

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Gustavo Rasera

**DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS
CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL**

**Santa Maria, RS
2017**

Gustavo Rasera

**DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS
CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação de Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do Título de **Doutor em Meteorologia**.

Orientador: Vagner Anabor
Coorientador: Franciano Scremin Puhales

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rasera, Gustavo
DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS
CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL / Gustavo
Rasera.- 2017.
78 p. ; 30 cm

Orientador: Vagner Anabor
Coorientador: Franciano Scremin Puhales
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2017

1. Sistemas Convectivos de Mesoescala 2. Índices de
Instabilidade 3. Tempo Severo 4. Ventos Intensos I.
Anabor, Vagner II. Scremin Puhales, Franciano III. Título.

Gustavo Rasera

**DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS
CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
de Meteorologia, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do Título de **Doutor em
Meteorologia**.

Aprovado em 24 de março de 2017



Vagner Anabor, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Franciano Scremin Puhales, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



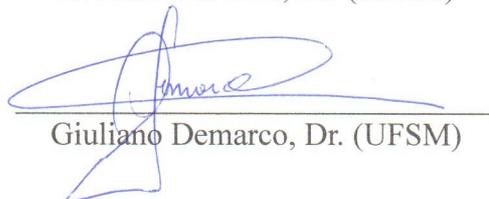
Mateus Teixeira da Silva, Dr. (UFPel)



Mário Francisco Leal de Quadro, Dr. (IFSC)



Everson Dal Piva, Dr. (UFSM)



Giuliano Demarco, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Ao apoio incondicional da minha família e também dos amigos que estiveram sempre presentes.

Ao meu orientador Vagner Anabor pelos seus ensinamentos, sugestões e muita cooperação durante os 4 anos de doutorado.

Ao meu orientador Franciano Scremin Puhales também por suas providenciais contribuições sempre que se fez necessário.

Agradeço todos os membros componentes da banca examinadora que desde o processo de qualificação vieram sempre a acrescentar.

A toda equipe do Grupo de Modelagem Atmosférica (GruMA), professores e alunos, pela proveitosa oportunidade através da experiência de realizar a previsão do tempo durante 3 anos, acrescentando muito ao meu conhecimento.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL

AUTOR: GUSTAVO RASERA

ORIENTADOR: VAGNER ANABOR

COORIENTADOR: FRANCIANO SCREMIN PUHALES

Este trabalho apresenta um estudo que visa aprimorar a previsão de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) na região subtropical da América do Sul através do desenvolvimento de um índice específico para este tipo de sistema meteorológico, além de aplicações para previsão de ventos intensos e potenciais usos no meio operacional de previsão do tempo. Com a utilização de imagens de satélite no canal infravermelho termal foi possível obter os 115 SCMs e 382 casos de convecção não-organizada ocorridos entre 2005 e 2010 que serviram como base do estudo. A partir de dados de reanálises do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) foi possível obter os campos sinóticos médios para os dois conjuntos de sistemas. Estes mostraram uma diferença mais evidente nos níveis de 250 hPa e 500 hPa, indicando forte contribuição do núcleo do Jato de Altos Níveis e de um cavado em níveis médios na organização dos SCMs, condição ausente nos casos de convecção não-organizada. Usando métodos estatísticos foram obtidos os melhores parâmetros meteorológicos que compuseram 4 novas versões de índices de SCMs. Estes foram avaliados estatisticamente pelo seu poder de detecção de SCMs. Teve-se como resultado um índice de SCM para a América do Sul (SA-MCS Index) que conseguiu detectar duas vezes mais SCMs que o MCS Index em um dos parâmetros de distâncias avaliados entre os pontos de máximos valores dos índices e os locais de iniciação dos SCMs observados. Apesar de ter sido elaborado a partir de SCMs com duração superior a 6 horas, o SA-MCS Index conseguiu detectar com sucesso o desenvolvimento e deslocamento em um caso de SCM avaliado que possuía menor duração. Além disso, obteve êxito com a utilização de produtos de previsão do modelo Global Forecast System (GFS). Em outro estudo, ao longo da estação quente no Rio Grande do Sul (RS), o SA-MCS Index foi avaliado com um horizonte de previsão de 24 horas, diariamente. Os resultados mostraram que todos os SCMs ocorridos no RS, bem como todos os eventos severos registrados pela Defesa Civil do RS, ocorreram em dias com indicativo de desenvolvimento para SCMs sobre o RS segundo o SA-MCS Index. Apesar do MCS Index também conseguir detectar todos os SCMs e eventos severos, este possuiu uma razão de falso alarme mais de duas vezes maior comparado ao SA-MCS Index desenvolvido. Outra aplicação do SA-MCS Index observada foi para a previsão de regiões com potencial para ventos intensos através do acoplamento a índices de rajada de vento (Windex e Gustex), modificados para a região, que apresentaram probabilidade de detecção superior a 80% dos casos de ventos intensos associados a SCMs, gerando uma taxa de falso alarme que não ultrapassa 40%. Desta forma, verifica-se um potencial uso do SA-MCS Index acoplado à índices preditores de vento intenso que podem ser de grande valia para os setores de energia e transporte. Além disso, o SA-MCS Index utilizado como ferramenta decisória de ativação de simulações de alta resolução permite reduzir consideravelmente os custos computacionais.

Palavras-chave: Sistemas Convectivos de Mesoescala. Índice de SCM. Ventos intensos. Windex. Gustex.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE POTENTIAL OF MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEM OCCURRENCE FOR SOUTH AMERICA

AUTHOR: GUSTAVO RASERA

ADVISOR: VAGNER ANABOR

CO-ADVISOR: FRANCIANO SCREMIN PUHALES

This work presents a study aimed at improving the prediction of Mesoscale Convective Systems (MCSs) in the South America subtropical region through the development of a specific index for this type of meteorological system, as well as wind gusts forecasting applications and their potential in operational use in weather forecast. Using satellite imagery in the thermal infrared channel it was possible to obtain the 115 MCSs and 382 cases of unorganized convection that occurred between 2005 and 2010 and that served as the basis of the study. From the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) data it was possible to obtain the mean synoptic fields for the two sets of systems. These showed a more evident difference in the levels of 250 hPa and 500 hPa, indicating a strong contribution of the Jet Streak and of a trough in 500 hPa in the organization of the MCSs, absent condition in cases of unorganized convection. Using statistical methods, we obtained the best meteorological parameters that composed 4 new versions of MCS indexes. These were statistically evaluated from their ability to detect MCSs. The result was an MCS index for South America (SA-MCS Index) that was able to detect twice as many MCSs as the MCS Index in one of the distances parameters evaluated between the maximum index values points and the initiation position point of the MCSs observed. Although it was elaborated from MCSs lasting more than 6 hours, the SA-MCS Index was able to successfully detect the development and displacement in a evaluated case of MCS that had a shorter duration. In addition, it was successful with the use of forecast products from the Global Forecast System (GFS) model. In another study, throughout the warm season in Rio Grande do Sul (RS), the SA-MCS Index was evaluated, with a forecast horizon of 24 hours, daily. The results showed that all the MCSs occurring in RS, as well as all the severe weather events reported by the Civil Defense of RS, occurred on days with an indicative development of MCSs on RS according to the SA-MCS Index. Although the MCS Index was also able to detect all MCSs and severe events, it had a false alarm rate more than twice as high compared with developed SA-MCS Index. Another observed SA-MCS Index application was for the prediction of regions with potential for intense winds through coupling to wind gust indexes (Windex and Gustex), modified for the region, with a probability of detection higher than 80% of the cases with intense winds associated with MCSs, generating a false alarm rate that does not exceed 40%. Thus, there is a potential use of the SA-MCS Index coupled with predictive intense wind indexes that can be of great value to the energy and transport sectors. In addition, the SA-MCS Index used as a decision-making tool for the activation of high resolution simulations allows a considerable reduction of computational costs.

Keywords: Mesoscale Convective Systems. MCS Index. Strong winds. Windex. Gustex

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1

- Figura 1 – Imagem do satélite GOES-12 cobrindo a área de estudo no canal infravermelho. A temperatura foi realçada para valores inferiores a -40°C para destacar o SCM 22
- Figura 2 – Representação da média dos domínios móveis dos SCMs ($60^{\circ} \times 60^{\circ}$) centrado no centro de massa médio no momento anterior à iniciação dos 115 SCMs. O domínio móvel menor, de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, é representado pelo retângulo preenchido no centro da figura. O relevo indicado pelo CFSR é observado pelas áreas hachuradas 25
- Figura 3 – Padrões gerais dos 115 SCMs e dos 382 casos de convecção não-organizada ocorridos entre 2005 e 2010 na porção subtropical da América do Sul. (a) posições dos centros de massa dos SCMs no momento de iniciação e dos casos de convecção não-organizada durante a máxima atividade convectiva; (b) horários preferenciais nas mesmas condições para os SCMs e casos de convecção não-organizada; (c) assim como (b), mas para os meses preferenciais 26
- Figura 4 – Teste t de Student para avaliação espacial a uma distância de até $6,25^{\circ}$ dos centroides dos SCMs e de convecção não-organizada, comparando ambos com respeito às seguintes variáveis: (a) altura geopotencial (250 hPa), (b) magnitude do vento (250 hPa), (c) altura geopotencial (500 hPa), (d) altura geopotencial (850 hPa), (e) umidade específica (850 hPa), (f) temperatura do ar (850 hPa), (g) pressão reduzida ao nível médio do mar e (h) índice de levantamento mais instável 29
- Figura 5 – Campos médios em 250 hPa para o vento (m.s^{-1} ; barbelas e área hachurada para o núcleo do jato acima de 30 m.s^{-1}) e altura geopotencial (mcp; linhas contínuas), acrescido da velocidade vertical Ω em 500 hPa (Pa.s^{-1} ; linhas tracejadas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita) 29
- Figura 6 – Campos médios em 500 hPa do vento (m.s^{-1} , barbelas) e altura geopotencial (mcp, linhas contínuas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita) 31
- Figura 7 – Campos médios em 850 hPa do vento (m.s^{-1} , barbelas), altura geopotencial (mcp, linhas contínuas), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$, linhas pontilhadas) e umidade específica (área hachurada). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita) 31
- Figura 8 – Campos médios do vento (m.s^{-1} ; barbs) em 1000 hPa e pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa, linhas contínuas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita) 32
- Figura 9 – Campos médios do índice de levantamento mais instável (linhas contínuas) e

CAPE de superfície (área hachurada). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita) 33

Figura 10 – Avaliação de dois casos de SCMs. (a) MCS Index às 12Z do dia 29 de maio de 2005; (b) canal infravermelho termal realçado do satélite GOES-12 às 1430Z; (c) SA-MCS Index (sem o termo $\hat{\Omega}$) no mesmo instante de (a); (d) assim como (c), porém com o termo $\hat{\Omega}$; (e) MCS Index às 00Z do dia 5 de dezembro de 2005; (f) canal infravermelho termal realçado do satélite GOES-12 às 04Z do dia 5 de dezembro de 2005; (g) assim como (c) mas para o mesmo instante de (e); (h) assim como (d), mas para o mesmo instante de (e) 38

ARTIGO 2

Figura 1 – (a) MCS Index 2,5 horas antes do estágio de iniciação; (b) MCS Index alternativo 2,5 horas antes do estágio de iniciação; (c) SCM ocorrido em 14 de outubro de 2015 no estágio de iniciação 47

Figura 2 – (a) MCS Index 2 horas antes do estágio de maturação; (b) MCS Index alternativo 2 horas antes do estágio de maturação; (c) SCM ocorrido em 14 de outubro de 2015 no estágio de maturação (tamanho máximo) 48

Figura 3 – (a) MCS Index 0,5 hora antes do estágio de dissipação; (b) MCS Index alternativo 0,5 hora antes do estágio de dissipação; (c) SCM ocorrido em 14 de outubro de 2015 no estágio de dissipação (tamanho máximo) 49

Figura 4 – (a) MCS Index 1 hora antes do estágio de iniciação; (b) MCS Index alternativo 1 hora do estágio de iniciação; (c) SCM ocorrido em 20 de outubro de 2015 no estágio de iniciação 49

Figura 5 – (a) MCS Index 2,5 horas antes do estágio de maturação; (b) MCS Index alternativo 2,5 horas antes do estágio de maturação; (c) SCM ocorrido em 20 de outubro de 2015 no estágio de maturação (tamanho máximo) 50

Figura 6 – (a) MCS Index 2,5 horas antes do estágio de dissipação; (b) MCS Index alternativo 2,5 horas antes do estágio de dissipação; (c) SCM ocorrido em 20 de outubro de 2015 no estágio de dissipação 51

ARTIGO 3

Figura 1 – Domínio utilizado na avaliação dos 3 índice de SCMs através de produtos de previsão para até 24 horas do modelo GFS $0,25^\circ$. No canto baixo esquerdo consta as dimensões das grades móveis ($2,25^\circ \times 2,25^\circ$) centradas em cada um dos pontos do domínio 55

Figura 2 – Domínio utilizado na avaliação do SA-MCS Index, das lapse rates e dos índices de rajada de vento $Wind_{SA}$ e $Gust_{SA}$, durante todo o ciclo de vida dos 28 SCMs analisados. Os retângulos representam cada um dos domínios analisados (alcances de $0,105^\circ$, $0,15^\circ$, $0,2^\circ$, $0,25^\circ$ e $0,3^\circ$). Linhas em preto estão relacionados com os municípios com eventos de vendaval e em cinza os que não apresentaram vendaval (grupo de controle) 58

Figura 3 – Valores máximos de lapse rate para os 105 eventos de vendaval, causados por 28 SCMs, em 5 diferentes alcances ($0,105^\circ$, $0,15^\circ$, $0,2^\circ$, $0,25^\circ$ e $0,3^\circ$) 58

Figura 4 – Frequência horária dos maiores valores observados para o SA-MCS Index,

Windex_{SA} e Gustex_{SA}, entre os 4 horários do CFSR (00Z, 06Z, 12Z e 18Z), para os 105 registros de vendaval. O domínio utilizado o de alcance médio (0,2°) 63

Figura 5 – Distribuição dos valores de Windex_{SA} e Gustex_{SA} ($\alpha = 0,7$) para eventos de vendaval e para o grupo controle utilizando dados do CFSR 0,5°. O domínio de alcance utilizado foi de 0,20°, representativo do domínio médio entre os 5 avaliados. O coeficiente $\alpha = 0,7$ foi aplicado por ter o melhor desempenho para o Gustex_{SA}..... 64

Figura 6 – Evento de vendaval associado com SCM ocorrido em 18/11/2009. (a) Área com temperatura de brilho abaixo de -55°C entre 0330Z e 1800Z desse mesmo dia; (b) SA-MCS Index entre 0000Z e 1800Z; (c) Windex_{SA} sobreposto à (b). Os retângulos representam os municípios atingidos por vendaval (0,4° x 0,4°) 66

Figura 7 – Figura 7 – O mesmo evento descrito na Figura 6, utilizando o Gustex_{SA} na figura (c) 66

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

- Tabela 1 – Variáveis meteorológicas com os mais altos Heidke Skill Score (HSS) na qualidade em distinguir SCMs de convecção não-organizada. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo. As variáveis meteorológicas destacadas em negrito foram utilizadas na avaliação dos 3 SA-MCS Index 35
- Tabela 2 – Avaliação estatística dos 5 índices de SCM. Os valores ótimos são os que possuíram os maiores Heidke Skill Score. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo 37
- Tabela 3 – Avaliação dos parâmetros de proximidade para as regiões de valores mais elevados dos 5 índices em comparação com o centroide dos SCMs 39
- Tabela 4 – Avaliação dos parâmetros de proximidade para as regiões de valores mais elevados do SA-MCS Index e do MCS Index em comparação com o centroide dos SCMs 40

ARTIGO 3

- Tabela 1 – Ocorrências de tempo severo entre setembro de 2015 e abril de 2016 no Estado do Rio Grande do Sul (RS) distribuídos em cada mês 61
- Tabela 2 – Ocorrências de tempo severo entre setembro de 2015 e abril de 2016 no Estado do Rio Grande do Sul (RS) relacionadas aos sistemas atuantes no mesmo dia . 61
- Tabela 3 – Porcentagens que cada um dos índices de SCM considerou como potencial desenvolvimento de um SCM para as 6 categorias de condição de tempo classificadas 62
- Tabela 4 – Classificação das melhores combinações do SA-MCS Index com o $Windex_{SA}$, baseado no parâmetro estatístico Heidke Skill Score (HSS), para casos de vendaval associados com SCMs no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Também são apresentados os parâmetros de probabilidade de ocorrência (POD), grau de ameaça (TS), razão de falso alarme (FAR) e o viés 66
- Tabela 5 – O mesmo que a Tabela 4, mas para a combinação do SA-MCS Index com o $Gustex_{SA}$, variando a constante α de 0,1 a 0,9 67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS	Alta Subropical do Atlântico Sul
BNA	Baixa do Noroeste Argentino
CAPE	Energia potencial disponível para convecção
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescal
CIN	Inibição convectiva
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CVV	Cisalhamento Vertical do Vento
DCRS	Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Rio Grande do Sul
EUA	Estados Unidos da América
FAR	Razão de falso alarme
GDI	<i>Galvez-Davison experimental index</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
Gustex _{SA}	Gustex modificado para a América do Sul
HSS	<i>Heidke Skill Score</i>
JBN	Jato de Baixos Níveis da América do Sul
LI	<i>Lifted Index</i>
JAN	Jato de Altos Níveis
MCS	Sistemas Convectivos de Mesoescala
MCS Index	Índice de SCM desenvolvido para os Estados Unidos da América
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
PRNMM	Pressão reduzida ao nível médio do mar
PECS	Sistemas Convectivos Alongados e Persistentes
POD	Probabilidade de detecção
RS	Rio Grande do Sul
SA-MCS Index	Índice de SCM desenvolvido para a América do Sul
SA-MCS Index 2	SA-MCS Index, com a lapse rate no lugar do índice de levantamento
SA-MCS Index 3	SA-MCS Index 2 com o acréscimo da umidade verticalmente integrada
TS	<i>Threat score</i>
Windex _{SA}	Windex modificado para a América do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 ARTIGO 1 – ÍNDICE DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	21
2.2.1 Imagens de satélite	21
2.2.2 Dados de reanálise	23
2.2.3 Cálculo dos campos sinóticos e SA-MCS Index	23
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
2.3.1 Principais características dos SCMs	26
2.3.2 Campos médios na escala sinótica	27
2.3.3 Obtenção do SA-MCS Index	34
2.3.4 Avaliação dos índices	37
2.4 CONCLUSÕES	40
2.5 REFERÊNCIAS	41
3 ARTIGO 2 – AVALIANDO UM ÍNDICE DE SCM NO SUL DO BRASIL PARA DOIS SCMS BREVES E QUE GERARAM DANOS	45
3.1 INTRODUÇÃO	45
3.2 DADOS E METODOLOGIA	46
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
3.4 CONCLUSÃO	51
3.5 REFERÊNCIAS	51
4 ARTIGO 3 – APLICAÇÕES DO ÍNDICE DE SCM DA AMÉRICA DO SUL EM AMBIENTE OPERACIONAL E ACOPLAMENTO COM ÍNDICES DE VENTO PARA O RIO GRANDE DO SUL	53
4.1 INTRODUÇÃO	53
4.2 DADOS E METODOLOGIA	55
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.3.1 Avaliação dos índices de SCM para previsão de 24 horas do modelo GFS 0,25° ...	59
4.3.2 SA-MCS Index combinado com Windex e Gustex para eventos de vendaval no RS associados a SCMs entre 2005 e 2010	63
4.4 CONCLUSÕES	67
4.5 REFERÊNCIAS	68
5 DISCUSSÃO	70
6 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são aqueles sistemas meteorológicos precipitantes embebidos na escala meso- α , segundo a classificação espacial de Orlanski (1975).

Existem subclassificações dos SCMs que levam em consideração critérios como tamanho, excentricidade do seu formato e duração. Maddox (1980) classifica como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) aqueles sistemas que se encaixaram em dois critérios de tamanho: a) uma primeira área de 100.000 km² com temperatura de brilho inferior a -32°C; b) área interna embebida dentro da primeira possuindo 50.000 km² com temperatura de brilho inferior a -52°C. Além disso possuir uma excentricidade (razão entre o maior e menor eixo) maior ou igual 0,7 no momento de máxima extensão (maturação) e duração mínima de 6 horas.

Outra subclassificação são os denominados Sistemas Convectivos Alongados e Persistentes (PECS) definidos por Anderson e Arritt (1998). Possuem essa definição quando os mesmos critérios dos CCMs são satisfeitos, excetuando a necessidade de área de pelo menos 100.000 km² com temperatura inferior a -32°C. Além disso, o que os diferencia, é o critério de excentricidade, que não excede 0,7, ou seja, são mais lineares.

Os primeiros estudos sobre estes sistemas ocorreram nos Estados Unidos (EUA) por Maddox (1980), aqueles subclassificados como CCMs, que destacou o comportamento não randômico durante sua organização e que apesar de sua benéfica contribuição no regime de precipitação sobre a região central dos EUA também gerava danos por tempo severo. Devido ao seu alto grau de impacto sobre a sociedade e desconhecimento a respeito de sua dinâmica de organização e desenvolvimento passou a ser cada vez mais estudado. Maddox, Perkey e Fritsch (1981) estudaram o comportamento da alta troposfera durante o desenvolvimento de um CCM e Maddox (1983) avaliou o comportamento da escala sinótica associada com os CCMs de médias latitudes.

Na América do Sul estes sistemas começaram a ser documentados por Velasco e Fritsch (1987), também sob a forma de CCMs, comparando-se as características climatológicas daqueles ocorridos nas latitudes médias da América do Sul (ao sul de 20°S) com aqueles ocorridos nas áreas tropicais entre as Américas do Sul e do Norte (entre 20°N e 20°S). Observaram que ambos os tipos foram predominante noturnos e continentais e que comparando os CCMs de latitudes médias, os ocorridos sobre a América do Sul foram, em média, 60% maiores. Estes autores foram, ainda, responsáveis pelas primeiras constatações de

forte relação desses sistemas convectivos com o Jato de Baixos Níveis da América do Sul (JBN).

Houze et al. (1990) mostraram que os SCMs possuem duas regiões com regime de precipitação distinta, a primeira na dianteira do SCM, denominada linha principal convectiva, com células alongadas embebidas nesta região causando precipitação convectiva. Na retaguarda da linha principal ocorre uma região com menor refletividade do radar, que é devida à predominância de uma grande área com regime de precipitação de caráter mais estratiforme.

Em um estudo de SCMs sobre a América do Sul diversos limiares de temperatura foram avaliados para considerar convecção profunda, e o valor de -55°C se mostrou o mais representativo (MACHADO et al., 1998). Este limiar passou a ser utilizado em diversos trabalhos envolvendo convecção profunda associada a SCMs (BORQUE et al., 2006; SALIO; NICOLINI; ZIPSER, 2007; ANABOR; STENSRUD; MORAES, 2008, 2009).

Trabalhos seguintes mostraram uma forte relação com o JBN com o desenvolvimento de SCMs (SAULO; NICOLINI; CHOU, 2000, NICOLINI et al., 2002; SAULO, RUIZ e SKABAR, 2007; SALIO, NICOLINI; ZIPER, 2007). Saulo, Ruiz e Skabar (2007) destacam inclusive o sinergismo envolvido entre os SCMs e o JBN, havendo uma retroalimentação de ambos, com o aceleração do JBN em função da convecção gerada por ele, e que também mantém as condições favoráveis para os SCMs continuarem a se desenvolver.

A região preferencial de desenvolvimento dos SCMs ocorridos na região subtropical do continente sul-americano também passou a ser alvo de estudo. Como está situado numa região conhecida por ventos de oeste em médios e altos níveis da troposfera, seu deslocamento habitual é para leste. Contudo, Anabor, Stensrud e Moraes (2008) observaram que uma relevante subclasse destes sistemas se desenvolvia convectivamente para noroeste, apesar do escoamento médio para leste, condição também encontrada nos SCMs ocorridos sobre os EUA. Anabor, Stensrud e Moraes (2009) conseguiram reproduzir este padrão de desenvolvimento dos SCMs relacionada principalmente com ondas de gravidade interna do sistema.

Uma alternativa para melhorar a previsão da ocorrência de SCMs, bem como sua região preferencial de desenvolvimento é a utilização de índices que combinam ingredientes-chave para o seu estabelecimento e manutenção.

Vários parâmetros termodinâmicos, tais como o índice de levantamento (LI – GALWAY, 1956), a energia potencial convectiva disponível (CAPE – HOUZE, 1993), índice Total Totals (TT – MILLER, 1972), índice Showalter (SHOWALTER, 1947), índice K

(GEORGE, 1960), além da taxa de queda da temperatura ambiental com a altura (lapse rate – HOUZE, 1993) dão uma medida da instabilidade atmosférica do ambiente. Contudo, a utilização dos índices isoladamente não é suficiente para prever o modo convectivo com a destreza necessária.

Quando se introduz uma abordagem relativa à cinemática do ambiente, como o cisalhamento vertical do vento (CVV) em camadas da atmosfera, estudos conseguem relacionar um padrão de melhor organização dos sistemas convectivos proporcional à intensidade do CVV. Cohen, Coniglio e Corfidi (2007) relacionam os CVVs de 0-2, 0-4, 0-6, 0-8 e 0-10 km com a severidade do SCM, sendo os mais fortes mais comumente associados a derechos, seguido por SCMs que causam danos severos e aqueles que não apresentam severidade. Coniglio et al., 2007 associaram um CVV mais intenso numa camada mais profunda com o estágio de maturação de SCMs, enquanto que estes estavam fracos no estágio de dissipação do SCM.

Weisman e Klemp (1982, 1984) observaram em seus estudos utilizando modelo numérico tridimensional de nuvens que as tempestades geradas se tornavam predominantemente do tipo supercelular quando o cisalhamento unidirecional do vento e o termo de flutuabilidade estavam elevados. Quando estes decaíam a preferência era por geração de tempestades multicelulares e, por fim, tempestades unicelulares.

Brooks et al. (2003) analisando sondagens geradas com dados de reanálises para tempestades severas ocorridas nos EUA observou que, em geral, quanto maior o CAPE acompanhado de maior diferença do vetor vento entre 0 e 6 km de altura, maior o número de ocorrências de tempestades que geraram tornado, seguido de tempestades que geraram significativo dano severo e, por fim, aquelas com pouca severidade.

Alguns índices considerando várias componentes meteorológicas foram elaborados com o intuito de melhorar a previsibilidade de sistemas convectivos e SCMs.

Henry (2000) considerou o uso da temperatura do ar e do ponto de orvalho em 850 hPa e a temperatura em 700 hPa para solucionar o problema de previsão de convecção ocorrida na Nova Zelândia quando havia uma camada de inversão próxima à superfície, se mostrando estatisticamente significativamente num nível de 2%.

O índice de Gálvez-Davison (GDI), utilizado como produto no Weather Prediction Center, pertencente a National Oceanic and Atmospheric Administration (WPC/NOAA), fornece as regiões favoráveis à convecção dos trópicos e subtropicais. Para isso utiliza os valores de temperatura potencial e razão de mistura nos níveis de 950, 850, 700 e 500 hPa.

Os SCMs estão comumente relacionados a danos por tempo severo e grandes

acumulados de chuva (MADDOX; ROGERS; HOWARD, 1982; JIRAK et al., 2003; MATSUDO; SALIO, 2011) e, segundo Zipser et al. (2006), a região subtropical da América do Sul é onde ocorrem as tempestades mais intensas de todo o globo.

A previsibilidade de SCMs ainda é um desafio para previsores, uma vez que, exige-se um entendimento sobre como a convecção profunda é sustentada por interações com o ambiente em torno do sistema (WEISMAN; ROTUNNO, 2004; PARKER; JOHNSON 2004a,b; CONIGLIO; STENSRUD; WICKLER, 2006). Além disso é preciso considerar como as características preexistentes de mesoescala podem influenciar os sistemas (FRITSCH; FORBES, 2001; TRIER; DAVIS 2005) e também como os próprios sistemas podem modificar o influxo do ambiente e manter as mudanças na estrutura do sistema, afetando também sua longevidade (PARKER; JOHNSON 2004c; FOVELL et al., 2005).

Existe um índice de Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS Index) proposto por Jirak e Cotton (2007) considerando os SCMs durante a estação quente (abril a agosto) de 1996 a 1998. Utiliza como variáveis de entrada a advecção de temperatura em 700 hPa, o CVV entre 0 e 3 km e o LI. Contudo, Rasmussen e Houze (2011) encontraram diferenças com relação ao disparo convectivo dos SCMs terem uma contribuição maior do relevo na região subtropical da América do Sul em relação aos ocorridos nos EUA, além diferenças físicas entre os continentes envolvendo proporções de água e terra que influenciam na dinâmica da atmosfera. Tendo em vista estas diferenças e os grandes impactos por tempo severo associados a SCMs frequentemente observados na região subtropical da América do Sul, vê-se a necessidade do desenvolvimento de um índice que acarrete numa melhora da taxa de detecção de SCMs na América do Sul, além de sua utilização acoplada a índices de previsibilidade de ventos intensos de forma como uma ferramenta de previsibilidade de ventos intensos associados a SCMs.

Três objetivos específicos são abordados separadamente em capítulos distintos, sob a forma de artigos científicos: 1) construção de um novo índice de SCM para a América do Sul; 2) teste deste novo índice para 2 SCMs de curta duração com produtos de previsão do modelo GFS; 3) implementação operacional do índice e acoplamento com dois índices relativos à previsão de rajadas de vento.

O primeiro capítulo trata do desenvolvimento de um novo índice de SCM (SA-MCS Index) baseado nos SCMs ocorridos durante 6 anos (2005-2010) na região subtropical da América do Sul. Para isso são utilizados dados de reanálises do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR – 0,5°) e elaborado método estatístico para definição das variáveis meteorológicas e seus respectivos níveis verticais a fim de serem ajustados como termos

componentes do SA-MCS Index.

No capítulo seguinte é realizada uma avaliação do SA-MCS Index utilizando-se de dados do modelo Global Forecast System (GFS – 0,25°), dos produtos de análise e de previsão para 3 horas. Além da dificuldade inerente a produtos de previsão de modelo, outro empecilho que se deseja avaliar é a viabilidade do índice para SCMs de curta duração (menos de 6 horas) e com interação com outro sistema durante seu ciclo de vida.

O último capítulo analisado é subdividido em dois tópicos: a) avaliação do SA-MCS Index para um período de 8 meses, compreendido pela estação quente do Rio Grande do Sul (RS). Para isso, dentro de um horizonte de 24 horas do modelo GFS são realizadas avaliações diárias do SA-MCS Index para o RS e o seu entorno; b) viabilidade do acoplamento do SA-MCS Index com índices preditores de rajadas de vento intenso utilizado nos EUA e Austrália associadas a microexplosões. Esta última abordagem foi realizada devido à alta associação de danos por tempo severo com SCMs e sendo os danos por ventos intensos o tipo evento de tempo severo mais frequente encontrado pela Defesa Civil do RS entre 2003 e 2011.

2 ÍNDICE DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL¹

2.1 INTRODUÇÃO

Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são definidos como um aglomerado de nuvens convectivas que se organizam em um único sistema, com uma extensa estrutura em altos níveis, com nuvens cirriformes e uma extensa área contígua de precipitação. Esses sistemas foram primeiramente estudados nos Estados Unidos (EUA) por Maddox (1980) e na América do Sul no final da década de 1980 por Velasco e Fritsch (1987). Podem assumir formas variadas (HOUZE, 1993; MACHADO; ROSSOW, 1993, RASMUSSEN; HOUZE, 2011), sendo denominados Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (MADDOX, 1980) quando são grandes e com um formato mais circular, ou Sistemas Convectivos Persistentes e Alongados (PECS – ANDERSON; ARRIT, 1998) quando são mais alongados. Na Bacia do Prata a ocorrência de SCM é mais frequente na estação quente (VELASCO; FRITSCH, 1987; SALIO et al. 2007) e são frequentemente relacionados à presença de um jato de baixos níveis (JBN) de norte proveniente da Bacia Amazônica (NICOLINI et al. 2002; SALIO et al., 2007; ANABOR et al., 2008).

Este tipo de sistema meteorológico possui grande importância dos regimes de precipitação por todo o globo terrestre, como a leste da Cordilheira dos Andes, na América do Sul (DURKEE et al. 2009). Esta região também apresenta as maiores incidências de SCM sobre o planeta (SALIO et al., 2007; ZIPSER et al., 2006; LIU; ZIPSER, 2009). Além disso, estes sistemas estão frequentemente associados com registros de tempo severo (MADDOX et al., 1982; JIRAK et al., 2003; MATSUDO; SALIO, 2011). Desta forma, uma detecção rápida dos SCMs, como também sua localização, são extremamente importantes de modo a evitar danos e transtornos à sociedade.

Apesar das semelhanças entre os SCMs que ocorrem na América do Sul (SA-MCS) e aqueles dos EUA, tais como sua ocorrência a leste de uma cadeia de montanhas e ter uma contribuição baroclínica, os SA-MCS têm uma maior relação com a orografia, com relação à iniciação convectiva, quando comparados com os dos EUA (RASMUSSEN; HOUZE, 2011). Existem também diferenças na dinâmica da atmosfera em altos níveis entre essas duas regiões. No hemisfério sul, devido a grande cobertura por oceanos, os núcleos do Jato de

¹ Artigo aceito na revista *Meteorological Applications* em processo de correção final.

Altos Níveis (JAN) possuem tipicamente menos amplitude e um formato mais zonal sobre a América do Sul, por exemplo.

Os SCMs ainda não são fáceis de serem previstos, principalmente porque um ambiente com condições favoráveis à convecção nem sempre são suficientes para a sua iniciação e manutenção (JIRAK; COTTON, 2007). A previsibilidade da manutenção dos SCMs é uma tarefa complexa, que envolve um entendimento de como a convecção profunda é sustentada através de interações com o ambiente no entorno do sistema (FRITSCH; FORBES, 2001; WEISMAN; ROTUNNO, 2004; PARKER; JOHNSON 2004a,b; TRIERE; DAVIS 2005; CONIGLIO et al. 2006) e como o sistema por si só pode modificar o influxo do ar ambiente e retroalimentar modificações na sua estrutura, influenciando sua longevidade (PARKER; JOHNSON 2004c; FOVELL et al., 2005). CONIGLIO et al. (2007) e COHEN et al. (2007) observaram que ambientes com instabilidade mais alta são mais favoráveis à manutenção do SCM e possuem maior probabilidade de produzir um SCM severo. Além disso, os autores também concluíram que um forte cisalhamento vertical do vento atuando sobre camadas profundas está usualmente associado com o estágio de maturação de SCMs, enquanto que um fraco cisalhamento vertical do vento é encontrado no processo de dissipação destes. Weisman e Klemp (1982, 1984) mostraram que a CAPE (energia potencial disponível para convecção) e o cisalhamento vertical do vento atuam na modulação de tempestades, com altos valores de ambos tendendo a causar tempestades supercelulares e mais fracos na geração de tempestades unicelulares.

A previsão e a manutenção dos SCMs, em qualquer região do globo, é uma questão operacional importante conhecida por ter alguns ingredientes-chave (LETKEWICZ; PARKER, 2010). A mobilização prévia dos sistemas vinculados à Defesa Civil, bem como o auxílio a tomadores de decisão, poderiam ser melhorados com o uso de índices objetivos quando se considera múltiplas variáveis meteorológicas e variáveis sociais. Também ajudaria a implementar sistemas de alertas automáticos e integrados para áreas remotas e vastas. Índices são usados em várias áreas, tais como risco de incêndio florestal, conforto térmico e previsão climática. Na Meteorologia de Mesoescala não é diferente, com vários índices preditivos para convecção, como o índice de atividade de mesoescala envolvendo variabilidades diurnas e interdiurnas do vento (ALPERT; EPPEL, 1985), um índice de convecção de nuvem de topo baixo (HENRY, 2000), o cálculo de índices de instabilidade (K, LI e água precipitável) provenientes do Meteosat Second Generation (MSG) (KOENIG; CONING, 2009) e o índice experimental Galvez-Davison (GDI) utilizado de forma operacional pelo centro de previsão da NOAA (National Oceanic and Atmospheric

Administration) como um parâmetro de instabilidade nos trópicos e subtropicais. Jirak e Cotton (2007), através de uma amostragem de casos de convecção não-organizada e de SCMs ocorridos nos EUA durante a estação quente entre 1996 e 1998, obtiveram um índice (MCS Index) que mensurava a probabilidade de ocorrência de SCMs. Este índice é normalizado e envolve o cisalhamento vertical do vento entre 0 e 3 km de altura, advecção de temperatura em 700 hPa e o índice de levantamento (LI).

Contudo, o MCS Index foi obtido baseado na climatologia norte-americana de SCMs, e apesar da física da atmosfera não variar com a localização, fatores geográficos e diferentes padrões atmosféricos observados sobre a América do Sul podem modificar as características típicas dos ambientes relacionados à SCM nesta região. Assim sendo, o desenvolvimento de um índice de SCM válido para outras regiões da Terra torna necessário avaliar e encontrar os componentes e os níveis meteorológicos mais significativos que irão ser usados para compor as informações significativas dessa região. Portanto, além das modificações dos valores médios para ajustar cada um dos termos do MCS Index original, também são necessários novos cálculos estatísticos para descobrir possíveis variáveis e níveis atmosféricos que podem ser significativos para a previsão e detecção da iniciação de um SCM.

O objetivo deste estudo foi criar um índice preditivo de SCM para a região subtropical da América do Sul (SA-MCS Index), levando em consideração as condições atmosféricas de até 6 horas antes do instante de iniciação do SCM. O SA-MCS Index pode ser aplicado a um serviço meteorológico operacional, aumentando a destreza da previsão de SCMs nas saídas pós-processadas de produtos de modelo atmosférico.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

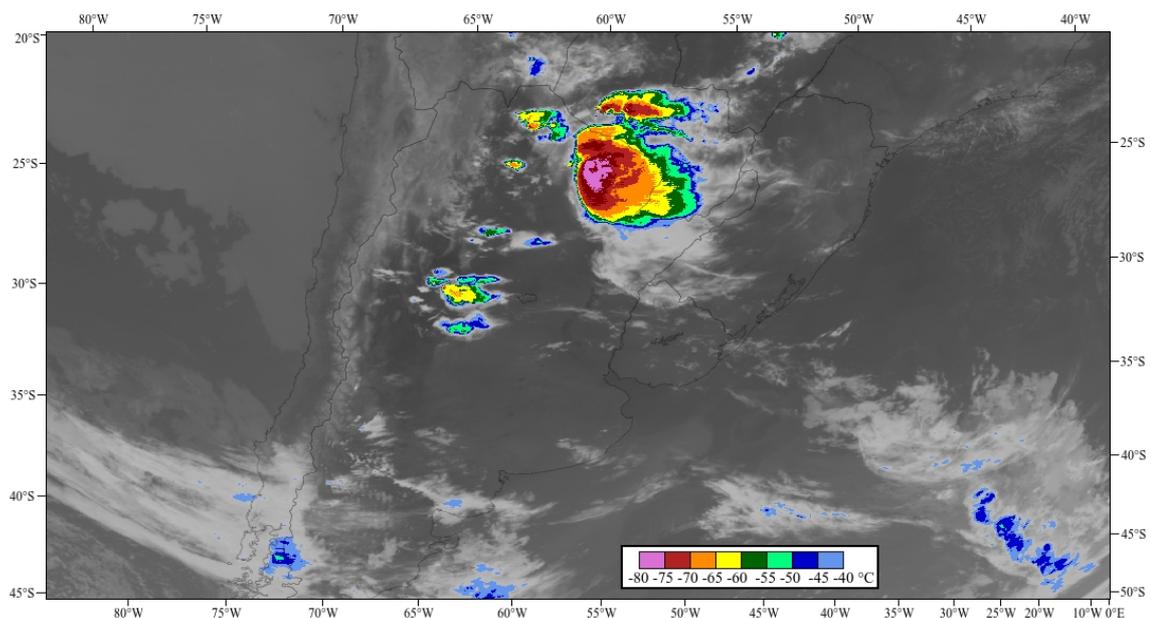
2.2.1 Imagens de satélite

Com o intuito de classificar os episódios de SCM foram utilizadas imagens do satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 10, 12 e 13, no canal infravermelho termal, com resolução espacial de 4 km x 4 km no seu ponto subsatélite, e resolução temporal variando de 15 a 30 minutos. O domínio correspondeu à metade sul da América do Sul, sendo delimitado pelas latitudes 19,9°S e 51,1°S e longitudes de 84,2°W e 0,6°E (Figura 1). Essas imagens corresponderam ao período de 17 de maio de 2005 a 31 de dezembro de 2010.

Algumas falhas ocorreram durante este período, incluindo ausência de imagens devido à operação do satélite e também devido ao sistema de aquisição dessas imagens, representando 15,7 % dos dias. Considerando individualmente cada estação do ano, as falhas foram de 21,5% no verão, 11,3% no outono, 5,9% no inverno e 24,3% na primavera.

O escudo de nuvens com temperatura de brilho foram calculado utilizando uma ferramenta denominada PyStormTracker (FERREIRA; ANABOR, 2013), que foi desenvolvida em linguagem Python, utilizando uma biblioteca, de código aberto, de visão computacional (<http://opencv.org>). Esta biblioteca permite o rastreamento geométrico de objetos em imagens, bem como o cálculo de parâmetros como posição, área e excentricidade de SCMs através de limiares de temperatura de brilho representados no canal infravermelho termal de imagens de satélite.

Figura 1 – Imagem do satélite GOES-12 cobrindo a área de estudo no canal infravermelho. A temperatura foi realçada para valores inferiores a -40°C para destacar o SCM.



Para obter esses dados relacionados aos SCMs, deste estudo, foi considerada a área com temperatura de brilho inferior a -55°C . O critério de detecção de SCM foi uma área contígua mínima de 100.000 km^2 possuindo uma temperatura inferior a -55°C (MADDOX, 1983; VELASCO; FRITSCH, 1987; MACHADO; ROSSOW 1993; MACHADO et al. 1992, 1998; JIRAK et al. 2003; ZIPSER et al. 2006; ANABOR et al., 2008).

O PyStormTracker permite a determinação da área do SCM, centro de massa, excentricidade e a construção do histórico de evolução do SCM. Em seguida 130 SCMs foram

selecionados, e 115 com ciclo de vida superior a 6 horas foram selecionados para melhor avaliá-los com dados de reanálises, que possuem uma escala temporal de 6 horas, e também para atender ao critério de CCM (MADDOX, 1983). Outros eventos convectivos foram classificados como convecção não-organizada.

O critério para a caracterização dos sistemas convectivos não-organizados foi o mesmo estabelecido por Jirak e Cotton (2007), isto é, aqueles que em nenhum momento de seus ciclos de vida alcançaram a condição de um SCM. Como resultado, 382 casos de convecção não-organizada foram para o mesmo domínio e período.

2.2.2 Dados de reanálise

Após a obtenção dos episódios de SCM e de convecção não-organizada, foram extraídas variáveis meteorológicas de cada um dos casos para a obtenção do padrão sinótico e também para gerar o índice preditor de SCMs para a América do Sul (SA-MCS Index). Para isso, foram utilizados dados de reanálise do NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR – SAHA et al. 2010) (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC), com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. No caso dos SCMs, as reanálises foram obtidas no tempo imediatamente anterior ao momento de iniciação, enquanto que para os casos de convecção não-organizada o tempo utilizado foi o mais próximo do momento de máxima atividade convectiva. Este critério foi adotado por Jirak e Cotton (2007) para a obtenção do MCS Index desenvolvido com os sistemas convectivos ocorridos nos EUA.

2.2.3 Cálculo dos campos sinóticos e SA-MCS Index

A fim de manter as características físicas da região em torno do SCM e dos sistemas não-organizados, independentemente da sua posição geográfica, uma grade móvel de $60^\circ \times 60^\circ$ (Figura 2) foi centrada nos centros de massa (obtidos pelo PyStormTracker) de cada SCM nas fases de iniciação, maturação e dissipação e para os casos de convecção não-organizada no instante de máxima atividade convectiva.

As seguintes variáveis meteorológicas de superfície foram usadas: CAPE, CIN (inibição convectiva), LI, LI mais instável a partir de 4 camadas (superfície a 1600 m de altura – LI+) e pressão reduzida ao nível médio do mar (PRNMM); a 2 metros: temperatura do ar, umidade relativa e específica; a 10 metros: componentes zonal e meridional do vento; e em 23 níveis isobáricos (1000 a 200 hPa): altura geopotencial, umidade específica,

temperatura do ar, componentes zonal e meridional do vento, velocidade vertical ($\hat{\Omega}$). Subsequentemente, foram gerados os campos médios das condições sinóticas atuantes sobre os casos de convecção não-organizada, assim como para os SCMs durante todo o período analisado.

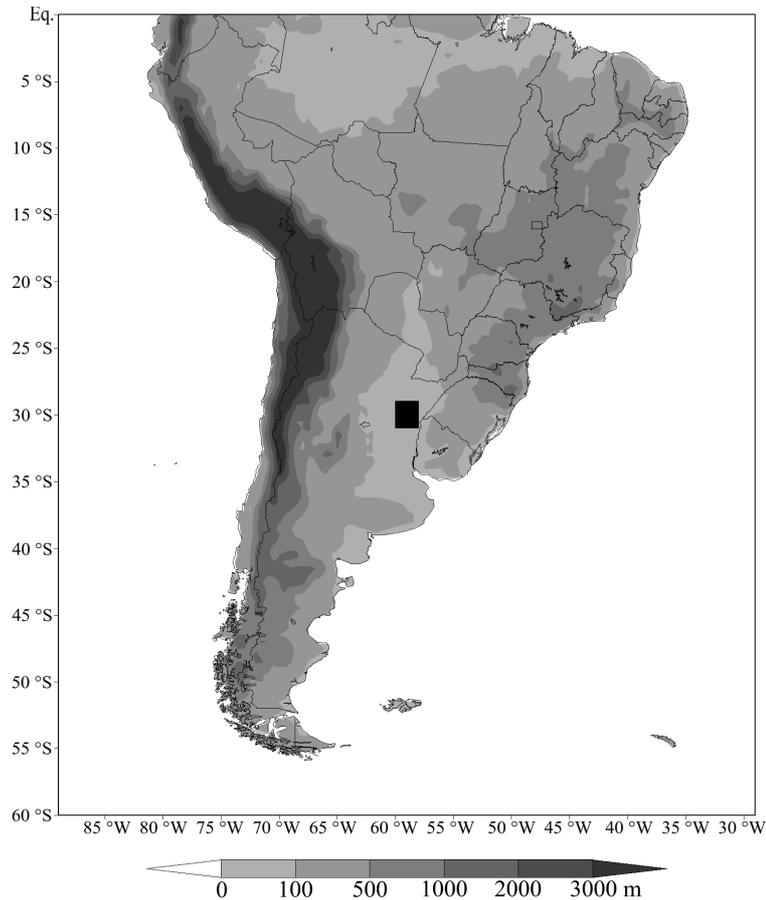
A topografia pode induzir escoamentos em baixos níveis, além de aumentar o fluxo de calor latente proveniente da superfície, bem como o momentum. Isso leva à geração de perturbações nas ondas que se propagam na atmosfera dessas latitudes, com efeitos na mesoescala e na escala sub-sinótica, contribuindo, deste modo, para um disparo convectivo (SHI, et al. 2008). O estudo de Rasmussen e Houze (2011) também destaca o papel da orografia no aumento da camada de inibição convectiva, com um movimento subsidente a sotavento dos Andes, ressecando a camada em médios níveis que precede a passagem de um cavado em altos níveis. De modo a atenuar o ruído causado pela topografia, foram realizadas médias dos pontos de grade para células de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, além de ser mais representativo à área de formação de SCM.

Para a obtenção do SA-MCS Index foram selecionadas grades móveis de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ centradas na latitude e longitude mais próximas do centro de massa de cada SCM e nos centros de massa de para cada agrupamento de convecção não-organizada. Essa grade menor foi utilizada para a obtenção dos valores característicos do entorno da região de disparo convectivo. As médias para os seguintes parâmetros foram calculadas: advecção de temperatura (700, 750, 775, 800, 825 e 850 hPa), advecção de vorticidade (450, 500 e 550 hPa), CAPE (superfície), CIN (superfície), taxa de variação vertical da temperatura (lapse rate) média entre 500-700 hPa, umidade verticalmente integrada de 0 a 3 km de altura, umidade específica (700, 750, 775, 800, 825 e 850 hPa), convergência de umidade (750, 775, 800, 825, 850, 875 e 900 hPa), cisalhamento vertical do vento (0 a 1 km, 0 a 3 km e 0 a 6 km), divergência (200, 225, 250 e 300 hPa), LI, LI+, $\hat{\Omega}$ (450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775, 800 e 825 hPa), PRNMM, vento (200, 225, 250, 300, 450, 500, 550, 700, 750, 775, 800, 825 e 850 hPa). Desta maneira, 115 valores médios foram obtidos para os SCMs e 382 para os casos de convecção não-organizada.

Esses dois conjuntos de sistemas tiveram seus valores confrontados um com o outro, e com o auxílio de um teste estatístico avaliando os SCMs observados, não observados, previstos e não previstos em uma tabela de contingência, foi obtido o parâmetro Heidke Skill Score (HSS – descrito abaixo, extraído de WILKS, 2006). O HSS foi um fator preponderante na escolha das variáveis usadas no índice, mas não único, uma vez que a natureza física dos termos para efeitos convectivos, tais como parâmetros de estabilidade, variáveis cinéticas e

termodinâmicas, também foi considerada. Deste modo, uma grande gama de naturezas físicas foi utilizada para a composição do índice.

Figura 2 – Representação da média dos domínios móveis dos SCMs ($60^\circ \times 60^\circ$) centrado no centro de massa médio no momento anterior à iniciação dos 115 SCMs. O domínio móvel menor, de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, é representado pelo retângulo preenchido no centro da figura. O relevo indicado pelo CFSR é observado pelas áreas hachuradas.



$$HSS = \frac{\frac{a+d}{n} - \frac{(a+b)(a+c) + (b+d)(c+d)}{n^2}}{1 - \frac{(a+b)(a+c) + (b+d)(c+d)}{n^2}} \quad (1)$$

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

O índice foi gerado a partir da metodologia aplicada por Jirak e Cotton (2007), levando em consideração a média e o desvio padrão das variáveis mais relevantes. Deste modo, o índice se torna adimensional, e também normalizado.

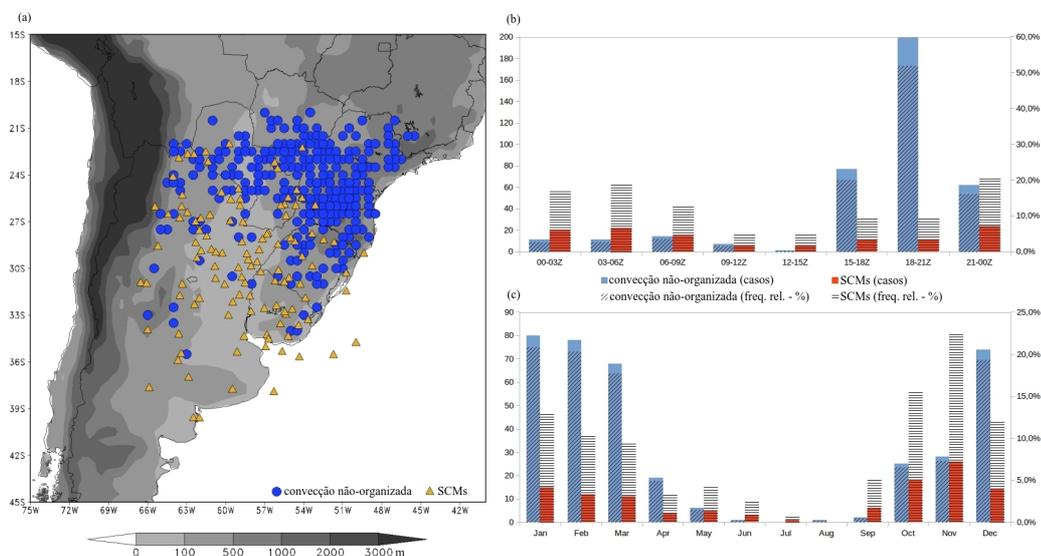
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Principais características dos SCMs

Para avaliar as características principais dos SCMs, foram analisados alguns aspectos como horário de iniciado, posição do centro de massa e sazonalidade. Foi possível observar na Figura 3(a) uma região de tamanho semelhante relacionada à ocorrência dos dois tipos de sistemas, mesmo sendo a amostragem de SCMs menor que a dos casos de convecção não-organizada.

Contudo, a região de ocorrência de SCMs se situou mais a sudoeste. Isto ocorreu, muito provavelmente, por causa do maior gradiente meridional de temperatura em direção ao sul, favorecendo a ocorrência de uma advecção de temperatura mais forte. O posicionamento mais a oeste está relacionado à maior proximidade com a região de saída do jato de baixos níveis, considerado importante na manutenção dos SCMs. Mesmo a posição média dos SCMs no estágio de maturação está deslocada para sudoeste em relação ao centro médio dos casos de convecção não-organizada. Os centroides dos SCMs estiveram distribuídos entre 22°S e 40°S, enquanto que os casos de convecção não-organizada se situaram entre 20°S e 36°S. Com relação às longitudes, os SCMs se posicionaram entre 49°W e 67°W, ao passo que os casos de convecção não-organizada ocorreram entre 45°W e 66°W.

Figura 3 – Padrões gerais dos 115 SCMs e dos 382 casos de convecção não-organizada ocorridos entre 2005 e 2010 na porção subtropical da América do Sul. (a) posições dos centros de massa dos SCMs no momento de iniciação e dos casos de convecção não-organizada durante a máxima atividade convectiva; (b) horários preferenciais nas mesmas condições para os SCMs e casos de convecção não-organizada; (c) assim como (b), mas para os meses preferenciais.



Os horários de iniciação dos SCMs e dos instantes de máxima atividade convectiva dos casos de convecção não-organizada apresentaram uma distribuição diferente quando comparados um ao outro (Figura 3(b)). Os casos de convecção não-organizada mostraram um pico de ocorrência entre 18Z e 21Z, representando 52,1% do total dos episódios. Os SCMs, por outro lado, não apresentaram um único pico de ocorrência, a considerar um intervalo de 3 horas, com 57,4% dos eventos ocorrendo entre 21Z e 06Z, mostrando, desta forma, um padrão de desenvolvimento mais noturno.

Analisando os dois conjuntos de dados mensalmente, foi observado que ambos tiveram um período de 4 meses como pico de ocorrência (Figura 3(c)). Os SCMs ocorreram, em média, dois meses antes dos casos de convecção não-organizada. 63,5% dos SCMs ocorreram entre outubro e janeiro, enquanto que de dezembro a março, ocorreram 78,5% dos casos de convecção não-organizada. Assim, foi observado que os casos de convecção não-organizada apresentaram uma maior relação com o verão austral, quando ocorre a maior incidência de radiação solar, enquanto que os SCMs estiveram preferencialmente situados na primavera, tendo uma atmosfera menos barotrópica.

Uma vez que o critério adotado para a caracterização de convecção não-organizada foi o mesmo utilizado por Jikrak e Cotton (2007), a estrutura que cada sistema apresentou não variou muito. Sempre a condição de convecção generalizada distribuída espacialmente, que em momento algum evoluiu para um único sistema organizado, como é definido um SCM.

Foi observado que mais da metade dos casos de iniciação ocorreram entre 21Z e 06Z, um período em que a camada limite frequentemente se desacopla e os escoamentos se tornam mais intensos nos níveis mais baixos da atmosfera. Isto favorece a ocorrência do JBN que é verificado em vários estudos envolvendo SCMs na América do Sul (NICOLINI et al., 2002; SALIO et al., 2007; ANABOR et al., 2008). A Baixa do Noroeste Argentino (BNA) também foi observada nos casos analisados, contribuindo para o aumento do gradiente horizontal de PRNMM entre a BNA e a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), intensificando o transporte de calor e umidade de norte, proveniente da Bacia Amazônica.

Com relação aos parâmetros de estabilidade, CAPE (de superfície e mais instável), LI mais instável e CIN de superfície, todos eles apresentaram valores mais elevados durante os horários de maior frequência de SCMs neste período avaliado.

2.3.2 Campos médios na escala sinótica

A partir das grades móveis obtidas para cada um dos 382 casos de convecção não-organizada nos momentos de máxima atividade convectiva e dos 115 SCMs (no horário de

reanálise imediatamente anterior ao momento de iniciação), foram elaborados os campos sinóticos médios para os níveis de 250 hPa, 500 hPa, 850 hPa, 1000 hPa e de superfície. Esses níveis atmosféricos e as variáveis utilizadas foram baseadas no estudo de Anabor et al. (2008) de modo a facilitar análises comparativas com os SCMs estudados por esses autores. O horário mais próximo foi definido como o horário de reanálise (00Z, 06Z, 12Z e 18Z) mais próximo e anterior ao horário de iniciação do SCM. Para os casos de convecção não-organizada o mesmo critério foi adotado, mas em referência ao instante de máxima atividade convectiva. Como ilustrado na Figura 3(b), a maioria dos SCMs ocorreu entre 21Z e 06Z (57,4%). Portanto, para os SCMs os horários de reanálise com maiores pesos nas composições médias foram 18Z e 00Z.

Para avaliar o grau de significância que diferencia alguns campos importantes entre SCMs e convecção não-organizada, foi utilizado o Teste t de Student. O procedimento foi realizado comparando as médias de 25 células de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ pertencentes ao domínio de $12,5^\circ \times 12,5^\circ$ centrado no centroide dos SCMs em seus momentos de iniciação, o mesmo foi realizado para os casos de convecção não-organizada.

Através de uma escala de cinza indicando limiares de 50%, 75% e 95% de níveis de significância entre os dois tipos de sistemas analisados (Figura 4) foi possível avaliar alguns campos atmosféricos em diferentes níveis.

O nível de 250 hPa (Figura 5) foi o que apresentou maior diferenciação entre os dois tipos de sistemas (mais altos níveis de significância) ao avaliar a altura geopotencial e a magnitude do vento, com a primeira variável tendo os menores valores de significância no extremo sudeste em relação ao centroide. Em 500 hPa e 850 hPa os campos de altura geopotencial também mostraram diferenças com elevados níveis de significância, mas com menores valores, desta vez, a nordeste do centroide. Ainda em 850 hPa, os campos de umidade específica e temperatura do ar tiveram valores de significância mais modestos, principalmente o último.

Por fim, os campos avaliados próximos à superfície foram de PRNMM e LI+. O primeiro apresentou um alto grau de diferenciação, com um nível de significância acima de 95% em quase todo o domínio avaliado, excetuando-se a porção sudoeste. O LI+ teve poucas células com diferenciação acima de 95% de nível de significância, com os valores mais baixos ocorrendo no setor noroeste.

Figura 4 – Teste t de Student para avaliação espacial a uma distância de até $6,25^\circ$ dos centroides dos SCMs e de convecção não-organizada, comparando ambos com respeito às seguintes variáveis: (a) altura geopotencial (250 hPa), (b) magnitude do vento (250 hPa), (c) altura geopotencial (500 hPa), (d) altura geopotencial (850 hPa), (e) umidade específica (850 hPa), (f) temperatura do ar (850 hPa), (g) pressão reduzida ao nível médio do mar e (h) índice de levantamento mais instável.

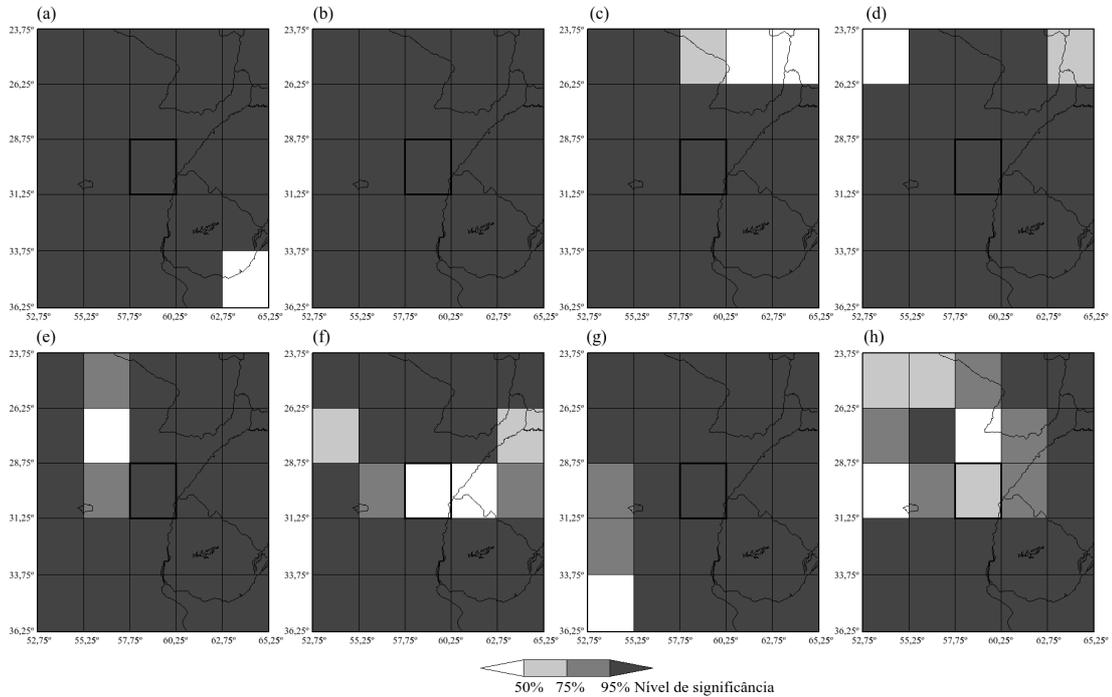
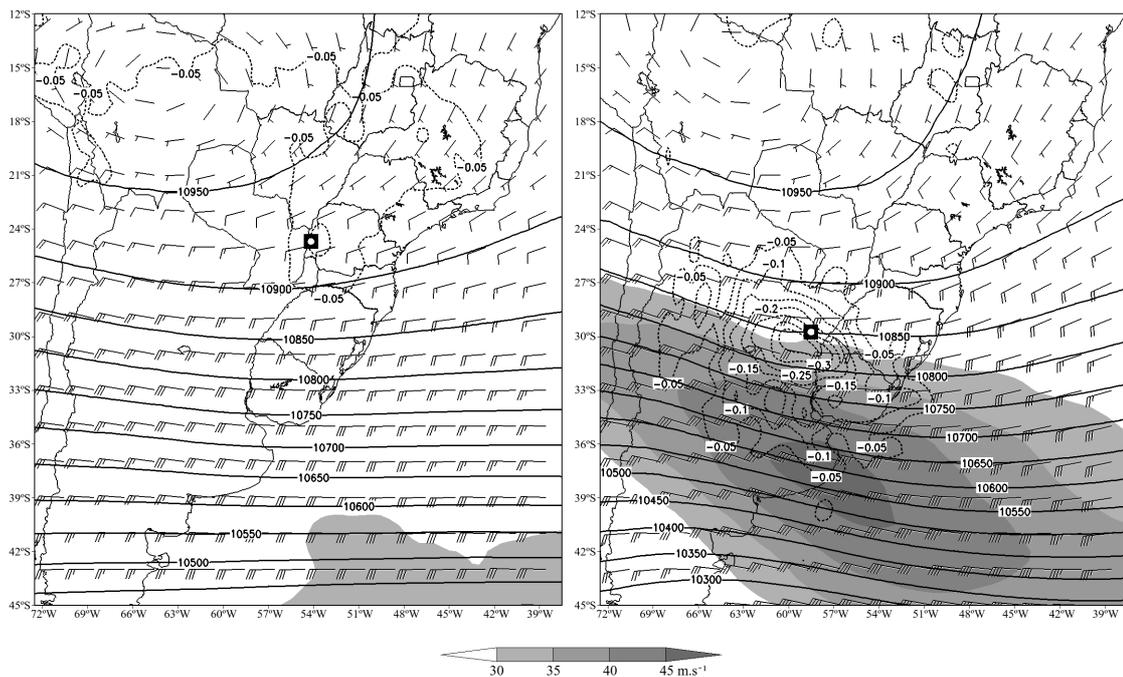


Figura 5 – Campos médios em 250 hPa para o vento ($m \cdot s^{-1}$; barbelas e área hachurada para o núcleo do jato acima de $30 m \cdot s^{-1}$) e altura geopotencial (mgp; linhas contínuas), acrescido da velocidade vertical Ω em 500 hPa ($Pa \cdot s^{-1}$; linhas tracejadas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



No nível de 250 hPa, as diferenças foram impressionantes entre os casos de convecção não-organizada e SCMs. A ocorrência do núcleo do JAN não é observado no campo médio dos casos de convecção não-organizada, as linhas de altura geopotencial tem um padrão quase zonal e o centroide da média dos casos de convecção não-organizada está localizado numa região de fraco movimento ascendente em 500 hPa ($-0,09 \text{ Pa.s}^{-1}$). O centroide médio dos SCMs nos momentos imediatamente anteriores à fase de iniciação está localizado na entrada equatorial do núcleo do JAN, uma região favorável para a geração e manutenção de sistemas convectivos observados por outros autores (SALIO et al., 2007; ANABOR et al., 2008), bem como usualmente encontrado próximo dos SCMs ocorridos nos EUA na fase de iniciação (MADDOX et al. 1983, CONIGLIO et al. 2004). No campo médio dos SCMs a velocidade vertical $\hat{\Omega}$ em 500 hPa é muito mais intensa ($-0,29 \text{ Pa.s}^{-1}$) e as linhas de altura geopotencial denotam um cavado suave localizado na retaguarda do centroide, refletindo o distúrbio deste cavado também no nível de 500 hPa.

Em 500 hPa (Figura 6) os cavados se tornaram mais evidentes na retaguarda dos centroides dos SCMs. Esta configuração aumenta a advecção de vorticidade ciclônica a leste dos cavados e contribui para a formação dos SCMs. Teixeira e Satyamurty (2007), em casos de precipitação extrema, e Cavalcanti (2012) para um evento de enchente na Argentina e no Uruguai, também observaram a atuação de um cavado em níveis médios nesta região da América do Sul. Os casos de convecção não-organizada mais uma vez apresentou as linhas de altura geopotencial bastante zonais. Portanto, a advecção de vorticidade ciclônica foi praticamente nula para este tipo de sistema, uma vez que o centro da grade também estava situado no lado de cisalhamento anticiclônico do JAN.

Em 850 hPa (Figura 7) os SCMs apresentaram um cavado evidente na retaguarda de seus centroides no momento de sua iniciação, enquanto que nos casos de convecção não-organizada, novamente as linhas de altura geopotencial tiveram uma amplitude menor quando comparados aos eventos de SCMs. Esse cavado mais marcante nos SCMs explica o maior gradiente térmico e o escoamento em baixos níveis vindo de norte que pode ser observado, produzindo, desta forma, uma advecção horizontal de temperatura mais efetiva que nos casos de convecção não-organizada.

Este escoamento de baixos níveis, que é frequentemente configurado como JBN, foi observado por vários autores no estudo de SCMs (NICOLINI et al., 2002; SALIO et al., 2007; ANABOR et al., 2008) e de precipitação extrema na América do Sul (TEIXEIRA; SATYAMURTY, 2007; CAVALCANTI, 2012). A umidade específica se encontrou elevada

para ambos os sistemas, com valores em torno de 13 g.kg^{-1} , o que por si só não se torna importante na organização de sistemas para um SCM.

Figura 6 – Campos médios em 500 hPa do vento (m.s^{-1} , barbelas) e altura geopotencial (mcp, linhas contínuas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).

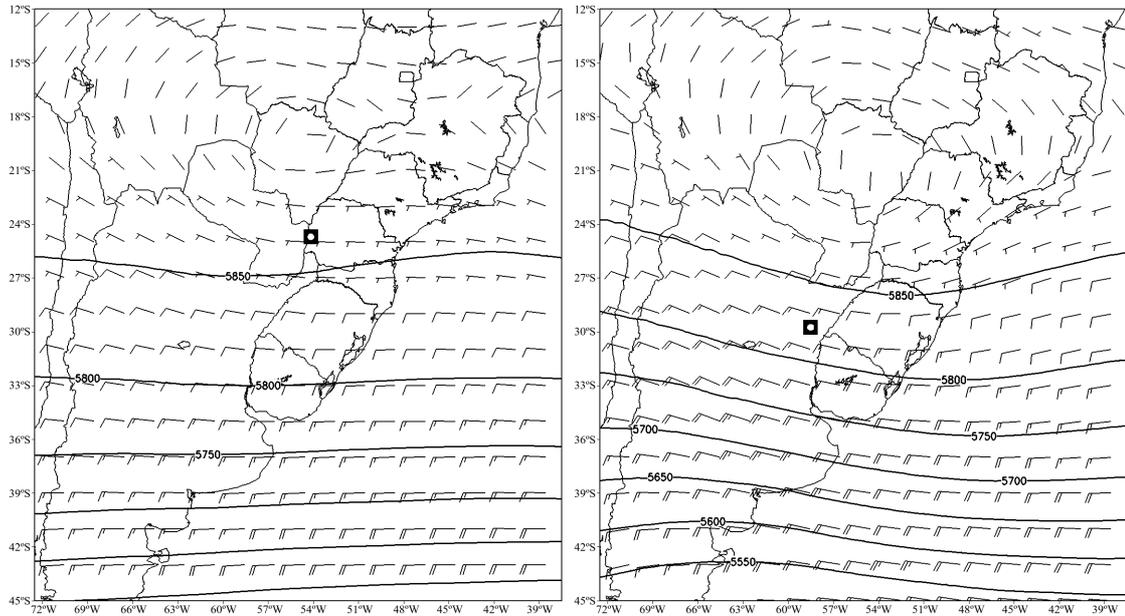
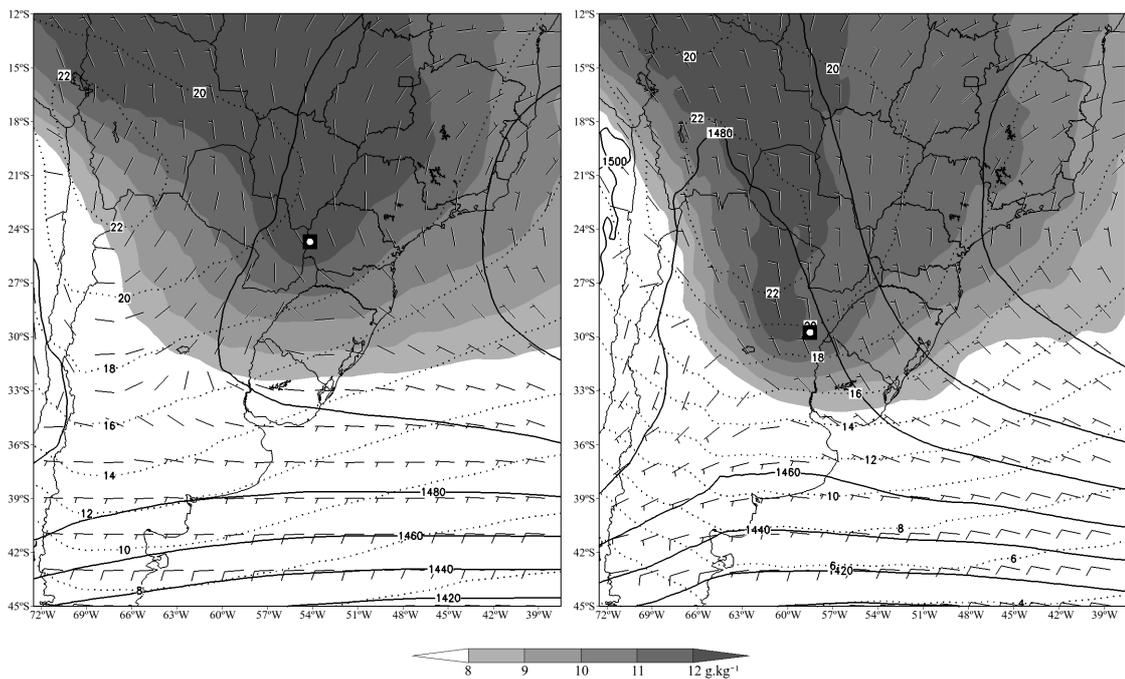


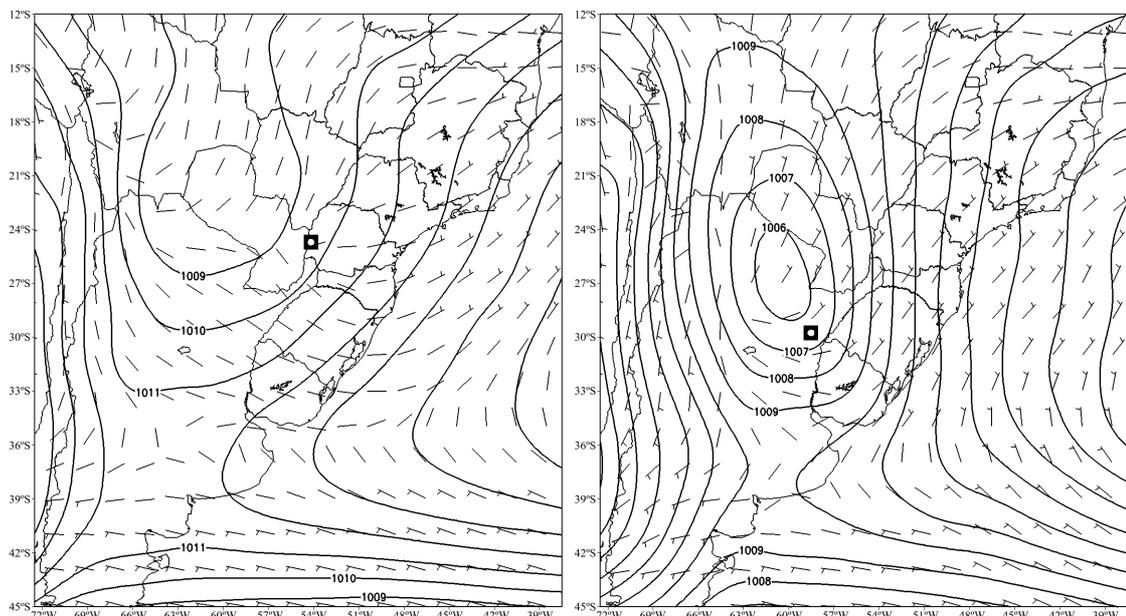
Figura 7 – Campos médios em 850 hPa do vento (m.s^{-1} , barbelas), altura geopotencial (mcp, linhas contínuas), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$, linhas pontilhadas) e umidade específica (área hachurada). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



Apesar de um centro de baixa pressão média ser observado a noroeste dos centroides de ambos os sistemas analisados (Figura 8), a PRNMM para os casos de convecção não-organizada apresentaram um gradiente muito mais fraco que os observados nos episódios de SCMs, situado entre o centro de baixa pressão no norte da Argentina e a ASAS.

Este gradiente mais intenso a leste do centro de baixa pressão é consistente com o observado por Anabor et al. (2008) para SCMs que se desenvolveram corrente acima sobre a América do Sul. Uma vez que este padrão não é observado nos casos de convecção não-organizada, os ventos em 1000 hPa se tornam mais fracos, como mostrado na Figura 8. O transporte de calor e umidade oriundos de norte se torna menos eficiente sobre a superfície. Nos casos de SCMs, ventos mais intensos com componente de norte são observados e o centroide médio fica posicionado sobre a região de mudança da direção do vento de nordeste para leste, aumentando o cisalhamento vertical do vento (uma vez que se tornam mais de oeste em médios e altos níveis), o que contribui para distúrbios de pressão dentro de células convectivas (WEISMAN, 1993; JOHNSON; MAPES, 2001; NASCIMENTO, 2005), e assim, favorecendo a organização e manutenção dos SCMs.

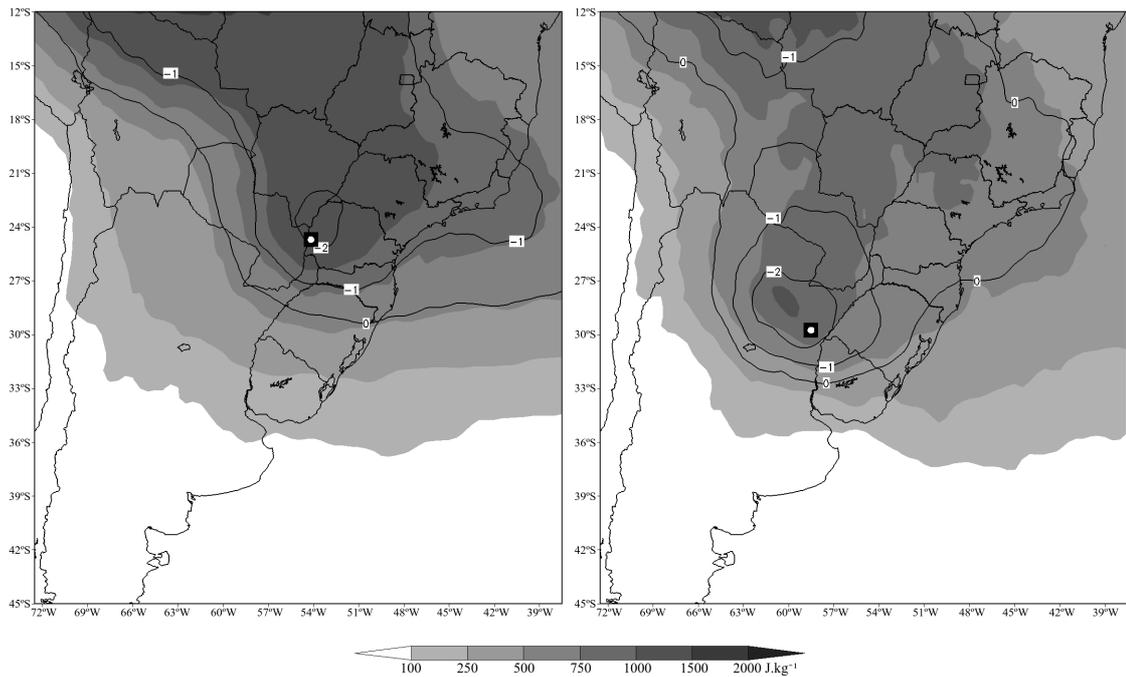
Figura 8 – Campos médios do vento (m.s⁻¹; barbs) em 1000 hPa e pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa, linhas contínuas). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



Como um meio de avaliar a instabilidade do ambiente, foram calculadas campos médios de superfície com CAPE e para LI+, tanto para os casos de convecção não-organizada, como para os episódios de SCMs (Figura 9). Foi observado que para ambos os

sistemas o LI+ médio foi negativo (abaixo de -2 K). Isto mostra que o maior grau de organização dos SCMs não reflete um LI+ muito mais instável, quando comparado aos casos de convecção não-organizada (considerando a grade móvel central de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, os SCMs apresentaram LI+ de $-2,17$ K, contra $-2,04$ K dos casos de convecção não-organizada).

Figura 9 – Campos médios do índice de levantamento mais instável (linhas contínuas) e CAPE de superfície (área hachurada). Convecção não-organizada durante a máxima atividade (esquerda) e SCMs durante o momento imediatamente anterior ao estágio de iniciação (direita).



Considerando o CAPE de superfície, os casos de convecção não-organizada apresentaram um valor mais alto em relação aos eventos de SCM. Isto pode ser explicado pelas diferenças nos ciclos de vida dos dois sistemas. A convecção não-organizada de forma geral é disparada durante a tarde quando o CAPE de superfície tende a ser mais elevado. Uma vez que os SCMs possuem um ciclo de vida predominantemente noturno, com iniciação usualmente no final da tarde, o CAPE de superfície começa a decair. Isto pode ser verificado através dos valores de CAPE mais instável, a partir de 1000 hPa, para os dois tipos de sistemas (490 J.kg^{-1} nos SCMs e 367 J.kg^{-1} nos casos de convecção não-organizada). O nível médio mais instável também confirma esta diferença do regime dos dois sistemas estando mais longe da superfície nos SCMs (860 hPa), quando comparados aos casos de convecção não-organizada (934 hPa). Contudo, os valores de LI e CAPE de superfície para os 115 eventos de SCMs estão de acordo com os observados nos SCMs analisados por Anabor et al. (2008).

2.3.3 Obtenção do SA-MCS Index

Após obter os campos médios dos casos de convecção não-organizada e dos SCMs, um índice foi desenvolvido com o objetivo de destacar ambientes favoráveis à formação de SCMs. No presente estudo para a América do Sul, buscou-se utilizar da metodologia estatística aplicada na elaboração do MCS Index existente composto por dados de sistemas convectivos ocorridos nos EUA (JIRAK; COTTON, 2007) para definir quais variáveis e níveis atmosféricos seriam usados no SA-MCS Index.

Subsequentemente, para cada parâmetro, uma tabela de contingência foi elaborada e a partir disso o Heidke Skill Score (HSS) foi calculado para cada parâmetro. A Tabela 1 mostra os parâmetros ordenados pelo HSS. Os níveis de melhor performance são mostrados para cada parâmetro testado. Os valores ótimos são aqueles que obtiveram os mais altos HSS entre todo conjunto de dados daquele parâmetro meteorológico e para este valor foi calculado seu Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e seu viés, de acordo com a metodologia aplicada por Jirak e Cotton (2007).

A escolha destes parâmetros meteorológicos que seriam incorporados ao SA-MCS Index não considerou apenas a avaliação dos valores de HSS, mas também a natureza física dos parâmetros que melhor representariam os processos físicos envolvidos no disparo convectivo e subsequente organização do sistema.

O primeiro termo foi baseado no cisalhamento vertical do vento entre os níveis de 0 e 6 km de altura. Esta é uma variável dinâmica e atua na metade inferior da atmosfera. A camada de 0 a 6 km, em vez de 0 a 3 km encontrado no MCS Index, pode ter parte de sua relevância estatística devido à assimilação de dados de poucas radiossondas pelo CFSR sobre a América do Sul. Portanto, a velocidade do vento mais afastada da camada limite tende a ser melhor representada pelo modelo. Não foram encontradas grandes diferenças entre as 2 camadas citadas, mas o uso do cisalhamento vertical do vento entre 0 e 6 km foi baseado em seu ligeiro melhor desempenho estatístico. Esta é uma camada que também é usada como parâmetro para distinguir severidade de tempestades convectivas com o limiar de 15 m.s^{-1} (BROOKS et al., 2003 e CRAVEN; BROOKS, 2004). Cohen et al. (2007), Coniglio et al. (2007), e Coniglio et al. (2010) também mostraram melhor discriminação quando à severidade e longevidade dos SCMs quando profundo cisalhamento vertical do vento foi observado.

O segundo termo do SA-MCS Index é baseado na advecção de temperatura em 775 hPa, um reflexo do levantamento isentrópico. Essa é uma variável termodinâmica responsável por prover calor, e consequentemente, energia para o sistema se desenvolver. A redução do

nível isobárico do termo de advecção de temperatura de 700 para 775 hPa pode estar relacionado com o aumento da contribuição da orografia para o disparo convectivo de SCMs na América do Sul observada por Rasmussen e Houze (2011) e também mais próximo ao nível onde geralmente o JBN ocorre nesse continente (~ 850 hPa), uma vez que esta é uma altura onde o transporte de calor se torna mais efetivo sobre esta região.

Tabela 1 – Variáveis meteorológicas com os mais altos Heidke Skill Score (HSS) na qualidade em distinguir SCMs de convecção não-organizada. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo. As variáveis meteorológicas destacadas em negrito foram utilizadas na avaliação dos 3 SA-MCS Index.

Variável	Valor ótimo	HSS	TS	POD	FAR	Viés
Cisalhamento vertical do vento (0-6 km)	16,28 m.s⁻¹	0,64	0,57	0,71	0,26	0,97
Magnitude do vento (250 hPa)	28,69 m.s ⁻¹	0,64	0,55	0,66	0,22	0,85
Cisalhamento vertical do vento (0-3 km)	10,06 m.s ⁻¹	0,63	0,55	0,71	0,29	1,00
Magnitude do vento (450 hPa)	16,39 m.s ⁻¹	0,62	0,54	0,63	0,21	0,79
Advecção de temperatura (775 hPa)	3,69 x 10⁻⁵ K.s⁻¹	0,59	0,50	0,55	0,15	0,64
Magnitude do vento (850 hPa)	8,35 m.s ⁻¹	0,53	0,47	0,61	0,33	0,91
Lapse rate (700hPa-500hPa)	5,76 K.km⁻¹	0,53	0,47	0,62	0,34	0,94
Velocidade vertical Ômega (800 hPa)	-0,26 Pa.s⁻¹	0,46	0,40	0,53	0,37	0,84
Velocidade vertical (800 hPa)	2,70 cm.s ⁻¹	0,46	0,40	0,53	0,37	0,84
Magnitude do vento (10 m)	3,28 m.s ⁻¹	0,41	0,35	0,45	0,38	0,73
Cisalhamento vertical do vento (0-1 km)	7,56 m.s ⁻¹	0,39	0,33	0,40	0,34	0,61
Divergência (225 hPa)	1,52 x 10 ⁻⁵ s ⁻¹	0,38	0,36	0,54	0,48	1,04
CIN (superfície)	-47,20 J.kg ⁻¹	1,00	0,37	0,64	0,53	1,38
Convergência de umidade (825 hPa)	1,54 x 10 ⁻⁴ g.kg ⁻¹ .s ⁻¹	0,36	0,33	0,45	0,45	0,83
Pressão reduzida ao nível médio do mar	1005,94 hPa	0,33	0,30	0,41	0,46	0,76
Advecção de vorticidade (450 hPa)	-9,74 x 10 ⁻¹⁰ s ⁻²	0,28	0,24	0,30	0,41	0,50
Umidade específica (700 hPa)	9,85 g.kg ⁻¹	0,27	0,23	0,27	0,39	0,44
Umidade Verticalm. Integrada (0-3 km)	34,50 g.kg⁻¹.m⁻¹	0,24	0,22	0,29	0,50	0,57
LI mais instável (de até 1600 m)	-4,02 K	0,18	0,18	0,23	0,55	0,52
CAPE (mais instável, acima de 1000 hPa)	767,28 J.kg ⁻¹	0,12	0,16	0,22	0,64	0,61

O próximo termo foi composto pela velocidade vertical Ômega no nível de 800 hPa, uma variável dinâmica. É principalmente influenciada pelo levantamento isentrópico mencionado anteriormente. Além de possuir uma relevância estatística devido ao seu valor de HSS, sua importância também é explicada fisicamente por sua boa representação do disparo convectivo que ocorre próximo à superfície, e desta forma delimita melhor a área de iniciação dos SCMs.

Finalmente, o último termo do SA-MCS Index está relacionado ao LI+. Apesar de seu

HSS não ser elevado, é um parâmetro de estabilidade, fornecendo uma medida de fluatibilidade da parcela ascendente, que exerce papel fundamental no disparo convectivo (EMANUEL, 1994). Além disso, seus valores médios mais instáveis delimitam bem a região de convecção, especificando de forma mais efetiva a área com SA-MCS Index favorável.

Outros dois índices também foram desenvolvidos com o uso da lapse rate média entre 500 e 700 hPa em um dos termos. O primeiro (SA-MCS Index 2) apenas substituindo o termo de LI+ e o segundo (SA-MCS Index 3) também acrescentando um quinto termo relacionado à umidade verticalmente integrada nos primeiros 3 km.

Após a escolha dos termos componentes dos índices, esses foram desenvolvidos usando a mesma metodologia aplicada por Jirak e Cotton (2007) para o MCS Index. A variável que compõe do termo é subtraída da média desta mesma variável contida na amostragem de SCMs e em seguida o desvio padrão desta é usado como o divisor deste termo. Esta metodologia é aplicada de modo a normalizar as variáveis e construir um índice adimensional. Utilizando esta técnica, os termos são calibrados de modo que eles possuem o mesmo peso. O valor ótimo é definido como o que melhor discrimina os eventos de SCMs dos casos de convecção não-organizada.

MCS Index:

$$\frac{[\vec{V}_{3km} - \vec{V}_{0km}] - 11,5}{5} + \frac{[-\vec{V} \cdot \nabla T_{700hPa}] - 4,5 \times 10^{-5}}{7,3 \times 10^{-5}} + \frac{-LI_{inst} + 4,4}{3,3}$$

MCS Index modificado para a América do Sul:

$$\frac{[\vec{V}_{3km} - \vec{V}_{0km}] - 13,55}{5,30} + \frac{[-\vec{V} \cdot \nabla T_{700hPa}] - 3,7 \times 10^{-5}}{5,91 \times 10^{-5}} + \frac{-LI_{inst} + 2,17}{2,23}$$

SA-MCS Index:

$$\frac{[\vec{V}_{6km} - \vec{V}_{0km}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-\vec{V} \cdot \nabla T_{775hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{-LI_{inst} + 2,17}{2,23} + \frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29}$$

SA-MCS Index 2:

$$\frac{[\vec{V}_{6km} - \vec{V}_{0km}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-\vec{V} \cdot \nabla T_{775hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{\frac{dT}{dz}_{700-500hPa} - 5,93}{0,59} + \frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29}$$

SA-MCS Index 3:

$$\frac{[\vec{V}_{6km} - \vec{V}_{0km}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-\vec{V} \cdot \nabla T_{775hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{\frac{dT}{dz}_{700-500hPa} - 5,93}{0,59} + \frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29} + \frac{\int_0^{3km} U_{esp} - 30,99}{5,46}$$

2.3.4 Avaliação dos índices

Avaliando os 5 índices acima, a partir da mesma metodologia estatística aplicada anteriormente na obtenção dos termos relevantes aos índices, houve uma melhora nos valores de HSS (Tabela 2) dos 3 índices desenvolvidos para a América do Sul (SA-MCS Index, SA-MCS Index 2 e SA-MCS Index 3) em relação ao MCS Index e quando este foi calibrado para a América do Sul. Além disso, os 3 SA-MCS Index obtiveram melhores taxas de detecção, considerando TS e POD. Isto é de grande importância, visto que é muito relevante descartar o menor número possível de SCMs ocorridos sem serem previstos, devido ao seu potencial de geração de tempo severo.

Tabela 2 – Avaliação estatística dos 5 índices de SCM. Os valores ótimos são os que possuíram os maiores Heidke Skill Score. Também são mostrados outros parâmetros estatísticos como o Threat Score (TS), probabilidade de detecção (POD), razão de falso alarme (FAR) e viés, todos também calculados para o valor ótimo.

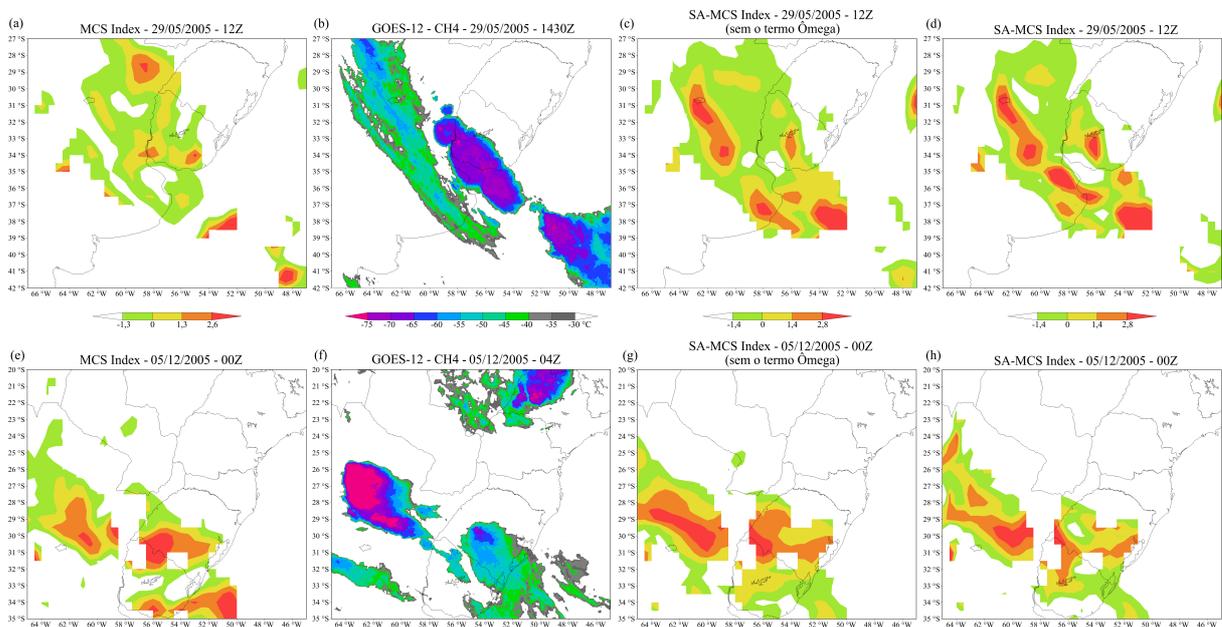
Índice	Valor ótimo	HSS	TS	POD	FAR	Viés
MCS Index	-1,29	0,69	0,61	0,73	0,21	0,92
Modified MCS Index	-0,70	0,68	0,60	0,71	0,21	0,90
SA-MCS Index	-1,40	0,71	0,64	0,77	0,22	0,99
SA-MCS Index 2	-1,74	0,76	0,69	0,80	0,17	0,97
SA-MCS Index 3	-1,71	0,79	0,71	0,78	0,11	0,88

Dois dos SCMs avaliados neste estudo (um linear e outro circular) são mostrados na Figura 10, comparando os valores do MCS Index (JIRAK; COTTON, 2007 – Figura 10(a,e)) e o SA-MCS Index com o termo de Ômega em 800 hPa (Figura 10(d,h)) e com a ausência deste termo (Figura 10(c,g)). Em ambos os episódios foi notado que o SA-MCS Index possuiu valores mais elevados na região de ocorrência de SCM, indicando mais certeza quanto a área de desenvolvimento dos SCMs. Além disso, o MCS Index indicou algumas regiões com valores mais altos afastadas dos SCMs. Também é possível observar que as áreas com falso alarme de SCM diminuíram com a introdução do termo relacionado ao Ômega, mostrando a sua importância. Também foi verificado que o centroide relacionado aos maiores valores do SA-MCS Index esteve posicionado mais próximo do centroide referente a posição de iniciação do SCM que iniciou posteriormente.

Para uma melhor conclusão da performance de cada índice, estes foram avaliados espacialmente também, de modo a medir a distância entre os máximos valores dos índices com o local de iniciação do SCM. Contudo, para esta avaliação, alguns filtros foram utilizados de modo a delimitar com mais precisão as áreas favoráveis a ocorrência de SCM.

Esta questão foi considerada importante, uma vez que valores favoráveis ao desenvolvimento de SCMs podem ocorrer onde não há significância física para a formação de SCM, como uma área com valor elevado do índice em uma região de movimento subsidente. No uso operacional nos EUA, o MCS Index é usado juntamente a um filtro de LI, que considera apenas valores negativos deste para o MCS Index. Para o presente estudo, a condição de LI acima de zero foi consistente com percentil 15 da amostragem de SCMs.

Figura 10 – Avaliação de dois casos de SCMs. (a) MCS Index às 12Z do dia 29 de maio de 2005; (b) canal infravermelho termal realçado do satélite GOES-12 às 1430Z; (c) SA-MCS Index (sem o termo $\hat{\Omega}$) no mesmo instante de (a); (d) assim como (c), porém com o termo $\hat{\Omega}$; (e) MCS Index às 00Z do dia 5 de dezembro de 2005; (f) canal infravermelho termal realçado do satélite GOES-12 às 04Z do dia 5 de dezembro de 2005; (g) assim como (c) mas para o mesmo instante de (e); (h) assim como (d), mas para o mesmo instante de (e).



De modo a testar outras variações de filtros, foram avaliadas outras baseadas no grau de diferenciação de algumas das melhores variáveis para este uso. Isto foi realizado comparando a grade central de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ com as grades adjacentes. Estas variáveis foram: advecção de temperatura em 775 hPa, CIN de superfície, cisalhamento vertical do vento entre 0 e 6 km, lapse rate média entre 500 e 700 hPa, LI+, $\hat{\Omega}$ em 800 hPa, PRNMM, umidade verticalmente integrada nos primeiros 3 km e o vento em 250 hPa. As três melhores variáveis,

com as melhores distinções entre a grade central do SCM e as adjacentes foram: LI+, magnitude do vento em 250 hPa e advecção de temperatura em 775 hPa, nesta ordem.

Em seguida, os valores máximos dos 5 índices foram avaliados dentro do domínio delimitado pelas latitudes 40°S e 20°S e longitudes de 67°W a 45°W. Esta limitação foi definida, uma vez que todos os SCMs ocorreram dentro deste domínio, que compreende a região subtropical da América do Sul, a leste dos Andes. Além disso, foi também considerado que a grade de 2,5° x 2,5° que contivesse o maior valor do índice tivesse pelo menos 20 g.kg⁻¹.m⁻¹ (mm) de umidade verticalmente integrada entre 0 e 3 km, visto que mais de 99% da amostragem de SCMs possuiu valores acima deste em sua grade central.

Os seguintes parâmetros foram avaliados para as grades de 2,5° x 2,5° dos valores máximos de cada índice: número de casos em que esta grade interseccionou exatamente o ponto central onde o SCM se desenvolveu horas depois (centro – Tabela 3), número de casos que esta grade inteseccionou a grade de igual dimensão onde o SCM se desenvolveu (grade – Tabela 3), número de casos em que esta grade se posicionou a no máximo 2,5° de distância do centroide do SCM (até 2,5° – Tabela 3), e finalmente, a distância média entre o centroide de maior valor do índice com o centroide relativo ao SCM (dist. média – Tabela 3).

Tabela 3 – Avaliação dos parâmetros de proximidade para as regiões de valores mais elevados dos 5 índices em comparação com o centroide dos SCMs.

Percentil (%)	Índice	Filtro	Valor	Parâmetro
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	31,30%	até 2.5°
15	SA-MCS Index	LI_P7,5% + vento250_P7,5%	30,43%	até 2.5°
12.5	SA-MCS Index	LI_P8% + vento250_P4%	30,43%	até 2.5°
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	22,61%	grade
15	SA-MCS Index	LI_P7,5% + vento250_P7,5%	21,74%	grade
12.5	SA-MCS Index	LI_P8% + vento250_P4%	21,74%	grade
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	14,78%	centro
15	SA-MCS Index	LI_P7,5% + wind250_P7,5%	14,78%	centro
12.5	SA-MCS Index	LI_P8% + wind250_P4%	14,78%	centro
15	SA-MCS Index 2	LI_P15%	5,80	dist. média (°)
12.5	SA-MCS Index	LI_P8% + wind250_P4%	5,82	dist. média (°)
10	SA-MCS Index	LI_P7% + wind250_P3%	5,83	dist. média (°)

Foi observado que a melhor combinação do índice com filtro foi o SA-MCS Index com o filtro de LI (P 7%) juntamente com o de magnitude do vento em 250 hPa (P 3%) para todos os parâmetros, com exceção da distância média. Contudo, a diferença da menor distância média para a observada com esta combinação foi insignificante. Apesar, de possuir o melhor HSS, o SA-MCS Index 2 e 3 não obtiveram tão boa performance quando o SA-MCS

Index. Isto pode ser explicado pelo comportamento da lapse rate. Quando se analisou somente as grades centradas nos SCMs de 2,5° x 2,5°, esta variável apresentou valores maiores que os observados nos casos de convecção não-organizada. Contudo, quando foi considerado o todo o domínio da América do Sul subtropical e a leste dos Andes, esta variável se mostrou ruidosa e com valores máximos fora da grade central dos SCMs.

A Tabela 4 mostra a melhora que o SA-MCS Index proporcionou quando confrontado ao MCS Index avaliando os SCMs ocorridos dentro do período de estudo. Com relação às grades de 2,5° x 2,5° centradas nos valores máximos do índice que se interseccionavam com o centroide dos SCMs, o SA-MCS Index detectou em torno de duas vezes mais SCMs que o detectado com o MCS Index considerando uma distância máxima de 1°. Quando a grade referente ao valor máximo dos índices interseccionou a grade de mesmo tamanho centrada no centroide do SCM, houve uma melhora de 42,3 %. Já para os valores máximos situados a até 2,5° do centroide do SCM, a melhora foi de 27,8%.

Tabela 4 – Avaliação dos parâmetros de proximidade para as regiões de valores mais elevados do SA-MCS Index e do MCS Index em comparação com o centroide dos SCMs.

Percentil (%)	Índice	Filtro	Valor	Variable
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	31,30%	até 2.5°
15	MCS Index	LI>0 (LI_P15%)	22,61%	até 2.5°
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	22,61%	grade
15	MCS Index	LI>0 (LI_P15%)	13,04%	grade
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	14,78%	centro
15	MCS Index	LI>0 (LI_P15%)	6,96%	centro
10	SA-MCS Index	LI_P7% + vento250_P3%	5,83	distância média (°)
15	MCS Index	LI>0 (LI_P15%)	6,41	distância média (°)

2.4 CONCLUSÕES

No presente estudo, diferenças significativas foram observadas nos campos sinóticos médios em altos e médios níveis, evidenciando o importante papel do núcleo do Jato de Altos Níveis e também a presença de um cavado a oeste da ocorrência dos SCMs no nível de 500 hPa. Em 850 hPa, as diferenças se atenuaram, mas a presença de um cavado a oeste do centroide médio dos SCMs no momento de iniciação seguiu atuando, provendo calor e umidade da Bacia Amazônica, tornando, desta forma, a atividade convectiva mais duradoura. Em superfície, a pressão reduzida ao nível médio do mar possuiu um significativo grau de diferença entre os dois tipos de sistemas convectivos avaliados na maior parte da região

adjacente aos centroides dos SCMs e de convecção não-organizada, com o CAPE de superfície e o LI mais instável se mostrando similares.

Com relação ao SA-MCS Index, este se mostrou mais eficiente que o MCS Index desenvolvido por Jirak e Cotton (2007), quando considerados os eventos de SCMs na região subtropical da América do Sul. Este novo índice desenvolvido possuiu uma melhor qualidade de diferenciação entre os casos de convecção não-organizada e SCMs, demonstrado pelo valor mais alto do Heidke Skill Score. Também teve uma melhor performance na detecção de regiões dos valores máximos dos índices mais próximos aos centroides dos SCMs.

De qualquer modo, é importante enfatizar que o SA-MCS Index deve ser usado como uma ferramenta auxiliar aos meteorologistas na atividade de previsão do tempo, não devendo ser analisado unicamente. É muito importante avaliar o ambiente sinótico, como o posicionamento do núcleo do Jato de Altos Níveis, um cavado em médios e baixos níveis e também observar o campo de lapse rate média de 500 a 700 hPa na região de interesse.

2.5 REFERÊNCIAS

ALPERT, P.; EPPEL, E. A proposed index for mesoscale activity. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.24, 472–480. 1985

ANABOR, V.; STENSRUD, D. J. de MORAES, O. L. Serial upstream propagating mesoscale convective system events over southeastern South America. **Monthly Weather Review**, v.136, 3087–3105. 2008.

ANDERSON, C. J; ARRITT, R. W. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993. **Monthly Weather Review**, 126, 578–599. 1998.

BROOKS, H. E.; LEE, J. W; CRAVEN, J. P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. **Atmospheric Research**, v.67-68, 73-94. 2003.

CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: a review and case studies for the first decade of the 21st century. **Atmospheric Research**, 118, 27–40. 2012.

COHEN, A. E.; CONIGLIO, M. C.; CORFIDI, S. J. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations. **Weather and Forecasting**, v.22, 1045–1062. 2007.

CONIGLIO, M. C.; STENSRUD, D. J.; WICKLER, L. J. Effects of upper-level shear on the structure and maintenance of strong quasi-linear mesoscale convective systems. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.63, 1231–1252. 2006.

- CONIGLIO, M. C.; BROOKS, H. E.; WEISS, S. J.; CORFIDI, S. F. Forecasting the maintenance of quasi-linear mesoscale convective systems. **Weather and Forecasting**, v.22, 556–570. 2007.
- CONIGLIO, M. C.; HWANG, J. Y.; STENSRUD, D. J. Environmental Factors in the Upscale Growth and Longevity of MCSs Derived from Rapid Update Cycle Analyses. **Monthly Weather Review**, v.138, 3514–3539. 2010.
- CRAVEN, J. P.; BROOKS, H. E. Baseline Climatology of Sondings derived parameters associated with deep moist convection. **National Weather Digest**, v.28, 13-24. 2004.
- DURKEE, J. D.; MOTE, T. L.; SHEPHERD, J. M. The Contribution of Mesoscale Convective Complexes to Rainfall across Subtropical South America. **Journal of Climate**, v.22, 4590–4605. 2009.
- EMANUEL, K.. **Atmospheric Convection**. Oxford University Press, 1994, 580 p.
- FERREIRA, V; ANABOR, V. PyStormTracker: rastreador de tempestades. In: VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2013, **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2013, CD-ROM.
- FOVELL, R. G.; RUBIN-OSTER, B.; KIM, S. A discretely propagating nocturnal Oklahoma squall line: Observations and numerical simulations. In: 22d Conf. on Severe Local Storms, **Anais...** Hyannis, MA: Amer. Meteor. Soc., 2005. Disponível em: <<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/82021.pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2017.
- FRITSCH J. M.; FORBES, G. Mesoscale convective systems. **Meteorological Monographs** v.28(50), 323–358. 2001.
- HENRY NL. A Static Stability Index for Low-Topped Convection. **Weather and Forecasting**, v.15, 246–254. 2000.
- HOUZE Jr., R. A. **Cloud Dynamics**, Academic, San Diego, Calif., 1993. 573 pp.
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems. **Weather and Forecasting**, v.22, 813–838. 2007.
- JIRAK IL, COTTON WR, MCANELLY RL. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. **Monthly Weather Review**, v.131(10):2428–2449. 2003.
- JOHNSON, R. H.; MAPES, B. E. Mesoscale processes and severe convective weather. In: Severe Convective Storms, C. A. Doswell III (Ed.), **American Meteorological Society Meteorological Monographs**, v.28, n. 50, p. 71-122. 2001.
- KOENIG, M.; CONING, E. The MSG Global Instability Indices Product and Its Use as a Nowcasting Tool. **Weather and Forecasting**, v.24, 272–285. 2009.
- LETKEWICZ, C. E.; PARKER, M. D.. Forecasting the Maintenance of Mesoscale Convective Systems Crossing the Appalachian Mountains. **Weather and Forecasting**, v.25, 1179–1195. 2010.

- LIU, C.; ZIPSER, E. J. “Warm Rain” in the tropics: seasonal and regional distributions based on 9 yr of TRMM data. **Journal of Climate**, v.22, 767–779. 2009.
- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B. Structural characteristics and radiative of tropical cloud clusters. **Monthly Weather Review**, v.121, 3234–3260. 1993.
- MACHADO, L. A. T.; DESBOIS, M.; DUVEL, J. P. Structural characteristics of deep convective systems over tropical Africa and the Atlantic Ocean. **Monthly Weather Review**, v.120, 392–406. 1992.
- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v.126, 1630–1654. 1998.
- MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.61, 1374–1387. 1980.
- MADDOX, R. A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. **Monthly Weather Review**, v.111, 126–140. 1983.
- MADDOX, R. A.; ROGERS, D. M.; HOWARD, K. W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1981—An annual summary. **Monthly Weather Review**, v.110, 1501–1514. 1982.
- MATSUDO, C. M.; SALIO, P. V. Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. **Atmospheric Research**, v.100(4), 523–537. 2011
- NASCIMENTO EL. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n. 1, p. 121–140. 2005.
- NICOLINI, M.; SAULO, A. C.; TORRES, J. C.; SALIO, P. Enhanced precipitation over southeastern America related to strong low-level jet events during austral warm season. **Meteorologica**, v.27, 59–69. 2002.
- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 545–567. 2004a.
- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 1637–1655. 2004b.
- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and maintenance. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 1656–1673. 2004c.
- RASMUSSEN, K. L.; HOUZE Jr., R. A. Orographic Convection in Subtropical South America as Seen by the TRMM Satellite. **Monthly Weather Review**, v.139, 2399–2420. 2011.

SAHA, S. et al. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National centre for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5065/D69K487J>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

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

SHI, X.; WANG, Y.; XU, X. Effect of mesoscale topography over the Tibetan Plateau on summer precipitation in China: A regional model study, **Geophysical Research Letters**, v.35, L19707, 1-5. doi:10.1029/2008GL034740. 2008.

TEIXEIRA, M.; SATYAMURTY, P. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. **Monthly Weather Review**, v.135(2), 598–617. 2007.

TRIER, S. B.; DAVIS, C. A. Propagating nocturnal convection within a 7-day WRF–model simulation. Preprints, 32d Conf. on Radar Meteorology and 11th Conf. on Mesoscale Processes, **Anais...**, Albuquerque, NM: Amer. Meteor. Soc., 2005. CDROM, P2M.1.

VELASCO, I. Y.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v.92, 9591–9613. 1987.

WEISMAN M. The genesis of severe, long-lived bow echoes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.50, 645-670. 1993

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. **Monthly Weather Review**, v.110, 504–520. 1982.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. **Monthly Weather Review**, v.112, 2479–2498. 1984.

WEISMAN, M. L.; ROTUNNO, R. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 361–382. 2004.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition**. Academic Press, 2006. 630 p.

ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J.; LIU, C.; NESBITT, S.W; YORTY, D. P. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.87, 1057–1071. 2006.

3 AVALIANDO UM ÍNDICE DE SCM NO SUL DO BRASIL PARA DOIS SCMS BREVES E QUE GERARAM DANOS ²

3.1 INTRODUÇÃO

Sistemas convectivos de mesoescala são classificados como um agrupamento de nuvens convectivas que se tornam organizadas em um único sistema, com uma extensa estrutura vertical em altos níveis, com topos de nuvens cirriformes e uma grande área contígua com precipitação numa direção com extensão aproximada de 100 km (HOUZE, 1993).

Esses sistemas começaram a ser estudados profundamente pela primeira vez por Maddox (1980), que analisou um tipo particular com formato circular que ocorreram nos Estados Unidos. Na América do Sul, o estudo foi iniciado por Velasco e Fritsch (1987) e tem sido estudado extensivamente desde então.

Outra característica desses sistemas é que eles podem assumir vários formatos, desde o mais linear até o mais circular. Essa característica é calculada a partir da razão entre dois eixos ortogonais. Os SCMs mais circulares são classificados como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), quando satisfazem um critério específico de tamanho para diferentes limiares de temperatura e duração mínima de 6 horas (MADDOX, 1980). Os SCMs mais alongados são, quando também satisfazem o critério de duração de CCM, são classificados como Sistemas Convectivos Alongados Persistentes (PECS – ANDERSON; ARRITT, 1998).

Várias metodologias têm sido utilizadas para limiares de temperatura na detecção de SCMs através do canal infravermelho termal das imagens de satélite. Contudo, utilizando -55 °C como limiar para uma área mínima de 100.000 km² apresentaram um bom resultado para detectar convecção profunda em topos de nuvens observados por volta de 12 km de altitude (MACHADO et al., 1998).

A contribuição da precipitação causada por esses sistemas é muito importante em várias regiões do globo, como a porção a leste dos Andes, na América do Sul subtropical (DURKEE; MOTE; SHEPHERD, 2009), que tem um das mais altas incidências de SCMs de todo o mundo (ZIPSER et al., 2006; SALIO; NICOLINI; ZIPSER, 2007; LIU; ZIPSER, 2009). Além disso, SCMs são comumente relacionados com a geração de tempo severo (MADDOX; ROGERS; HOWARD, 1982; JIRAK; COTTON; MCANELLY, 2003; MATSUDO; SALIO, 2011).

² Artigo publicado na revista American Journal of Environmental Engineering.

Dada a importância de tais sistemas, vários autores propuseram o uso de índices termodinâmicos e também já confeccionaram índice com múltiplas variáveis para auxiliar na previsão do desenvolvimento convectivo e potencial para tempo severo (WEISMAN; KLEMP, 1982; WEISMAN; KLEMP, 1984; KOENIG; CONING, 2009) e um especialmente para SCM, baseado na climatologia dos EUA, proposto por Jirak e Cotton (daqui em diante referido como MCS Index – JIRAK; COTTON, 2007).

Devido a essa grande relação com tempo severo e sua grande ocorrência na região subtropical da América do Sul, o objetivo deste estudo foi testar um índice alternativo, de previsão de SCM baseado na climatologia da região. Para isto foram escolhidos dois casos de SCMs que ocorreram em outubro de 2015, no sul do Brasil (Rio Grande do Sul – RS) e também no Uruguai, que causaram danos de tempo severo.

3.2 DADOS E METODOLOGIA

Para a confecção deste estudo foram utilizadas imagens do satélite GOES-13, no canal 4, infravermelho termal, com resolução espacial de 4 km x 4 km no seu ponto sub-satélite. Estas imagens foram fundamentais para detectar a configuração e os diferentes estágios dos SCMs utilizando-se do limiar de temperatura de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre uma área de 100.000 km² e comparando a posição do sistema com as previstas pelos índices de SCM testados. Essas imagens de satélite foram obtidas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

Também foram utilizados dados de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da imprensa do Uruguai para obter valores de acumulados de precipitação, rajadas de vento e informações de tempo severo.

Além disso foram utilizados dados de análise e previsão (somente para até 3 horas posteriores) do modelo Global Forecast System (GFS), com resolução espacial de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ para calcular o novo índice de SCM proposto para a América do Sul (explicado em detalhes num próximo estudo) para diferentes estágios de dois SCMs.

Também foi calculado o índice de SCM desenvolvido por Jirak e Cotton (2007) para fim de comparação com o índice de SCM alternativo proposto neste estudo.

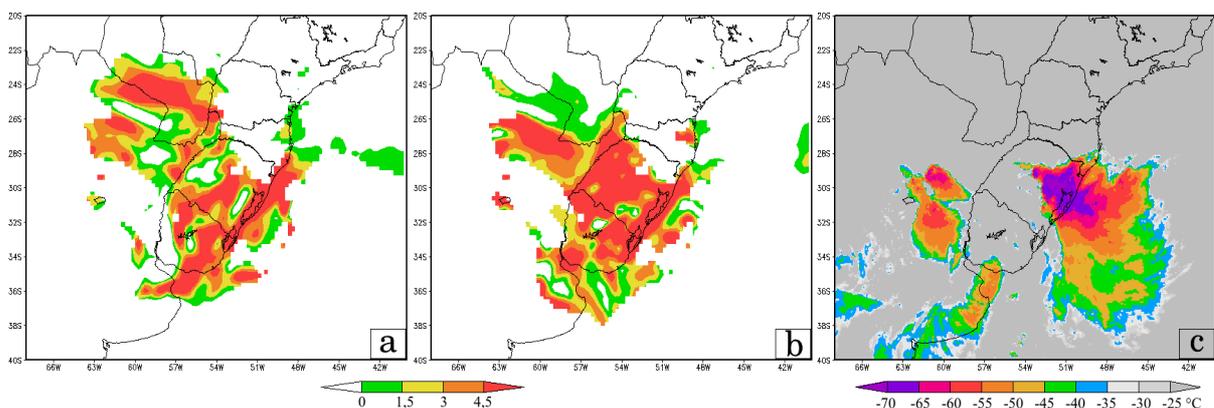
Os dois índices de SCM são compostos por algumas variáveis representativas observadas nos momentos anteriores à configuração dos SCMs. Considera-se a média e o desvio padrão destas variáveis, fazendo com que estes índices sejam adimensionais. Quanto maior o valor, maior a possibilidade de configuração de um SCM nas horas subsequentes.

Estes dois índices foram calibrados especificamente com o propósito de diferenciarem ambientes conducentes à geração de sistemas convectivos não-organizados daqueles que produzem um SCM. No índice de SCM proposto as principais mudanças foram a adição da variável de velocidade vertical, uma redução do nível de advecção de temperatura considerada e um aprofundamento do cisalhamento vertical do vento.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro SCM (15 de outubro de 2015) alcançou uma área superior a 125.000 km² e atravessou o RS, causando notificações de tempo severo sobre 27 municípios, entre eles, granizo, chuva intensa (até 93 mm em 10 horas) e fortes rajadas de vento (próximo a 25 m.s⁻¹). Este sistema durou apenas 4 horas desde que alcançou o critério de tamanho mínimo até decair e se agrupar com outro SCM. Este caso foi escolhido devido a sua complexidade para a previsão, uma vez que possuiu um curto ciclo de vida e devido a interação com outro SCM em sua retaguarda. A imagem de satélite no canal infravermelho realçada pode ser observada na Figura 1c. O centro do SCM está localizado sobre a região nordeste do RS (30°S, 50°W).

Figura 1 - (a) MCS Index 2,5 horas antes do estágio de iniciação; (b) MCS Index alternativo 2,5 horas antes do estágio de iniciação; (c) SCM ocorrido em 14 de outubro de 2015 no estágio de iniciação.

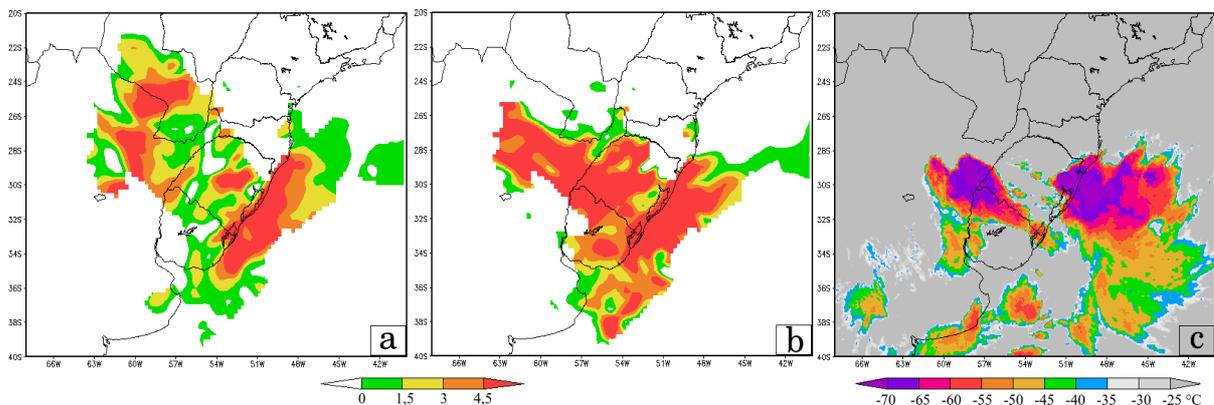


A performance dos dois índices pode ser visualizada comparando a Figura 1a (MCS Index) com a Figura 1b (novo índice proposto), com uma imagem de satélite num instante posterior (2:30 depois). Pode ser observado que os dois índices indicaram alta probabilidade de ocorrência de SCM sobre o nordeste do RS, mas o MCS Index teve um padrão de mais espalhamento que o índice proposto. Além disso, o MCS Index pontuou uma área de intensidade com falso alarme sobre a região central do Paraguai (24 °S, 58 °W), enquanto que

o índice proposto indicou apenas uma baixa probabilidade de desenvolvimento de um SCM nas horas seguintes para esta região. Sobre o nordeste da Argentina, onde uma região convectiva pode ser observada na Figura 1c, os dois índices não coincidiram muito bem com o observado, contudo o índice proposto foi mais intenso nas vizinhanças que o outro.

O estágio de maturação (tamanho máximo alcançado pelo SCM) do primeiro SCM pode ser visualizado na Figura 2. É notado um deslocamento do SCM para leste, e o desenvolvimento de um outro sistema para oeste (Figura 2c). O MCS Index (Figura 2a) mantém a alta probabilidade de configuração de um SCM sobre o Paraguai, onde nenhum sistema convectivo é observado. Embora o MCS Index tenha detectado uma alta probabilidade de ocorrência no centro do SCM, o índice aqui proposto apresentou uma possibilidade de ocorrência numa área mais restrita ao SCM observado e aos demais sistemas convectivos nas vizinhanças (Figura 2b).

Figura 2 - (a) MCS Index 2 horas antes do estágio de maturação; (b) MCS Index alternativo 2 horas antes do estágio de maturação; (c) SCM ocorrido em 14 de outubro de 2015 no estágio de maturação (tamanho máximo).



A Figura 3c ilustra o estágio de dissipação do primeiro SCM analisado. O MCS Index (Figura 3a) segue mantendo a alta probabilidade de ocorrência do SCM sobre o Paraguai, ao contrário, o índice proposto não mostra nada para esta região, como pode ser observado horas depois na imagem de satélite. Sobre o SCM o MCS Index foi menos intenso que o índice proposto, e este último mostrou um formato mais similar com o sistema. Ambos detectaram razoavelmente bem o desenvolvimento do outro SCM na retaguarda (30°S, 57°W – Figura 3c).

O segundo caso estudado ocorreu em 20 de outubro de 2015, alcançando mais de 280.000 km², o que acarretou na geração de algumas notificações de tempo severo no RS e também no Uruguai, como precipitação intensa (quase 82 mm em apenas 4 horas), rajadas de

vento intensas (acima de 25 m.s^{-1}), além de deslizamento de terra. Este SCM durou um pouco mais em relação ao primeiro (7 horas de ciclo de vida). Diferentemente do primeiro SCM analisado, este não apresentou nenhuma interação com outro sistema após sua dissipação. No estágio de iniciação o SCM foi observado sobre o Uruguai (33°S , 55°W) e esteve presente de forma mais linear (Figura 4c).

Figura 3 - (a) MCS Index 0,5 hora antes do estágio de dissipação; (b) MCS Index alternativo 0,5 hora antes do estágio de dissipação; (c) SCM ocorrido em 14 de outubro de 2015 no estágio de dissipação (tamanho máximo).

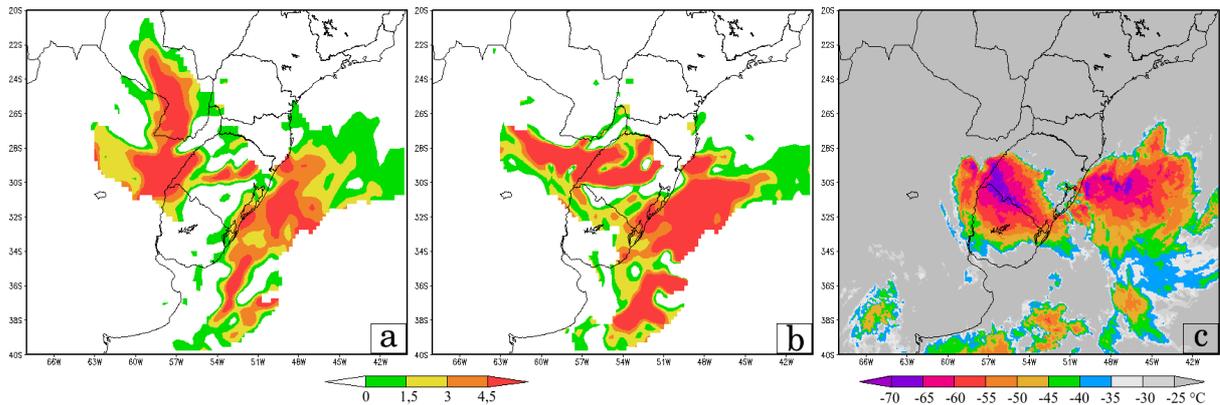
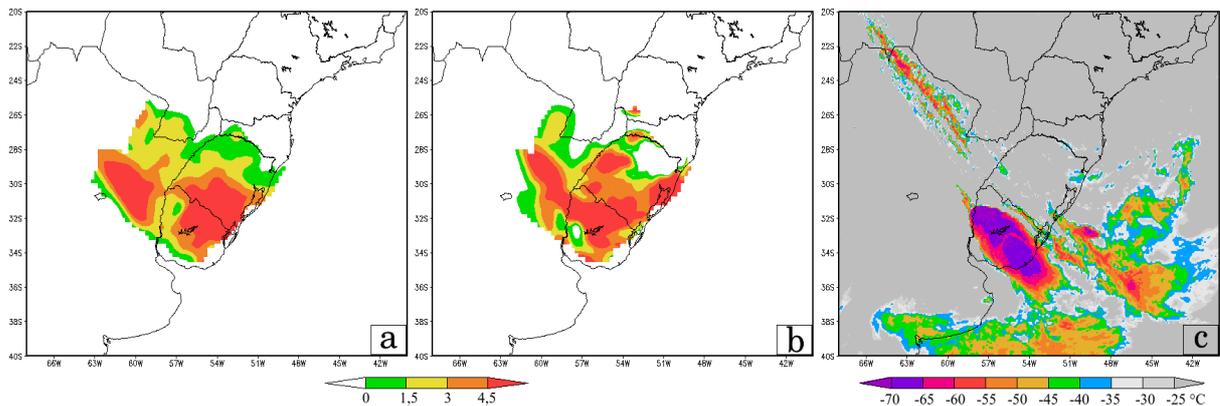


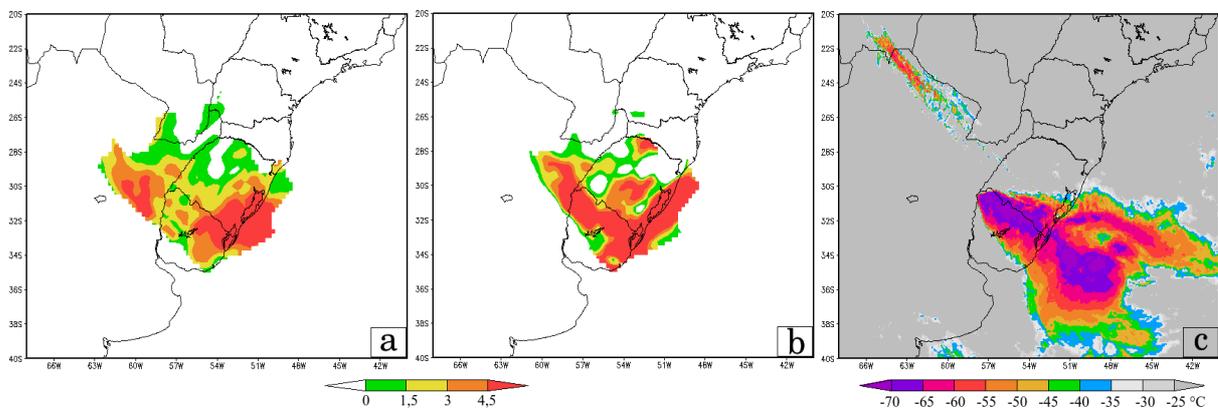
Figura 4 - (a) MCS Index 1 hora antes do estágio de iniciação; (b) MCS Index alternativo 1 hora do estágio de iniciação; (c) SCM ocorrido em 20 de outubro de 2015 no estágio de iniciação.



O índice proposto (Figura 4b) foi o que melhor representou este formato mais linear, ao contrário do MCS Index que mostrou uma segmentação sobre seus valores máximos, sugerindo uma futura ocorrência de dois diferentes sistemas (Figura 4a), o que não foi observado na imagem de satélite. Em geral, os dois índices não mostraram nada aonde a convecção não foi intensa.

O estágio de maturação observado sobre a fronteira entre o Brasil (RS) e o Uruguai também avançando sobre o Oceano Atlântico (33°S , 52°W – Figura 5c). O MCS Index seguiu indicando dois valores máximos (Figura 5a), onde somente um único SCM se desenvolveu. Ao contrário deste, o índice proposto manteve sua previsão de apenas um único sistema, com somente um máximo centrado próximo do SCM observado, além de possuir um formato mais condizente com o observado pelo SCM.

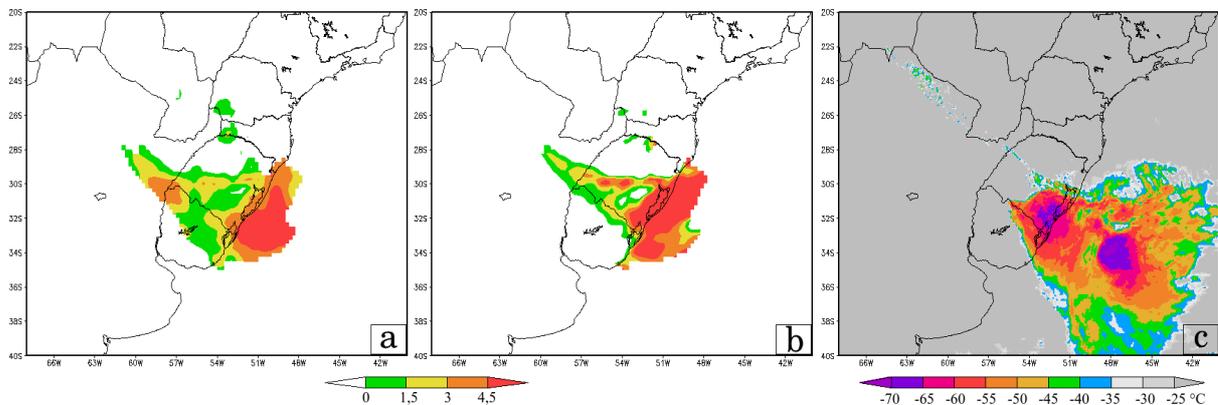
Figura 5 - (a) MCS Index 2,5 horas antes do estágio de maturação; (b) MCS Index alternativo 2,5 horas antes do estágio de maturação; (c) SCM ocorrido em 20 de outubro de 2015 no estágio de maturação (tamanho máximo).



O último estágio do segundo SCM analisado é ilustrado na Figura 6c. Pode ser observado o início de um processo de separação em dois sistemas, e em consequência disto o critério de tamanho mínimo é desfeito. Este SCM, assim como o outro, migrou para leste, com o deslocamento médio para leste esperado para esta latitude, nos médios e altos níveis da atmosfera, sem o posterior desenvolvimento corrente acima do escoamento como os SCMs analisados por ANABOR; STENSRUD; MORAES (2008) para esta região.

O MCS Index deslocou para leste seus valores máximos comparados ao SCM observado (Figura 6a), onde o índice proposto possuiu maior acurácia, delimitando seus valores mais intensos com a localização do SCM (32°S , 52°W). Sobre a fronteira entre Brasil (RS), Argentina e Uruguai (30°S , 58°W) o MCS Index indicou uma probabilidade mais alta de ocorrência de SCM, onde nenhum sistema foi observado nas horas posteriores, enquanto que o índice proposto indicou apenas uma pequena chance.

Figura 6 - (a) MCS Index 2,5 horas antes do estágio de dissipação; (b) MCS Index alternativo 2,5 horas antes do estágio de dissipação; (c) SCM ocorrido em 20 de outubro de 2015 no estágio de dissipação.



3.4 CONCLUSÃO

Este estudo discute um possível uso operacional de um índice de SCM alternativo, desenvolvido para a América do Sul, mostrando uma melhor performance comparado ao índice de SCM já existente, desenvolvido para casos de SCMs nos EUA. Isto mostra que para os SCMs sul-americanos a advecção de temperatura é mais importante em níveis mais baixos do que aqueles que ocorrem nos EUA, além de uma camada mais profunda do cisalhamento vertical do vento e a inclusão da velocidade vertical. A região de valores máximos do novo índice proposto se assemelharam mais com o formato com os núcleos convectivos dos SCMs observados horas depois. A região demarcada pelo índice também foi menor que o MCS Index, facilitando o monitoramento e previsão do SCM nas horas subsequentes.

Esta região do globo tem uma alta frequência de SCMs, e este novo índice de SCM pode melhorar a previsão destes sistemas, auxiliando os centros de previsão e tomadores de decisão a mitigarem os danos gerados pelos SCMs.

3.5 REFERÊNCIAS

ANABOR, V.; STENSRUD, D. J.; de MORAES, O. L. Serial upstream propagating mesoscale convective system events over south-eastern South America. **Monthly Weather Review**, v.136, 3087–3105. 2008.

ANDERSON, C. J.; ARRITT, R. W., 1998, Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993. **Monthly Weather Review**, v.126, 578–599. 1998.

- DURKEE, J. D.; MOTE, T. L.; SHEPHERD J. M, The Contribution of Mesoscale Convective Complexes to Rainfall across Subtropical South America. **Journal of Climate**, v.22, 4590–4605. 2009.
- HOUZE, R. A., Jr. *Cloud Dynamics*, 573 pp., Academic, San Diego, Calif, 1993.
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R.; MCANELLY, R. L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. **Monthly Weather Review**, v.131, 2428–2449. 2003.
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems. **Weather Forecasting**, v. 22, 813–838. 2007.
- KOENIG, M.; CONING, E. The MSG Global Instability Indices Product and Its Use as a Nowcasting Tool. **Wea. Forecasting**, v.24, 272–285. 2009.
- LIU, C., ZIPSER, E.J. “Warm Rain” in the tropics: seasonal and regional distributions based on 9 yr of TRMM data. **Journal of Climate**, v.22, 767–779. 2009.
- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v.126, 1630-1654. 1998.
- MADDOX, R. A., Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.61, 1374–1387. 1980.
- MADDOX, R. A.; ROGERS, D. M.; HOWARD, K. W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1981—An annual summary. **Monthly Weather Review**, v.110, 1501–1514. 1982.
- MATSUDO, C. M.; SALIO, P. V. Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. **Atmospheric Research**, v.100(4), 523-537, 2011.
- SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E.J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v.135, 1290–1309. 2007.
- VELASCO, I. Y.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **J. Geophys. Res.**, v.92, 9591–9613. 1987.
- WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. **Monthly Weather Review**, v.110, 504–520. 1982.
- WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. **Monthly Weather Review**, v.112, 2479–2498. 1984.
- ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J.; LIU, C.; NESBITT, S.W; YORTY, D. P. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.87, 1057–1071. 2006.

4 APLICAÇÕES DO ÍNDICE DE SCM DA AMÉRICA DO SUL EM AMBIENTE OPERACIONAL E ACOPLAMENTO COM ÍNDICES DE VENTO PARA O RIO GRANDE DO SUL³

4.1 INTRODUÇÃO

A Bacia do Prata, situada na América do Sul, é uma região do globo bem conhecida por sofrer grande impacto de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs – ZIPSER et al., 2006; SALIO et al., 2007; ANABOR et al., 2008; LIU; ZIPSER, 2009) e por danos de tempo severo que são frequentemente associados a esses sistemas (MADDOX; ROGERS; HOWARD, 1982; JIRAK; COTTON; MCANELLY, 2003; MATSUDO; SALIO, 2011).

No entanto, a previsibilidade dos SCMs ainda é uma dificuldade para os meteorologistas, visto que nem sempre as condições sinóticas presentes que inciam a convecção são também suficientes para que o sistema convectivo se sustente e organize-se como um SCM (JIRAK; COTTON, 2007). É necessário se ter um conhecimento de como a convecção profunda interage com o ambiente no entorno (WEISMAN; ROTUNNO, 2004), bem como considerar a influência das características de mesoescala preexistentes (FRITSCH; FORBES, 2001; TRIER; DAVIS 2005).

Com o intuito de considerar as diversas variáveis que influenciam a organização de um SCM, Jirak e Cotton desenvolveram um índice objetivo que indica a probabilidade de ocorrência de um SCM. Para isso consideraram a climatologia de SCMs nos EUA durante as estações quentes de 1996 a 1998. Concluíram, desta forma, que a advecção de temperatura em 700 hPa, índice de levantamento e o cisalhamento vertical do vento entre 0 e 3 km formaram os 3 termos deste índice.

Contudo, diferenças físicas entre os continentes, como proporção de água e terra, formato da cadeia de montanhas podem influenciar significativamente as variáveis meteorológicas na atmosfera. Isto é confirmado pelo estudo de Rasmussen e Houze (2011), em que os autores concluem que ocorre uma participação maior do relevo no disparo convectivo dos SCMs da América do Sul subtropical comparados aqueles ocorridos nos EUA.

Dessa forma, em um artigo a ser publicado, foi desenvolvido um índice de SCM para a América do Sul (SA-MCS Index) baseando-se nos ingredientes-chave mais significativos para o desenvolvimento de SCM ocorridos entre 2005 e 2010. Constatou-se que uma mudança no nível de advecção de temperatura para 775 hPa, um cisalhamento vertical do vento mais

³ Artigo a ser submetido.

profundo (0 a 6 km) a adição do termo ômega em 800 hPa), além da manutenção do índice de levantamento.

Dentre os eventos de tempo severo registrados pela Defesa Civil do Rio Grande do Sul (DCRS) desde 2003, aqueles relacionados a ventos intensos são frequentemente observados, tendo sido o mais comum em vários anos.

A dinâmica do desenvolvimento dos ventos intensos em superfície, causados por tempestades, está relacionada com fortes correntes descendentes de ar mais denso (frio) que atingem a superfície e ocasionalmente geram danos dependendo de sua intensidade.

Alguns destes casos, cuja intensidade do vento é alta, se configuram como downbursts, que Fujita (1985) divide em duas categorias baseando-se na extensão da tempestade causadora dos ventos intensos. Caso a extensão horizontal não supere 4 km, então é classificado como microburst (microexplosão), senão, são denominados macroburst.

Ocorre uma grande dificuldade na previsão deste tipo de fenômeno através de radar meteorológico, uma vez que as microexplosões costumam evoluir a partir de um estágio de correntes ascendentes em questão de minutos (WILSON et al. 1984; PROCTOR, 1988; ROBERTS; WILSON, 1989). Contudo, segundo McCann (1994), já existe considerável conhecimento para a previsão de potencial desenvolvimento deste tipo de fenômeno, pelo menos numa escala de mesoescala.

Baseado nisso, McCann (1994) desenvolveu um índice de vento (Windex), utilizando-se de casos de microexplosões ocorridas nos EUA, que considera algumas variáveis, em que a lapse rate tem a maior contribuição. Na Austrália, Geerts (2000) utilizou-se de estações meteorológicas de superfície para calibrar um índice de vento, utilizando o Windex como um dos termos acrescido da componente zonal do vento em 500 hPa.

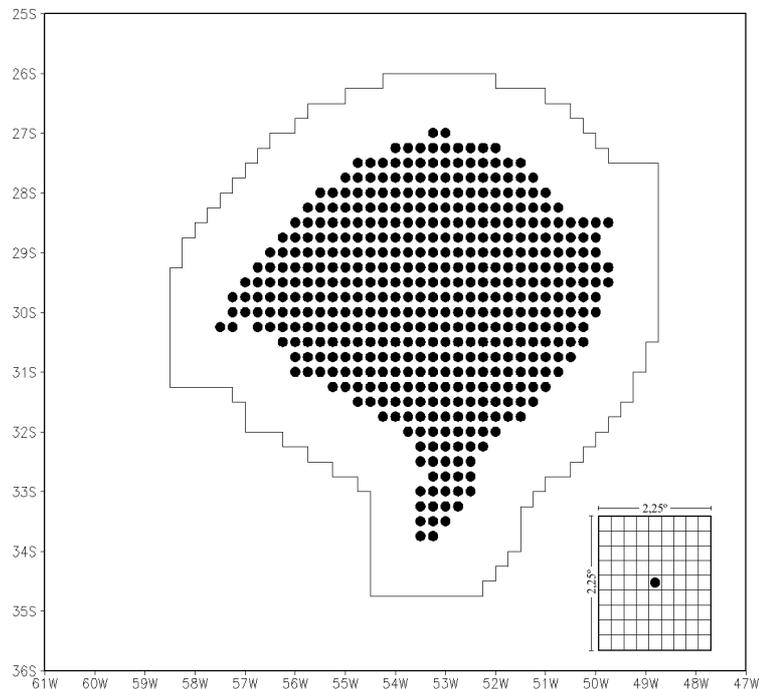
Contudo, como mencionado anteriormente, diferenças geográficas entre os continentes modificam a atmosfera nos níveis mais baixos, região em que algumas variáveis do Windex, e por consequência do Gustex, se encontram, inclusive a lapse rate. Tendo isto em vista, este estudo tem como um dos objetivos primários a calibração do Windex e do Gustex, levando em consideração os valores de lapse rate encontrados nos vendavais associados a SCMs na América do Sul entre 2005 e 2010.

Neste estudo duas questões principais são discutidas: a) a viabilidade do uso operacional do SA-MCS Index utilizando o modelo global de previsão do tempo Global Forecast System (GFS 0,25°) com produtos de previsão num horizonte de 24 horas e b) um possível uso acoplado do SA-MCS Index com índices preditores de rajadas de vento associados a microexplosões.

4.2 DADOS E METODOLOGIA

Este estudo foi dividido em duas etapas. Primeiramente, as destrezas de três índices de SCM foram avaliadas baseado nas suas capacidades de detectarem corretamente a previsão de SCMs para o Estado do Rio Grande do Sul (RS). Para isso foram utilizados os produtos de previsão do Global Forecast System (GFS), com resolução espacial de $0,25^\circ$, num horizonte de 24 horas, com intervalo de 3 horas, entre setembro de 2015 e abril de 2016. Para cada índice foi verificado durante os 9 horários de previsão, dos 243 dias, a média para cada um dos 460 domínios de $2,25^\circ \times 2,25^\circ$ que cobrem o RS (Figura 1) e então obtido o valor máximo entre todos estes domínios naquele instante de tempo. Após a obtenção dos valores máximo de cada um dos 9 horários foi destacado o horário de maior magnitude para os 3 índices. Caso o limiar mínimo de valor ótimo de cada índice fosse atingido, este dia seria considerado como favorável a ocorrência de SCMs sobre o RS.

Figura 1 – Domínio utilizado na avaliação dos 3 índice de SCMs através de produtos de previsão para até 24 horas do modelo GFS $0,25^\circ$. No canto baixo esquerdo consta as dimensões das grades móveis ($2,25^\circ \times 2,25^\circ$) centradas em cada um dos pontos do domínio.



Os índices de SCM analisados aqui foram: i) MCS Index (JIRAK; COTTON, 2007) utilizando como filtro as regiões com índice de levantamento (LI) positivo, conforme o modo que é utilizado na operação dos centros de previsão norte-americanos, ii) SA-MCS Index

utilizando seu esquema de filtro originalmente proposto em artigo a ser publicado, com filtro utilizando LI acima de 0,94 K e a magnitude do vento em 250 hPa quando abaixo de 9,69 m.s-1 e iii) SA-MCS Index utilizando o mesmo critério de filtro que o descrito em (i) (SA-MCS-LI Index). Este último índice foi utilizado para fins de comparação com o MCS Index, uma vez que ambos levam em consideração o mesmo filtro, e também para avaliar se a mudança de filtro acarretou melhoras nesta avaliação com produtos de previsão do GFS.

Os sistemas meteorológicos foram avaliados através de análise do topo das nuvens pela temperatura de brilho fornecida pelo canal infravermelho do satélite GOES-13 e então classificados em 6 categorias: i) céu aberto, ii) pouca nebulosidade, iii) nebulosidade baixa, iv) convecção não-organizada, v) sistemas organizados (sistemas frontais e cavados em superfície) e vi) SCMs.

Foi classificado como “céu claro” os dias em que em nenhum momento houve nebulosidade sobre o RS. A categoria “pouca nebulosidade” se aplicou a dias em que a nebulosidade se deu de maneira parcial, com temperatura de brilho superior a -30°C . “Nebulosidade baixa” foi caracterizada quando ocorria de maneira contígua sobre o RS, com temperatura de brilho de topo da nuvem superior a -40°C . “Sistemas organizados” foram aqueles sistemas que foram organizados por sistemas frontais ou por cavados em superfície atuantes sobre o RS. “Convecção não-organizada” deu nome àqueles sistemas convectivos que ocorreram de modo disperso, sem que houvesse organização em um único sistema convectivo de mesoescala, considerando a temperatura de brilho inferior a -55°C com área de 100.000 km². Por fim, foram classificados como dias de SCM aqueles em que houve a organização de um SCM considerando o critério de área superior a 100.000 km² com temperatura de brilho inferior a -55°C .

Se o ciclo de vida de um SCM ultrapassa a duração de um dia são contabilizados como havendo 2 dias de SCM. Sempre foi considerado o sistema convectivo mais intenso naquele dia, por exemplo, caso um SCM tenha se dissipado nas primeiras horas da manhã e o restante do dia foi de predominância de céu aberto, este dia foi considerado como um dia com SCM. Além disso, foi utilizado o banco de dados da DCRS para uma avaliação associativa entre os tipos de sistemas meteorológicos ocorridos com a ocorrência de tempo severo.

Na segunda parte do estudo foi testado o uso acoplado do SA-MCS Index com dois índices preditores de rajadas de vento associados a microexplosões, o Windex (MCCANN, 1994) e o Gustex (GEERTS, 2001). Os dados utilizados para o cálculo dos índices foram provenientes do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR – SAHA et al., 2010) entre maio de 2005 e dezembro de 2010. Estes dados de reanálises possuem resolução espacial de $0,5^{\circ} \times$

0,5° e intervalo temporal de 6 horas. Este período foi escolhido por cobrir um robusto banco de dados de SCMs na América do Sul subtropical e utilizado também para o desenvolvimento do SA-MCS Index.

No período compreendido por maio de 2005 a dezembro de 2010, 115 SCMs se configuraram na região subtropical da América do Sul. Apresentaram área contígua mínima de 100.000 km² com temperatura de brilho inferior a -55°C e duraram no mínimo 6 horas com esse tamanho. A partir deste conjunto de SCMs acompanhado dos dados de vendaval da DCRS foi possível destacar 28 SCMs associados a vendaval sobre o RS.

Uma vez que o SA-MCS Index produziu uma melhora na detecção de SCMs sobre a América do Sul, comparado ao índice de SCM existente (MCS Index), o uso de um outro índice relacionado a rajadas de vento intenso combinado com o SA-MCS Index se mostra uma ideia interessante a ser investigada na previsão de vendavais associados a SCMs. Dois importantes índices relacionados ao potencial para fortes rajadas de vento associados a microexplosões são definidos abaixo:

$$\text{Windex} = 5 (H_M R_Q (\Gamma^2 - 30 + Q_L - 2 Q_M)) \quad (1)$$

$$\text{Gustex} = \alpha \text{Windex} + 0,5 U_{500} \quad (2)$$

Ambos os índices estimam a velocidade do vento em unidade de nós. H_M é a altura do nível de derretimento dos hidrometeoros (km); $R_Q = Q_L/12$, é uma tentativa empírica para considerar uma superestimativa do Windex em ambientes secos; Γ é a taxa de variação vertical da temperatura (lapse rate – °C.km⁻¹) da superfície até o nível de derretimento, Q_L é a razão de mistura no primeiro quilômetro acima da superfície (g.kg⁻¹) e Q_M é a razão de mistura no nível de derretimento (g.kg⁻¹). Gustex está associado ao Windex e utiliza uma constante “ α ” a ser calibrada entre 0 e 1; a segunda constante “0,5” deriva da razão $\rho_{500}/\rho_{1000} \sim 0,5$, onde ρ é a densidade do ar e U_{500} a magnitude do vetor vento em 500 hPa (nós).

Como pode ser visto na equação 1, a lapse rate possui uma grande contribuição nos dois índices, visto que está elevada ao quadrado. O número 30 que subtrai o termo da lapse rate funciona como uma função de “corte”, uma vez que faz o índice desconsiderar eventos de rajada de ventos em ambientes cuja lapse rate seja menor que 5,5 °C.km⁻¹. Contudo, analisando os eventos de vendaval associados a SCMs no RS nos 5 diferentes domínios centrados nos municípios atingidos (Figura 2), pode ser visto que a lapse rate alcançou valores em torno de 4,5 °C.km⁻¹, mesmo considerando o maior valor do domínio (Figura 3).

Figura 2 – Domínio utilizado na avaliação do SA-MCS Index, das lapse rates e dos índices de rajada de vento $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$, durante todo o ciclo de vida dos 28 SCMs analisados. Os retângulos representam cada um dos domínios analisados (alcances de $0,105^\circ$, $0,15^\circ$, $0,2^\circ$, $0,25^\circ$ e $0,3^\circ$). Linhas em preto estão relacionados com os municípios com eventos de vendaval e em cinza os que não apresentaram vendaval (grupo de controle).

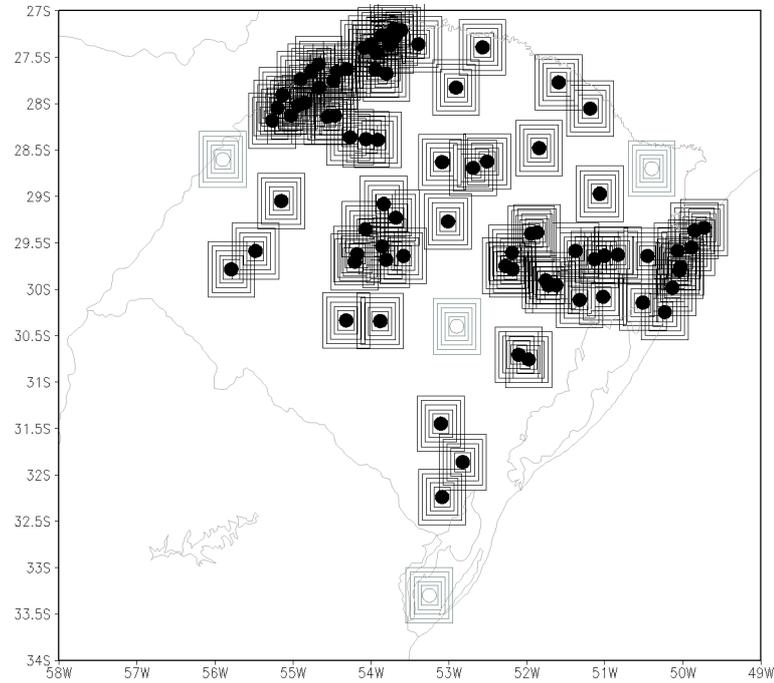
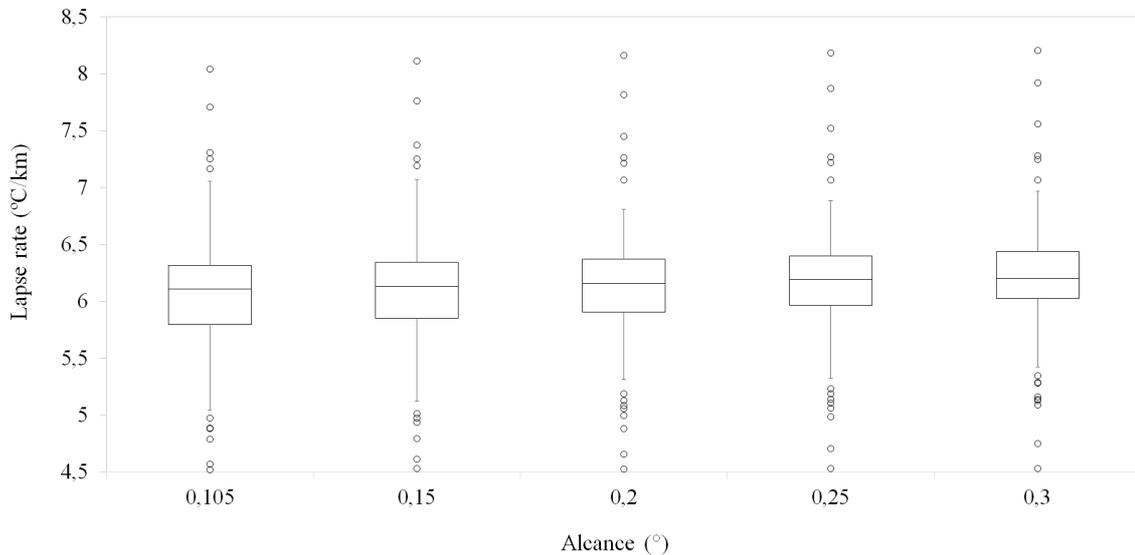


Figura 3 – Valores máximos de lapse rate para os 105 eventos de vendaval, causados por 28 SCMs, em 5 diferentes alcances ($0,105^\circ$, $0,15^\circ$, $0,2^\circ$, $0,25^\circ$ e $0,3^\circ$).



Portanto, uma alteração se mostra necessária no cálculo do $Windex$, e consequentemente modifica o cálculo do $Gustex$. Tem-se, as seguintes equações:

$$\text{Windex}_{SA} = 5 (H_M R_Q (\Gamma^2 - 20 + Q_L - 2 Q_M))$$

$$\text{Gustex}_{SA} = \alpha \text{Windex}_{SA} + 0,5 U_{500}$$

A análise foi realizada considerando o ciclo de vida inteiro dos 28 SCMs que causaram vendaval sobre o RS, considerando o valor mais alto interpolado para 5 diferentes distâncias (0,105°, 0,15°, 0,2°, 0,25° e 0,3° - retângulos em preto na Figura 2) relativas ao ponto representativo à sede municipal atingida. A mesma metodologia foi aplicada para outras quatro localidades (retângulos em cinza na Figura 2), que não apresentaram danos por vendaval associado a SCMs neste período. Este segundo conjunto de localidades serviu como um grupo de controle, para a posterior análise de eficiência dos índices acoplados.

O motivo da escolha de 4 localidades para esse grupo de controle se deu para que o número do total de localidades dos conjuntos com ocorrência (105) e sem ocorrência de vendaval (112) fossem semelhantes. O domínio de distância relativa ao centro de 0,105° (0,21° x 0,21°) é representativo à média da área dos municípios do RS e foi o menor utilizado. O maior domínio (0,6° x 0,6°), possui área acima de 8 vezes maior em relação à média da área dos municípios do RS, e não foi excedido para não se afastar demais do município atingido, evitando também inviabilizar algumas áreas utilizadas para grupo de controle.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1 Avaliação dos índices de SCM para previsão de 24 horas do modelo GFS 0,25°

Nesta etapa a performance dos três índices de SCM foram avaliadas usando os produtos de previsão de até 24 horas do modelo GFS 0,25°. Durante os oito meses avaliados pelo estudo foram observados 96 dias com convecção organizada por frentes ou cavados em superfície, 74 dias com presença de SCM dentro do domínio mostrado na Figura 1 e 13 dias convecção não-organizada. Além disso, dias com tempo estável e nebulosidade sem desenvolvimento convectivo somaram 60 dias (3 dias de céu claro, 37 dias de poucas nuvens e 20 com nebulosidade baixa).

O mês de setembro teve predomínio de sistemas organizados (3 dias com cavado em superfície e 13 sistemas frontais). Nebulosidade baixa foi observada em 6 dias (5 relacionados com cavados e um dia a um sistema frontal. Com relação a SCM foram observados 4 dias com presença deste sistema. Em outubro continuou havendo predomínio de sistemas

organizados (16 dias), sendo 11 relacionados a cavados em superfície e 5 com sistemas frontais. Ocorreram, ainda, 10 dias com SCM. No mês de novembro os sistemas organizados mantiveram predominância, com 11 dias, (10 relacionado com cavados e um a sistema frontal), enquanto que, ocorreram 9 dias com presença de SCM sobre o domínio do RS. Dezembro apresentou bastante atividade convectiva, com SCM presentes em 17 dias. Sistemas organizados foram observados durante 7 dias (6 relacionados com cavados em superfície e 1 sistema frontal). Assim como no mês anterior, janeiro foi dominado por dias com SCM (11), seguido de 9 dias com convecção organizada (7 cavados e 2 sistemas frontais) e também 9 dias com poucas nuvens (2 relacionados com cavados, 2 com sistemas frontais e 4 relacionadas ao escoamento de leste provenientes de um centro de Alta Pressão na costa do RS). No mês de fevereiro os sistemas organizados voltaram a serem os mais frequentes (11 dias), sendo 10 relacionados com cavados e um a sistema frontal. Os casos de convecção não-organizada atingiram seu pico durante o período de estudo (9 dias). Os SCM estiveram presentes em 6 dias. Março, mais uma vez, apresentou predominância de dias com sistemas organizados (11), destes, 9 relacionados com cavados em superfície e outros 4 com sistemas frontais. Além disso, foram observados 9 dias de pouca nebulosidade, destes, um relacionado com cavado em superfície, 6 relacionados a escoamentos de leste de sistemas de alta pressão na costa do RS e 2 dias por aquecimento local. Por fim, o mês de abril registrou 13 dias com sistemas organizados (6 cavados e 7 sistemas frontais), além de 12 dias com SCM.

Os eventos de tempo severo registrados neste período são mostrados na Tabela 1. É possível observar uma predominância de granizo, chuvas intensas e enxurrada, respondendo conjuntamente por 75% do total. Nos meses de setembro e outubro o evento do tipo granizo foi o mais frequente, enquanto que em novembro os de vendaval, ligeiramente acima dos demais. Eventos de enxurrada foram os mais frequentes nos meses de dezembro e janeiro, principalmente no primeiro, com 24 dos 51 eventos registrados neste mês. Fevereiro e março não apresentaram danos por eventos de tempo severo no RS. No mês de abril as chuvas intensas foram o tipo de evento mais frequente (19 dos 22 registros).

É importante salientar também o registro de 2 tornados no RS durante este período de estudo, o primeiro na cidade de Alpestre-RS ocorrido em novembro de 2015 e o segundo em São Miguel das Missões-RS no mês de abril de 2016. Estes eventos de tornado estiveram exclusivamente relacionados a SCM, como pode ser observado na Tabela 2, dando a medida da importância da previsibilidade de SCM nesta região.

Tabela 1 – Ocorrências de tempo severo entre setembro de 2015 e abril de 2016 no Estado do Rio Grande do Sul (RS) distribuídos em cada mês.

Tempo severo	Set/15	Out/15	Nov/15	Dez/15	Jan/16	Fev/16	Mar/16	Abr/16	Total
Granizo	7	47	0	1	0	0	0	0	55
Chuvas intensas	0	21	1	13	0	0	0	19	54
Enxurrada	0	26	2	24	2	0	0	0	54
Inundação	0	16	0	10	0	0	0	0	26
Vendaval	1	10	3	1	1	0	0	1	17
Alagamento	0	3	0	2	0	0	0	1	6
Deslizamento	0	2	1	0	0	0	0	0	3

Tabela 2 – Ocorrências de tempo severo entre setembro de 2015 e abril de 2016 no Estado do Rio Grande do Sul (RS) relacionadas aos sistemas atuantes no mesmo dia.

Tempo severo	céu aberto/ pouca nebulosidade	nebulosidade baixa	convecção não- organizada	convecção organizada	SCMs	Total
Granizo	0	0	0	22	33	55
Chuvas intensas	0	0	0	15	39	54
Enxurrada	0	0	0	15	39	54
Inundação	0	0	1	10	15	26
Vendaval	0	0	0	3	14	17
Alagamento	0	0	0	1	5	6
Deslizamento	0	1	0	1	1	3
Tornado	0	0	0	0	2	2

Ainda com base na Tabela 2 é notória a grande associação dos eventos de tempo severo com sistemas organizados conjuntamente com SCM, abrangendo 99% dos registros de tempo severo durante o período sobre o RS. Os SCM foram responsáveis pela maioria dos casos (68%), sendo predominante para todos os tipos de eventos severo que constaram durante o período, com exceção do deslizamento, onde teve participação dividida.

O desempenho dos 3 índices de SCM analisados neste estudo é mostrado na Tabela 3. Foram avaliados quantos dias com potencial para desenvolvimento de SCM foram previstos pelos índices e o que esses dias apresentaram como condição meteorológica. É possível notar, desta forma, que apesar de os 3 índices preverem os 74 dias com SCM sobre o domínio do RS, o MCS Index indicou como potencial dia de SCM todos os casos de convecção não-organizada, por exemplo. Levando em consideração que este índice foi elaborado com o intuito de diferenciar casos de convecção não-organizada dos casos de SCM, este resultado mostra que este índice não pode ser utilizado sobre a região subtropical da América do Sul sem aplicar nenhuma modificação neste.

Tabela 3 – Porcentagens que cada um dos índices de SCM considerou como potencial desenvolvimento de um SCM para as 6 categorias de condição de tempo classificadas.

condição meteorológica	SA-MCS Index	SA-MCS-LI Index	MCS Index
céu aberto	0,0%	0,0%	0,0%
pouca nebulosidade	45,9%	51,4%	70,3%
nebulosidade baixa	70,0%	85,0%	85,0%
convecção não-organizada	53,8%	53,8%	100,0%
convecção organizada	87,5%	87,5%	95,8%
SCMs	100,0%	100,0%	100,0%

Quando se utiliza o SA-MCS Index com seu filtro original, bem como com o mesmo filtro do MCS Index (SA-MCS-LI), os números de dias com convecção não-organizada capturados como potencial para SCM caíram para ~54%. Isto mostra uma melhora significativa com o principal propósito deste índice, independente do filtro utilizado. Além disso, todas as demais condições meteorológicas apresentaram queda como potencial desenvolvimento de SCM previsto pelos índices SA-MCS e SA-MCS-LI.

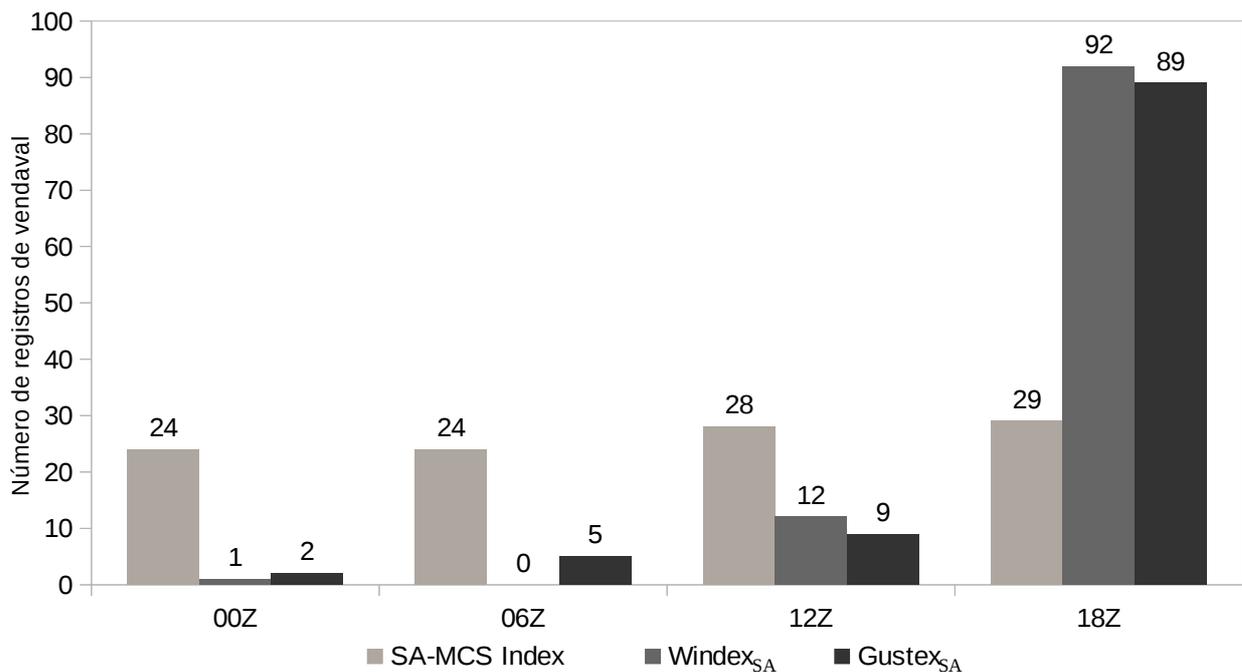
O SA-MCS Index se mostra mais acurado mesmo quando comparado ao SA-MCS-LI, que utiliza apenas o filtro de LI positivo. Isto mostra que tanto a mudança nas variáveis que integram o SA-MCS Index, bem como os filtros utilizados para ele foram de grande importância na previsibilidade de SCM nesta região da América do Sul. Destaca-se, ainda, que todos os eventos de tempo severo registrados no RS foram capturados como dias com potencial desenvolvimento de SCM, com exceção, apenas, de um episódio de deslizamento ocorrido, em um dia de nebulosidade baixa, em decorrência de chuvas nos dias anteriores (que foram destacados pelo SA-MCS Index).

É preciso lembrar que os casos de sistemas organizados, apesar de terem diminuição na detecção como dias de possível desenvolvimento de SCM, ainda se mostram com um valor razoavelmente elevado. Isto acontece pois na elaboração dos índices de SCM, o principal foco era prover uma melhor distinção entre dias com convecção não-organizada e SCM, não considerando sistemas frontais por exemplo. Além disso, alguns SCM estão embebidos dentro de sistemas frontais e com grande frequência com cavados em superfície, o que dificulta a diferenciação destes sistemas. Ambos os sistemas também compartilharam de ingredientes-chave do índice de SCM, como advecção térmica positiva na dianteira de um sistema frontal, além do índice de levantamento que é causado pelo encontro das diferentes densidades das massas de ar.

4.3.2 SA-MCS Index combinado com Windex e Gustex para eventos de vendaval no RS associados a SCMs entre 2005 e 2010

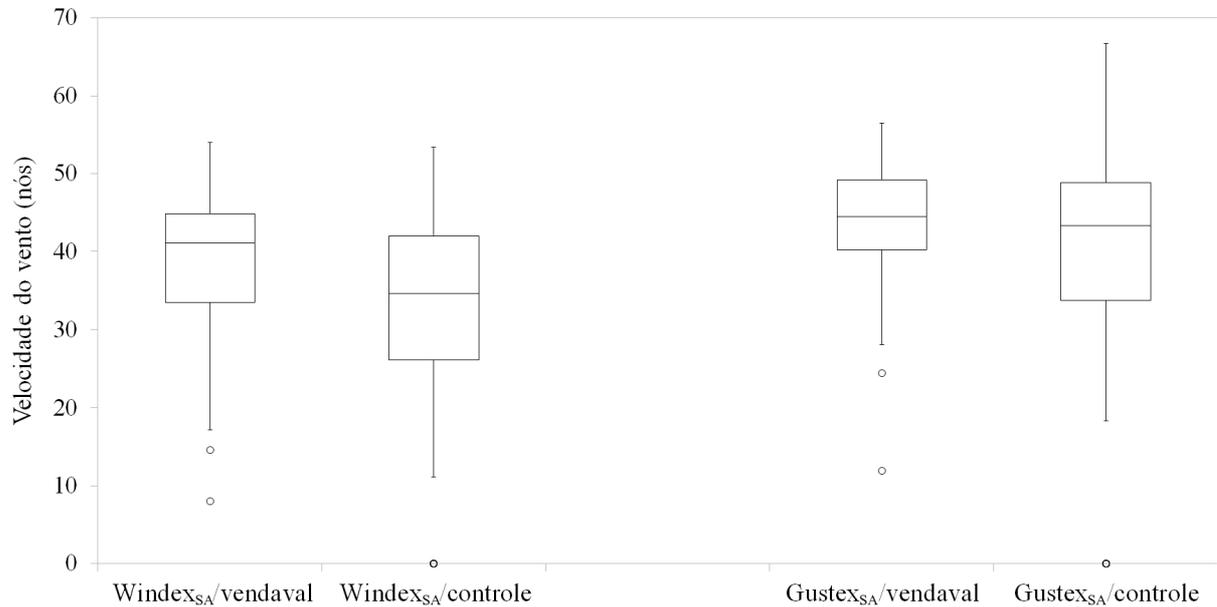
Para avaliar estes índices de forma combinada, foram utilizados os valores máximos do SA-MCS Index, $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$ dentro do ciclo de vida de cada SCM, mesmo que estes horários sejam distintos entre os 3 índices. Como ilustrado na Figura 4, enquanto o SA-MCS Index não apresenta uma frequência maior em um dos 4 horários utilizados, o mesmo não ocorre com $Windex_{SA}$ e o $Gustex_{SA}$. Como esses dois índices mencionados consideram a temperatura no nível da superfície para o cálculo da lapse rate, eles tendem a ter valores mais elevados às 18Z (15:00 hora local).

Figura 4 – Frequência horária dos maiores valores observados para o SA-MCS Index, $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$, entre os 4 horários do CFSR (00Z, 06Z, 12Z e 18Z), para os 105 registros de vendaval. O domínio utilizado o de alcance médio ($0,2^\circ$).



Na Figura 5 pode ser observada a distribuição dos valores do $Windex_{SA}$ e do $Gustex_{SA}$ no domínio médio (alcance de $0,2^\circ$) para todos os municípios que registraram eventos de vendaval e também um segundo conjunto de valores que consideram o grupo de controle. Outliers, nos box-plots, representativos à raiz quadrada negativa foram substituídos por zero e foram observados somente no conjunto do grupo de controle tanto para o $Windex_{SA}$ quanto para o $Gustex_{SA}$.

Figura 5 – Distribuição dos valores de $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$ ($\alpha = 0,7$) para eventos de vendaval e para o grupo controle utilizando dados do CFSR 0,5°. O domínio de alcance utilizado foi de $0,20^\circ$, representativo do domínio médio entre os 5 avaliados. O coeficiente $\alpha = 0,7$ foi aplicado por ter o melhor desempenho para o $Gustex_{SA}$.



As medianas encontradas para o grupo de controle foram menores para os dois índices, apesar da diferença na mediana entre os conjuntos ser maior no $Windex_{SA}$. O grupo de controle também apresentou as caudas inferiores (primeiro quartil subtraído do intervalo interquartil multiplicado por um fator de 1,5) mais reduzidos em relação ao conjunto de localidades que registraram vendaval.

Com relação às caudas superiores (terceiro quartil acrescido do intervalo interquartil multiplicado por um fator de 1,5) observou-se um comportamento oposto entre o $Windex_{SA}$ e o $Gustex_{SA}$. Enquanto o primeiro apresentou as caudas superiores mais elevadas para casos de vendaval, no segundo índice o resultado foi o inverso. Esta configuração mostra que analisando apenas os dois índices de rajada em separado, deve-se ter cuidado com a utilização do $Gustex_{SA}$, uma vez que é possível encontrar valores até mais elevados em locais onde não houve ocorrência de vendaval, segundo a DCRS, do que em relação aos locais que apresentaram este tipo de dano.

Apesar do $Windex_{SA}$ se mostrar um pouco melhor que o $Gustex_{SA}$, quando vistos separadamente, para diferenciar as localidades afetadas por vendaval, deve-se avaliar o comportamento dos índices quando estes se encontram combinados com o SA-MCS Index. Este procedimento se torna necessário pelo fato de que uma região com falso alarme observada em ambos os índices, separadamente, pode ser descartada pelo SA-MCS Index. Tendo isto em vista, foram construídas tabelas de contingência para os dois índices de rajadas

de vento combinados com o SA-MCS Index. O limiar mínimo para possibilidade de SCM no SA-MCS Index é conhecido por ser maior ou igual a -1,4. Para o $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$ foram testados limiares que variaram de 20 a 40 nós. Para descobrir o valor ótimo foi utilizado o parâmetro estatístico Heidke Skill Score (HSS – Wilks, 2006) que considera todos os valores de uma tabela de contingência. Além disso, foram testados, também para os 5 domínios, a melhor performance para cada contante de α referente ao $Gustex_{SA}$, variando de 0,1 a 0,9.

Os melhores valores ótimos para o $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$ são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. O $Gustex_{SA}$ apresentou um valor de HSS ligeiramente maior que o $Windex_{SA}$ (0,32 contra 0,31), que foi acompanhado também por uma melhora no parâmetro de probabilidade de detecção (POD – 0,87 contra 0,80) e índice de ameaça (TS – 0,55 contra 0,53). O parâmetro POD leva em consideração os acertos na previsão de ocorrência de vendaval e os erros de previsão quando ocorre vendaval. O TS leva em consideração os dois termos presentes no POD, acrescido da previsão de vendaval que não ocorreu. Analisando a taxa de falso alarme (FAR), que leva em conta o número de acertos na previsão de vendaval e o número de previsões de vendaval não observadas, o valor se manteve em 0,40 para os dois índices quando acoplados ao SA-MCS Index.

Considerando que a resolução espacial do CFSR de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, utilizado nesta avaliação, é semelhante ao tamanho dos domínios utilizados na verificação de previsão de vendavais, os resultados obtidos podem ser considerados relevantes e uma ferramenta útil para auxiliar previsores.

Um exemplo da aplicação desta técnica é representada nas Figuras 6 e 7, para o $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$ respectivamente, para um SCM ocorrido em 18 de novembro de 2009, entre 0330Z e 1800Z, sobre o RS. O escudo de nuvens com a temperatura de topo inferior a -55°C é mostrada de forma cumulativa, sobreposta no tempo, durante seu ciclo de vida (Figs. 6a e 7a). O SA-MCS Index com integração no tempo, utilizando os horários de reanálise mais próximos (0000Z e 1800Z), é mostrado nas Figuras 6b e 7b. O $Windex_{SA}$ é representado na Figura 6c, com o limiar de velocidade mínima de 29 nós, enquanto que o $Gustex_{SA}$ é representado na Figura 7c com o limiar de 39 nós, para uma constante α de 0,8. Os dois índices de rajada de vento também integrados no tempo conforme o SA-MCS Index.

Na Figura 6 os municípios atingidos por vendaval estão apresentados por domínios de $0,4 \times 0,4^\circ$ (alcance de $0,2^\circ$), baseado na melhor configuração do $Windex_{SA}$ (Tabela 4). Na Figura 7 estes retângulos estão com dimensão de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ($0,25^\circ$ de alcance), que também foi definido através da melhor configuração para o $Gustex_{SA}$ (Tabela 5). Para este caso exemplificado pode ser visto que os 4 municípios estiveram contidos dentro da região

favorável do SA-MCS Index, assim como do $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$, ou seja, estariam sobre uma região de atenção para potencial geração de vendaval associado a SCM, como de fato ocorreu.

Figura 6 – Evento de vendaval associado com SCM ocorrido em 18/11/2009. (a) Área com temperatura de brilho abaixo de -55°C entre 0330Z e 1800Z desse mesmo dia; (b) SA-MCS Index entre 0000Z e 1800Z; (c) $Windex_{SA}$ sobreposto à (b). Os retângulos representam os municípios atingidos por vendaval ($0,4^{\circ} \times 0,4^{\circ}$).

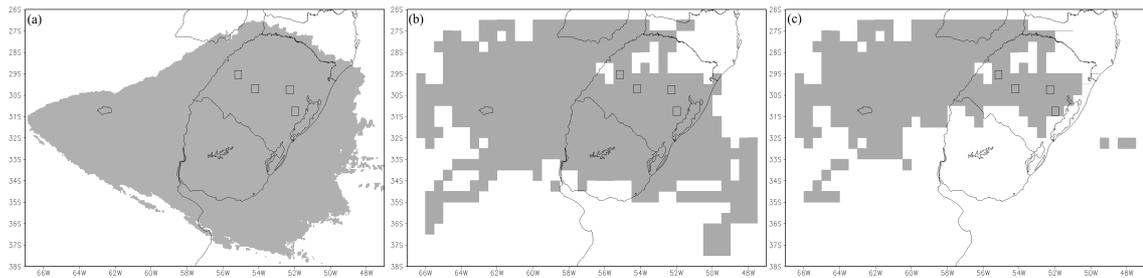


Figura 7 – O mesmo evento descrito na Figura 6, utilizando o $Gustex_{SA}$ na figura (c).

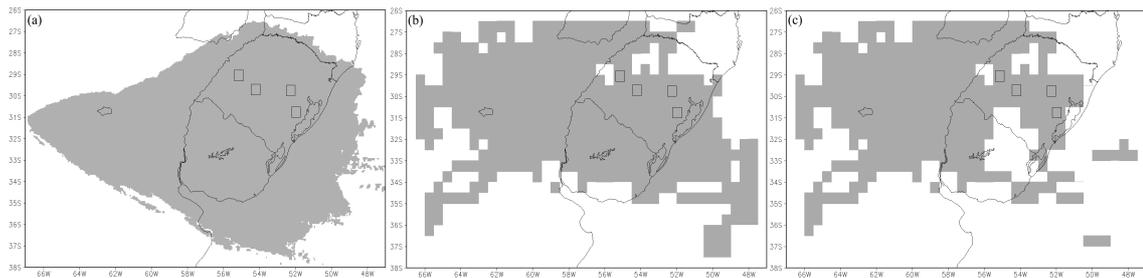


Tabela 4 – Classificação das melhores combinações do SA-MCS Index com o $Windex_{SA}$, baseado no parâmetro estatístico Heidke Skill Score (HSS), para casos de vendaval associados com SCMs no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Também são apresentados os parâmetros de probabilidade de ocorrência (POD), grau de ameaça (TS), razão de falso alarme (FAR) e o viés.

Alcance	Valor ótimo	HSS	POD	TS	FAR	Viés
0,20 °	29 nós	0,31	0,80	0,53	0,40	1,32
0,25 °	29 nós	0,30	0,82	0,53	0,40	1,37
0,15 °	29 nós	0,30	0,78	0,52	0,40	1,30
0,30 °	29 nós	0,29	0,84	0,53	0,41	1,42
0,25 °	30 nós	0,29	0,80	0,52	0,40	1,34
0,30 °	32 nós	0,29	0,79	0,52	0,40	1,32
0,20 °	30 nós	0,29	0,78	0,51	0,40	1,30

Tabela 5 – O mesmo que a Tabela 4, mas para a combinação do SA-MCS Index com o $Gustex_{SA}$, variando a constante α de 0,1 a 0,9.

α	Alcance	Valor ótimo	HSS	POD	TS	FAR	Viés
0,7	0,25°	36 nós	0,32	0,87	0,55	0,40	1,45
0,8	0,25°	39 nós	0,32	0,87	0,55	0,40	1,45
0,7	0,20°	35 nós	0,32	0,86	0,55	0,40	1,43
0,7	0,30°	37 nós	0,31	0,88	0,55	0,41	1,48
0,9	0,25°	42 nós	0,31	0,87	0,54	0,41	1,46
0,9	0,30°	43 nós	0,31	0,87	0,54	0,41	1,46
0,8	0,25°	38 nós	0,31	0,87	0,54	0,41	1,46
0,9	0,25°	43 nós	0,31	0,86	0,54	0,40	1,44
0,8	0,25°	40 nós	0,31	0,86	0,54	0,40	1,44
0,8	0,20°	38 nós	0,31	0,86	0,54	0,40	1,44
0,8	0,20°	39 nós	0,31	0,85	0,54	0,40	1,42
0,7	0,20°	36 nós	0,31	0,85	0,54	0,40	1,42

4.4 CONCLUSÕES

No presente estudo foram mostradas algumas aplicações do SA-MCS Index no uso operacional. Durante os meses quentes do RS, em um ano particular com intensa atividade de SCMs e ocorrência de tempo severo, o SA-MCS Index apresentou êxito em detectar todos os SCMs ocorridos no período, bem como todos os eventos severos reportados pela DCRS. Além disso, houve uma diminuição nos falsos alarmes de SCM previstos, relacionados a dias com convecção organizada por sistemas frontais e cavados em superfície e também à convecção não-organizada. Esse resultado mostra, portanto, que seu uso operacional pode gerar economia computacional em um sistema que ativaria um modelo de alta resolução para determinado domínio quando houvesse potencial para SCMs.

Outra possível aplicação do SA-MCS Index é a sua utilização de forma acoplada à versões modificadas, para a região subtropical da América do Sul, dos índices de vento Windex e Gustex. Estes dois são utilizados muitas vezes em conjunto com imagens de satélite no canal visível e infravermelho, e uma vez que o SA-MCS Index representa bem o comportamento dos SCMs, poderia ser utilizado em conjunto com estes dois índices.

Analisando as melhores configurações do $Windex_{SA}$ e $Gustex_{SA}$ quando utilizado junto ao SA-MCS Index as taxas de falso alarme (FAR) foram de 40%, com uma probabilidade de detecção (POD) em torno de 80% para o primeiro índice e 87% para o segundo, com um viés de moderada superestimação para ambos.

Um estudo futuro sobre o uso operacional dos índices de vento acoplados ao SA-MCS Index, utilizando-se de dados de previsão será feito para avaliação da previsão de ventos

intensos sobre o RS.

4.5 REFERÊNCIAS

- ANABOR V; STENSRUD D. J.; de MORAES, O. L. Serial upstream propagating mesoscale convective system events over south- eastern South America. **Monthly Weather Review**, v.136, 3087–3105. 2008.
- FUJITA, T. T. The downburst, microburst and microburst. SMRP Research Paper 210, University of Chicago, 1985. 122 p.
- GEERTS, B. Estimating Downburst-Related Maximum Surface Wind Speeds by Means of Proximity Soundings in New South Wales, Australia. **Weather and Forecasting**, v.16, 261–269. 2001.
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems. **Weather and Forecasting**, v.22, 813–838. 2007
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R.; MCANELLY, R. L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. **Monthly Weather Review** v.131(10):2428–2449. 2003.
- LIU, C.; ZIPSER, E. J. “Warm Rain” in the tropics: seasonal and regional distributions based on 9 yr of TRMM data. **Journal of Climate**, v.22, 767–779. 2009.
- MADDOX, R. A; ROGERS, D. M.; HOWARD, K. W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1981—An annual summary. **Monthly Weather Review**, v.110, 1501–1514. 1982.
- MATSUDO, C. M.; SALIO, P. V. Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. **Atmospheric Research**, v.100(4), 523-537. 2011.
- MCCANN, D. W. WINDEX—A New Index for Forecasting Microburst Potential. **Weather and Forecasting**, v.9, 532–541. 1994.
- PROCTOR, F. H. Numerical simulation of the 2 August 1985 DFW microburst with the three-dimensional terminal Area Simulation System. Proc. 15th Conf. on Severe Local Storms, Baltimore, MD, Amer. Meteor. Soc., J99-J102. 1988.
- ROBERTS, R. D.; WILSON, J. W. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.28, 285-303. 1989.
- SAHA, S. et al. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National centre for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5065/D69K487J>>. Acesso em: 17 jan. 2017.
- SALIO, P; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v.135, 1290–1309. 2007.

WILKS D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Second Edition. Academic Press, 2006. 630 p.

WILSON, J. W.; ROBERTS, R. D.; KESSINGER, C.; MCCARTHY, J. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.23, 898-915. 1984.

ZIPSER, E. J; CECIL, D. J; LIU, C.; NESBITT, S. W.; YORTY D. P. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.87, 1057–1071. 2006.

5 DISCUSSÃO

Na presente tese é discutida a elaboração de um índice de SCM exclusivo para a América do Sul, sua aplicação em ambiente operacional com modelo de previsão global e sua viabilidade no uso acoplado com índices de previsibilidade de rajadas de vento.

O primeiro estudo considera domínios móveis de $60^\circ \times 60^\circ$ no entorno dos centroides de iniciação dos SCMs e também dos centros de máxima atividade convectiva de sistemas não-organizados sobre ao sul de 20°S na América do Sul. O período compreendido se configura de maio de 2005 a dezembro de 2011. São utilizadas imagens no canal infravermelho dos satélites GOES-10, GOES-12 e GOES-13 para a detecção dos dois sistemas avaliados. Além disso são utilizados dados de reanálise do modelo CFSR do NCEP, de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de resolução para elaborar uma climatologia dos campos sinóticos médios entre casos de convecção não-organizada e SCMs. Haja vista que nem sempre as condições ambientes que são favoráveis para iniciar a convecção são também suficientes para a manutenção destes sistemas convectivos, conforme Jirak e Cotton (2007) apontam, é importante do ponto de vista operacional que o meteorologista possa distinguir qual o modo convectivo mais favorável a se desenvolver. Estes campos sinóticos médios podem auxiliar na operação de previsão do tempo.

Em seguida é avaliado o comportamento das variáveis meteorológicas em um domínio de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ entre no entorno da posição de iniciação dos SCMs e de máxima atividade convectiva dos sistemas não-organizados. Utilizando-se da metodologia de Jirak e Cotton (2007) de classificação estatística para apontar as variáveis mais relevantes para distinção dos dois modos convectivos, foram obtidos três possíveis índices de SCMs com variáveis e níveis atmosféricos que diferiram das encontradas no índice de SCM norte-americano (MCS Index) (JIRAK; COTTON, 2007). Estes 3 novos índices (SA-MCS Index, SA-MCS Index 2 e SA-MCS Index 3), com o MCS Index e outro apenas calibrando o MCS Index com as médias e desvio padrão encontrados para as mesmas variáveis e níveis atmosféricos na América do Sul (MCS Index modificado), foram avaliados através de parâmetros de distância entre o valor de máxima intensidade do índice com a posição do SCM observada. A utilização de filtros foi também testada a fim de melhor a eficácia dos 5 índices avaliados.

Os resultados do estudo mostraram que os campos sinóticos médios diferiram com maior grau de significância em 250 hPa e 500 hPa, indicando o núcleo do JAN logo a sudeste do centroide médio de iniciação de SCMs como um forte indicativo para geração de SCMs na região, uma vez que se encontra ausente em casos de convecção não-organizada. Além disso,

em 500 hPa a presença de um cavado na retaguarda dos SCMs se mostra mais evidente do que nos casos de convecção não-organizada, onde as linhas de altura geopotencial se encontram dispostas de forma mais zonal.

Apesar da boa distinção entre ambientes favoráveis a SCMs perante convecção não-organizada, o termo de lapse rate presente no SA-MCS Index 2 e 3, não possuiu o mesmo êxito quando se comparou os parâmetros de distância entre os máximos valores dos índices e os SCMs observados. Isto ocorreu pelo fato da lapse rate ser maior nos casos de SCMs quando comparados aos sistemas não-organizados, mas quando se observava um caso de SCM seu valor máximo não estava relacionado ao local de iniciação de SCMs. Com isso, o SA-MCS Index se mostrou mais eficiente, possuindo as menores diferenças de erros nos 4 parâmetros de distância avaliados, chegando a acertar o dobro do obtido pelo MCS Index.

O segundo estudo tratou de uma análise comparativa entre o MCS Index e o SA-MCS Index para dois casos de SCMs ocorridos sobre o RS em outubro de 2015. Para tanto, foram utilizadas imagens do satélite GOES-13, no seu canal infravermelho e dados de análise e previsão do modelo de previsão global GFS, com $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de resolução espacial. O objetivo deste estudo foi avaliar a destreza do SA-MCS Index em lidar com SCMs de curta duração (abaixo de 6 horas) e com dados de previsão do modelo.

O primeiro SCM avaliado gerou danos por granizo, enxurrada e vendaval sobre vários municípios do RS, mesmo com apenas 4 horas de duração. Foi realizada uma avaliação comparativa do MCS Index e SA-MCS Index nas etapas de iniciação, maturação e dissipação que indicou valores mais intensos próximos ao local do SCM observado e também uma região preferencial menor, com menos falsos alarmes fora da região de SCM. Comportamento semelhante foi observado no segundo SCM, que gerou danos no Uruguai e no RS e que teve duração de 7 horas.

Os resultados apresentados nesta avaliação de dois casos de SCMs mostrou a viabilidade para o uso do SA-MCS Index utilizando dados do modelo GFS com produtos de previsão de até pelo menos 3 horas, além das análises a cada 6 horas. Além disso, teve eficácia na previsão de um SCM de curta duração, com interação com outro sistema em seu momento de dissipação.

Para o último estudo foram avaliados dois períodos de tempo distintos. A primeira parte esteve relacionada em avaliar a eficiência no uso do SA-MCS Index na previsibilidade de dias com potencial para desenvolvimento de SCMs sobre o RS entre setembro de 2015 e abril de 2016. Para isso foram utilizados os produtos de análise e previsão num horizonte de 24 horas (intervalos de 3 horas) do modelo GFS ($0,25^\circ$), sobre 460 domínios de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$

que cobriam o RS e suas adjacências. Além disso, foi utilizado o banco de dados com registros de tempo severo sobre o RS fornecido pela Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Rio Grande do Sul (DCRS).

Foram testados além do SA-MCS Index, o MCS Index e o SA-MCS Index com o filtro de LI positivo (SA-MCS-LI Index), assim como o utilizado pelo MCS Index operacionalmente nos EUA. Já o SA-MCS Index, considerava seu filtro original discutido no primeiro artigo, que considera a magnitude do vento em 250 hPa, além do LI. Após 8 meses de avaliação dos 3 índices, constatou-se que estes capturaram todos os SCMs ocorridos sobre o RS neste período. Porém, o SA-MCS Index apresentou a menor razão de falso alarme entre os índices, com destaque para a redução em torno de 45% da detecção de dias com convecção não-organizada que indicavam potencial dia de desenvolvimento de SCM quando comparado ao MCS Index. Além disso, o SA-MCS Index teve maior habilidade de distinguir outros sistemas meteorológicos, mesmo quando comparado ao SA-MCS-LI Index. Isto evidencia que não apenas as mudanças dos termos que o compõe, como também o filtro utilizado junto ao SA-MCS Index trouxeram melhoras significativas na previsibilidade de SCMs.

A última parte do terceiro estudo teve por objetivo investigar o uso acoplado do SA-MCS Index com dois índices de previsão de rajadas de vento associadas a microexplosões e downbursts (Windex – MCCANN, 1994; Gustex – GEERTS, 2001). O período compreendido para esta análise foi de maio de 2005 a dezembro de 2010 e foram utilizados dados de reanálises do CFSR ($0,5^\circ$) e o banco de dados de vendaval da DCRS. Este período foi escolhido por haver um extenso banco de dados dos SCMs no período, além de poder avaliar o uso conjunto dos índices em situações de diferentes situações climáticas de variabilidade interanual.

Os dois índices de rajada de vento são potencialmente dependentes da lapse rate entre a superfície e o nível de derretimento na troposfera e apresentaram um limiar mínimo em torno de $5,5^\circ\text{C}/\text{km}$. Contudo, foi verificado através de 5 tamanhos de domínios diferentes variando de $0,21^\circ \times 0,21^\circ$ a $0,6^\circ \times 0,6^\circ$ que para os casos de vendaval associados a SCMs no RS as maiores lapse rates tiveram um limiar mínimo de $4,5^\circ\text{C}/\text{km}$ e por consequência disto os dois índices foram modificados, a fim de serem adaptados para esta região de estudo.

Foi considerada uma amostra de 105 ocorrências de vendaval associados a 28 SCMs neste período e outra de 112 utilizada como grupo de controle, onde as localidades em nenhum dos casos foram afetadas por vendaval. As taxas de falso alarme (FAR) foram de 40% para a melhor configuração do Windex modificado ($\text{Windex}_{\text{SA}}$) e do Gustex modificado ($\text{Gustex}_{\text{SA}}$) acoplados ao SA-MCS Index. Considerando a probabilidade de detecção (POD),

que leva em consideração os casos de vendaval corretamente previstos e aqueles que ocorreram sem haver a previsão, os valores foram mais elevados no $Gustex_{SA}$ (87%) do que em relação ao $Windex_{SA}$ (80%) com um viés de mais superestimativa no $Gustex_{SA}$ (1,45) comparado ao $Windex_{SA}$ (1,32).

Estes resultados mostraram que apesar dos índices de rajadas de vento estarem originalmente associados com microexplosões, estes podem ser aplicados a casos de vendaval associados a SCMs no Rio Grande do Sul quando se faz as devidas modificações a fim de adaptá-lo. Mesmo realizando uma abordagem acerca de domínios com tamanho similar à escala espacial do modelo de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ os resultados foram promissores, indicando alta taxa de probabilidade de detecção, principalmente com o uso do $Gustex_{SA}$ e falso alarme relativamente baixo. Considerando que vendaval foi o tipo de evento severo mais frequentemente observado entre 2003 e 2011 pela DCRS e que os SCMs estão relacionados comumente a geração de danos por tempo severo, este estudo fornece uma alternativa para a mitigação de danos por vendaval no RS.

6 CONCLUSÃO

Considerando os casos de convecção não-organizada e de SCMs, diferenças significativas foram encontradas nos campos sinóticos médios em altos e médios níveis da troposfera, evidenciando um importante papel do núcleo do Jato de Altos Níveis e também da presença de um cavado a oeste da localização dos centroides dos SCM em um momento anterior à fase de iniciação. Nos casos de convecção não-organizada não é observada interação do núcleo do Jato de Altos Níveis com a região de máxima atividade convectiva, bem como também o cavado em médios níveis se mostra bem menos pronunciado. Quando se compara os valores máximos do SA-MCS Index com o MCS Index, observa-se uma maior eficiência do primeiro na capacidade de detecção de SCMs na região subtropical América do Sul. O novo índice possuiu também uma melhor diferenciação entre os casos de convecção não-organizada e SCM, que é retrato pelo seu valor de Heidke Skill Score mais elevado (0,71). A distância entre os pontos de máximo valor do índice para o local de iniciação do SCM observado teve um ganho de 112,5 % quando estes se encontravam a no máximo 2 pontos de grade de distância.

Quando se avaliou a eficiência do SA-MCS Index para dois SCMs de curta duração utilizando-se de dados de previsão do modelo global GFS 0,25°, novamente o SA-MCS Index teve boa acurácia, com a região de valores máximos do novo índice proposto se assemelhando mais com o formato com os núcleos convectivos dos SCMs observados horas depois. A região demarcada pelo índice também foi menor que o MCS Index, facilitando o monitoramento e previsão do SCM nas horas subsequentes.

Algumas aplicações do SA-MCS Index no uso operacional foram demonstradas avaliando 8 meses de estação quente no RS, em um ano particular com intensa atividade de SCMs e ocorrência de tempo severo sobre a região. O SA-MCS Index obteve êxito em detectar todos os SCMs ocorridos neste período. Além disso teve a menor razão de falso alarme diante de outros sistemas meteorológicos ocorridos neste período quando comparados aos detectados pelo MCS Index e a versão do SA-MCS Index com filtro utilizado pelo MCS Index. Outra possível aplicação do SA-MCS Index apresentada é a sua utilização de forma acoplada à versões modificadas dos índices Windex e Gustex que originalmente estavam associados a rajadas de vento geradas por microexplosões. Com uma probabilidade de detecção (POD) situado acima de 80% e um falso alarme que não superou 40% dos casos de vendaval associados a SCMs.

A existência de um índice de SCM, que diferencie eventos de SCMs de casos de

convecção não-organizada, elaborado para os EUA, não necessariamente o credencia para utilização em todas as regiões do globo. Isto pode ser verificado no presente estudo, onde este índice existente foi avaliado pela primeira vez num período tão extenso, e de maneira inédita se confeccionou um índice de SCM para a região subtropical da América do Sul. Para isso, foram alterados alguns termos e níveis atmosféricos relativos a estes, que mostraram resultados mais promissores do que o índice de SCM anteriormente elaborado quando aplicado a esta região.

Foram avaliados, também pela primeira vez, diferentes tipos de filtros que possam delimitar melhor a área de possível desenvolvimento de SCMs, fazendo uma abordagem não apenas com o conjunto de dados de convecção não-organizada, mas também das adjacências dos próprios episódios de SCMs. A aplicação junto a índices modificados de rajadas de vento associados à microexplosões trazem resultados promissores para a região na previsão de vendaval, sendo de grande utilidade para os setores energético e de transportes. Por fim, o acoplamento das técnicas desenvolvidas permite reduzir custos computacionais, pois cria uma ferramenta decisória na ativação de simulações de alta resolução e alto custo computacional apenas em áreas de grande probabilidade do fenômeno.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser feitos alguns aprimoramentos em relação ao SA-MCS Index. Pode ser explorado, por exemplo, a utilização de dados de entrada com maior resolução, ou saídas processadas pelo modelo WRF. É possível, ainda, fazer uma avaliação das diferenças em nível de mesoescala dos SCMs causadores de eventos severos, daqueles que não produziram, ou ainda, discriminar por tipo de evento gerado, criando, assim, índices mais específicos. O $Windex_{SA}$ e o $Gustex_{SA}$ podem ser avaliados operacionalmente através de dados do modelo de previsão global, e também com dados de estações meteorológicas de superfície. Além disso, é recomendada uma avaliação em modelo de maior resolução de grade, e também com o auxílio de parametrizações para melhor previsão de ventos intensos.

REFERÊNCIAS

- ANABOR, V.; STENSRUD, D. J.; de MORAES, O. L. Serial upstream propagating mesoscale convective system events over southeastern South America. **Monthly Weather Review**, v.136, 3087–3105. 2008.
- ANABOR, V.; STENSRUD, D. J., de MORAES, O. L. Simulation of a serial upstream-propagating mesoscale convective system event over southeastern South America. **Monthly Weather Review**, v.137, 2144–2163. 2009.
- ANDERSON, C. J.; ARRITT, R. W. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993. **Monthly Weather Review**, v.126, 578–599. 1998.
- BORQUE, P.; VIDAL, R.; SALIO, P.; SKABAR, Y. G; NICOLINI, M. Previous conditions associated with a development of a mesoscale convective system under a south american low-level jet event: a case study. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO), 8., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/adm_conf/2005/10.31.19.56/doc/1677-1682.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2017
- BROOKS, H. E.; LEEB J. W.; CRAVENC, J. P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. **Atmospheric Research**, v.67-68, 73-94. 2003.
- COHEN, A. E.; CONIGLIO, M. C.; CORFIDI, S. J. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations. **Weather Forecasting**, v.22, 1045–1062. 2007.
- CONIGLIO, M. C.; BROOKS, H. E.; WEISS, S. J.; CORFIDI, S. F. Forecasting the maintenance of quasi-linear mesoscale convective systems. **Weather Forecasting**, v.22, 556–570. 2007
- CONIGLIO, M. C.; STENSRUD, D. J.; WICKLER, L. J. Effects of upper-level shear on the structure and maintenance of strong quasi-linear mesoscale convective systems. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.63, 1231–1252. 2006.
- FOVELL, R. G.; RUBIN-OSTER, B.; KIM, S. A discretely propagating nocturnal Oklahoma squall line: Observations and numerical simulations. In: 22d Conf. on Severe Local Storms, **Anais...** Hyannis, MA: Amer. Meteor. Soc., 2005. Disponível em: <<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/82021.pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2017.
- FRITSCH J. M.; FORBES, G. Mesoscale convective systems. **Meteorological Monographs** v.28(50), 323–358. 2001.
- GALWAY, J. G. The lifted index as a predictor of latent instability. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 43, p. 528-529. 1956.

- GEORGE, J. J. **Weather Forecasting for Aeronautics**. Academic Press, 1960. 673 p.
- HENRY, N. L. A Static Stability Index for Low-Topped Convection. **Weather Forecasting**, v.15, 246–254. 2000.
- HOUZE, R. A.; SMULL, B. F.; DODGE, P. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. **Monthly Weather Review**, v.118, 613–654. 1990.
- Houze, R. A. **Cloud Dynamics**. Academic Press, 573 pp., 1993.
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R., MCANELLY, R.L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. **Monthly Weather Review**, v.131(10):2428–2449. 2003.
- JIRAK, I. L.; COTTON, W. R. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems. **Weather Forecasting**, v.22, 813–838. 2007.
- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A.W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v.126, 1630-1654. 1998.
- MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.61, 1374–1387. 1980.
- MADDOX, R. A.; PERKEY, D. J.; Fritsch, J. M. Evolution of upper tropospheric features during the development of a mesoscale convective complex. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.38, 1664–1674. 1981.
- MADDOX, R. A.; ROGERS, D. M.; HOWARD, K.W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1981—An annual summary. **Monthly Weather Review**, v.110, 1501–1514. 1982.
- MADDOX, R.A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. **Monthly Weather Review**, v.111, 126–140. 1983.
- MATSUDO, C.M.; SALIO, P. V. Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina; **Atmospheric Research**, v.100(4), 523-537. 2011.
- MILLER, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. **Technical Report 200**, Air Weather Service, United States Air Force, 1972. 190 p.
- NICOLINI, M.; SAULO, A.C.; TORRES, J.C.; SALIO, P. Enhanced precipitation over southeastern America related to strong low-level jet events during austral warm season. **Meteorologica**, v.27, 59–69. 2002.
- ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society** v.56, 527-530. 1975.
- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 545–567. 2004a.

- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics. **Journal of the Atmospheric Sciences** v.61, 1637–1655. 2004b.
- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and maintenance. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 1656–1673. 2004c.
- RASMUSSEN, K. L.; HOUZE Jr, R.A. Orographic Convection in Subtropical South America as Seen by the TRMM Satellite. **Monthly Weather Review**, v.139, 2399-2420. 2011.
- SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review** v.135, 1290–1309. 2007.
- SAULO, A. C.; NICOLINI, M.; CHOU, S. C. Model characterization of the South American low-level flow during the 1997–1998 spring–summer season. **Climate Dynamics**, v.16, 867–881. 2000.
- SAULO, C.; RUIZ, J.; SKABAR, Y. G. Synergism between the low-level jet and organized convection at its exit region. **Monthly Weather Review**, v.135, 1310–1326. 2007.
- SHOWALTER, A. K. A stability index for forecasting thunderstorms. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.34, 250-252. 1947.
- TRIER, S. B.; DAVIS, C. A. Propagating nocturnal convection within a 7-day WRF–model simulation. Preprints, 32d Conf. on Radar Meteorology and 11th Conf. on Mesoscale Processes, **Anais...**, Albuquerque, NM: Amer. Meteor. Soc., 2005. CDROM, P2M.1.
- VELASCO, I. Y.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v.92, 9591–9613. 1987.
- WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. **Monthly Weather Review**, v.110, 504–520. 1982.
- WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears **Monthly Weather Review**, v.112, 2479–2498. 1984.
- WEISMAN, M. L.; ROTUNNO, R.. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.61, 361–382. 2004.
- ZIPSER, E. J.; CECIL, D.J.; LIU, C.; NESBITT, S.W.; YORTY, D. P. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.87, 1057–1071. 2006.