalmente na alta troposfera apresentando nuvens estratiformes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

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 ocorre todo verão, podendo variar sua intensidade e direção de deslocamento, como ocorreu durante o verão de 2013.

Um SCM 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: Encyclopedia Britannica, (2011).

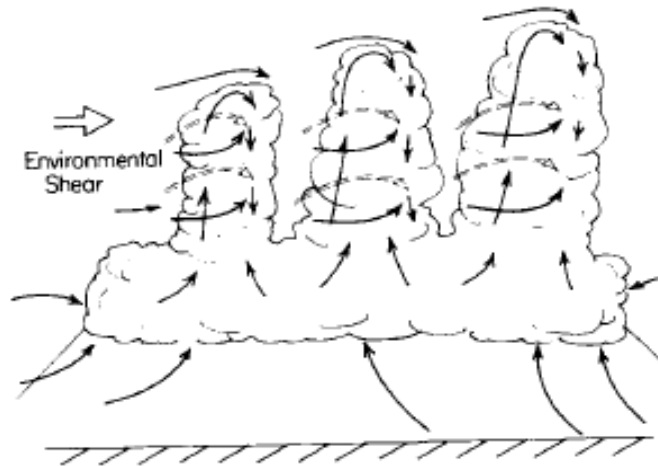
## 2.2. Ciclo de Vida:

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

### 2.2.1. Fase Cumulus (Iniciação):

Esta fase é caracterizada pela formação de nuvens cumulus (Figura 2), que são alimentadas pela advecção de umidade em baixos níveis para a região de formação. As correntes que se destacam nessa fase são as ascendentes, que fazem com que a umidade se eleve e a nuvem cresça verticalmente. Há também as correntes descendentes, porém estas se localizam apenas no topo da nuvem. Na lateral da nuvem ocorre o entranhamento, isto é, o influxo de ar seco e úmido para o interior da nuvem. Nesta fase pode haver precipitação localizada na parte superior da nuvem, porém chuvas localizadas na camada atmosférica abaixo do nível de condensação por levantamento se torna improvável.

Figura 2 - Representação da Fase Cumulus, esquematizando as correntes ascendentes na base até o topo, as correntes descendentes localizadas apenas no topo e o entranhamento lateral.



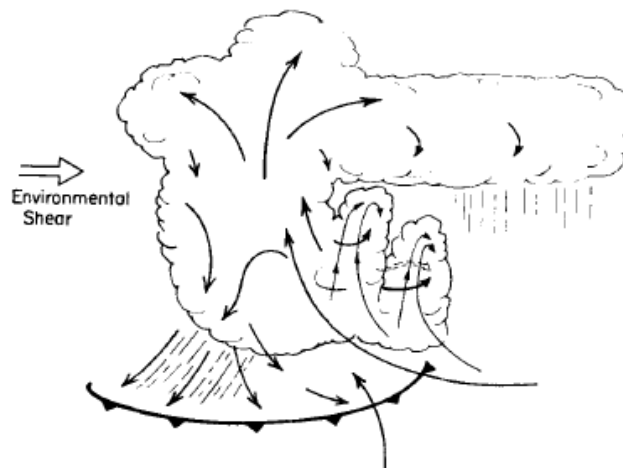
Fonte: Cotton e Anthes, (1989).

### 2.2.2. Fase Madura:

A característica desta fase é a junção de nuvens cumulus dentro de um mesmo sistema (Figura 3). Essa junção ocorre com a colisão de correntes descendentes induzidas por rajadas de nuvens cumulus adjacentes. Também tem como característica o início da precipitação na parte inferior da nuvem. Há a ocorrência de correntes descendentes e ascendentes com praticamente a mesma proporção. É nesta fase que a nuvem consegue atingir altas altitudes, chegando a medir 10-12 km e em alguns casos, conseguem ultrapassar a troposfera causando o *overshooting*. Com a existência das correntes descendentes próximas à tropopausa, ocorre uma extensão horizontal nesta região formando a bigorna, que é composta em parte por nuvens estratiformes. As correntes descendentes que divergem próximo à superfície formam uma rajada de ar frio, causado pela evaporação de gotas de chuva e gotículas de nuvens, assim como o derretimento de

gelo presente na nuvem. Essa frente faz com que o ar quente e úmido estagnado abaixo do sistema ascenda pela atmosfera e se condense, formando novas nuvens cumulus. As novas nuvens se integram ao sistema já existente e fará com que este se renove. A precipitação convectiva é característica desta fase. Também pode haver precipitação estratiforme que ocorre na região da bigorna, porém, na maioria das vezes, essa precipitação não chega a superfície pois se evapora na própria atmosfera.

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 cumulus, a precipitação intensa na parte inferior da nuvem e a precipitação estratiforme na parte superior da nuvem.



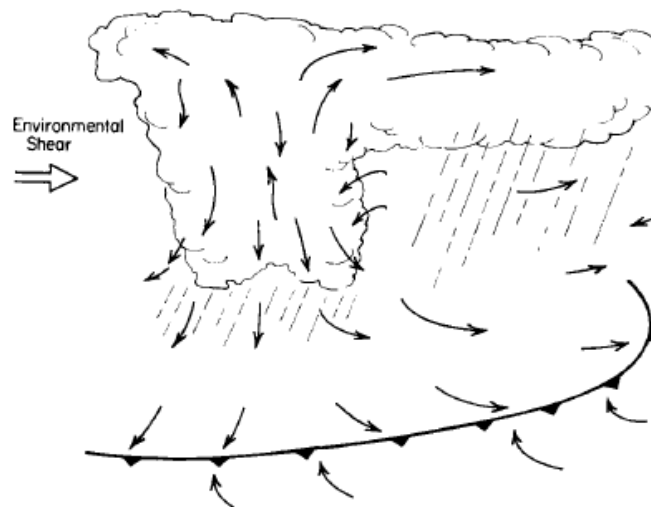
Fonte: Cotton e Anthes, (1989).

### 2.2.3. Fase de Dissipação:

As correntes descendentes caracterizam a fase de dissipação (Figura 4). O sistema começa a perder altitude devido à falta de correntes ascendentes intensas no seu interior, mas na parte superior da nuvem ainda pode haver algumas, definidas como bolsas de correntes ascendentes convectivas. O *overshooting*, que é uma característica da fase madura, dissipa-se. Na parte lateral do sistema ainda ocorre o entranhamento e alguma turbulência. E por

fim, na parte inferior da nuvem, a frente de rajada se torna cada vez mais intensa e mais fria, pois é alimentada pela evaporação e refrigeração da precipitação. Como essa rajada se torna mais intensa, esta irá alcançar uma área maior e isso fará com que o ar quente e úmido, localizado próximo à superfície, se ascenda e forme novas cumulus, porém essas nuvens não irão se integrarão ao sistema, pois estarão distantes do sistema convectivo. As correntes descendentes se tornam dominantes, logo a precipitação que ocorre na base do sistema se enfraquece e passa de convectiva para estratiforme. Com isso, a precipitação característica desta fase é estratiforme.

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 CCM localizados em latitudes médias como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Definições de um CCM a partir de imagens no infravermelho.

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

Fonte: Adaptado de Maddox (1980).

Na Tabela 1 tem-se que o tamanho dos SCM pode ser estimado por duas formas: A) aglomerados de nuvens que apresentam temperatura no IR  $\leq -32^{\circ}\text{C}$  possuem uma área de extensão  $\geq 100.000\text{ km}^2$ ; B) região fria no interior da nuvem com temperatura  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  possui uma área de extensão  $\geq 50.000\text{ km}^2$ . 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), 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 a superfície se apresenta fortemente aquecida e, a atmosfera em seu estado instável.

Durante o estágio de maturação, os CCMs se apresentam com uma longa extensão vertical, pois são sistemas que conseguem atingir níveis médios da atmosfera em pouco tempo, com correntes ascendentes intensas e com a presença de uma grande área de forte precipitação. Já no estágio de dissipação, o CCM perde suas características de mesoescala e, passa a se apresentar de forma não mais organizada. Os CCMs podem entrar em decaimento devido à forte intensidade das correntes descendentes, as quais proporcionam o surgimento de novas nuvens cúmulus em uma distância considerável para que essas não se agreguem ao sistema antigo; enfraquecimento dos jatos de baixos níveis e, a região em que o sistema esteja se propagando seja suficientemente seca e estável, causando o enfraquecimento das correntes ascendentes, conseqüentemente, a dissipação do sistema (MADDOX, 1980).

No Brasil, 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 são sistemas convectivos que são identificados por imagens de satélites como sistemas que possuam de 100 a milhares de quilômetros de extensão. São formados por um conjunto de nuvens cumulonimbus organizados 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 as correntes descendentes de mesoescala (HOUZE, 1993). São sistemas que podem produzir uma precipitação de 30 mm em apenas 30 minutos. Em regiões próximas aos trópicos, a precipitação convectiva pode persistir por várias horas.

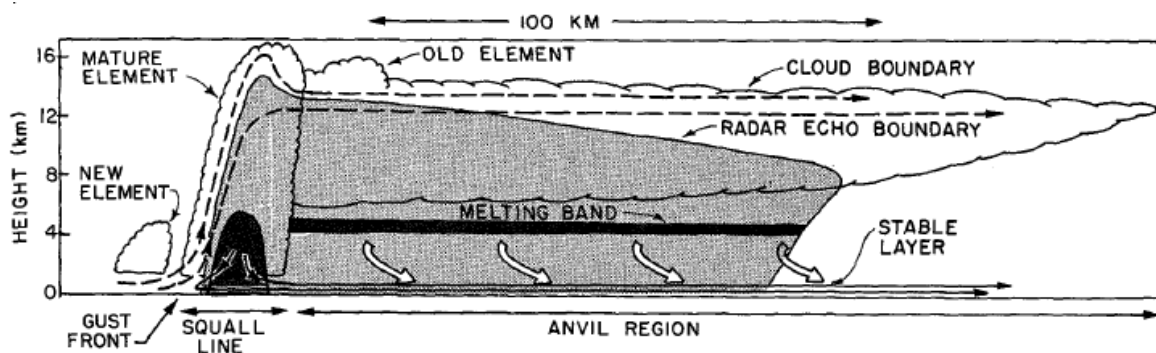
As correntes de escala convectiva se localizam na região frontal do sistema, a qual é formada pelas torres convectivas caracterizadas pelo estágio de maturação, e podem se estender de 10 à 20 km de largura. As correntes ascendentes de escala convectiva exercem a função de ascender a umidade e energia presentes na superfície para os níveis mais altos da troposfera. Já as correntes descendentes exercem a mesma função, porém em direções opostas, isto é, descendendo a umidade presente nos níveis altos da camada limite para a superfície. Essas correntes descendentes exercem um papel importante na propagação das linhas de instabilidade, pois, como são resfriadas pela evaporação das gotas de água e derretimento das partículas de gelo, acabam formando a região denominada de piscina fria, localizada abaixo da região estratiforme (COTTON e ANTHES, 1989).

A região estratiforme das linhas de instabilidade, conhecida como bigorna, é formada por meio das correntes ascendentes de escala convectiva que, dependendo de sua intensidade, não conseguem ultrapassar o limite da troposfera e acabam se movimentando horizontalmente nos altos níveis. Essa região estratiforme pode apresentar de 100 à 500 km de largura, correntes ascendentes e descendentes de mesoescala, e é caracterizada pela

precipitação estratiforme, a qual pode perdurar por vários dias. Quando a linha de instabilidade é identificada por imagens de satélite, geralmente a região estratiforme é a responsável por trilhar a direção de propagação do sistema.

A Figura (5) demonstra a estrutura física de uma linha de instabilidade se deslocando para oeste, em que todos os elementos citados anteriormente podem ser observados. Neste sistema, as correntes ascendentes se localizam na região norte (região de deslocamento), onde novas nuvens cumulus são formadas e agregadas ao sistema antigo. A torre convectiva é caracterizada pelo estágio de maturação e apresenta correntes descendentes em escala convectiva. O rastro do sistema é observado na região sul, representado pela bigorna, acompanhado das correntes descendentes de mesoescala.

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: 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 ANTHES, 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, a qual contém as correntes descendentes de mesoescala. 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.

### **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 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 cumulus. 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.

*b) Camada Overturning:*

O sistema de propagação piscina fria não considera a dinâmica de mesoescala da atmosfera que se localiza acima da camada limite, pois envolve apenas 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*.

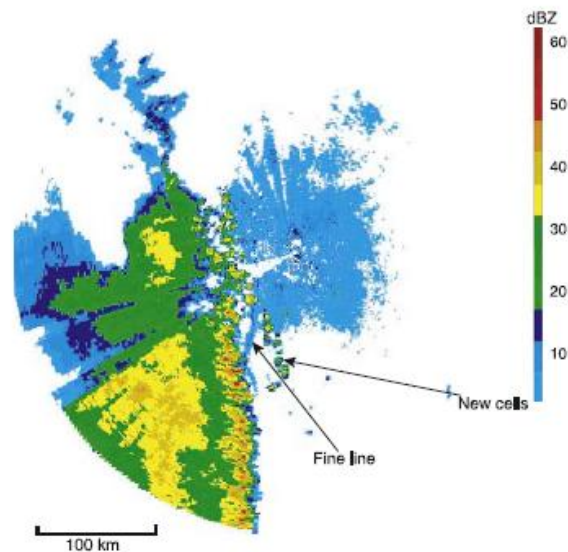
Segundo a teoria de Moncrieff, é necessário que o gradiente de pressão exista em níveis médios e que o SCM esteja estacionário em um ambiente com cisalhamento vertical e potencialmente instável. Essas características do ambiente irão influenciar na velocidade de propagação do sistema. Uma vez que o SCM se organiza e se mantém não estacionário com uma camada *overturning*, deve-se propagar em uma determinada taxa de velocidade para manter sua consistência dinâmica. Essa taxa de velocidade acaba sendo razoável sob condições de cisalhamento e estabilidade da atmosfera.

*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 à regiões com baixa refletividade 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.

Figura 6 - Padrão de refletividade de um 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: Houze (2004).

## 2.5. Identificação dos SCM:

Os satélites são utilizados para o reconhecimento dos SCMs, pois são 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, classificou os SCMs a partir do tempo de duração e de um limiar de  $-52^{\circ}$  C de temperatura de brilho do topo do sistema.

Os SCMs com grande extensão são classificados em dois grupos: os que possuem formato circular são definidos como CCM e os sistemas lineares 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  $-52^{\circ}$  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  $\geq 3$  horas. A extensão dos sistemas menores é um pouco mais difícil de definir, porém alguns estudos como Houze (1993) sugerem que este limiar seja 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  $30.000 \text{ km}^2$  (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.

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 para Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), PECS, MβCCS para Sistemas Convectivos Menores e Circulares e MβECS 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 SCM de acordo com a análise de imagens de satélite no infravermelho.

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 $\geq 6$ horas	Excentricidade $\geq 0.7$ no momento de máxima extensão
PECS			$0.2 \leq$ Excentricidade $< 0.7$ no momento de máxima extensão
MβCCS	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 $\geq 3$ horas	Excentricidade $\geq 0.7$ no momento de máxima extensão
MβECS			$0.2 \leq$ Excentricidade $< 0.7$ no momento de máxima extensão

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



### **3. METODOLOGIA:**

Dadas as características radiativas e morfológicas dos sistemas identificados pelo ForTraCC (MACHADO e ROSSOW, 1993 e MACHADO et al., 1998) foi possível descrever em detalhes o deslocamento e 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 durante nos últimos três verões sobre o sudeste do Brasil.

#### **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  $\mu\text{m}$ .

#### **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 com base na evolução dos SCM observada em passos de tempo anteriores.

### **3.2.1) Identificação dos SCM:**

Machado et al. (1998) propôs um limiar de temperatura de brilho de 245K para identificar os SCM, enquanto, segundo Velasco e Necco (1980), temperaturas entre 238 e 235K representaram bem a atividade convectiva durante o verão no Norte da Argentina. O algoritmo ForTraCC utiliza o valor de 235K como o limiar de temperatura para a detecção de SCM, pois este aparenta ser um limiar adequado à identificação de atividade convectiva na América do Sul, como foi sugerido por Laurent et al. (2002), Machado e Laurent (2004), e Carvalho e Jones (2001). A área de cobertura de um SCM também é um fator importante para sua identificação, pois, de acordo com Machado et al. (1993) e Mapes e Houze (1992), existe uma dependência quase linear entre o tamanho da nuvem e um determinado limiar de temperatura de brilho. A identificação do tamanho é feita a partir do reconhecimento de um mesmo sistema em duas imagens sucessivas, cuja área mínima de sobreposição de 25% do sistema para duas imagens consecutivas de trinta minutos e o tamanho mínimo de 150 pixels.

### **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 par de SCM, representado pela Figura 7(a).

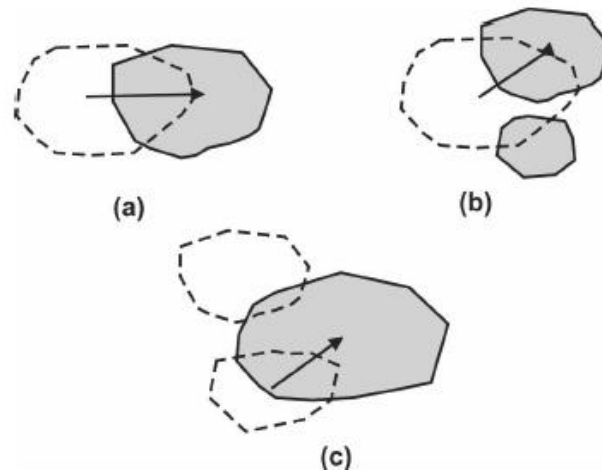
### **4) SEPARAÇÃO (S)**

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 7(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 7(c).

Figura 7 - 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.

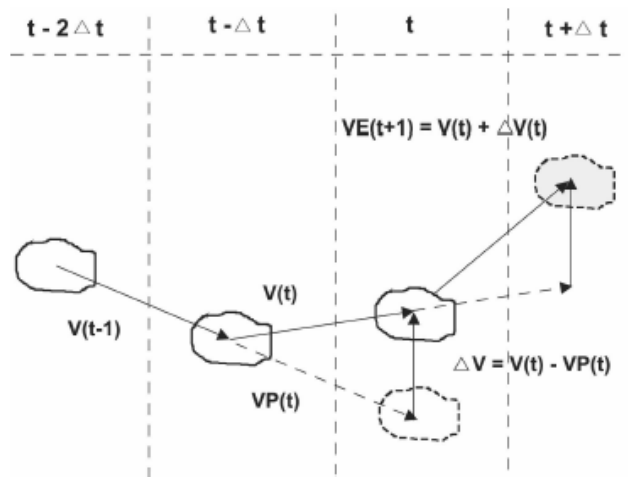
## **1) ESTIMATIVA DE DESLOCAMENTO DO CENTRO DE MASSA DE UM SCM**

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 8). 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  $t-\Delta t$  e  $t$ . 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 8 - 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).

## 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  $\Delta E$ .

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.

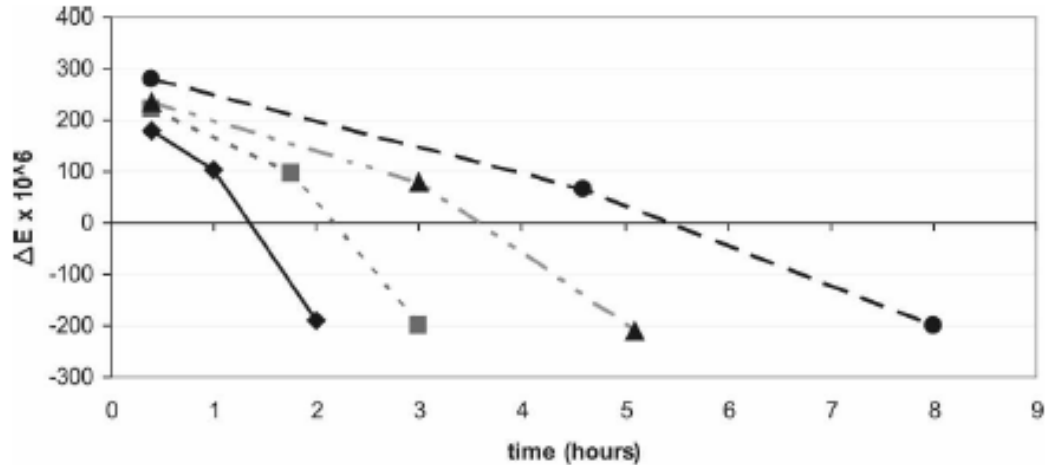
Baseado na equação (2),  $\Delta E$  normalmente são linhas retas representadas por:

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

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  $\Delta E$  foram avaliados: (a) o valor médio de  $\Delta E$  no primeiro instante de vida de cada um dos SCM (iniciação), (b) o valor médio de  $\Delta E$  na maturação do SCM, e (c) o valor médio de  $\Delta E$  no instante do final do SCM (dissipação). A disposição destes pontos está representada pelas diferentes linhas da Figura 9, 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 9 - Valores médios de  $\Delta E$  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 duração média de 2 horas e 39 minutos, sendo 2603 eventos durante o verão de 2011, 1899 durante o verão de 2012 e 1323 durante o verão de 2013. Com esses dados, observa-se que o número de SCMs tem diminuído a cada ano e, em 2013 especificamente, observou-se um índice de precipitação abaixo do esperado na região de estudo (CLIMA/CPTEC), o que pode ter contribuído para o agravamento do período de estiagem observado este ano sobre as bacias hidrográficas no Sudeste do Brasil. A velocidade e direção média dos sistemas foram de  $32,04 \text{ ms}^{-1}$  e  $91^\circ$  (para leste), respectivamente. Tais sistemas percorreram uma distância média de 226,3 km e apresentaram um tamanho médio de 8120,15 km<sup>2</sup>. Alguns sistemas convectivos apresentaram até 31 células convectivas (cumulonimbus) durante o seu ciclo de vida. 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.

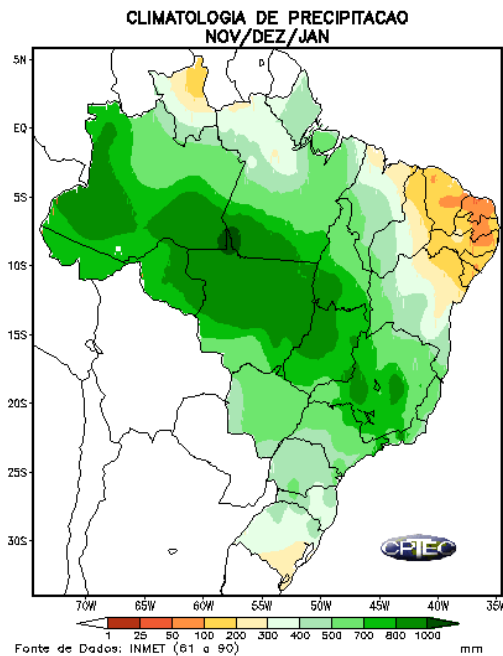
### **4.1. Análise da Precipitação:**

#### **4.1.1. Climatologia:**

Na Figura 10 observa-se o comportamento climatológico da precipitação durante o verão para todo o Brasil. 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 zona de convergência. Normalmente, seus índices de precipitação variam de 500 a 1000 mm durante a estação chuvosa. No entanto, os outros estados como São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo, apresentam valores médios climatológicos de

precipitação menores, que variam entre 400 a 800 mm. O posicionamento dos valores de precipitação pode variar de acordo com o posicionamento da ZCAS em determinados anos.

Figura 10 - Representação da climatologia de precipitação durante o verão.



Fonte: CLIMA/CPTEC, (2014).

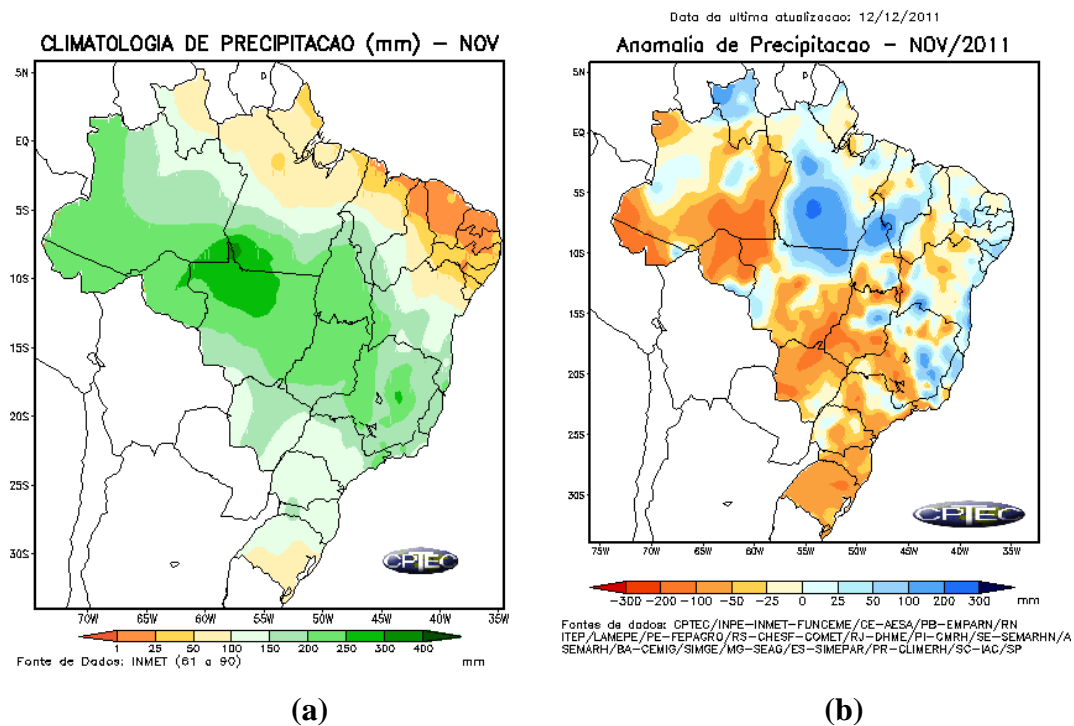
#### 4.1.2. Precipitação Acumulada Mensal:

##### a) Novembro:

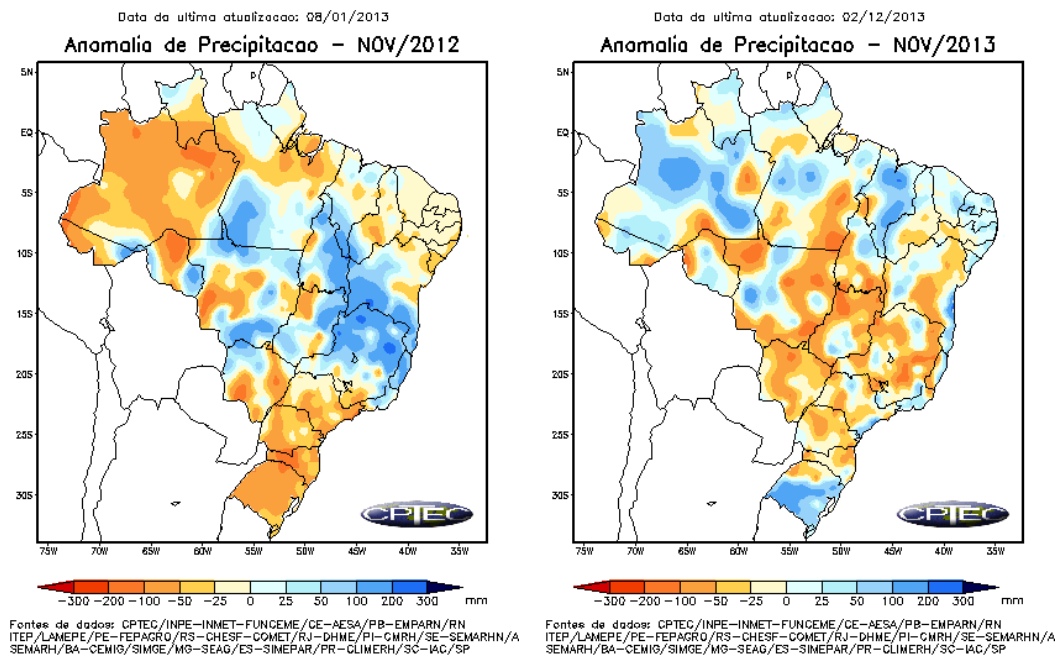
A Figura 11 representa as variações de precipitação de acordo com a climatologia mensal e suas anomalias para o mês de novembro. Pela Figura 11a observa-se o início da formação da ZCAS na região Norte com altos valores de precipitação, porém, durante esse período para a região Sudeste do Brasil, os índices tendem a variar de 100 a 250 mm. A Figura 11b mostra que o ano de 2011 apresentou baixa anomalia de precipitação para a metade da região Sudeste do Brasil. A região centro-sul de Minas Gerais e o estado de São Paulo

apresentaram valores negativos se comparados com a outra parte da região Sudeste, a qual apresentou valores próximos aos esperados pela climatologia. Durante o ano de 2012 (Figura 11c) houve um aumento de precipitação, em que grande parte de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo apresentaram valores de precipitação próximos aos esperados. No entanto, durante o ano de 2013 (Figura 11d), uma maior porção da região sudeste apresentou um comportamento parecido com ano de 2011, com destaque aos valores negativos de precipitação.

Figura 11 - 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).



(c)

(d)

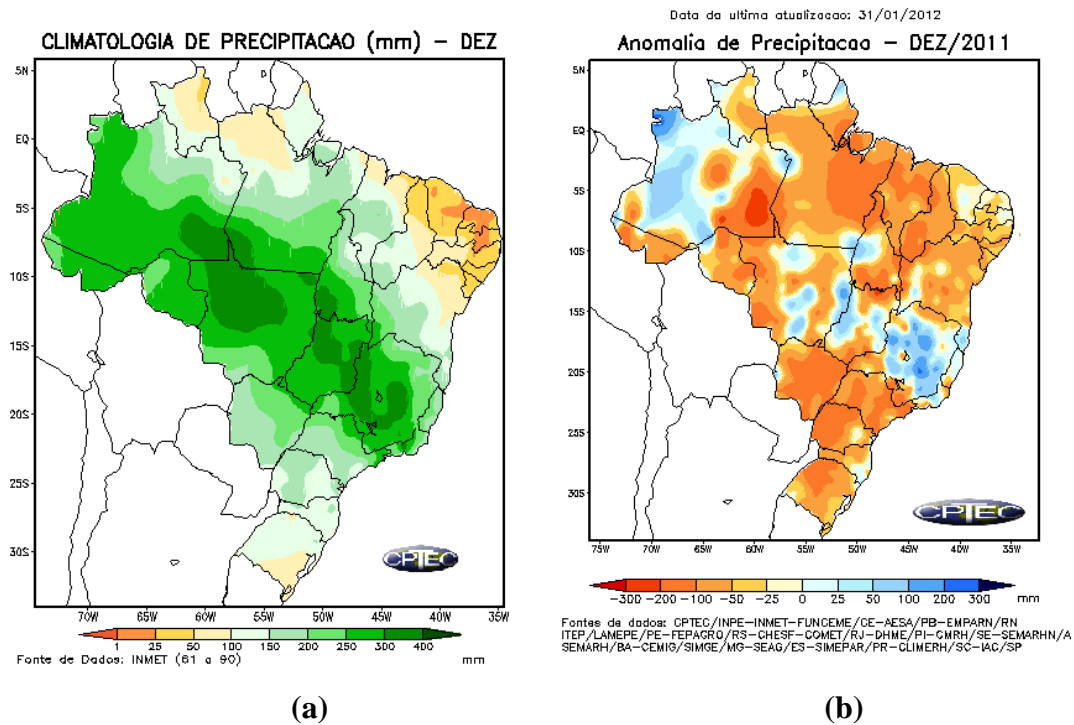
(Continuação Figura 11.)

## b) Dezembro:

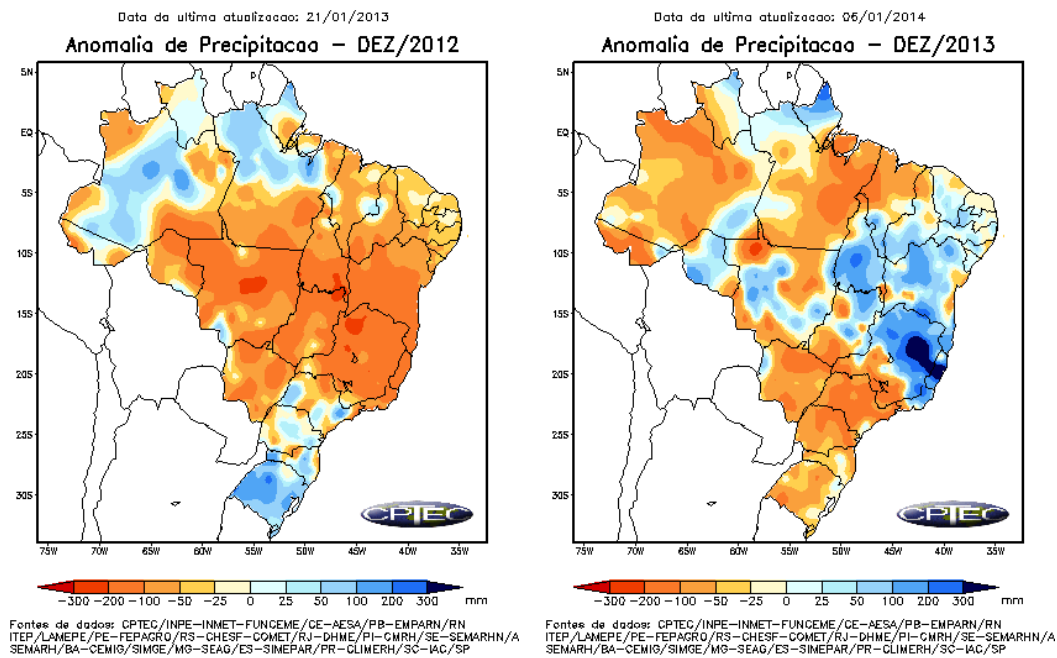
A Figura 12 mostra o comportamento da precipitação de acordo com sua climatologia para o mês de dezembro (Figura 12a), e de acordo com as anomalias apresentadas durante os verões estudados. Analisando os dados de climatologia (Figura 12a), observa-se que a ZCAS se apresenta bem configurada, se estendendo 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 12b, 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 12c), pelos dados de anomalia não é possível perceber a presença da ZCAS, já que grande parte do Brasil apresentou valores negativos de precipitação. Na região Sudeste, durante este período apenas a região sul do estado de São Paulo apresentou anomalias

positivas. Porém, em dezembro de 2013 (Figura 12d), nota-se padrão climatológico não está configurado na região Sudeste do Brasil, isto é, houve um deslocamento para norte, em que grande parte de Minas Gerais registraram altos valores de precipitação. Exatamente nesta região, houve um excesso de precipitação que, conseqüentemente, resultou em casos enchentes e desabamentos de encostas.

Figura 12 - 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.



Fonte: CLIMA/CPTEC, (2014).



(c)

(d)

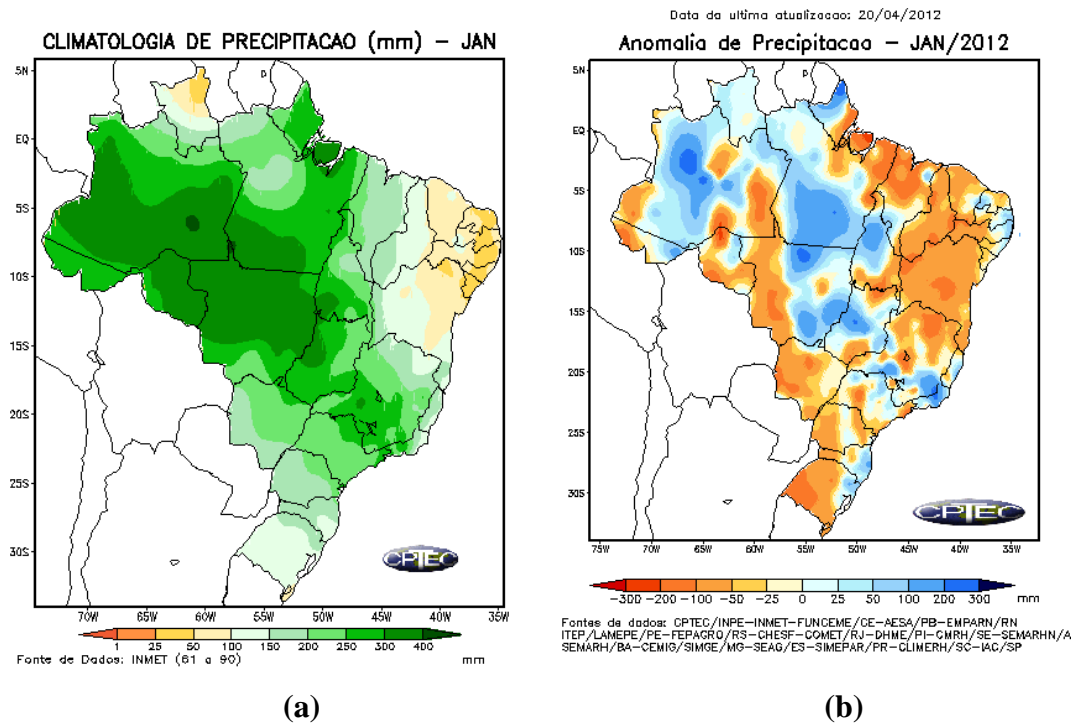
(Continuação Figura 12.)

### c) Janeiro:

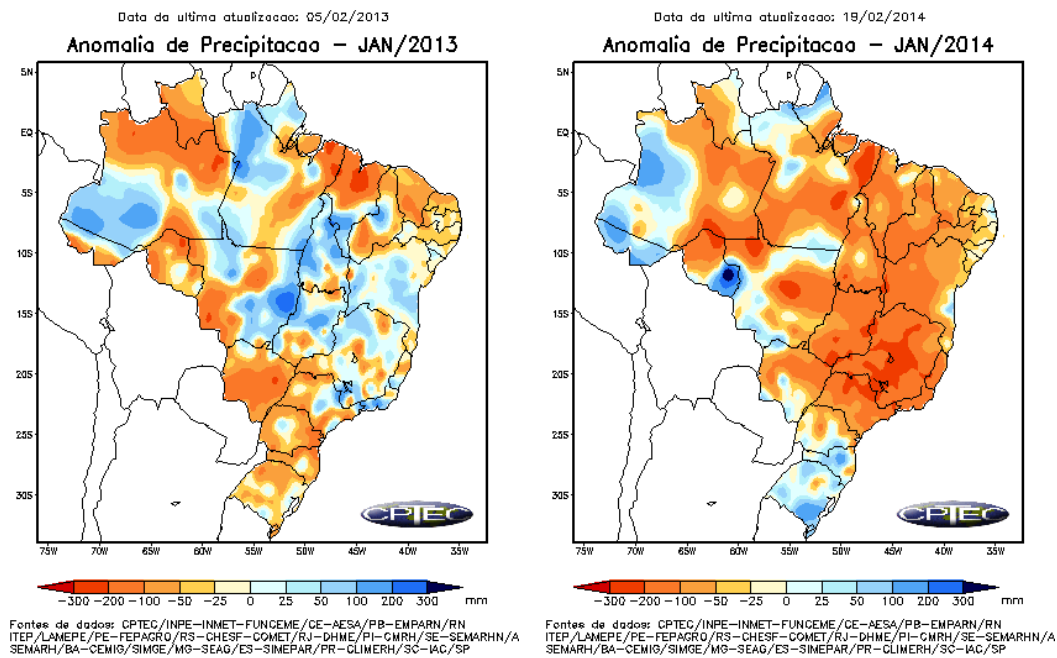
A Figura 13 representa o comportamento da precipitação durante os meses de janeiro. Na Figura 13a observa-se o início da dissipação da ZCAS e a diminuição dos índices de precipitação para a região Sudeste. Os valores climatológicos de precipitação para o mês de janeiro se apresentam menores se comparados com o mês de dezembro. Observa-se na Figura 13b que durante o ano de 2012 as anomalias de precipitação acompanharam o comportamento da ZCAS, porém, durante janeiro de 2013 (Figura 13c), as anomalias se apresentaram mais intensas e com uma maior distribuição espacial na região centro-oeste e nordeste do Brasil. Em comparação, analisando a região Sudeste, observa-se que os índices de precipitação se apresentaram abaixo do esperado climatológico, porém ainda com valores positivos. No entanto, janeiro de 2014 (Figura 13d) apresentou valores negativos de anomalias para a maior parte do Brasil e se comportou como o mês mais seco do período de

estudo. Parte da região sudeste apresentou índices de 300 mm negativos, comprovando a escassez de água nos principais reservatórios hídricos da região.

Figura 13 - 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: CLIMA/CPTEC, (2014).



(c)

(d)

(Continuação Figura 13.)

## 4.2. Tamanho Médio:

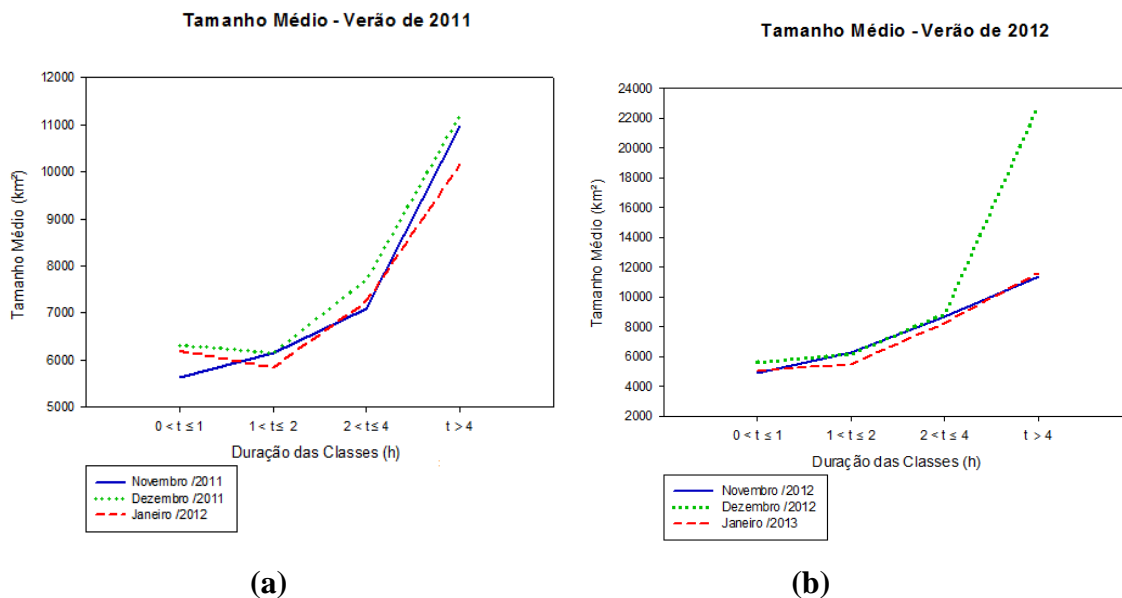
### 4.2.1. Análise dos Verões:

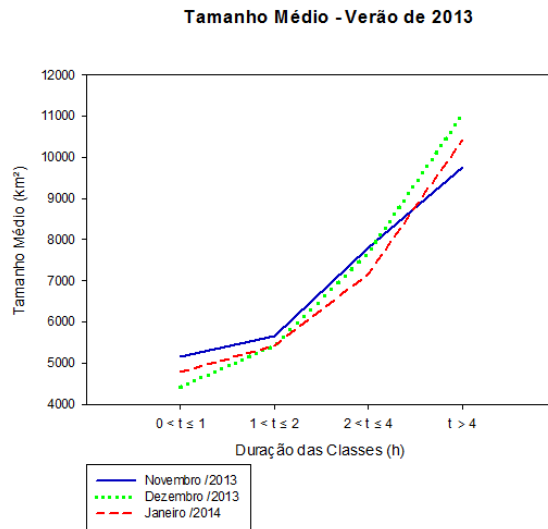
Analisar o tamanho dos sistemas convectivos com o ciclo de vida é fundamental no desenvolvimento de técnicas para a determinação da severidade (enchentes, deslizamentos, tempo para formação de granizo e altos índices pluviométricos) desses sistemas, pois dependendo do tipo de sistema a quantidade de chuva pode ser proporcional ao seu tempo de vida e a sua cobertura. Analisando o comportamento dos eventos convectivos durante o período de estudo sobre a região sudeste do Brasil, observou-se que os sistemas maiores apresentam maior tempo de vida. Na Figura 14 observa-se que os sistemas que ocorreram durante o verão de 2011 apresentaram um comportamento semelhante para os três meses, o que pode estar associado a um padrão atmosférico dominante durante este período. Durante



o verão de 2012, Figura 14b, nota-se que durante o mês de dezembro os maiores sistemas observados, associados aqueles que apresentaram o maior tempo de vida. Contudo, a anomalia de precipitação mensal para dezembro deste ano mostrou um déficit sobre a região de estudo, exceto sobre o Sul de São Paulo, como descrito na seção anterior. Para o verão de 2013 (Figura 14c), assim como em 2011, os sistemas apresentaram um comportamento similar, contudo o mês de novembro apresentou os sistemas maiores para aquelas classes de menor duração. Fica evidente nas figuras que existe um aparente crescimento exponencial em função do ciclo de vida dos sistemas, tal comportamento pode ser facilmente parametrizado de modo a prever com maior precisão a taxa de crescimento desses sistemas, contudo maiores estudos sobre as características termodinâmicas associadas ao crescimento e manutenção desses sistemas convectivos.

Figura 14 - Relação entre a duração e o tamanho médio dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.





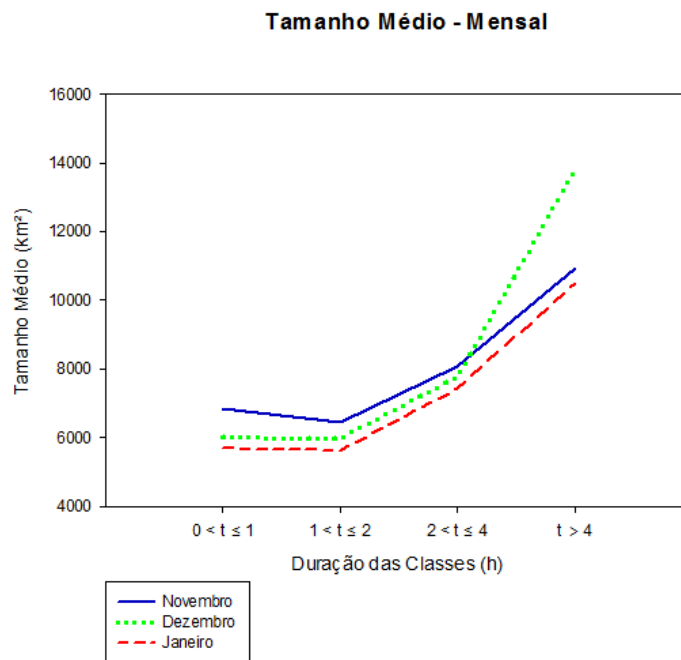
(c)

(Continuação Figura 14.)

#### 4.2.2. Análise Mensal:

A Figura 15 mostra os valores médios de tamanho para cada mês para 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 na Figura 15 que o mês de novembro (linha contínua azul) 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. O mês de janeiro apresentou os menores valores para todas as classes, o que pode estar associado à influência dos pequenos eventos observados em janeiro de 2014 (Figura 15c), que consequentemente proporcionaram uma anomalia negativa de precipitação sobre o Sudeste do Brasil neste mês, como mostrou a Figura 13d.

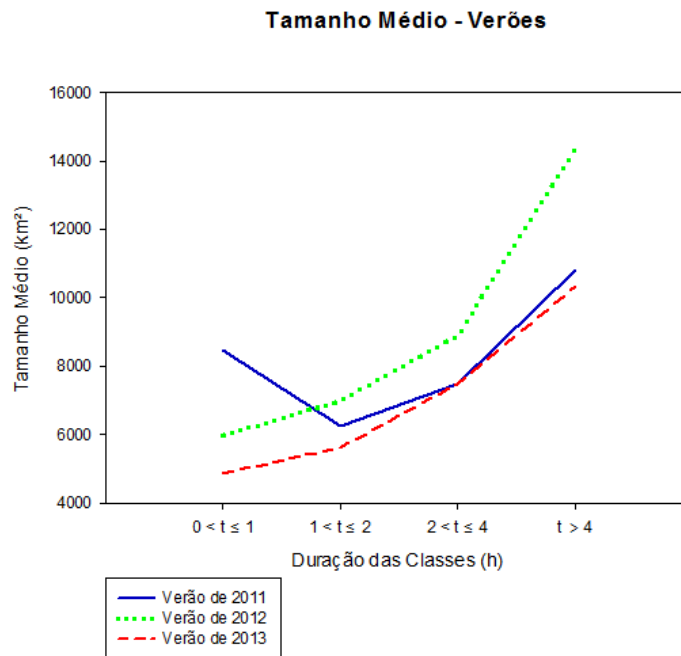
Figura 15 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada mês, para os três verões de estudo.



#### 4.2.3. Análise Anual:

A Figura 16 mostra os valores médios dos tamanhos para cada ano (verão) do período de análise. 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. Neste último, o verão de 2011 registrou 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 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 superior a 300 mm (Figura12d), que acarretaram na ocorrência de enchentes e desabamentos sobre a região.

Figura 16 - Relação entre duração e tamanho médio dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada verão, para os três anos de estudo.



### 4.3. Temperatura Mínima Média:

#### 4.3.1. Análise dos Verões:

Analisar o ciclo de vida dos eventos convectivos com relação à temperatura mínima é de suma importância na previsão a curtíssimo prazo por satélites meteorológicos, uma vez que a temperatura do topo das nuvens pode representar além da camada de nuvens como também a quantidade de chuva, a partir de medidas realizadas no espectro de onda do infravermelho.

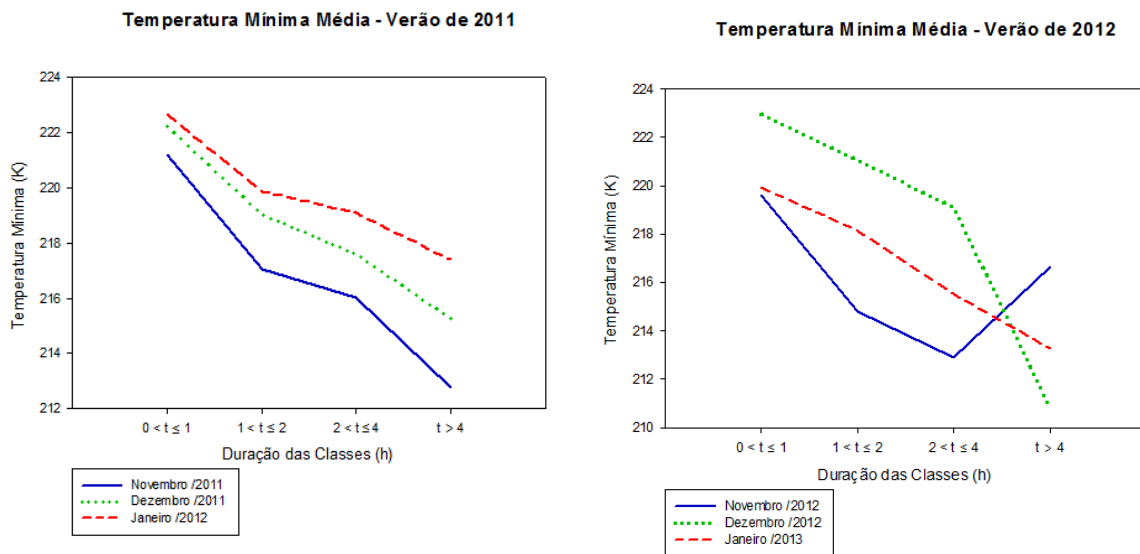
Alguns modelos empíricos de estimativa de precipitação a partir de imagens de satélites utilizam a relação entre a  $T_b$  e a taxa de chuva (HIDROESTIMADOR, VICENTE et al.,

1998). A Figura 17 apresenta os valores médios de temperatura de brilho mínima em função do ciclo de vida dos sistemas convectivos observados durante o período de análise. Observa-se na Figura 17 que 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 17a que durante o mês de novembro os sistemas com os menores valores de temperatura mínima foram observados e, conseqüentemente, os sistemas mais intensos durante verão de 2011. Para o verão de 2012, Figura 17b, novembro também apresentou os menores valores, com exceção da classe IV, em que dezembro registrou os sistemas com topos mais frios. O verão de 2013, Figura 17c, também apresentou os menores valores durante o mês de novembro, seguido de dezembro e janeiro. Contudo, segundo as análises das anomalias de precipitação, 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 subestimados 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 topos 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, 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 uma diminuição do índice de precipitação, exceto em dezembro, o que poder estar associado a

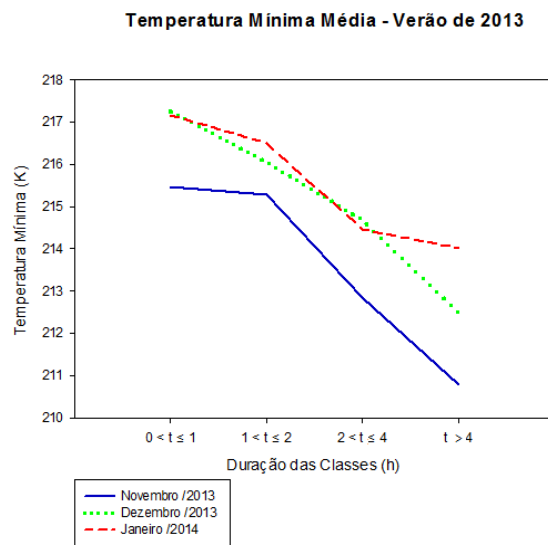
um menor número de eventos convectivos em 2013, como analisaremos posteriormente, assim, refletindo diretamente no total de precipitação.

Figura 17 - Relação entre a duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.



(a)

(b)

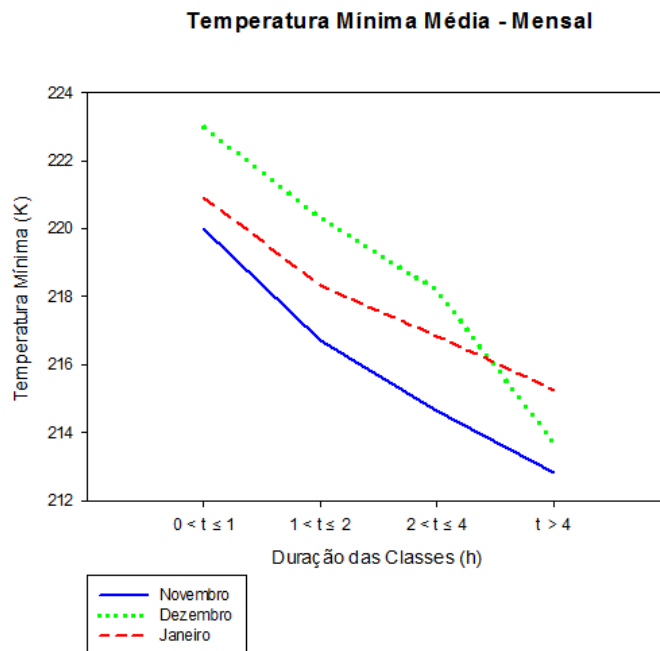


(c)

### 4.3.2. Análise Mensal:

A Figura 18 apresenta os valores de  $T_b$  mínima para cada mês. Nota-se que o mês de novembro apresentou os sistemas com os menores valores, apesar da menor atividade convectiva sobre este mês, os valores de  $T_b$  mínimo 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. 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 18 - Relação entre duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada mês, para os três verões de estudo.

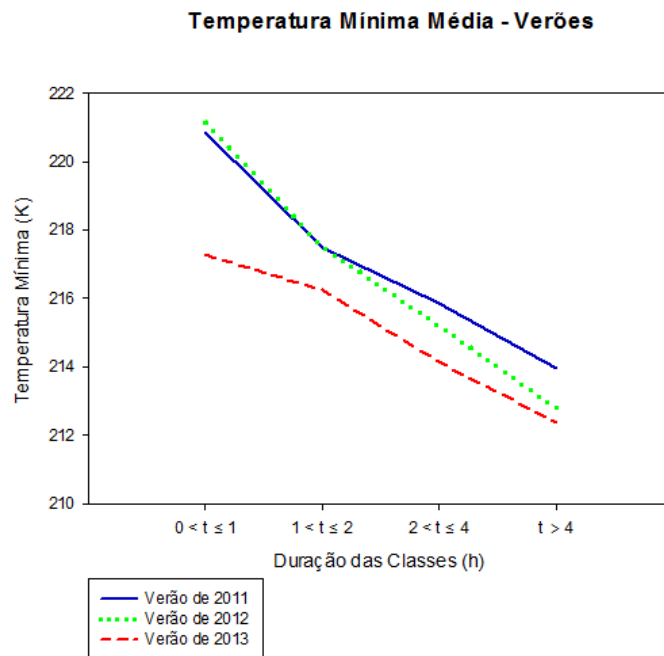


### **4.3.3. Análise Anual:**

A Figura 19 apresenta os valores médios de  $T_b$  mínima para todo o verão. 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, mostrou os menores valores de temperatura mínima que estão associados a eventos de precipitação intensa observados na ZCAS. Os verões de 2011 e 2012 apresentaram valores semelhantes para as duas primeiras classes, porém, para os sistemas com maior tempo de duração, o verão de 2011 apresentou a maior média. Nota-se ainda que existem similaridades para os eventos com maior duração, o que mostra que eventos com ciclos de vida mais longo e conseqüentemente maiores, como foi avaliado nas seções anteriores, são mais dependentes de uma condição de maior escala, do que aquela intranuvem, se comparados com eventos de menor duração, onde o ciclo diurno pode ser o fator dominante para a organização da convecção.



Figura 19 - Relação entre duração e temperatura mínima média dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada verão, para os três anos de estudo.



#### 4.4. Distância Média Percorrida:

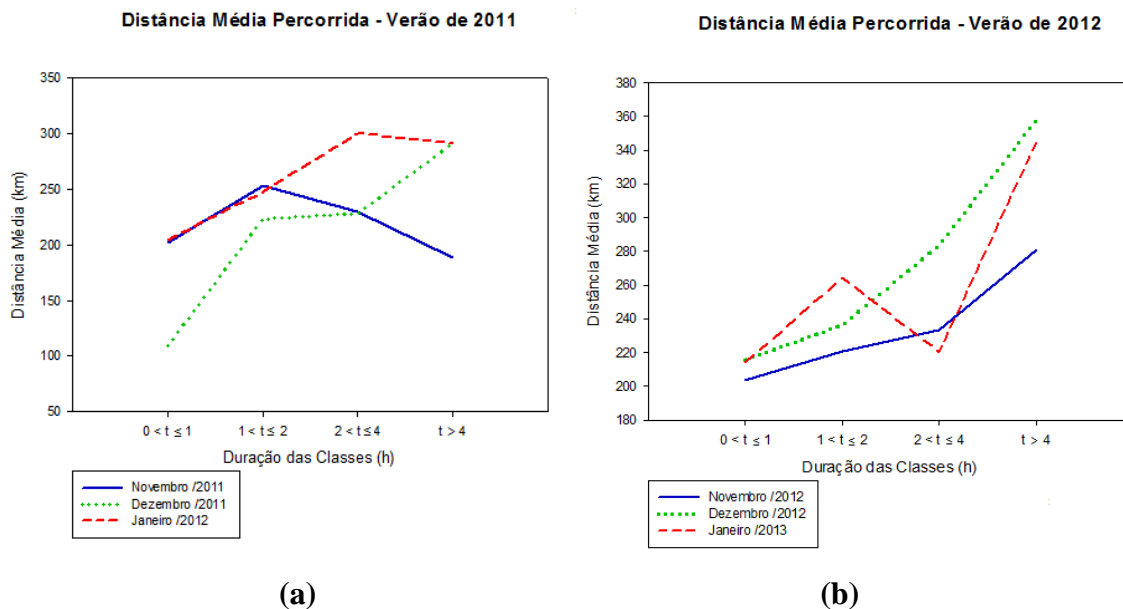
##### 4.4.1. Análise dos Verões:

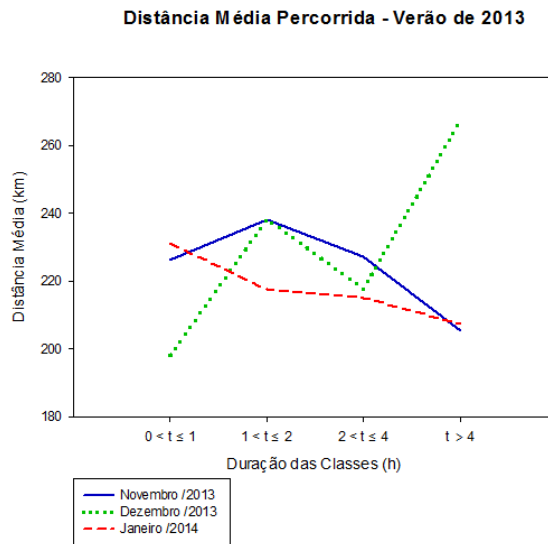
Com relação à propagação dos eventos convectivos, determinar a distância percorrida por esses sistemas em função de sua duração é importante para entender os processos de manutenção e geração de novas células ao longo do ciclo de vida. Tais informações podem ser utilizadas em previsões de tempo em curto 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 20 mostra os valores médios das distâncias percorridas (km)

associada ao centro de massa dos sistemas convectivos sobre a área de estudo. Nota-se na Figura 20a que, durante o verão de 2011, os sistemas atuantes durante o mês de janeiro percorreram as maiores distâncias médias. No entanto, o mês de dezembro apresentou os menores valores para as três primeiras classes, porém, para a classe IV, sua média se aproximou da registrada em janeiro, o que mostra que os sistemas de maior ciclo de vida conseguem percorrer maiores distâncias. Esta última característica é compartilhada para todos os outros verões, como pode ser notado nas Figuras 20b e 20c.

Contudo, os meses de novembro e janeiro apresentam grande variabilidade, que podem estar associados a uma característica termodinâmica dominante de maior escala, como o posicionamento preferencial em um determinado verão da ZCAS.

Figura 20 - Relação entre a duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, para o verão de 2011 (a), verão de 2012 (b) e verão de 2013 (c), respectivamente.





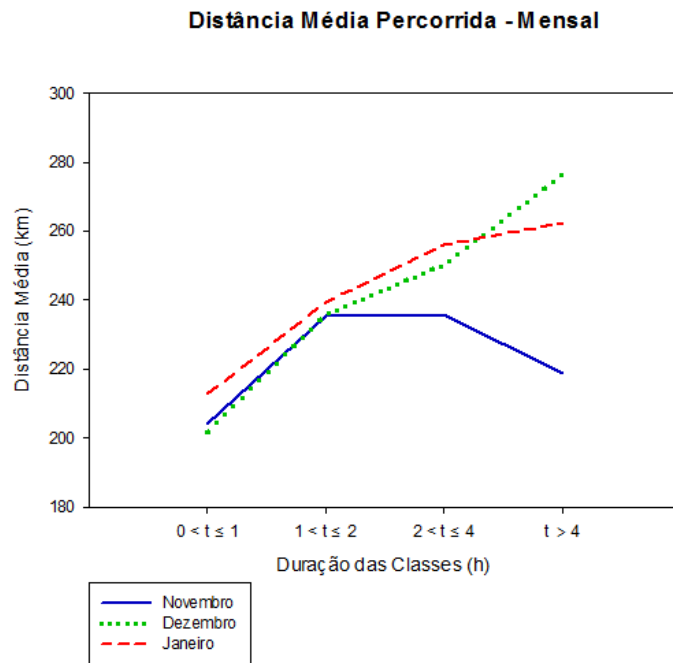
(c)

(Continuação Figura 20.)

#### 4.4.2. Análise Mensal:

Pela Figura 21, observa-se que o mês de novembro registrou os menores valores de distância média percorrida para todas as quatro classes. Janeiro apresentou as maiores médias 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. A partir desses resultados pode-se afirmar que os eventos em novembro e dezembro tendem a percorrer maiores distâncias, enquanto os sistemas com maior duração são mais lentos em janeiro. 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.

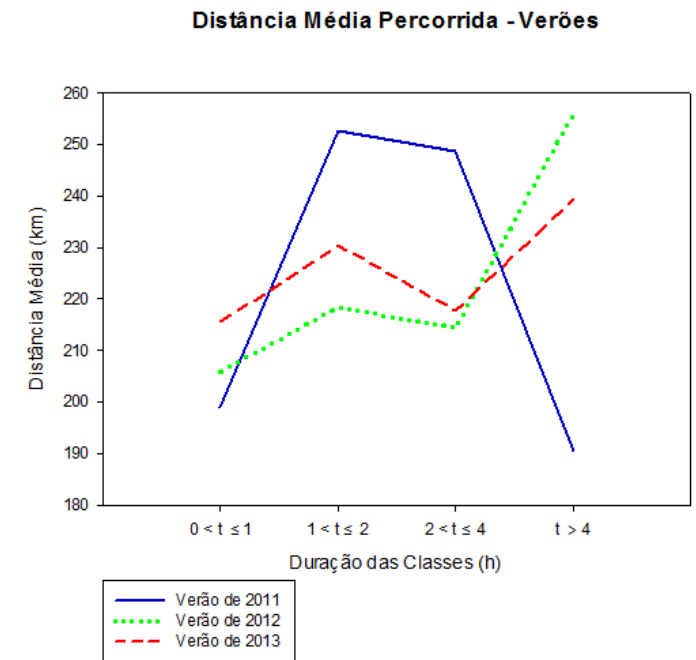
Figura 21 - Relação entre duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada mês, para os três verões de estudo.



#### 4.4.3. Análise Anual:

Pela Figura 22, nota-se que para a classe I, o verão de 2013 apresentou os maiores valores médios. Porém, para as classes II e III, as maiores médias foram registradas durante o verão de 2011, com grande diferença se comparado aos outros verões. Já para a classe IV, o verão de 2012 apresentou a maior distância média percorrida. Essa situação de convecção e menor distância média percorrida pelos sistemas podem estar relacionadas a um processo de alimentação dos eventos mais localizados, além de suas características termodinâmica e dinâmica. 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 22 - Relação entre duração e distância média percorrida dos sistemas convectivos, divididos em quatro classes, observados durante cada verão, para os três anos de estudo.



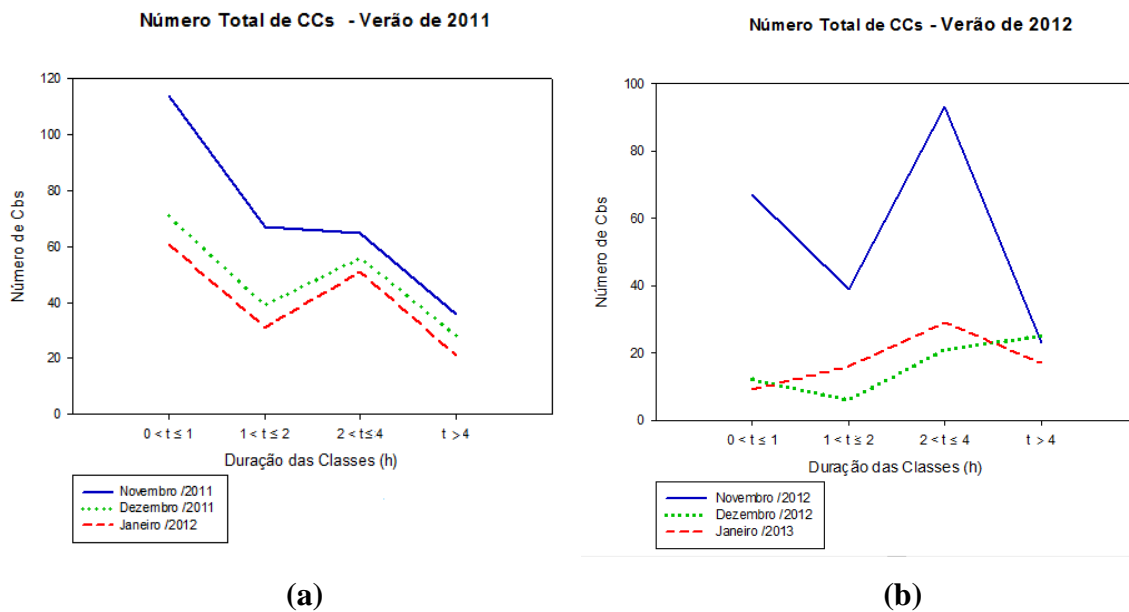
#### 4.5. Número Total de Células Convectivas:

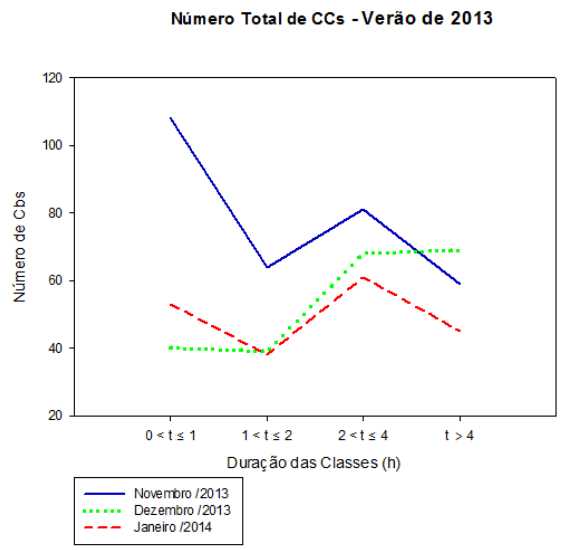
##### 4.5.1. Análise dos Verões:

O número total de células convectivas (CC) registrado para cada verão pode ser observado na Figura 23. Nota-se na Figura 23a que os meses do verão de 2011 apresentaram o mesmo comportamento no que diz respeito ao número de células convectivas. Contudo, nota-se na Figuras 16 que existem particularidades entre os verões, o mesmo padrão observado em 2011 apenas é semelhante para o mês de novembro, enquanto dezembro e janeiro apresentam características distintas. Essa variabilidade pode ser explicada apenas por análises que levem em consideração as características dinâmicas, como as correntes verticais dentro da nuvem e sua organização, que não podem ser observadas por satélites de

órbita geoestacionária utilizando-se apenas o canal do infravermelho. 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. 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 23 - 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.





(c)

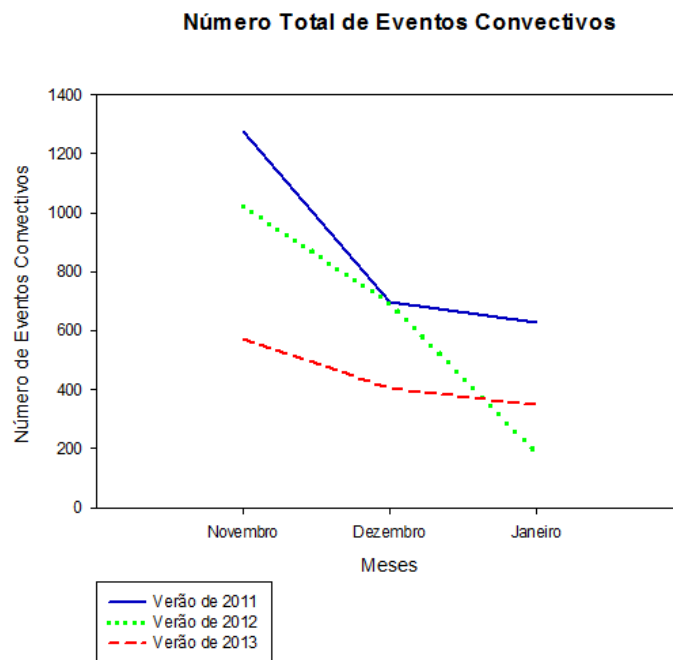
(Continuação Figura 23.)

#### 4.6. Número Total de Eventos Convectivos:

A Figura 24 mostra o número total de sistemas convectivos para cada verão durante o período de análise em função das observações mensais. Pela Figura 24, 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 deslocou-se 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 24) ao longo dos anos, o que reflete diretamente no total de precipitação sobre essas localidades. Além disso, Segundo a Climanálise do CPTEC, 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 frente que penetram sobre a região e que não definem a ZCAS também é importante na quantificação dos SC.

Figura 24 - Relação entre os meses e o número total de eventos convectivos, registrados durante os três verões de estudo.



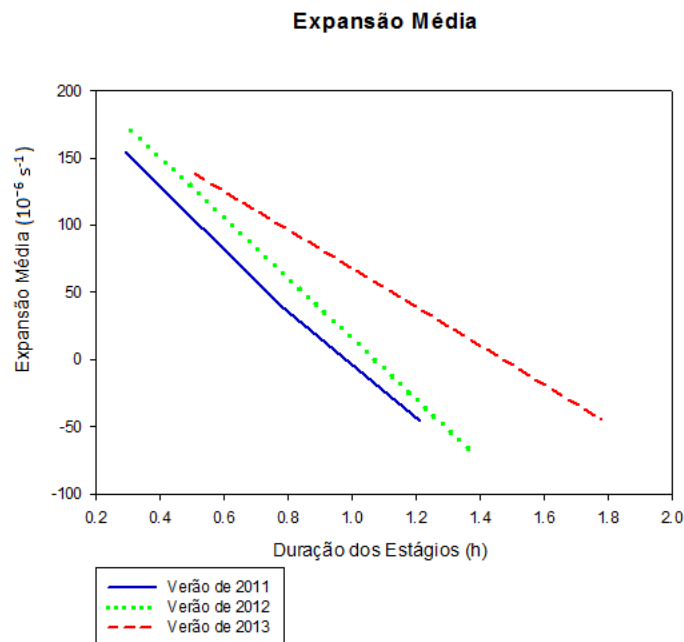
#### 4.7. Expansão Máxima:

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 **t** o tempo entre imagens consecutivas. A Figura 25 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 de expansão média 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 25 - 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.



#### 4.8 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 graus, 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. A Figura 26 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 concentram 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 à costa é afetada principalmente por sistemas associados à presença de sistemas frontais, que devido ao seu formato alongado fazem com que o centro de massa seja deslocado para uma área de atuação fora daquela especificada neste trabalho, consequentemente não sendo contabilizados. Ainda, cabe ressaltar 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 levaram em consideração sistemas com essas características, uma vez que a quantidade de chuva proporcionada por tais eventos é de suma importância para o total observado. Nota-se ainda que o deslocamento médio desses sistemas, 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 específicas, o que pode ajudar a criar um sistema que determine as áreas de atuação preferenciais de sistemas convectivos sobre o Sudeste do Brasil, que ajudará na previsão desses eventos. A Figura 27 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.

Figura 26 – 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 meses de: (a) novembro; (b) dezembro; e (c) janeiro.

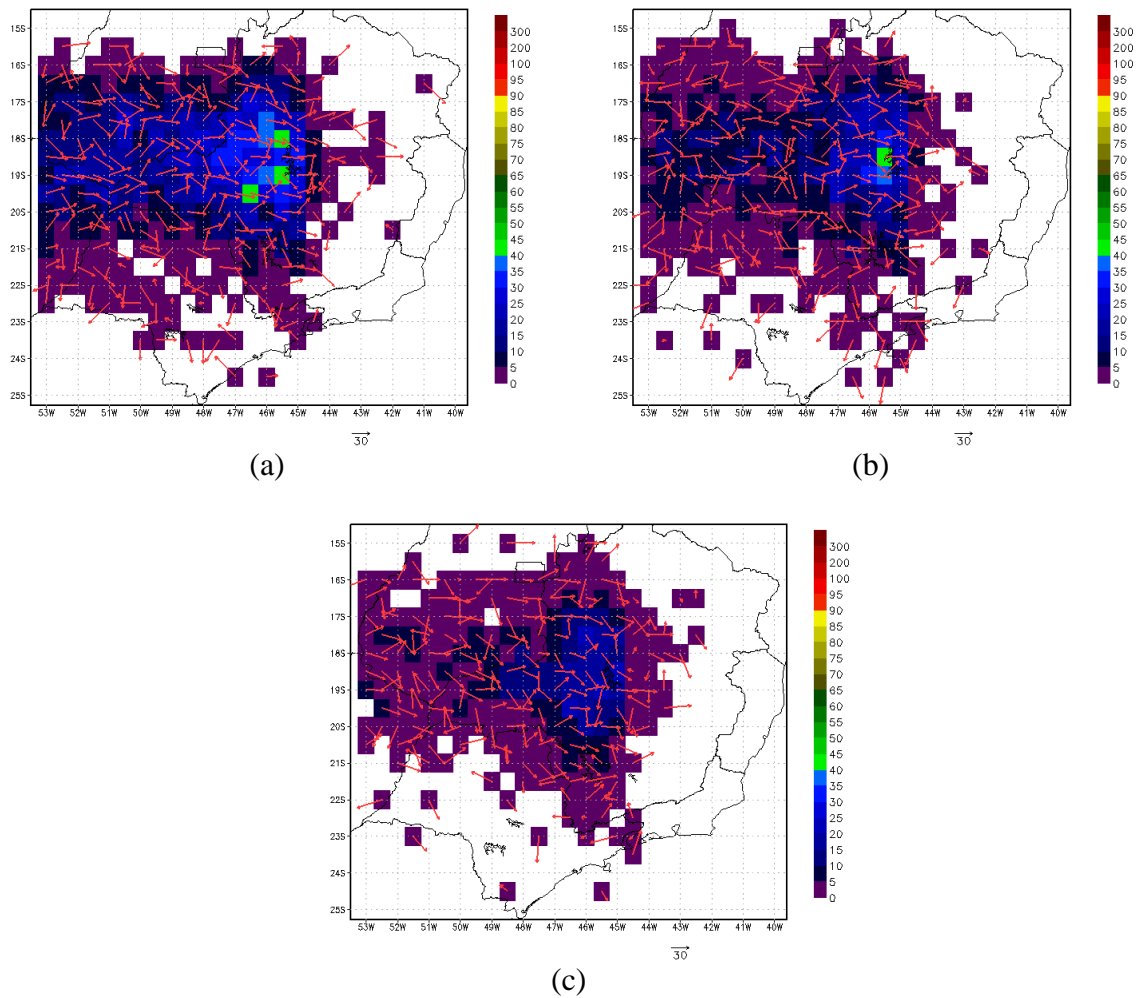
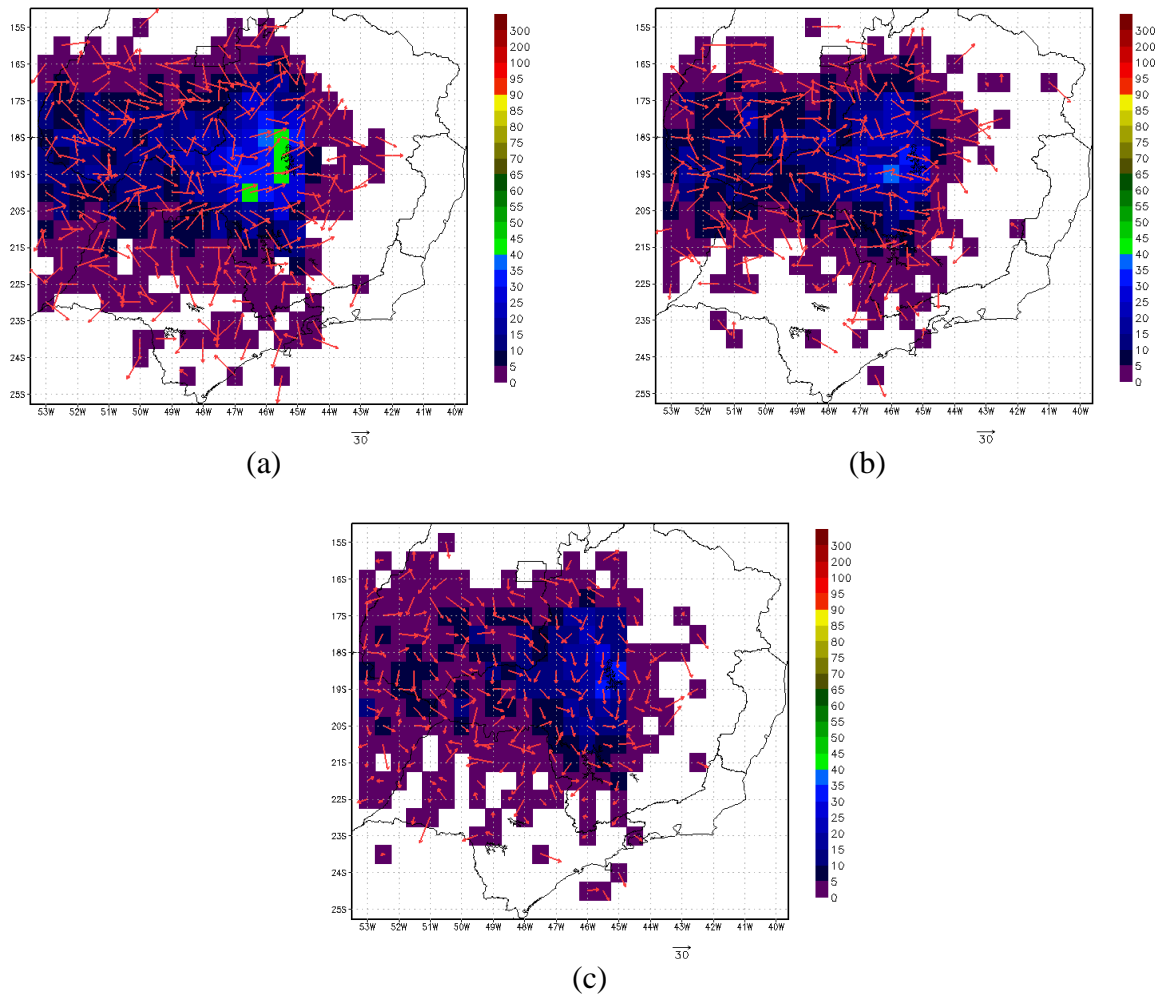


Figura 27 – Número de sistemas convectivos (áreas coloridas) em uma grade de 0,5x0,5° sobre a área de estudo e a direção predominante (vetor vermelho) para os verões de: (a) 2011; (b) 2012; e (c) 2013.



## 5. CONCLUSÃO:

Com este estudo foi possível realizar uma análise do comportamento dos sistemas convectivos atuantes sobre o Sudeste do Brasil durante a estação de verão. Com os resultados, conclui-se que os eventos convectivos se apresentam com seu tamanho máximo durante o mês de dezembro e com maior atividade convectiva associada a altos índices pluviométricos. Apesar disso, os sistemas mais altos e espessos, isto é, aqueles com menores temperaturas mínimas, são registrados durante o mês de novembro, assim como os sistemas com maior número de CCs. Já para os eventos que percorrem as maiores distâncias médias, esses são registrados durante o mês de janeiro.

Também foi observado que o número de eventos convectivos tem diminuído ao longo dos verões 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 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 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 próprio conhecimento sobre esses sistemas, que apesar de proporcionam grandes danos sociedade, são essenciais, devido à quantidade de precipitação gerada, para a sociedade.

## 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. 2<sup>nd</sup> 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., and 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.
- ROMATSCHKE, ULRIKE,, HOUZE, R. A. Jr.: Extreme Summer Convection in South America. *J. Climate*, 23, 3761-3791, 2010;
- 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;