

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia



Dissertação

**Análise quantitativa de eventos extremos de precipitação da região Leste e
Norte de Santa Catarina**

Gilson Carlos da Silva

PELOTAS, 2011

GILSON CARLOS DA SILVA

**Análise quantitativa de eventos extremos de precipitação da região Leste e
Norte de Santa Catarina**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Meteorologia).

Orientador: Dr. André Becker Nunes

PELOTAS, 2011

Dados de catalogação na fonte:
Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

S586a

Silva, Gilson Carlos da

Análise quantitativa de eventos extremos de precipitação da região Leste e Norte de Santa Catarina / Gilson Carlos da Silva. – 105f. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Meteorologia. Pelotas, 2011. – Orientador André Becker Nunes.

1.Meteorologia. 2.Eventos extremos de precipitação.
3.Santa Catarina. 4. Modelagem climática regional.
5.Tendência. I.Nunes, André Becker. II.Título.

CDD: 551.57798164

Banca examinadora:

Professor Dr. André Becker Nunes (Orientador)

Professora Dr^a. Simone Erotildes Teleginski Ferraz (UFSM)

Professor Dr. Gilberto Barbosa Diniz (UFPEL)

AGRADECIMENTOS

- À minha família, pelo apoio constante que sempre deram a mim, meus pais Pedro e Lourdes, por me darem vida, por me darem educação e valores importantes, e aceitarem a distância neste longo e árduo período que morei em Pelotas, sempre me ajudando no que fosse preciso; meus irmãos: Gilvan, por me ensinar muitas lições de vida, me incentivar a continuar os estudos, sempre estando disposto a ajudar; à Eloá, por me motivar nos momentos mais difíceis com sua alegria espontânea; e à Gilcéia, por mostrar a importância da leitura e incentivar a voltar a estudar. Também à Vanda e Márcia, pela amizade e meus sobrinhos especiais, Isabele e Pedrinho, e o Lucas.
- A todos meus familiares, também por entenderem o meu afastamento devido à busca do crescimento, principalmente ao tio Oriosvaldo e à tia Salete, que tanto me ajudaram na minha permanência e adaptação numa época em Joinville.
- Aos amigos em Pelotas, Débora, Emília, Guilherme, Diego, Denise Argenta, Cleder Fontana, Ricardo Scherer e Jucenir G. da Rocha. E à Cláudia Battestin, pela amizade, sinceridade, carinho, incentivo para continuar o mestrado, dicas de melhorias, pelas conversas e lições de vida.
- Ao sempre amigo Gélcio Nascimento.
- Ao Dr. André Becker Nunes, pela confiança e orientação na pesquisa.
- Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e correções para a melhoria do trabalho.
- Aos colegas de curso Cristiano Eichholz, Cristiano Cardoso, Daniel Schuch, e a todos que de alguma forma estiveram dispostos para auxiliar e concluir o trabalho.

- Aos colegas de Graduação Aline Bilhalva, Bruna Segalin, Thomas Kaufmann, Maurício Pino, José Paulo, e outros, pelos momentos de reunião para estudar para provas.
- Ao Bruno Medina, pelo auxílio na pesquisa, confiança e amizade.
- Aos professores do curso de Pós-Graduação, pelos ensinamentos e dedicação.
- À Eliane Barbosa dos Santos, pela disponibilidade dos dados do índice IAS.
- Ao Rogério Souza, pelo apoio técnico num momento importante da pesquisa.
- À Camila Peter, pela ajuda, confiança e momentos de reflexão.
- À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.
- À UFPEL, por me permitir realizar os estudos e auxílios, e ajuda através da cessão de APOIO.
- Ao Hadley Centre pelo fornecimento do sistema de modelagem PRECIS e ao CCST/INPE pelas projeções do modelo climático regional HadRM3P.

Resumo

DA SILVA, G. C. **Análise quantitativa de eventos extremos de precipitação da região Leste e Norte de Santa Catarina**. 2011. 105f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Este estudo analisa o aspecto temporal dos eventos extremos de precipitação com potencial para causar inundação na região Leste e Norte do Estado de Santa Catarina, uma das regiões brasileiras que mais sofrem transtornos devido à chuva intensa. Foram selecionadas algumas cidades cujo histórico de inundação – construído através de várias fontes, como a Defesa Civil Estadual – foi usado para a confecção de um limiar para identificar tais eventos. Foram utilizados dados de precipitação da ANA (Agência Nacional de Águas) no período de 1951 a 2010, para análise da chuva diária ocorrida até quinze dias antes das inundações e para a quantificação dos eventos extremos de precipitação com potencial para provocar inundação. A metodologia empregada para detecção desses eventos foi a de limiares médios, baseada na análise pontual da precipitação nas cidades atingidas. A quantificação do número de eventos gerou a variação temporal no período, em que pode-se analisar as ocorrências de tendência positiva – e também alguma negativa, embora não significativa – na região, além de correlação linear significativa, em algumas cidades, com fenômenos climáticos de escala global. É examinado também o aspecto climatológico sazonal do presente e de um cenário climático para o final do século (2070-2100), cujo objetivo é fornecer informações para um melhor planejamento das cidades, usando dados do modelo climático regional HadRM3P, do Hadley Centre (UK), simulados e fornecidos pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE), considerando o cenário A2 (mais pessimista) do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Na comparação com o clima presente, a projeção simulada pelo modelo climático indicou aumento da frequência de ocorrência dos eventos em todas as cidades, para todas as estações do ano, principalmente para o outono.

Palavras-chave: Eventos extremos de precipitação, Santa Catarina, Modelagem climática regional, Tendência linear.

Abstract

DA SILVA, G. C. **Quantitative analysis of rainfall extreme events in east and North regions of Santa Catarina State**. 2011. 105f. Dissertation – Program of Post-Graduation in Meteorology. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The time-variation feature of extreme precipitation events (those can result in flooding) on east and north regions of the Santa Catarina State, one of the Brazilian regions most attained by damages owing to heavy rain episodes, is analyzed in this study. For this, it were selected some cities whose history of flooding – based on many sources, as the Defesa Civil Estadual – was employed to built a threshold to identify the precipitation events that can cause flooding. The observed precipitation data, from 1951 to 2010, from ANA (Agência Nacional de Águas) was used to the analysis of daily rainfall occurred until fifteen days before the flooding and for the counting of this type of event. The methodology employed to detect these events was based on mean thresholds following the rainfall observed on the selected cities. The counting of the occurrences generated the time-variation over such period, indicating positive – and also some negative, although not significant – tendencies on this region, and a significative linear correlation with global scale climate phenomena in some of the cities. It is also observed the seasonal behavior for the present time and for a future climate scenario, ranging from 2070 to 2100, which aim is to give information to a better planning of the cities, through the regional climate model HadRM3P, from Hadley Centre (UK), simulated and provided by CCST (Centro de Ciências do Sistema Terrestre) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), considering the A2 scenario (more pessimist) following IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). In comparison against present climate, the estimated projection by climatic model shows an increasing of the frequency of these extreme precipitation events in all selected cities, for all seasons – mainly in autumn.

Keywords: Extreme events of precipitation, Santa Catarina State, Regional Climate Model, Linear tendency.

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1 - Localização e hipsometria do Estado de Santa Catarina. Fonte: Adaptado de Vanhone Jorge, 2009. 18
- Fig. 2 - Localização e numeração das cidades em estudo (retângulo em vermelho). A relação das cidades numeradas é a seguinte: 1) Alfredo Wagner; 2) Araranguá; 3) Benedito Novo; 4) Blumenau; 5) Brusque; 6) Criciúma; 7) Florianópolis; 8) Ilhota; 9) Ituporanga; 10) Joinville; 11) Mafra; 12) Orleans; 13) Porto União; 14) Rio do Sul; 15) Santo Amaro da Imperatriz; 16) Taió; 17) Timbé do Sul; 18- Tubarão..... 35
- Fig. 3 - Exemplo do limiar de precipitação com potencial de causar inundação, obtido para a cidade de Ilhota (SC) – Neste caso, a média é para 15 eventos de inundação ocorridos. 40
- Fig. 4 - Regiões de estudo de Niños no Oceano Pacífico Tropical..... 42
- Fig. 5 - Anomalia negativa (à esquerda) e positiva (à direita) da Oscilação Decadal do Pacífico. Fonte: Mantua et al., 1997..... 44
- Fig. 6 - Localização das áreas oceânicas do Oceano Atlântico para determinação do índice IAS. Fonte: Adaptado de Santos (2011). 46
- Fig. 7 - Representação do total do número de eventos extremos obtidos através do limiar 5d100mm. A localização de cada cidade está na Fig. 2. 60
- Fig. 8 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo 1º limiar com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODPI; e) IAS e f) QBOI. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%). 63
- Fig. 9 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo limiar de 10 dias com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODP; e) IAS e f) QBOI. Os níveis de

significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).	65
Fig. 10 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo limiar de 15 dias com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODP; e) IAS e f) QBO. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).	66
Fig. 11 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo limiar de 5d100 com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODP; e) IAS e f) QBOI. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).	68
Fig. 12 - Climatologia de eventos extremos no presente (1951-2010) para as 18 cidades. Cada cidade possui os 4 limiares representados: 1º limiar (superior esquerda); 10 dias (superior direita); 15 dias (inferior direita) e 5d100 (inferior esquerda). A unidade do eixo vertical é fixa em 5 (nº de casos por trimestre).	70
Fig. 13 - Climatologia sazonal dos eventos extremos no futuro (2070-2100) do 1º limiar. a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON (casos por estação).	73
Fig. 14 - Climatologia sazonal dos eventos extremos no futuro (2070-2100) do limiar de 15 dias. a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON (casos por estação).	75
Fig. 15 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo 1º limiar de precipitação, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.	77
Fig. 16 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo limiar de 10 dias, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.	77
Fig. 17 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo limiar de 15 dias, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.	78

Fig. 18 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo limiar de 5d100, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.	78
Fig. 19 - Tendência anual do total acumulado de eventos extremos obtidos pelo 1º limiar, 10 dias, 15 dias e 5d100 nas cidades de Alfredo Wagner e Araranguá, para o período 1951 a 2010. A unidade do eixo principal é 5 para todos os gráficos.	92
Fig. 20 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Benedito Novo e Blumenau.	93
Fig. 21 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Brusque e Criciúma.	94
Fig. 22 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Florianópolis e Ilhota.	95
Fig. 23 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Ituporanga e Joinville.	96
Fig. 24 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Mafra e Orleans.	97
Fig. 25 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Porto União e Rio do Sul.	98
Fig. 26 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Santo Amaro da Imperatriz e Taió.	99
Fig. 27 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Timbé do Sul e Tubarão.	100
Fig. 28 - Tendências do total acumulado (em decênios) de eventos extremos obtidos pelo 1º limiar nas cidades do Leste e Norte de Santa Catarina, para o período 1951 a 2010.	101
Fig. 29 - Diferença entre a precipitação média do cenário b2 e o baseline (esquerda) e entre o cenário a2 e o baseline (direita) para o verão. Os valores da barra de cores estão em mm dia ⁻¹	103
Fig. 30 - Idem a Fig. anterior, mas para o outono.	103
Fig. 31 - Idem a Fig. 29, mas para o inverno.	104
Fig. 32 - Idem a Fig. 29, mas para a primavera.	104

LISTA DE TABELAS

Tab. 1 - Fontes verificadas para obtenção do histórico de inundações e enchentes.	34
Tab. 2 – Cidades, estações pluviométricas usadas e suas coordenadas geográficas e altitude e distância aproximada ao centro da cidade.....	36
Tab. 3 - Limiares de precipitação determinados e utilizados para quantificar os eventos extremos para o período de 1951 a 2010.	52
Tab. 4 - Níveis de significância associadas aos valores dos coeficientes de correlação. A identificação do nível de significância é indicada por asteriscos.....	53
Tab. 5 - Tendência anual dos eventos extremos para o 1º limiar, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo.	54
Tab. 6 - Tendência anual dos eventos extremos para o limiar de 10 dias, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo.	56
Tab. 7 - Tendência anual dos eventos extremos para o limiar de 15 dias, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa	

significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%.
(SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo. 57

Tab. 8 - Tendência anual dos eventos extremos para o limiar de 5 dias e 100 mm, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo. 59

LISTA DE SIGLAS

5d100 – Precipitação de 100 mm acumulados em cinco dias
ANA – Agência Nacional de Águas
CPC – Climate Prediction Center
CDC – Climate Diagnostics Center
CO₂ – dióxido de carbono
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DJF – Dezembro, Janeiro, Fevereiro
ENOS – El Niño-Oscilação Sul
HadRM3P – Modelo Climático Regional do Hadley Centre
IAS – Índice Atlântico Sul
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOS – Índice de Oscilação Sul
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
JJA – Junho, Julho, Agosto
MAM – Março, Abril, Maio
MEI – Multivariate ENOS Index
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
ODP – Oscilação Decadal do Pacífico
ONI – Oceanic Niño Index
PIB – Produto Interno Bruto
PRECIS – Providing REgional Climates for Impacts Studies
QBO – Quasi-Biennial Oscillation
RS – Estado do Rio Grande do Sul
SC – Estado de Santa Catarina
SON – Setembro, Outubro, Novembro
TSM – Temperatura da superfície do mar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Estudo relacionado aos eventos severos de precipitação no Leste e Norte de Santa Catarina.....	21
2.1.1 Distribuição espacial e frequência de inundações na região Leste e Norte de Santa Catarina.....	21
2.1.2 Histórico de inundação no Leste e Norte de Santa Catarina.....	24
2.1.3 Episódios de numerosos desastres naturais causados por eventos atmosféricos severos.....	27
2.2 Estudos relacionados à tendência dos eventos extremos de precipitação	29
2.3 Modelagem Climática e eventos extremos de precipitação	30
3 METODOLOGIA	33
3.1 Dados de casos de inundações	33
3.2 Dados de precipitação	35
3.2.1 Seleção das estações pluviométricas.....	36
3.2.2 Dados do Modelo Climático HadRM3P	37
3.3 Determinação dos limiares de eventos extremos	38
3.3.1 Exemplo de determinação de limiar de precipitação	39
3.4 Índices anuais de fenômenos climáticos de escala global.....	41
3.4.1 Fenômeno ENOS.....	42
3.4.1.1 Índice MEI.....	43
3.4.1.2 Índice ONI.....	43
3.4.1.3 Índice SOI.....	43
3.4.1.4 Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)	44
3.4.1.5 Índice do Atlântico Sul (IAS)	45
3.4.1.6 Índice Oscilação Quase-Bienal (QBOI)	46

3.5 Testes para análise de tendência e de correlação	47
3.5.1 Análise de tendências lineares: Análise de Regressão e Teste de Mann-Kendal	47
3.5.2 Correlação com índices climáticos	49
3.6 Eventos extremos e cenários climáticos futuros	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 Relação dos limiares obtidos	51
4.2 Tendência dos eventos extremos observados.....	53
4.3 Eventos extremos e fenômenos climáticos	61
4.4 Análise sazonal e variação climática	69
5 CONCLUSÃO	81
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
Apêndices	91
Apêndice A	92
Apêndice B	101
Anexo A	103

1 INTRODUÇÃO

Os eventos extremos de precipitação causam transtornos para a sociedade em geral. Entre os transtornos gerados pela precipitação intensa estão as inundações, que podem ocorrer de forma rápida e violenta – as chamadas inundações bruscas – provocando desastres, principalmente nas encostas e margem dos rios. Outro tipo de inundações são as inundações graduais, na qual o fator agravante é o acúmulo pluviométrico ao longo de um período prolongado de chuvas, em que a saturação do solo não permite a infiltração, provocando o aumento no escoamento superficial das águas. Além disso, outra consequência desastrosa motivada pelo excesso pluviométrico associado com fatores antrópicos e geográficos da área atingida é a ocorrência de escorregamentos (deslizamentos) de terra.

Assim, uma das principais consequências negativas do excesso pluviométrico está relacionada ao fator humano nas grandes cidades, onde a expansão urbana modifica a cobertura da superfície do solo, diminuindo a taxa de infiltração das chuvas no solo, fazendo-as acumularem-se nas regiões mais baixas das cidades, expondo a população aos riscos causados pela força destrutiva das águas. Em adição, estudos indicam que a elevação da temperatura média global, provocada pela presença excessiva de gases que intensificam o efeito estufa, acentua a frequência das atividades atmosféricas severas, provocando o aumento dos totais pluviométricos em várias regiões do mundo, inclusive no Brasil. Devido aos riscos e prejuízos causados pelas chuvas anômalas, é importante um estudo voltado para a previsão do clima futuro, na qual a prevenção de tragédias e o planejamento das cidades para enfrentá-las são de suma importância.

O Estado de Santa Catarina apresenta problemas relacionados às chuvas intensas. Uma região que é crítica, seja em eventos de chuva prolongados ou intensos, é o Vale do Itajaí. Alguns dos fatores que estão relacionados aos problemas enfrentados pela população desta região são as características geográficas da bacia hidrográfica, que favorecem o escoamento rápido e violento das águas, e também o relevo acidentado, que favorece o desenvolvimento de nuvens convectivas.

Devido a isto, e pelo fato de o Estado ser castigado por eventos atmosféricos intensos – como tempestades severas, com elevados índices de precipitação associados com características físicas e geológicas que causam enchentes e inundações – se torna necessário a pesquisa de eventos de chuva que provocam estes tipos de transtornos. Além disso, muitas cidades não possuem planejamento ou estrutura para enfrentar as inundações e deslizamentos, consequência de tais adversidades atmosféricas.

O Estado de Santa Catarina localiza-se na região Sul do Brasil, possui uma área de 95,346,181km² e se encontra entre as coordenadas 25,95°S e 29,38°S e 48,32°W e 53,83°W (Fig. 1). O relevo caracteriza-se por regiões de planícies, planaltos e serras, sendo que as planícies se encontram na faixa litorânea e vales, com áreas abaixo de 300m abrangendo 23,83% da área total do Estado. Estudos indicam alta taxa de casos de inundação em várias cidades do Estado, principalmente na parte leste e norte.

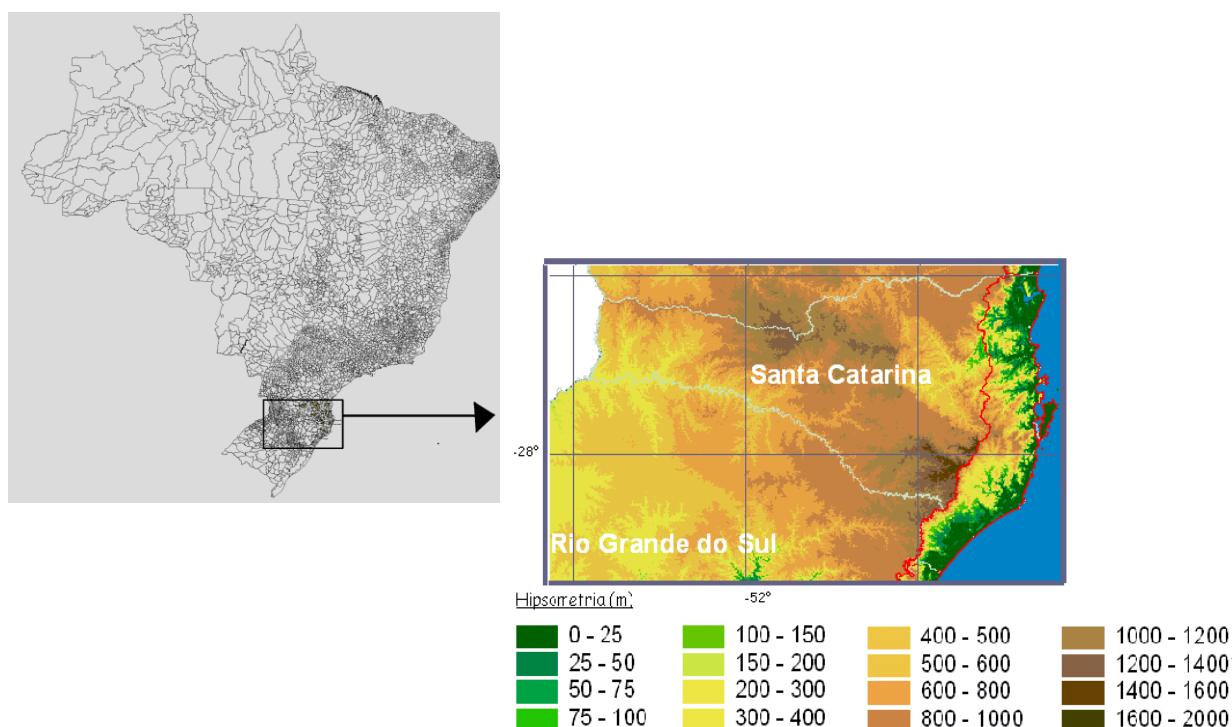


Fig. 1 - Localização e hipsometria do Estado de Santa Catarina. Fonte: Adaptado de Vanhone Jorge, 2009.

A região Leste e Norte de Santa Catarina possui cidades importantes para a economia brasileira, como Blumenau, Joinville e Florianópolis, sendo estas também as cidades mais populosas¹ do Estado. Além disso, devido ao desenvolvimento econômico em vários setores da economia, o norte catarinense é uma das regiões com maior PIB do país (IBGE, 2010).

Uma série de episódios de inundação ocorridos em Santa Catarina, e que são causados por fenômenos atmosféricos severos, ocorreram recentemente e atingiram o Leste do Estado. O primeiro furacão registrado na costa brasileira, o Catarina, ocorreu no final de março de 2004, atingindo a região litoral-sul do Estado, causando prejuízos consideráveis (Marcelino et al., 2005), e em novembro de 2008 foram as

¹ População das maiores cidades de Santa Catarina no ano de 2010: Joinville, 515.250; Florianópolis, 421.203; Blumenau, 309.214.

chuvas torrenciais que causaram recordes de precipitação, o que fazem a região Leste de Santa Catarina uma das mais vulneráveis do Brasil. No norte do Estado, existe um histórico de inundações, com destaque para Joinville, se tornando foco de estudo de muitos pesquisadores. Na região do Vale do Itajaí, a cidade de Blumenau possui um dos maiores históricos de enchentes e inundações do país.

Vários estudos foram realizados com o objetivo de analisar as anomalias de precipitação em Santa Catarina e no Vale do Itajaí (por exemplo, Marcelino et al. 2004; Severo, 1994), na qual aspectos relacionados aos sistemas atmosféricos de escala sinótica em eventos de chuva intensa servem como prognóstico para futuros eventos. Como consequência natural dos eventos extremos de precipitação, as inundações são um dos transtornos comuns e de difícil previsão, haja vista que uma cidade que receba uma quantidade de chuva pode apresentar inundação – ao contrário de outra cidade próxima, devido a fatores geológicos e físicos das regiões nas quais estão localizadas. Outros estudos indicam que existe boa correlação entre a ocorrência de inundações e a precipitação média climatológica. Porém, os eventos causadores de inundação podem ser independentes de precipitações médias, em que a análise pontual através de limiares de precipitação ao longo de um período de tempo pode ser melhor representativa da ocorrência de inundação.

Um estudo voltado para a análise dos eventos extremos que causam transtornos à população, tanto no presente quanto no futuro, pode indicar uma tendência de ocorrência destes eventos. Também se torna necessário saber se em um cenário futuro estes eventos extremos de precipitação serão mais frequentes ou não, uma vez que tais eventos podem estar relacionados com a precipitação climatológica, que é modulada pelo acoplamento oceano-atmosférico dos grandes oceanos, tais como ENOS e no Oceano Pacífico e também por anomalias da TSM do Oceano Atlântico. Desta forma, a partir deste tipo de informação muitos municípios poderão se preparar, tanto no setor da agricultura como nos grandes centros urbanos. A pesquisa desses eventos no presente serve como subsídio para a pesquisa dos mesmos no futuro, na qual a pesquisa da variação climática pode ser realizada através da modelagem climática.

Neste sentido, no presente trabalho são usados os resultados gerados pelo modelo climático regional HadRM3P do Hadley Centre (MARENGO et al., 2009a), mais especificamente os dados de baseline (tempo presente, 1960-1990) e do cenário A2 (2070-2100), que é o mais pessimista com relação à liberação de dióxido de carbono e, consequentemente, com relação ao aquecimento global de acordo com os relatórios do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) das Nações Unidas (ONU).

Com base no exposto acima, e da necessidade de estudo dos extremos de chuva em centros urbanos suscetíveis às inundações, o objetivo deste trabalho é:

1. Identificar o histórico de casos de inundação nas cidades do setor Leste e Norte de Santa Catarina;
2. Através de dados diários observados de chuva, que estão associados às inundações, obter alguns limiares de precipitação e a partir deles detectar os eventos extremos num período de 60 anos;
3. Verificar a tendência dos eventos sobre o período e a relação dos mesmos com fenômenos climáticos de grande escala;
4. Obter e analisar a climatologia sazonal das ocorrências dos eventos para o clima futuro (2070-2100) através de modelagem climática e comparar com a climatologia sazonal do presente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estudo relacionado aos eventos severos de precipitação no Leste e Norte de Santa Catarina

2.1.1 Distribuição espacial e frequência de inundações na região Leste e Norte de Santa Catarina

Vários estudos recentes – como alguns dos citados nesta revisão bibliográfica – mostram que a maioria dos transtornos causados por fenômenos atmosféricos em Santa Catarina são causados pelo excesso de precipitação, de modo que os acumulados pluviométricos podem acontecer de forma lenta e contínua, mas também de forma muito rápida e brusca, resultando em vários modos de situação de alagamento. Portanto, um dos objetivos do presente trabalho é realizar um estudo sobre os casos em que ocorreram prejuízos para as cidades da região Leste e Norte de Santa Catarina. De acordo com Herrmann (2006) a circulação atmosférica regional predominante no Estado de Santa Catarina é caracterizada por adversidades atmosféricas peculiares, que resultam em elevados totais pluviométricos, prolongados meses de estiagem ou tempestades intensas, que segundo a autora desencadeiam vendavais, granizos, tornados e marés de tempestades, distribuindo-se por todo o território catarinense ao longo do ano. A recorrência de eventos atmosféricos severos, com consequências danosas para quase todos os municípios catarinenses resultaram no mapeamento de tais eventos e no levantamento dos danos desencadeados pelos desastres naturais entre os anos de 1980 e 2003 (HERRMANN, 2006; ALMEIDA e PASCOALINO, 2009).

Desastres naturais ocorrem frequentemente no Estado, atingindo praticamente todos os setores da economia e a população rural e urbana. Segundo Herrmann et al. (2009) Santa Catarina tem maior destaque nos desastres causados pelos elevados totais pluviométricos, incluindo as inundações graduais, inundações

bruscas e escorregamentos, sendo as inundações graduais o mais frequente desastre natural e que provoca maiores impactos na região. As inundações graduais estão associadas a períodos prolongados de chuvas, e ocorrem quando os rios transbordam de forma lenta e previsível, voltando ao normal também de forma lenta. As inundações bruscas são relacionadas com picos intensos de chuva, de curta duração e concentradas, causando elevação repentina do nível das águas e escoamento rápido e destruidor. Características do relevo como inclinação, forma das encostas, impermeabilização do solo, são fatores que influenciam no escoamento e acúmulo do volume precipitado de chuva, acentuando os riscos de desastres naturais provocado pelas inundações bruscas (HERRMANN e MENDONÇA, 2007).

Herrmann et al. (2009) realizaram um levantamento dos desastres naturais no Estado de Santa Catarina entre os anos de 1980 e 2007, a partir de dados dos Relatórios de Avaliação de Danos da Diretoria Estadual da Defesa Civil (DEDC-SC), órgão em que são registrados os pedidos municipais de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública, para posterior criação de um banco de dados. Ao relacionar os municípios mais atingidos verificou que as mesorregiões² mais atingidas por inundações bruscas e graduais foram: o Norte Catarinense, Vale do Itajaí e Grande Florianópolis. Os eventos de inundação gradual estiveram presentes principalmente em anos de El Niño, já os eventos de inundação brusca ocorrem principalmente nos meses de janeiro e fevereiro.

Marcelino et al. (2004) analisaram a distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina no período de 1980 a 2003, ordenando conforme o número de ocorrência. Os autores constataram que as dez³ cidades mais atingidas estão nas mesorregiões do Vale do Itajaí, Grande Florianópolis e leste da mesorregião norte. As estações do ano com maior frequência foram primavera e verão, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro, sugerindo que

² O Estado de Santa Catarina é dividido geograficamente em seis mesorregiões: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Região Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí.

³ Estas cidades são: Blumenau, Florianópolis, Anitápolis, Camboriú, Garuva, Ituporanga, Presidente Getúlio, Joinville, Rio do Sul e Benedito Novo.

as instabilidades atmosféricas típicas de verão provocadas pelo aquecimento associado com o relevo da região são fatores decisivos para os desastres. Também foi observado que houve um aumento significativo na frequência das inundações bruscas a partir dos anos 90, que pode estar relacionado com o processo de urbanização da região e alterações climáticas.

Herrmann (2006) desenvolveu mapas de inundações graduais para Santa Catarina no período de 1980 a 2003, de forma que os municípios com estes desastres naturais foram classificados conforme a frequência de ocorrência. Os eventos de inundação graduais se encontram principalmente no Leste e Norte do Estado, sendo Blumenau e Mafra os municípios mais atingidos.

Herrmann e Mendonça (2007) realizaram um estudo relacionando os desastres naturais de inundação e estiagem no Estado, entre os anos de 1980 e 2004, correlacionando com sistemas meteorológicos de escala global e regional, a partir das informações da Defesa Civil estadual. As autoras verificaram que as chuvas intensas estiveram associadas tanto com o fenômeno El Niño, de grande escala, quanto à circulação regional. Também analisaram que os períodos secos estiveram relacionados tanto a eventos de La Niña quanto a bloqueios atmosféricos. No período de estudo foram registrados 1,229 inundações graduais, o que representa 37,7% dos desastres naturais ocorridos e que estiveram associados aos eventos de El Niño e à passagem de sistemas frontais.

Marcelino et al. (2006) realizaram o mapeamento das áreas de risco de desastres naturais relacionados à instabilidade atmosférica em Santa Catarina. O índice de risco foi relacionado com a frequência de desastres naturais (obtida junto à Defesa Civil estadual pelo Grupo de Estudo de Desastres Naturais (GEDN) da Universidade Federal de Santa Catarina), vulnerabilidade e resposta das cidades relativa ao dano sofrido (obtidos do Atlas de Desenvolvimento Humano do Brasil – ADHB, com dados do censo de 1991 a 2000, do IBGE). O termo vulnerabilidade inclui informações sobre a densidade demográfica municipal, a renda da população e o número de pessoas idosas (idade maior que 65 anos). A resposta da cidade leva em conta o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM). Para o período entre 1980 a 2003 ocorreram 3,373 desastres naturais neste Estado, sendo que

85% estiveram associados com instabilidades atmosféricas. Novamente o destaque foram cidades do leste: Florianópolis e Blumenau apresentaram os maiores índices de risco de desastres naturais, e também as mesorregiões do oeste e norte catarinenses. Segundo os autores, a partir destes resultados é possível que as comunidades afetadas possam enfrentar as situações de desastres naturais juntamente com medidas preventivas e apoio de políticas públicas para diminuir o número de pessoas afetadas.

2.1.2 Histórico de inundação no Leste e Norte de Santa Catarina

As bacias hidrográficas que compõem a Vertente Atlântica do Estado apresentam áreas de drenagem relativamente pequenas, se comparadas com outras bacias brasileiras. Uma exceção é a da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, que possui aproximadamente 15,500 km², e abrange 47 municípios catarinenses, tendo seus rios formadores localizados em regiões mais elevadas, razão pela qual seus deflúvios atingem a parte baixa da bacia com bastante rapidez. Com o crescimento da população urbana e o desenvolvimento das cidades, as inundações passaram a gerar prejuízos significativos, devido à ocupação de áreas de planície de inundação dos rios (SILVA, 2003); e as inundações no vale do Itajaí são periódicas desde quando se teve registros dos níveis dos rios. No entanto, há no presente um grande esforço para previsão e prevenção de situações de enchentes. A Bacia do Rio Itajaí-Açu conta com um conjunto de diques e represas para contenção das águas que desembocam no Rio Itajaí-Açu, e uma rede significativa de pluviômetros e fluviômetros que integram um sistema de alerta de inundações e cheias, com o centro de comando localizado na Universidade Regional de Blumenau (FURB).

Na cidade de Blumenau, situada às margens do Rio Itajaí-Açu, houve registros de 68 ocorrências de enchentes no período de 1852 a 2001, sendo que em 19 vezes a cota do rio ultrapassou os 12 metros, que é o nível de colapso na cidade (SILVA, 2003). As piores enchentes e que marcaram a região ocorreram em maio e junho de 1983 e agosto de 1985. Durante as inundações do mês de julho de 1983, foram registrados 197,770 desabrigados e 49 mortos. Só em Blumenau houveram 8

mortes e aproximadamente 50,000 desabrigados, contabilizando 29,3% da população do Município (HERRMANN et al., 2009).

Segundo Frank (1995) as inundações ocorridas na cidade de Blumenau – que tem cota de extravasamento de 8,5 metros e é a cidade mais castigada pelas inundações – levaram as autoridades a procurar soluções após o evento, para corrigir este tipo de transtorno para a comunidade, que vem desde a fundação da cidade. As principais enchentes que serviram para a tomada de decisões foram as que ocorreram nos anos de 1911, 1927, 1957 e 1983. Em outubro de 1911 a cota do Rio Itajaí-Açu, em Blumenau foi de 9,86 metros. Em 1927, no mês de outubro, a cota do rio foi 12,30 metros. Em 1957 ocorreram quatro inundações na cidade, e a cota maior aconteceu em agosto, com 12,86 metros. No ano de 1983 ocorreram quatro enchentes, em março, maio, julho e em setembro, com cota de 10,35, 12,46, 15,34 e 11,50 metros, respectivamente, na cidade de Blumenau. As tentativas de soluções realizadas ao longo dos anos passaram pela instalação e acompanhamento de postos pluviométricos e fluviométricos na bacia, represas de contenção, alargamento de rios e um sistema eficiente de alerta para prever os riscos de inundação, além de aperfeiçoamento dos trabalhos realizados pela Defesa Civil na evacuação das residências em áreas suscetíveis à inundação (SILVA, 2003).

Silveira e Kobiyana (2007) estudaram as inundações ocorridas desde antes da data de fundação de Joinville no período de 1851 a 2007, norte do Estado, sendo um dos registros mais longos deste tipo no país. A cidade, que está localizada entre a serra do mar e o oceano, apresenta baixa elevação acima do nível médio do mar (2 metros), facilitando os transtornos devido às influências das marés astronômicas e chuvas de relevo (SILVEIRA, 2008). Segundo Silveira e Kobiyana (2007) ocorreram inundações em 84 anos dos 157 estudados, com 54% de possibilidade de ocorrência, e a bacia do rio Cachoeira, que cruza a cidade, tem a maior frequência de ocorrência, com 56% de possibilidade de ocorrer alagamentos. Ao agrupar os dados de inundação em intervalos de 20 anos, os autores verificaram tendência de aumento das inundações – o que deve estar associado com o crescimento da cidade, desmatamento e possível aumento do volume precipitado ao longo dos anos. Porém, as precipitações médias anuais mostram tendência decrescente de

acumulado de chuva ao longo dos anos. As maiores inundações na cidade de Joinville ocorreram no mês fevereiro de 1985, de forma que o rio Cubatão subiu 7 metros acima do nível normal; em fevereiro de 1994, com 85% da cidade alagada; em fevereiro de 1995, com três mortes e 15,000 desalojados; em fevereiro de 2001, e 20,000 pessoas foram atingidas por algum dano provocado pelas chuvas fortes; em fevereiro de 2002, com 81 alagamentos na cidade e em novembro de 2006, fato que deixou o acumulado pluviométrico em cinco dias foi superior a 300 mm.

Em Rio do Sul, município mais populoso e com maior taxa de urbanização do Alto Vale do Itajaí, a maior enchente que o município enfrentou ocorreu em julho de 1983 (POLEZA, 2003). Segundo a autora, em todo o Estado houveram 250,000 pessoas desabrigadas, 25,000 somente em Rio do Sul, com 5 mortes e o nível do Rio Itajaí atingindo a cota de 15,08 metros. Outras enchentes ocorreram nos anos de 1954 e 1984, com muitos danos para a comunidade, porém com cota inferior à do ano 1983.

Na cidade de Rio Negrinho, situada no norte do Estado, ocorreram 12 inundações severas, sendo sete destas ocorridas em situação de El Niño (GOERL, 2010). As piores enchentes foram em julho de 1983, com precipitação mensal de 538,3 mm e em maio de 1992, precipitando o total de 482 mm neste mês, e nos dois anos a cota do Rio Negrinho atingiu 9,30 metros acima do nível normal.

Segundo Zarbatto (2004) a enchente que marcou a história do município de Tubarão, no sul de Santa Catarina, aconteceu em março de 1974, na qual cerca de 90% da cidade ficou alagada. Foram 30 dias com ruas alagadas, 199 mortes e 60,000 desabrigados – na época o número de habitantes em Tubarão era 70,000. Segundo a autora, duas outras enchentes ocorreram em 1838 e 1887, porém com menor intensidade que a de 1974. A principal causa da enchente foi, além de precipitação intensa, a acúmulo das águas pela atuação do vento de leste, impedindo o deslocamento natural do volume das águas do rio Tubarão. Após esse episódio houve a construção de diques ao longo do rio e a dragagem e retificação do mesmo para diminuir esses desastres e evitar que episódios semelhantes viessem a se repetir.

2.1.3 Episódios de numerosos desastres naturais causados por eventos atmosféricos severos

Herrmann (2006) relatou as principais adversidades atmosféricas que geraram danos significativos em Santa Catarina, que são causadas por diferentes tipos de sistemas atmosféricos no sul do Brasil. Em novembro de 1991 houve precipitação em apenas dois dias com acumulada superior a 400 mm em São José e inúmeros escorregamentos na serra do leste catarinense e mortes por soterramento de casas, além de vários trechos da BR 101 bloqueados por queda de barreira. Em dezembro de 1995 as intensas chuvas, que resultaram em 29 mortes, fizeram 29 municípios da mesorregião do sul catarinense decretar estado de calamidade pública.

No ano de 1995 as mesorregiões do Sul, Grande Florianópolis e Vale do Itajaí foram severamente atingidas por inundações bruscas e graduais. O mês de dezembro foi o de maior incidência de desastres naturais, sendo que em Florianópolis choveu mais de 400 mm no dia 24 (HERRMANN, 2006). Este evento foi caracterizado pela atuação simultânea de um sistema frontal transiente e um Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN), ocasionando ciclogênese e castigando boa parte da região sul do país por três dias (REINKE et al., 2006).

Herrmann et al. (2004) verificaram os escorregamentos associados pelas fortes chuvas, no período de 1980 a 2003, com os municípios mais atingidos sendo os que estão na serra do leste catarinense, principalmente Blumenau e outros do Vale do Itajaí, e os da Grande Florianópolis, principalmente na ilha onde situa-se a capital. Os autores notaram que os maiores registros de eventos mais chuvosos estão na maioria das vezes associados aos episódios de El Niño. Para a autora, parte da região da Grande Florianópolis foi atingida por quatro episódios de chuvas superiores a 200 mm diários, ocorrendo deslizamentos e 14 vítimas fatais: em novembro de 1991 (404,8 mm em 21 horas); fevereiro de 1994 (227 mm em 4 horas); dezembro de 1995 (594,5 mm em 48 horas) e fevereiro de 2001 (378,7 mm em 48 horas).

Em 24 de dezembro de 1995, fortes chuvas na bacia do rio Araranguá, no Sul do Estado, geraram enxurradas violentas e como consequência 11 municípios decretaram estado de calamidade pública com 29 vítimas devido aos deslizamentos nos municípios vizinhos: Timbé do Sul, Jacinto Machado e Siderópolis (HERRMANN et al., 2004).

Em 2001 ocorreram dois episódios que afetaram um grande número de municípios catarinenses. Entre os dias 5 e 8 de maio um ciclone extratropical associado com evento de sizígia ocasionou 11 registros de marés de tempestade com danos severos (HERRMANN et al., 2009). No dia 1 do mês de outubro de 2001, um sistema frontal associado com posterior ciclogênese, levou a acumulados significativos em toda a região sul do Brasil, exceto a parte oeste, com acumulados superiores a 50 mm (BARBIERI et al., 2008). A cidade de Blumenau foi uma das mais atingidas e várias cidades decretaram situação de emergência, devido ao rio Itajaí-Açu subir rapidamente.

Em março de 2004, Santa Catarina também foi castigado por um fenômeno atmosférico atípico, denominado Furacão Catarina. Nos dias 27 e 28 de março a costa sul do Estado e costa norte do Rio Grande do Sul sofreram com ventos intensos, chuvas fortes e avanço do mar pela costa, atingindo mais de 20 municípios (MARCELINO et al., 2005; HERRMANN, 2006). Os municípios mais castigados foram Passo de Torres, Balneário Gaivota, Balneário Arroio do Silva e Araranguá (MARCELINO et al., 2005).

No mês de novembro de 2008 ocorreu um das maiores desastres naturais de Santa Catarina. As áreas mais atingidas foram o Vale do Itajaí, Litoral Norte e a Grande Florianópolis. As chuvas foram causadas pelo estabelecimento de um bloqueio atmosférico no oceano Atlântico, juntamente com um vórtice ciclônico em altos níveis, favorecendo a ascensão do ar úmido ao longo da Serra do Mar, formando um eficiente sistema gerador de chuvas (SILVA DIAS et al., 2009). Segundo os autores, no que consiste em danos a sociedade, foram 60 cidades atingidas, mais de 1,5 milhões de pessoas afetadas, 133 mortes e 22 desaparecidos. Em muitas cidades foram superados os recordes anteriores de acumulado de chuva, tanto diários como mensal. Em Joinville e Blumenau o

acumulado ficou em torno de 1000 mm no mês de novembro. Ainda segundo os autores, entre os dias de maior precipitação, 20 a 24 de novembro de 2008, houve em Blumenau um acumulado de 283,1 mm em 24 horas, em Joinville 232,1 mm e em Itajaí 231,4 mm (SILVA DIAS et al., 2009).

2.2 Estudos relacionados à tendência dos eventos extremos de precipitação

Verifica-se que a região Leste e Norte de Santa Catarina é caracterizada por inúmeros eventos de inundações e enchentes, fatos que ocorrem devido a diversos fatores que interagem com os sistemas atmosféricos, como relevo, altitude e maritimidade. Esta instabilidade atmosférica é provocada pela aproximação de sistemas frontais, vórtices ciclônicos de altos níveis, sistemas convectivos de mesoescala, cavados atmosféricos em níveis baixos, médios, e altos da atmosfera, pela presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), pela atuação dos jatos de baixos e altos níveis, além da convecção causada pelo aquecimento. A localização deste Estado brasileiro favorece a ação dos diversos processos de precipitação que são fortalecidos pela sustentação do conteúdo de umidade, proveniente tanto dos oceanos Atlântico e Pacífico, como da região continental. Além disso, fenômenos de grande escala como ENOS tem papel importante no regime de precipitação. Porém, sabe-se que em uma atmosfera mais aquecida haveria maior ocorrência de extremos de chuva devido à convecção local, e a verificação da tendência desses extremos é de suma importância.

Alexander et al. (2006) analisaram tendências em extremos anuais de chuva no Sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e Centro-norte da Argentina. Neste estudo identificaram tendências positivas no número de dias com chuva intensa e chuva muito intensa concentrada em curto espaço de tempo, além de precipitação acumulada em eventos chuvosos e muito chuvosos, que são indicadores de chuvas que produzem enchentes, para o período de 1961-2000. Estas tendências sugerem aumento na intensidade e na frequência dos eventos severos de chuva no Sudeste da América do Sul.

Na literatura existem várias metodologias usadas para a verificação e análise de eventos extremos de chuva, o que dificulta uma análise comparativa entre os estudos. Por exemplo, Teixeira e Satyamurty (2007) e Teixeira (2005) usaram isoetas fechadas de precipitação em uma área específica, e também identificaram tendência de crescimento da frequência de extremos de chuva no Sul do Brasil, e com frequência maior em anos dominados por eventos de El Niño

Uma forma de determinação e análise de eventos extremos do clima, mais especificamente os extremos de chuva que são os que causam inundação, é através de índices de extremos climáticos de curta duração. Um dos trabalhos mais completos que usam estes índices, Tebaldi et al. (2006), analisaram regiões do globo no período de 1950-2003. A partir da década de 1980 nota-se que a curva de tendência dos extremos de chuva, determinados pelos índices, apresentam valores acima da média e aumento considerável.

Groisman et al. (1999) desenvolveram o primeiro estudo de precipitação intensa para diversos países. Examinaram os extremos de precipitação no verão para oito países: Canadá, Estados Unidos, México, Antiga União Soviética, China, Austrália, Noruega, e Polônia, usando a distribuição e modelagem estatística gama. Verificaram aumento do número de dias com precipitação intensa em várias regiões dos extratropicais no globo ao longo do século XX. Isto pode estar associado com o aumento da temperatura média global vista no último século, o que acelera o ciclo hidrológico devido à maior disposição do vapor d'água na atmosfera em nível global.

2.3 Modelagem Climática e eventos extremos de precipitação

É de consenso geral que os estudos que indicam o comportamento futuro dos eventos com potencial para causar transtornos são de suma importância para o planejamento das cidades. Desta forma, várias pesquisas empregando a modelagem climática vêm sendo realizados com esse objetivo.

Milly et al. (2005) analisaram a vazão de rios em escala mundial. Verificaram um aumento de 2 a 30% na vazão do Rio Paraná e áreas vizinhas do Sudeste da América do Sul, o que é consistente com outros trabalhos (MARENGO et al., 2007; TEBALDI et al., 2006; MARENGO, 2008, 2009a,b; MILLY et al., 2002) que mostram

aumento da tendência de chuva na região para o futuro. Usando vários modelos empregados no quarto relatório do IPCC (IPCC AR4), foi verificado, em nível global, aumento na vazão em comparação com o presente. No Brasil, a tendência é de crescimento na Bacia Paraná-Prata para o fim do século XXI, sugerindo aumento da frequência de enchentes, consequência de intensos eventos de precipitação.

Através da modelagem climática, Marengo et al. (2007) verificaram aumento da intensidade das chuvas em algumas regiões do sudoeste da América do Sul, concordando com aumento das temperaturas. Isto somado com a crescente expansão das grandes cidades e ao uso acelerado de áreas antes conservadas, pode estar relacionado com o aumento observado na frequência de eventos de inundação em Santa Catarina (HERRMANN, 2006; MARCELINO et al., 2004). Usando modelagem climática, muitos autores mostram que em cenários de aquecimento haveria aumento do volume total precipitado no sul e sudeste do país; no entanto, este ocorreria em forma de eventos extremos de chuva (MARENGO et al., 2007, 2009a,b; TEBALDI et al., 2006).

Estudos realizados com o modelo regional HadRM3P mostram que o mesmo apresenta boa concordância com o ciclo sazonal de precipitação, sendo assim de grande valia para pesquisa da variabilidade climática (ALVES, 2007). Na avaliação do autor, o modelo foi testado em condições contrastantes de ENOS e apresentou boa capacidade de simulação, tanto no padrão espacial quanto temporal de precipitação na América do Sul. As regiões que melhor foram representadas são o Sul e Sudeste do Brasil. Modelos climáticos regionais são importantes para estudos climáticos de eventos extremos locais, pois captam mudanças e forçantes em escala regional.

O Modelo HadRM3P é um modelo climático regional desenvolvido pelo Hadley Centre, do Reino Unido, e utilizado por cientistas do mundo todo (MARENGO et al., 2009a). Ele usa o sistema de modelagem PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies), que está sendo empregado por vários países para previsões climáticas regionais (por exemplo, Tadross et al., 2005; Rupa Kumar et al., 2006; Xu et al., 2006a,b; Islam and Rehman, 2007; Zhang et al., 2006). No Brasil foi implantado um sistema para estudo do clima futuro (2071-2100) e

impactos das mudanças climáticas, o CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America), o qual foi financiado pelo MMA/BIRD/GEF/CNPq (Projeto PROBIO), pelo Programa Nacional de Mudanças Climáticas do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e pelo *UK Global Opportunity Fund-GOF Project Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South America* e pelo *GOF-Dangerous Climate Change* (DCC).

O modelo HadRM3P, cujas projeções usadas neste trabalho foram fornecidas pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE), possui escala espacial de 50 km e condições de contorno geradas pelo modelo de circulação geral (escala global) HadAM3P, também do Hadley Centre, em que as principais forçantes para a simulação do período 1960-1990 (baseline) são a temperatura da superfície do mar e a cobertura de gelo marinho. Para as simulações dos cenários futuros, o HadAm3P adiciona às condições do baseline tendências geradas pelo modelo acoplado HadCM3 (GORDON et al., 2000), cujos componentes atmosféricos consideram, para o caso do baseline, dados de emissões de gases de efeito estufa observados e, para o caso dos cenários futuros, emissões simuladas do SRES (Special Reports for Emissions Scenarios).

A validação do modelo em relação à precipitação para o presente (1961-1990) foi realizada na América do Sul (MARENGO et al., 2009b), na qual comparou-se com dados observados, para assegurar a habilidade em simular a tendência de extremos do clima para o futuro. Para o Brasil, foi implantado um sistema de estudo do clima futuro (2071-2100) e impactos das mudanças climáticas, o CREAS, gerando cenários de alta resolução para a América do Sul, levando em conta os GEE (gases efeito estufa) e SO₂ emitidos a partir de dois cenários do IPCC (A2, pessimista e B2, otimista). A concentração de CO₂ no SRES A2 é de aproximadamente 300ppm durante a década de 1980 e de aproximadamente 700ppm durante a década de 2080, enquanto que as concentrações de NO₂ são da ordem de 280 e 400 ppb, respectivamente (SOARES, 2008).

3 METODOLOGIA

Basicamente, a metodologia empregada para se obter a variação temporal dos casos com potencial para causar inundação pode ser organizada em quatro passos: coleta dos casos de inundação, associação dos dados de precipitação observada à cada caso de inundação, obtenção dos limiares que identificarão os casos com potencial para causar inundação e quantificação de tais casos ao longo das últimas décadas. Posteriormente, são obtidas as tendências, as análises sazonais e correlações com alguns índices climáticos. O modelo climático HadRM3P (MARENGO et al., 2009a) foi usado para a estimativa do comportamento dos eventos no futuro (2070-2100). A seguir, as etapas supracitadas são explicadas detalhadamente.

3.1 Dados de casos de inundações

Na primeira etapa deste estudo, foram registrados os eventos de inundações e enchentes ocorridos nas áreas urbanas das cidades com maior frequência de inundações na região (Fig. 2), no período de janeiro de 1980 a dezembro de 2010. Os casos de inundações foram obtidos da Defesa Civil Estadual – decretos de situação de emergência (SE) ou estado de calamidade pública (ECP) –; trabalhos científicos como de Herrmann (2006); Herrmann e Mendonça (2007); Silva (2003), exclusivamente para a cidade de Blumenau; Silveira (2008) e Silveira e Kobiyama (2007), exclusivamente para a cidade de Joinville; além de notícias locais publicadas em jornais (DIÁRIO CATARINENSE, A NOTÍCIA) e do Banco de Dados de Recursos Hídricos do Estado. A variedade dessas fontes se deve ao fato da não-existência de um órgão regional que registre esse tipo de dado por um longo tempo, com exceção

da Defesa Civil, que disponibiliza os casos mais recentes (a partir de 1998). Na Tab. 1 é mostrado o período e as fontes pesquisadas e na Fig. 2 as cidades em estudo.

Tab. 1 - Fontes verificadas para obtenção do histórico de inundações e enchentes.

Ano	Fonte pesquisada					Jornais
	Recursos Hídricos de SC	Defesa Civil de SC	HERRMANN (2006); HERRMANN e MENDONÇA (2007)	SILVEIRA e KOBİYANA (2007); SILVEIRA (2008)	SILVA (2003)	
1980	X		X	X	X	X
1981	X		X	X	X	X
1982	X		X	X	X	X
1983	X		X	X	X	X
1984	X		X	X	X	X
1985	X		X	X	X	X
1986	X		X	X	X	X
1987	X		X	X	X	X
1988	X		X	X	X	X
1989	X		X	X	X	X
1990	X		X	X	X	X
1991	X		X	X	X	X
1992	X		X	X	X	X
1993	X		X	X	X	X
1994	X		X	X	X	X
1995	X		X	X	X	X
1996			X	X	X	X
1997			X	X	X	X
1998		X	X	X	X	X
1999		X	X	X	X	X
2000		X	X	X	X	X
2001		X	X	X	X	X
2002		X	X	X		X
2003		X	X	X		X
2004		X	X	X		X
2005		X		X		X
2006		X		X		X
2007		X		X		X
2008		X				X
2009		X				X
2010		X				X

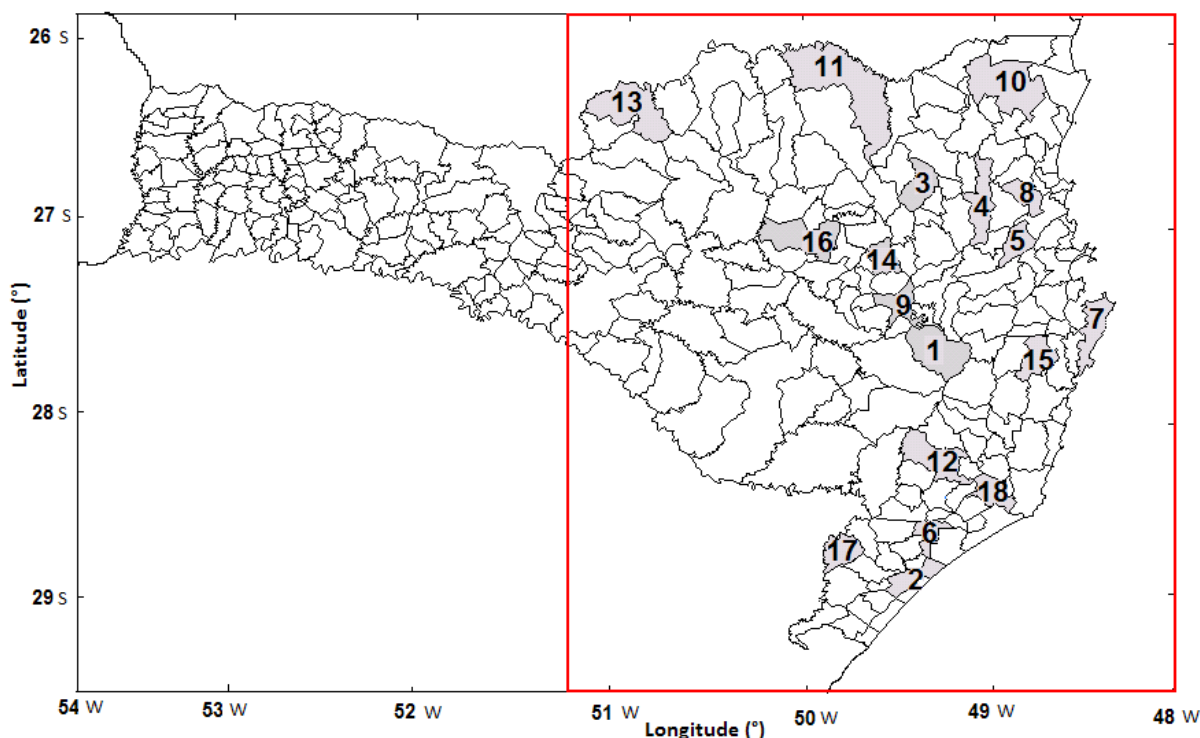


Fig. 2 - Localização e numeração das cidades em estudo (retângulo em vermelho). A relação das cidades numeradas é a seguinte: 1) Alfredo Wagner; 2) Araranguá; 3) Benedito Novo; 4) Blumenau; 5) Brusque; 6) Criciúma; 7) Florianópolis; 8) Ilhota; 9) Ituporanga; 10) Joinville; 11) Mafra; 12) Orleans; 13) Porto União; 14) Rio do Sul; 15) Santo Amaro da Imperatriz; 16) Taió; 17) Timbó do Sul; 18- Tubarão.

3.2 Dados de precipitação

Após a coleta dos casos de inundações, se obteve os dados da precipitação que antecedeu aos eventos de inundação, com o objetivo de se determinar um valor numérico (taxa) médio que possa identificar eventos de chuva com potencial de provocar inundação. Os dados de precipitação foram obtidos de estações pluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas) por meio do site <http://hidroweb.ana.gov.br>, depois de uma pesquisa sobre as estações com dados disponíveis na região. O período de tempo utilizado foi de 1951 a 2010.

3.2.1 Seleção das estações pluviométricas

O critério de escolha das estações pluviométricas foi a da localização mais próxima possível das cidades analisadas. Pelo fato de haver séries com falhas dos dados diários, foi formada uma matriz de correlação entre as estações próximas, para as cidades que não dispõem de estação com série completa, sendo que as estações que apresentaram grau de coeficiente de correlação baixo ($< 0,75$) entre si foram descartadas. No total foram analisadas 60 estações, sendo utilizadas efetivamente 43 destas, como mostrado na Tab. 2.

Tab. 2 – Cidades, estações pluviométricas usadas e suas coordenadas geográficas e altitude e distância aproximada ao centro da cidade.

Cidade	Código da estação	Lat (S)	Lon (W)	~Altitude (m)	~Distância (m)
Alfredo Wagner	2749007	27,7306	49,3828	550	5000
Alfredo Wagner	2749037	27,6833	49,3653	454	3500
Araranguá	2849004	28,9583	49,6014	10	11000
Araranguá	2849012	28,8833	49,5167	13	6000
Benedito Novo	2649003	26,7811	49,3650	90	14000
Benedito Novo	2649004	26,8298	49,2718	70	10000
Benedito Novo	2649008	26,7408	49,2706	80	10000
Blumenau	2649007	26,9181	49,0653	12	1000
Blumenau	2649009	26,9700	49,0700	40	5000
Brusque	2748000	27,1006	48,9178	40	500
Brusque	2748002	27,2856	48,9333	45	20000
Criciúma	2849006	28,7506	49,4731	40	11000
Criciúma	2849022	28,7217	49,3033	50	7000
Criciúma	2849017	28,9667	49,3667	46	3000
Florianópolis	2748004	27,6900	48,7100	20	17000
Florianópolis	2748013	27,6700	48,5500	5	7000
Florianópolis	2748006	27,6006	48,6200	2	7000
Ilhota	2648001	26,9217	48,8392	10	5000
Ilhota	2649007	26,9181	48,0653	12	24000
Ilhota	2648002	26,7242	48,9317	90	23000
Ituporanga	2649002	27,3986	49,6058	370	3000
Ituporanga	2749017	27,7019	49,5531	370	7000
Joinville	2648014	26,3217	48,8464	6	1000
Joinville	2648033	26,1800	48,9394	64	13000
Joinville	2648028	26,4483	48,8303	8	14000
Mafra	2649006	26,1000	49,8000	770	1000
Orleans	2849001	28,3589	49,2950	90	1000
Orleans	2849002	28,3258	49,1792	40	11000

Orleans	2849028	28,4347	49,1822	40	12000
Porto União	2651000	26,2431	51,0779	736	500
Porto União	2651007	26,2167	51,0670	778	2000
Porto União	2651059	26,2431	51,0779	820	500
Rio do Sul	2749008	27,2167	48,6167	350	2000
Rio do Sul	2749013	27,2903	48,7689	304	15000
Rio do Sul	2749039	27,2056	48,6317	350	3000
Sto Amaro da Imperat,	2748004	27,6928	48,7097	20	6500
Sto Amaro da Imperat,	2748005	27,7028	48,8019	55	3000
Taió	2750014	27,0972	50,0339	370	4000
Taió	2749003	27,1131	49,9944	360	100
Timbé do Sul	2849019	28,8350	49,8378	115	1000
Timbé do Sul	2849005	28,8322	49,6367	80	20000
Tubarão	2849000	28,4194	49,1067	20	11000
Tubarão	2849027	28,4722	48,9911	9	100

Desta forma foram usadas as séries mais completas de dados diários de chuva disponíveis. Para o preenchimento das falhas, foram usadas as estações pluviométricas mais próximas fisicamente, tendo como critério de escolha:

1º: deveriam se encontrar próximas do posto pluviométrico da série a ser preenchido (< 25 km) e,

2º: deveriam estar localizadas em altitudes menores que 95m de diferença para aquela a ser preenchida, e padrão de precipitação semelhantes, baseado nos coeficientes de correlação da matriz de dados.

Ao final da etapa de preenchimento, o percentual de falhas nas séries diárias de precipitação pluviométrica foi menor do que 1% para todas as cidades pesquisadas.

3.2.2 Dados do Modelo Climático HadRM3P

Para análise da variação climática ao longo do século foram usados dados de precipitação simulados pelo modelo climático regional HadRM3P (MARENGO et al., 2009a), considerando o baseline (tempo presente , 1960-1990) e o cenário futuro (A2, 2070-2100), que é o cenário mais pessimista em relação à liberação de gases efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global de acordo com os relatórios

do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) das Nações Unidas (ONU), conforme a descrição do modelo feita no item de revisão bibliográfica. Os casos identificados no futuro usaram os limiares obtidos para cada cidade no tempo presente. Obviamente, supõe-se que em um período de vários anos, como o empregado neste estudo, o fator urbanístico (intensificador de inundações) seja aumentado. Por outro lado, espera-se que este fator seja arrefecido por políticas públicas de prevenção de tais transtornos, o que tenderia a aproximar os limiares reais do futuro e do presente, justificando o emprego dos limiares usados nos dados observados (1951-2010) e no modelo climático (2070-2100).

3.3 Determinação dos limiares de eventos extremos

Foram usados os dados diários de precipitação observados em até 30 dias antes de cada evento de inundação para que se considere não só as inundações bruscas, que são intensas precipitações que normalmente ocorrem em um único dia, como também as precipitações moderadas, que ao longo de vários dias leva o solo à saturação e inibe a infiltração, gerando condições de ocorrer inundação gradual. Contudo, dos 30 dias analisados foram utilizados, neste estudo, até 15 dias antes de cada inundação para determinação dos limiares.

Através da análise diária da precipitação acumulada média pré-inundação, obteve-se o cálculo da média e do desvio padrão dos dias anteriores à data do registro da inundação. O termo “precipitação acumulada média”, se refere ao valor médio da precipitação diária acumulada de todos os eventos de inundação observados na cidade. Devido à irregularidade temporal das chuvas, o padrão de acumulado nem sempre tem picos intensos pouco tempo antes de desencadear uma inundação, situação que é comprovada se o valor de desvio padrão obtido for alto. Se em um determinado dia antes da inundação existir um valor nulo (obviamente hipotético) de desvio padrão, significa que neste dia todos os valores de acumulados são idênticos, e conclui-se que este valor de acumulado médio é um valor que sempre está presente nas inundações. Porém, não é o que ocorre em se tratando da variável meteorológica *chuva*, mas pode ser uma boa aproximação para quantificar

os eventos de chuva que mais ocorrem em na cidade com histórico de inundação. O valor médio (mm de precipitação acumulada em um determinado número de dias) mais “comum”, ou seja, que apresenta o menor desvio padrão de precipitação acumulada, associado com o valor médio da precipitação, é um indicativo de um caso com potencial de causar inundação na área urbana de uma cidade.

3.3.1 Exemplo de determinação de limiar de precipitação

A Fig. 3 mostra um exemplo de obtenção de um limiar de acordo com a metodologia citada acima para a cidade de Ilhota, que é cortada pelo Rio Itajaí-Açu. A linha em vermelho indica a precipitação acumulada média ao longo dos 30 dias anteriores à enchente (Dia 0) - que são valores médios diários que antecederam 15 eventos de inundação observados entre 1980 e 2010, em Ilhota - e a linha em negrito, o desvio padrão. É esperado que quanto maior for o intervalo antecedente à inundação, maior o desvio padrão. Contudo, caso o desvio padrão apresente uma queda, é indicativo de uma taxa com pouco espalhamento, i.e., com boa concordância entre os casos, servindo como limiar. Neste exemplo, o limiar é definido como sendo o 2º dia antes da enchente, pois o valor do desvio padrão foi o menor (com exceção do primeiro dia), de 29 mm, e a precipitação acumulada de 78 mm, sendo este limiar chamado de 2d78. Assim, a análise das inundações ocorridas nesta cidade (de 1980 a 2010) indica que eventos com valores de precipitação iguais ou maiores de 78 mm acumulada em 2 dias tem grande potencial de causar situação de inundação na cidade de Ilhota.

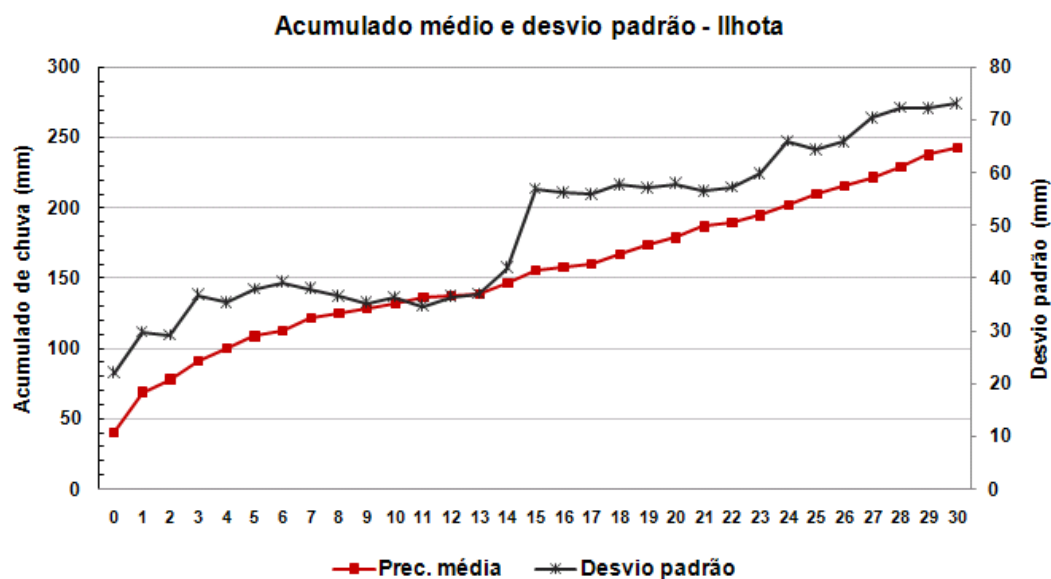


Fig. 3 - Exemplo do limiar de precipitação com potencial de causar inundação, obtido para a cidade de Ilhota (SC) – Neste caso, a média é para 15 eventos de inundação ocorridos.

Aqui, o termo “potencial” é necessário, pois significa que o evento teve condição de acarretar em inundação, não necessariamente acarretando (por outros motivos), ou que até possa realmente ter provocado e a inundação não ter sido registrada.

Outros valores de limiar para esta cidade também podem ser definidos, como 147 mm de chuva em 14 dias, caso se deseje analisar um período de acumulação maior, considerando também períodos de chuva menos intensa e mais prolongada cujos valores acumulados ao longo de dias provoquem a saturação do solo e consequente inundação.

Esta análise de acumulado médio foi realizada para todas as 18 cidades em estudo, sendo que cada cidade apresenta diferentes padrões de precipitação e número de inundações (entre 13 e 36) no período de tempo (1980 a 2010). Desta forma, cada cidade geralmente apresenta um limiar próprio devido à distribuição irregular das chuvas, ao aspecto urbanístico, além do aspecto geológico e hidrográfico.

3.4 Índices anuais de fenômenos climáticos de escala global

Sabe-se que o regime de clima global e regional é afetado pelo comportamento da temperatura da superfície dos oceanos, devido ao forte acoplamento entre oceano e atmosfera. Na análise de prováveis relações dos eventos extremos de chuva associados às inundações na região Leste e Norte de Santa Catarina com fenômenos oceânico-atmosférico foram utilizados índices climáticos, fazendo a correlação serial anual dentro do período de 1951 e 2010. Para este estudo utilizou-se informações de anomalias da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical para identificação do fenômeno ENOS (El Niño-Oscilação Sul), medido através dos índices MEI (Multivariate ENOS Index), ONI (Oceanic Niño Index) e SOI (South Oscillation Index); de anomalias climáticas de temperatura de maior duração do Oceano Pacífico, índice ODP (Oscilação Decadal do Pacífico); de anomalias de temperatura para o Atlântico Sul, índice IAS (Índice Atlântico Sul) (SANTOS, 2011); além de anomalias de vento zonal na Estratosfera Tropical, Índice QBO (Quasi-Biennial Oscillation).

Devido aos eventos extremos serem quantificados anualmente, os índices mensais oceânicos teriam de ser definidos também anualmente, sendo usados os valores máximos de anomalias mensais, para que represente da melhor forma possível o sinal das anomalias. Sendo assim, dos 12 meses que correspondem a um ano foi selecionado o valor do índice mensal com maior amplitude, em módulo, que obrigatoriamente deveria estar na maior sequência de sinal de anomalia, isto é, sem alternância entre os sinais positivos e negativos, e desta maneira, captar os eventos anômalos. Por exemplo, para uma série anual em que houve oito meses com anomalia positiva de TSM e quatro com anomalia negativa, elegeu-se o maior valor positivo como representante do sinal da anomalia para correlacionar com o número de eventos extremos de chuva detectados no mesmo ano. Desta forma, foram usados 60 valores de índice climático, que correspondem às séries no período de 1951 a 2010.

3.4.1 Fenômeno ENOS

O ENOS é um fenômeno oceânico-atmosférico que ocorre no Oceano Pacífico e afeta o tempo e o clima em diversas regiões do planeta, causando fenômenos como secas e enchentes, inclusive no Brasil. A circulação dos ventos em médios e altos níveis na atmosfera tropical está associada às anomalias de TSM nos grandes oceanos. Os eventos de El Niño são definidos pelo aquecimento anormal do setor central e Leste do Oceano Pacífico Tropical, enquanto eventos de La Niña são definidos pelo resfriamento anormal deste setor. Juntamente com as anomalias de TSM ocorrem variações de pressão atmosférica nas regiões de Darwin (12,4S°-130,0°E) e de Taiti (17,5°S-149,6°W), formando uma espécie de gangorra atmosférica com centros de pressão nestas regiões (BJERKNES, 1966). A localização da área de anomalia é mostrada na Fig. 4. Para medir a fase e magnitude desta oscilação, estabeleceram-se índices que são usados para quantificar as anomalias dos eventos ENOS e, aqui, foram estudados os índices MEI, ONI e SOI.

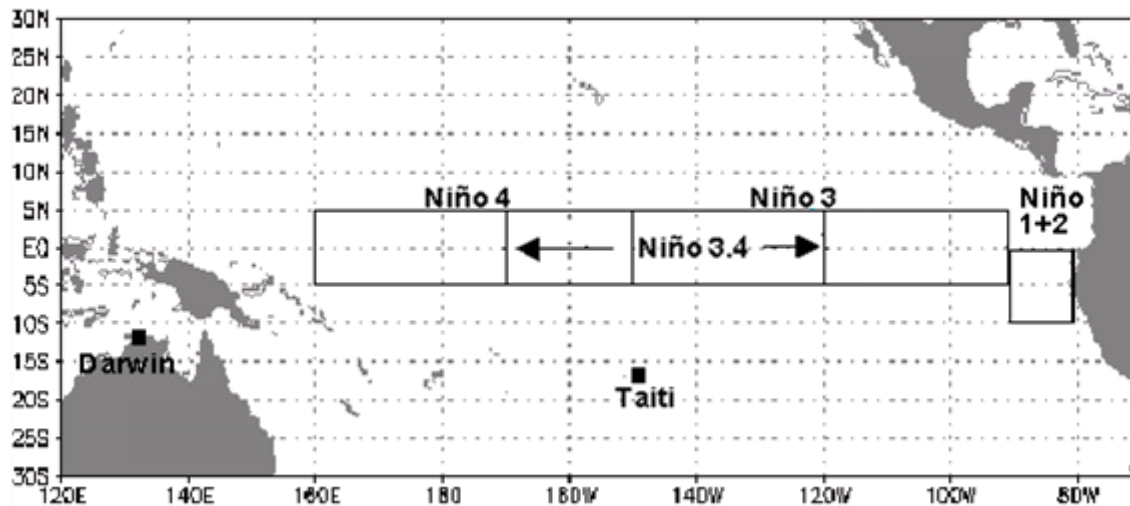


Fig. 4 - Regiões de estudo de Niños no Oceano Pacífico Tropical.

Fonte: CPTEC / INPE - <http://tucupi.cptec.inpe.br/enos>.

3.4.1.1 Índice MEI

O Índice MEI (*Múltivariate ENOS Index*) é um índice oceânico-atmosférico definido para analisar o comportamento do ENOS através de observações no Pacífico Tropical. Foi desenvolvido pelo CDC (Climate Diagnostics Center, da NOAA), sendo determinado por 6 variáveis atmosféricas: pressão ao nível do mar, componente zonal e meridional do vento em superfície, temperatura da superfície do mar, temperatura do ar e um indicador de nebulosidade. Este índice oscila entre valores positivos e negativos, que indicam a fase quente e fase fria, respectivamente, determinando assim a intensidade relativa de eventos El Niño e La Niña. O Índice MEI foi calculado separadamente, para cada um dos doze meses do ano, e expresso como médias bimestrais (Dez-jan, Jan-fev,..., Nov-dez). É obtido através da primeira componente principal não rotacionada de todos os seis campos observados e combinados (LOPES, 2006). Valores do índice e mais informações podem ser obtidos em: <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/mei.html>.

3.4.1.2 Índice ONI

O índice ONI (Oceanic Niño Index), calculado pelo CPC (Climatic Prediction Center) do (NOAA) é um índice de medida e monitoramento do ENOS, que é determinado a partir da média móvel de três meses corridos da anomalia de temperatura na região Niño 3,4 (5°S-5°N; 120°W-170°W) do Pacífico Equatorial. Cada evento anômalo é definido ao apresentar, pelo menos, cinco meses consecutivos com anomalias de TSM de +/- 0,5°C, e calculado em relação ao período de 1971-2000 (NOAA, 2011).

3.4.1.3 Índice SOI

O índice SOI (*Southern Oscillation Index*) é calculado pelo Departamento de Meteorologia da Austrália (Bureau of Meteorology of Australia), e obtido através da diferença de pressão atmosférica normalizada ao nível do mar, expressando uma relação entre a pressão atmosférica no Pacífico Central (Taiti) (17,5°S – 149,6°W), e no Pacífico Oeste (Darwin/Austrália) (12,4°S – 130,9°E). O índice SOI é expresso por unidades de desvio padrão (PHILANDER, 1990), sendo

que anomalias positivas e negativas persistentes por vários meses indicam a ocorrência de La Niña e El Niño, respectivamente. É importante mencionar que o índice SOI se apresenta com valores de sinais contrários aos de ONI, na qual os sinais positivos num índice são correspondentes a sinais negativos no outro, e com diferentes magnitudes. Os valores mensais podem ser encontrados em: <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>.

3.4.1.4 Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)

O Oceano Pacífico apresenta um padrão dominante de variabilidade climática de baixa frequência e grande escala, com regime oscilatório, chamado Oscilação Decadal do Pacífico (ODP - Fig. 5) (MANTUA et al., 1997). A escala de tempo da persistência do sinal da TSM é interdecadal, com período de 20 a 30 anos. Este fenômeno – provocado por anomalias simultâneas de TSM no Pacífico Tropical e o Pacífico Norte (20°N-90°N) – apresenta-se através de duas fases, sendo que a fase fria é caracterizada por anomalias negativa no Pacífico Tropical e positiva no Pacífico Extratropical. A fase quente é determinada pela configuração oposta à da fase fria, e as causas das variações da TSM da ODP ainda são desconhecidas. A série temporal da Oscilação Decadal do Pacífico também é apresentada por valores numéricos disponíveis desde janeiro de 1900. Os dados mensais do índice de ODP está disponível em <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.

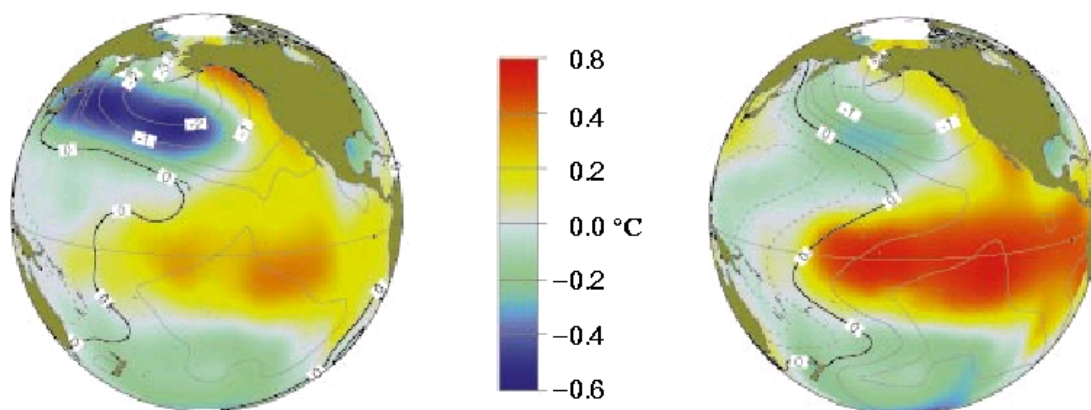


Fig. 5 - Anomalia negativa (à esquerda) e positiva (à direita) da Oscilação Decadal do Pacífico. Fonte: Mantua et al., 1997.

3.4.1.5 Índice do Atlântico Sul (IAS)

As TSMs do Atlântico Tropical e Sul (5°S - 5°N ; 5°W - 35°W / 20°S - 30°S ; 20°W - 40°W), respectivamente, (Fig. 6) apresentam variações semelhantes as do Pacífico, sendo possível obter índices mensais. Santos (2011) definiu valores numéricos para o índice IAS (Índice do Atlântico Sul), entre outros, na qual analisou as TSMs dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Tropical (região do Niño 3,4), com o objetivo de estudar as influências destes oceanos na precipitação no Estado do Rio Grande do Sul (RS), no intervalo de 1948 a 2009. As variáveis foram: a média e desvio padrão da TSMs das regiões oceânicas, resultando em séries temporais de dados entre 1900 e 2009.

Segundo a autora, semelhante ao ENOS, o Atlântico sofre influências externas de forma que é possível identificar numericamente as oscilações das anomalias de TSMs, na qual a fase positiva corresponde à anomalia positiva, e a fase negativa corresponde à anomalia negativa das TSMs desta parte oceânica. O índice IAS apresentou variabilidade inter-anual significativa, para períodos de 2 a 4 anos entre 1953 e 1967, e de 4 a 8 anos entre 1909 e 1918.

Para o RS usou a correlação linear simples entre a precipitação e as TSMs de forma simultânea, nos mesmos meses, e com adiantamento de até 3 meses das TSMs. A autora verificou, como resultado mais importante, a maior associação entre a precipitação pluviométrica do Estado do RS com o índice IAS, sendo por isso o escolhido para analisar a associação deste oceano com os eventos extremos de precipitação da área em estudo de Santa Catarina, por meio de correlação linear anual simples.

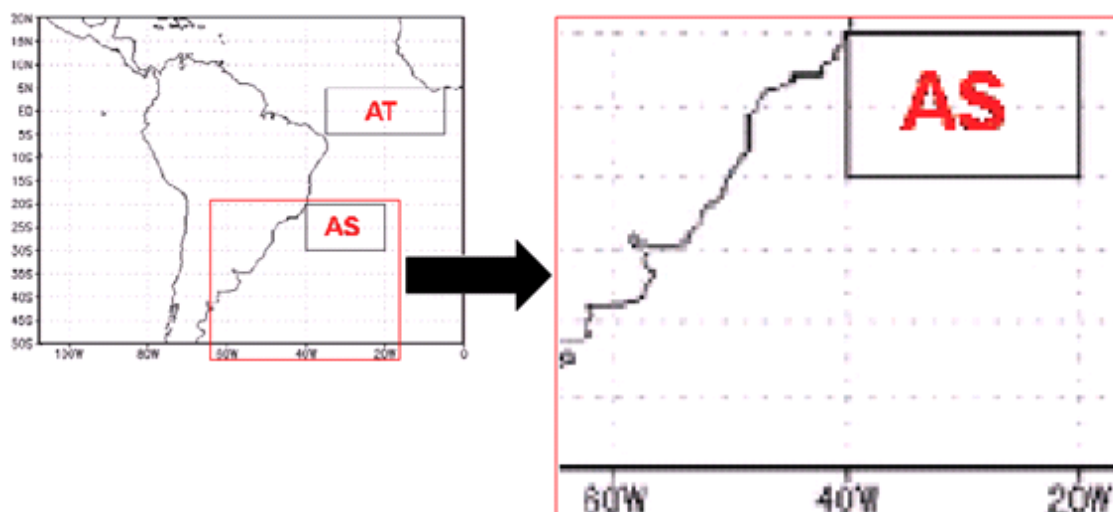


Fig. 6 - Localização das áreas oceânicas do Oceano Atlântico para determinação do índice IAS. Fonte: Adaptado de Santos (2011).

3.4.1.6 Índice Oscilação Quase-Bienal (QBOI)

Este fenômeno, quantificado pelo índice QBO (Quasi-Biennial Oscillation), é uma oscilação que domina a variabilidade na estratosfera equatorial (~16 – 50 km), na qual o regime de ventos de leste e oeste tem período de variação aproximada de 28,2 meses.

Existe influência da QBO em várias partes do globo, no qual as anomalias negativas (ventos de leste) possuem maior duração e intensidade que as anomalias positivas (ventos de oeste). Algumas alterações provocadas na troposfera influenciam na atuação dos ciclones tropicais no Atlântico (CAMARGO, 2010) e na temperatura na América do Norte (BARNSTON e LIVEZEY, 1989). Medina e Nunes (2011) verificaram a influência da QBO na temperatura e precipitação para a América do Sul num período sem influência de ENOS (ano neutro). Em períodos de anomalia positiva houve aumento de precipitação em partes do sul do Brasil e, em períodos de anomalia negativa, no nordeste do Brasil. O sudeste do Brasil apresenta aumento da precipitação quando há anomalia negativa de QBO. Isto poderia ser explicado pela perturbação da QBO na célula de Walker, modificando a circulação geral da atmosfera. Os dados do índice QBO estão disponíveis em: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/qbo.data>.

3.5 Testes para análise de tendência e de correlação

3.5.1 Análise de tendências lineares: Análise de Regressão e Teste de Mann-Kendal

A identificação de tendência linear da série temporal dos eventos extremos foi realizada pela Análise de Regressão e pelo teste não-paramétrico Mann-Kendall, na qual é avaliada a tendência ao analisar a significância estatística dos testes.

A Análise de Regressão é baseada na verificação do coeficiente angular de uma reta ajustada aos dados, e no caso de valores significativos estatisticamente, podem indicar alterações climáticas. Da mesma forma que em Back (2001) é utilizado a equação da reta:

$$Y = a + bx \quad (1)$$

e determinado o intervalo de confiança do coeficiente angular (b), sendo que se este intervalo não incluir o valor zero, indica tendência significativa ao nível de confiança desejado. Para o teste de significância, foram adotados níveis de confiança para 10%, 5% e 1% e utilizado o Teste t-Student (WILKS, 1995), comparando com o valor crítico da tabela (teste bilateral) com $n-2$ graus de liberdade (equação 10). Se o t calculado for superior ao tabelado, é rejeitado a hipótese de nulidade, e aceitado a hipótese alternativa, que neste caso é definida como existência de tendência.

O Teste de Mann-Kendall (Kendal, 1975) é um teste não-paramétrico muito usado para detectar tendências lineares em séries pluviais e avaliar a ocorrência de mudanças climáticas. Neste estudo considerou-se um nível de significância apenas - diferente da Análise de Regressão -, na qual a técnica de Mann-Kendall identifica uma série com tendência estatisticamente significativa se esta é significativa a 5%. Um valor positivo do coeficiente de Kendall indica tendência de aumento, enquanto um valor negativo indica uma tendência de queda, desde que, significativos a algum nível de significância.

Verificando a hipótese nula (H_0) de as séries serem independentes e identicamente distribuídas, o teste de Mann-Kendall (S) é dado por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (2)$$

A função sgn é definida por:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_i - x_j) &= 1, & \text{se } x_i - x_j > 0, \\ &= 0, & \text{se } x_i - x_j = 0, \\ &= -1, & \text{se } x_i - x_j < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Nas séries com $n > 10$ a estatística S aproxima-se muita da distribuição normal ao se fazer a correção

$$S' = \text{sgn}(S) \quad (4)$$

Considerando a hipótese nula e ausência de valores repetidos na série, a variância de S é definida por:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

E fazendo com correções de repetição fica:

$$\text{Var}(S) = \left(\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \right) \quad (6)$$

Aqui g é o número de grupos repetidos e t_p é o número de dados do p -ésimo grupo.

Logo S e $\text{Var}(S)$ são utilizados para o cálculo da estatística Z , com distribuição normal padrão:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0, \\ Z &= 0, & \text{se } S = 0, \\ Z &= \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Para (H_0) verdadeiro, a estatística Z tem distribuição normal padrão. Para o teste de tendência ao nível de significância, no caso de 5%, a (H_0) é rejeitada se o valor absoluto de Z é maior que o valor tabelado, e neste caso, valores maiores que 1,67, para o tamanho de amostra de 60. Mais detalhes do teste em Obregón (2003).

Os métodos utilizados neste trabalho agem no sentido de se complementarem, pelo fato do primeiro analisar o grau de inclinação da reta de tendência e, o segundo avaliar a significância desta, no caso apenas em 5%.

3.5.2 Correlação com índices climáticos

Na verificação de possível associação dos eventos extremos de chuva nas cidades analisadas com fenômenos climáticos de grande escala, foi usada a correlação de Pearson, também conhecida como correlação linear (r). Ela fornece uma noção do grau de relacionamento entre duas variáveis quaisquer, estando os valores limitados no intervalo de -1 a 1. O coeficiente de correlação linear entre duas variáveis sempre estará neste intervalo, de forma que quando estas variarem juntas (perfeitamente correlacionadas) o $r=1$, e do contrário, se elas variam de forma oposta (uma cresce e a outra decresce) então será $r=-1$. Para identificar a significância estatística do resultado também foi usado o Teste t-Student. Se o valor da correlação linear calculado for maior que o valor de "t" crítico, então é assim identificada alguma relação entre as variáveis, com significância estatística no nível de confiança de 10%, 5% e 1%, que é usada neste estudo. Segundo Wilks (1995) obtém-se a covariância e o coeficiente de correlação:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (8)$$

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{S_x S_y} \quad (9)$$

$$t = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (\text{teste t-Student}) \quad (10)$$

O termo n é o número de elementos da série e S_x e S_y o desvio padrão das duas séries temporais.

3.6 Eventos extremos e cenários climáticos futuros

Os limiares para detecção de eventos extremos de precipitação no período dos anos de 1951 a 2010 serão usados para determinar a variação climática desses eventos no futuro, de acordo com o modelo climático regional HadRM3P (MARENGO et al., 2009a). Foi decidido pelo uso dos mesmos limiares de precipitação, pois como já mencionado, a metodologia aqui usada baseia-se nos casos ocorridos no passado, e se por um lado o efeito da urbanização crescente tende a aumentar o risco de inundações (o que baixaria o valor do limiar), por outro as ações preventivas por parte das cidades tenderiam a minimizar os riscos (o que aumentaria o valor do limiar). Assim, foram pesquisados os eventos extremos de precipitação na simulação do clima no presente (1960 – 1990, chamado baseline) e considerando o cenário A2 (2070 – 2100) do IPCC, que é o mais pessimista em relação ao aquecimento global (considera uma maior emissão de gases de efeito estufa) para posterior determinação da variação climática desses eventos no futuro.

Para fins de uma análise mensal (valores médios de cada mês), o cálculo dos eventos extremos no futuro será definido da seguinte forma:

$$NF = Var \times NP \quad (11)$$

$$Var = \left(\frac{A2}{BASELINE} \right) \quad (12)$$

Nas equações, o termo NF representa o número de eventos com potencial para causar inundação, simulados para o período 2070-2100 NP é o número de eventos observados no presente e $BASELINE$ e $A2$ representam o número dos eventos extremos simulados pelo modelo no presente e no futuro, respectivamente, sendo todas as variáveis médias mensais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relação dos limiares obtidos

Vários limiares foram obtidos através da análise da precipitação associada aos eventos de inundação. Cada cidade apresenta características próprias de suportar volumes de chuva sem apresentar problemas de inundação ou transbordamento de rios. Vários fatores influenciam, como: tamanho da bacia hidrográfica, topografia regional, cobertura vegetal, características urbanas, intensidade e duração das chuvas, distribuição espacial das chuvas e precipitação anterior, motivo pelo qual ocorrem diversos valores de limiares de precipitação que podem levar a situações de inundação. Na Tab. 3 estão os valores dos limiares para cada cidade. Os valores encontrados para o 1º limiar são os que melhor identificam os eventos extremos geradores de inundação brusca. Estes apresentam diferentes períodos de tempo e total acumulado, com variação de 2 a 4 dias e de 78 a 144 mm de chuva.

Tab. 3 - Limiares de precipitação determinados e utilizados para quantificar os eventos extremos para o período de 1951 a 2010.

Cidade	1º limiar (variável, mm)	10 dias (mm)	15 dias (mm)	5 dias (mm)
1- Alfredo Wagner	4d126	154	167	100
2- Araranguá	3d101	156	167	100
3- Benedito Novo	3d108	144	185	100
4- Blumenau	2d96	154	187	100
5- Brusque	2d118	180	219	100
6- Criciúma	4d133	165	190	100
7- Florianópolis	3d112	185	215	100
8- Ilhota	2d78	132	155	100
9- Ituporanga	2d78	128	155	100
10- Joinville	3d120	171	204	100
11- Mafra	4d116	171	223	100
12- Orleans	3d99	152	184	100
13- Porto União	3d127	192	230	100
14- Rio do Sul	2d85	145	171	100
15- Sto Amaro da Imperatriz	4d144	199	252	100
16- Taió	4d123	178	199	100
17- Timbé do Sul	4d131	175	201	100
18- Tubarão	3d122	208	224	100

Também foram encontrados outros limiares que levam em consideração a chuva anterior às inundações. Baseado nos totais pluviométricos acumulados médios que cada cidade apresentou, foram obtidos limiares para os períodos de tempo de 10 e 15 dias. Para verificar comparativamente a distribuição espacial dos eventos extremos de chuva, também foi obtido um limiar que é independente da precipitação associada às inundações, que é o de 5d100 (100 mm em 5 dias), e quantificada a ocorrência desses casos. A justificativa deste valor é que está num limite intermediário dos eventos rápidos de chuva e os eventos menos intensos, porém mais duradouros, mas que também podem captar totais diários extremos. Da Tabela acima pode-se observar em quais cidades as inundações podem ocorrer mais facilmente, isto é, ocorrem com uma quantidade menor de precipitação acumulada. Por exemplo, analisando as cidades com limiares de 2 dias, nota-se que Ilhota e Ituporanga necessitam de menos precipitação para a ocorrência de alguma inundação.

4.2 Tendência dos eventos extremos observados

A tendência é dita crescente se o coeficiente angular da equação da reta é positivo e decrescente se o coeficiente angular for negativo. O grau da tendência linear é determinado pelo grau de inclinação da reta, determinado pela Análise de Regressão e do valor de t , conforme a Tab. 4 (T-crítico), com n-2 graus de liberdade (60 anos). No Teste de Mann-Kendall, valores significativos (SIG) positivos (negativos) a 5% indicam tendência crescente (decrescente) de ocorrência anual de eventos extremos no período de 1950 a 2010. Do contrário, valores não significativos (N) indicam ausência de tendência significativa.

Tab. 4 - Níveis de significância associadas aos valores dos coeficientes de correlação. A identificação do nível de significância é indicada por asteriscos.

T-crítico	nível de sig.	valor-p	identificação
1,67	10%	0,1	*
2,00	5%	0,05	**
2,66	1%	0,01	***

Na Tab. 5 estão identificadas as tendências anuais do número de eventos extremos quantificados pelo 1º limiar.

Tab. 5 - Tendência anual dos eventos extremos para o 1º limiar, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo.

1º Limiar:	Análise Regressão			Mann-Kendall
	b	Stat t	valor-P	
1- Alfredo Wagner	0,0081	0,53	0,6004	N
2- Araranguá	-0,0110	-0,78	0,4377	N
3- Benedito Novo	0,0412	3,34***	0,0014	SIG
4- Blumenau	0,0195	1,64	0,1055	SIG
5- Brusque	-0,0014	-0,22	0,8281	N
6- Criciúma	-0,0116	-0,62	0,5361	N
7- Florianópolis	0,0278	1,64	0,1064	N
8- Ilhota	0,0542	2,57**	0,0127	SIG
9- Ituporanga	0,0019	0,11	0,9141	N
10- Joinville	0,0466	3,29***	0,0017	SIG
11- Mafra	0,0186	1,34	0,1841	N
12- Orleans	0,0031	0,22	0,8284	N
13- Porto União	0,0139	1,29	0,2007	N
14- Rio do Sul	0,0153	1,28	0,2072	N
15- Sto A. da Imperatriz	0,0013	0,06	0,9493	N
16- Taió	-0,0011	-0,07	0,9480	N
17- Timbé do Sul	0,0702	3,07***	0,0032	SIG
18- Tubarão	0,0590	4,12***	0,0001	SIG

Observa-se que houve tendência de aumento de eventos na maioria das cidades. Apenas 4 cidades apresentaram tendência de queda ao longo dos 60 anos analisados, sendo estes valores pouco expressivos. As cidades com tendência positiva e significativa, de acordo com análise de regressão e teste t-Student, foram: Ilhota, Joinville, Timbé do Sul, Benedito Novo e Tubarão. O Teste de Mann-Kendall confirma a ocorrência dessas tendências significativas, e neste teste aponta a cidade de Blumenau também com tendência significativa. A maior taxa de aumento ocorreu em Tubarão, na qual o coeficiente angular (b) foi de 0,059 eventos/ano, o que corresponde a um aumento de 3,5 eventos extremos por ano, no fim do período, que é 2010, em relação ao início da série, em 1950. Com exceção de Benedito Novo, que apresenta menos casos, as outras cidades com significância apresentam

alta frequência de casos quantificados pelo 1° limiar (Fig. 7). Como este limiar filtra períodos curtos de chuva, ou seja, chuva muito intensa como no caso de Ituporanga e Ilhota (2 dias e 78 mm), estas chuvas estão associadas às inundações bruscas, sendo muito frequentes em algumas cidades do Estado, como observado também em Marcelino et al. (2004).

Através dessa análise não se observa coerência regional do sinal da tendência. Por exemplo, no Sul do Estado se encontram 2 cidades com tendência crescente e significativa (Timbé do Sul e Tubarão), e 2 cidades com tendência decrescente (Criciúma e Araranguá), porém não significativa. Back (2001) verificou tendência crescente de temperatura e no total acumulado de chuva na cidade de Urussanga-SC, também no sul do Estado, sendo assim plausível imaginar que em uma região de topografia acidentada e com uma atmosfera mais aquecida há a maior possibilidade de desenvolver-se tempestades, aumentando a probabilidade de acontecer extremos. Observa-se que existem elementos locais que modificam o padrão de comportamento das chuvas nesta região do Estado.

A visualização gráfica da tendência temporal dos eventos extremos ocorridos no presente (Apêndice A) mostra a evolução da tendência linear anual para os quatro limiares de todas as cidades analisadas entre 1951 e 2010. Para a verificação da tendência decenal, o Apêndice B mostra o número de eventos extremos obtidos apenas com o 1° limiar de precipitação, para o mesmo período de tempo, em que nota-se, por exemplo, alguma variabilidade decadal de ocorrência para algumas cidades, enquanto para outras, o comportamento da tendência ao longo do período é mais linear. A análise gráfica anual e decadal permite também a verificação simultânea do padrão de ocorrência dos extremos com as fases anômalas dos fenômenos climáticos de grande escala e baixa frequência, através dos índices relativos ao ENOS e à ODP, respectivamente.

A Tab. 6 mostra a tendência anual de eventos extremos de precipitação detectados pelo limiar de 10 dias e com precipitação variável (ver Tab. 3). Estes eventos estão associados também a períodos úmidos, e não apenas a períodos intensos e curtos de chuva.

Tab. 6 - Tendência anual dos eventos extremos para o limiar de 10 dias, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo.

Limiar de 10 dias	Análise Regressão			Mann-Kendall
	b	Stat t	valor-P	
1- Alfredo Wagner	0,0257	0,63	0,5287	N
2- Araranguá	-0,0295	-0,77	0,4440	N
3- Benedito Novo	0,2017	4,44***	0,0000	SIG
4- Blumenau	0,0588	1,13	0,2615	N
5- Brusque	-0,0150	-0,38	0,7023	N
6- Criciúma	-0,0094	-0,23	0,8192	N
7- Florianópolis	0,0479	1,11	0,2730	N
8- Ilhota	0,2053	2,37**	0,0212	SIG
9- Ituporanga	-0,1149	-1,23	0,2243	N
10- Joinville	0,1564	3,46***	0,0010	SIG
11- Mafra	0,0273	1,57	0,1227	N
12- Orleans	-0,0711	-1,72*	0,0904	N
13- Porto União	0,0341	1,32	0,1915	N
14- Rio do Sul	0,0887	2,01**	0,0487	SIG
15- Sto A. da Imperatriz	0,0542	1,29	0,2020	N
16- Taió	0,0034	0,08	0,9343	N
17- Timbé do Sul	0,1806	3,43***	0,0011	SIG
18- Tubarão	0,0972	3,10***	0,0030	SIG

É observado que a tendência significativa de aumento de eventos extremos é semelhante aos do 1º limiar, com acréscimo da cidade de Rio do Sul. Destaque para Benedito Novo, com nível de significância alto, na qual a Análise de Regressão mostra valores de coeficiente angular chegando a 0,2017 eventos/ano, ou um aumento de 12 eventos/ano nos últimos anos. As cidades que apresentaram tendência de diminuição são agora cinco, sendo que em Orleans houve tendência significativa ao nível de 10%, apesar da tendência positiva para o 1º limiar. Contudo, o Teste de Mann-Kendall não confirma esta tendência, mas mostra que as tendências positivas obtidas no outro teste são realmente significativas.

A análise da tendência de eventos determinados pelo limiar de 15 dias é mostrada na Tab. 7. Este limiar tem o objetivo de detectar eventos extremos mais prolongados, geralmente associados a inundações graduais e enchentes, ou vários eventos curtos em sequência.

Tab. 7 - Tendência anual dos eventos extremos para o limiar de 15 dias, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo.

Limiar de 15 dias	Análise Regressão			Mann-Kendall
	b	Stat t	valor-P	
1- Alfredo Wagner	-0,0471	-0,56	0,5765	N
2- Araranguá	-0,0846	-1,30	0,1998	SIG
3- Benedito Novo	0,2378	4,09***	0,0001	SIG
4- Blumenau	0,1003	1,50	0,1398	N
5- Brusque	-0,0164	-0,28	0,7785	N
6- Criciúma	0,0169	0,26	0,7957	N
7- Florianópolis	0,0751	1,18	0,2411	N
8- Ilhota	0,2787	2,21**	0,0309	SIG
9- Ituporanga	-0,1554	-1,21	0,2327	N
10- Joinville	0,2342	3,58***	0,0007	SIG
11- Mafra	0,0700	2,37**	0,0211	SIG
12- Orleans	-0,0688	-1,41	0,1650	N
13- Porto União	0,0716	2,00**	0,0503	SIG
14- Rio do Sul	0,1540	2,53**	0,0142	SIG
15- Sto A. da Imperatriz	0,0492	0,87	0,3864	N
16- Taió	-0,0047	-0,07	0,9481	N
17- Timbé do Sul	0,3031	3,45***	0,0010	SIG
18- Tubarão	0,0392	1,84*	0,0713	SIG

Como nos casos obtidos pelo 1º limiar e o de 10 dias, este apresenta a maioria das cidades com tendência crescente de casos, agora com dois terços das cidades com crescimento e um terço das cidades com decréscimo. No entanto, há mais situações com níveis de significância, sendo que 8 cidades se apresentam tendências positivas significativas no mínimo a 10% na Análise de Regressão e teste t-Student e de 9 cidades pelo Teste de Mann-Kendall. Um aspecto importante é visto na cidade de Ilhota, na qual este limiar apresenta média anual bastante alta e

significância na tendência de aumento, que é de 0,2787eventos/ano, ou seja, acima de 16 casos por ano a mais que no início da série. Das cidades com tendência decrescente, unicamente Araranguá possui significância a 5% e apenas vista pelo Teste de Mann-Kendall, possuindo um coeficiente angular de -0,0846/ano, ou diminuição de 5 casos por ano nas últimas décadas. É observado ainda, que no Norte e Nordeste do Estado e parte do Vale do Itajaí a predominância foi de aumento.

A seguir é apresentado a Tab. 8 com os valores das tendências dos eventos extremos de chuva que foram determinados pelo limiar 5d100. Este valor não foi determinado através dos casos de inundação observados e, sendo assim, não representa adequadamente os eventos observados de chuva que podem levar a inundações. No entanto, possibilita a análise espacial comparativa da intensidade dos eventos extremos ocorridos na região Leste e Norte de Santa Catarina.

Tab. 8 - Tendência anual dos eventos extremos para o limiar de 5 dias e 100 mm, sendo que: (b) indica o coeficiente angular da equação da reta de tendência; (Stat t) são os resultados do Teste t-Student para a Análise de Regressão; (valor-p) indica o nível de significância da tendência; e os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall a 5%. (*) representa significância a 10%; (**) significância a 5%; (***) significância a 1%. (SIG) representa significativo a 5% e (N) não-significativo.

Limiar de 5 dias	Análise Regressão			Mann-Kendall
	b	Stat t	valor-P	
1- Alfredo Wagner	-0,0052	-0,13	0,8958	N
2- Araranguá	-0,0362	-1,18	0,2419	N
3- Benedito Novo	0,1571	4,50***	0,0000	SIG
4- Blumenau	0,0802	2,06**	0,0434	SIG
5- Brusque	0,0178	0,36	0,7220	N
6- Criciúma	0,0011	0,02	0,9809	N
7- Florianópolis	0,0992	2,07**	0,0428	SIG
8- Ilhota	0,1277	2,79***	0,0072	SIG
9- Ituporanga	-0,0599	-1,21	0,2303	N
10- Joinville	0,2012	4,12***	0,0001	SIG
11- Mafra	0,0460	1,56	0,1245	N
12- Orleans	0,0156	0,50	0,6171	N
13- Porto União	0,0878	2,66***	0,0101	SIG
14- Rio do Sul	0,0490	1,61	0,1138	N
15- Sto A. da Imperatriz	0,0329	0,83	0,4071	N
16- Taió	-0,0301	-0,65	0,5175	N
17- Timbé do Sul	0,1574	3,01***	0,0039	SIG
18- Tubarão	0,1749	3,79***	0,0004	SIG

Foi verificado que houve aumento nos eventos extremos de precipitação 5d100 em 14 das 18 cidades em análise, sendo que em 8 foi encontrada significância no coeficiente b, pelo teste t-Student, em pelo menos 5 % e pelo Teste de Mann-Kendall. No norte e nordeste também há uma predominância de crescimento nos eventos, como já observado no limiar de 15 dias. Seguindo o comportamento visto nos limiares anteriores, a cidade de Benedito Novo apresenta a maior tendência, com o coeficiente angular de 0,1571 eventos/ano, ou número de eventos extremos ocorrendo 9 casos a mais nos últimos anos. No sul ocorreu novamente a falta de predominância do sinal da tendência, com a cidade de Araranguá apresentando decrescimento. Dos 4 casos de decrescimento, nenhum teve significância estatística.

No geral, é observada tendência positiva dos eventos extremos de chuva com potencial de inundar as cidades localizadas na região Leste e Norte de Santa Catarina, concordando com estudos como o de Haylock et al. (2006) e Prudêncio et al. (1999).

Com o objetivo de analisar a distribuição regional dos eventos extremos de chuva, na Fig. 7 é mostrado o total de eventos 5d100mm encontrados no período de 1951 a 2010.

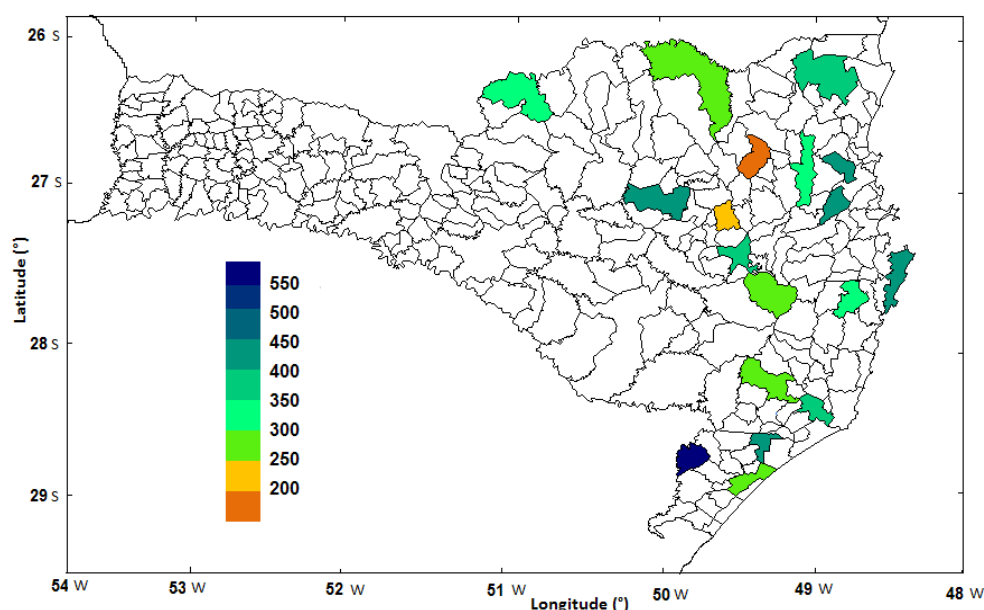


Fig. 7 - Representação do total do número de eventos extremos obtidos através do limiar 5d100mm. A localização de cada cidade está na Fig. 2.

Aqui é importante ressaltar que os valores representam os dias sob influência do evento, pois uma grande precipitação não “desaparece” no dia seguinte, influenciando não somente na quantidade de água acumulada sobre a superfície, mas também na quantidade de água no interior do solo. Aparentemente, a região mais propícia à ocorrência de eventos extremos é o sul do Estado, litoral-centro e parte do Alto Vale do Itajaí. Em Timbé do Sul houve mais de 550 casos sendo, portanto, a de maior frequência. As cidades que apresentaram entre 450 e 500 casos foram Criciúma, Florianópolis, Ilhota, Blumenau e Taió. A alta frequência de casos intensos de chuva aliado ao crescimento das cidades concorda com os estudos sobre a ocorrência de eventos de inundação em algumas cidades, a partir

da década de 80 (HERRMANN, 2006; HERRMANN et al., 2009; MARCELINO et al., 2004; MARCELINO et al., 2006).

Salienta-se que o objetivo da análise das tendências lineares não é a obtenção de um modelo prognóstico, e sim verificar o sinal da variação temporal do comportamento do número das ocorrências. Além disso, nota-se que em alguns casos a variação decenal apresenta-se mais exponencial do que linear (Apêndices A e B).

4.3 Eventos extremos e fenômenos climáticos

Nas Fig. 8 a 11 são mostrados os resultados da correlação serial obtida entre os eventos extremos quantificados anualmente e os fenômenos de grande escala, com as anomalias climáticas quantificadas pelos índices anuais. Os níveis de significâncias verificados através do Teste t-Student foram de 10%, 5% e 1%, correspondendo aos coeficientes de correlação de 0,215, 0,255 e 0,330, respectivamente. Nas figuras os valores de correlação obtidos entre os índices e os eventos extremos anuais nas cidades analisadas são representados através da barra de cores e o nível de significância pelos círculos. É então identificada uma relação linear direta (número de eventos aumentando quando aumenta a magnitude do índice climático) das anomalias dos índices com os eventos extremos toda vez que há sinal coincidente com o sinal do coeficiente de correlação, e relação linear inversa quando há divergência entre os sinais.

A correlação dos eventos extremos com potencial de inundação obtidas pelo 1º limiar (Fig. 8a) com o índice MEI mostra-se positiva na maioria das cidades. Associações mais fortes, significativas a 1%, foram observadas em Rio do Sul, Ituporanga e Ilhota. Foram significativas a 5% as correlações para as cidades de Taió, Alfredo Wagner e Orleans, e significativas a 10 % em Porto União. No geral, os índices que representam o fenômeno ENOS mostram-se diretamente associados com a ocorrência de eventos extremos de forte intensidade na maior parte das cidades, com valores significativos principalmente no Vale do Itajaí. Os Apêndices A e B permitem verificar que a curva de evolução temporal dos eventos extremos

possui realmente concordância com os sinais dos índices climáticos, havendo predominância de mais eventos extremos em anos de El Niño e nas fases quentes de ODP. Houve apenas um caso de correlação tanto negativa quanto significativa, na cidade de Benedito Novo.

A correlação dos eventos com os outros dois índices que medem o ENOS mostram-se de forma semelhante, porém com valores ligeiramente menores. Como já mencionado, eventos quentes de ENOS (El Niño) são representados por índices positivos pelo MEI e ONI, e negativos pelo índice SOI. Portanto, no índice SOI (Fig. 8c) valores negativos identificam os eventos de El Niño, e positivos identificam eventos de La Niña. Entretanto, há situações anômalas em que o padrão de maior precipitação no Estado, que é em períodos de El Niño (GRIMM et al., 1998), mostra-se de forma inversa, como as chuvas que ocorreram agosto de 1984 e mais recentemente, em novembro de 2008, causando uma série de inundações e enchentes, e que aconteceram sob atuação de La Niña.

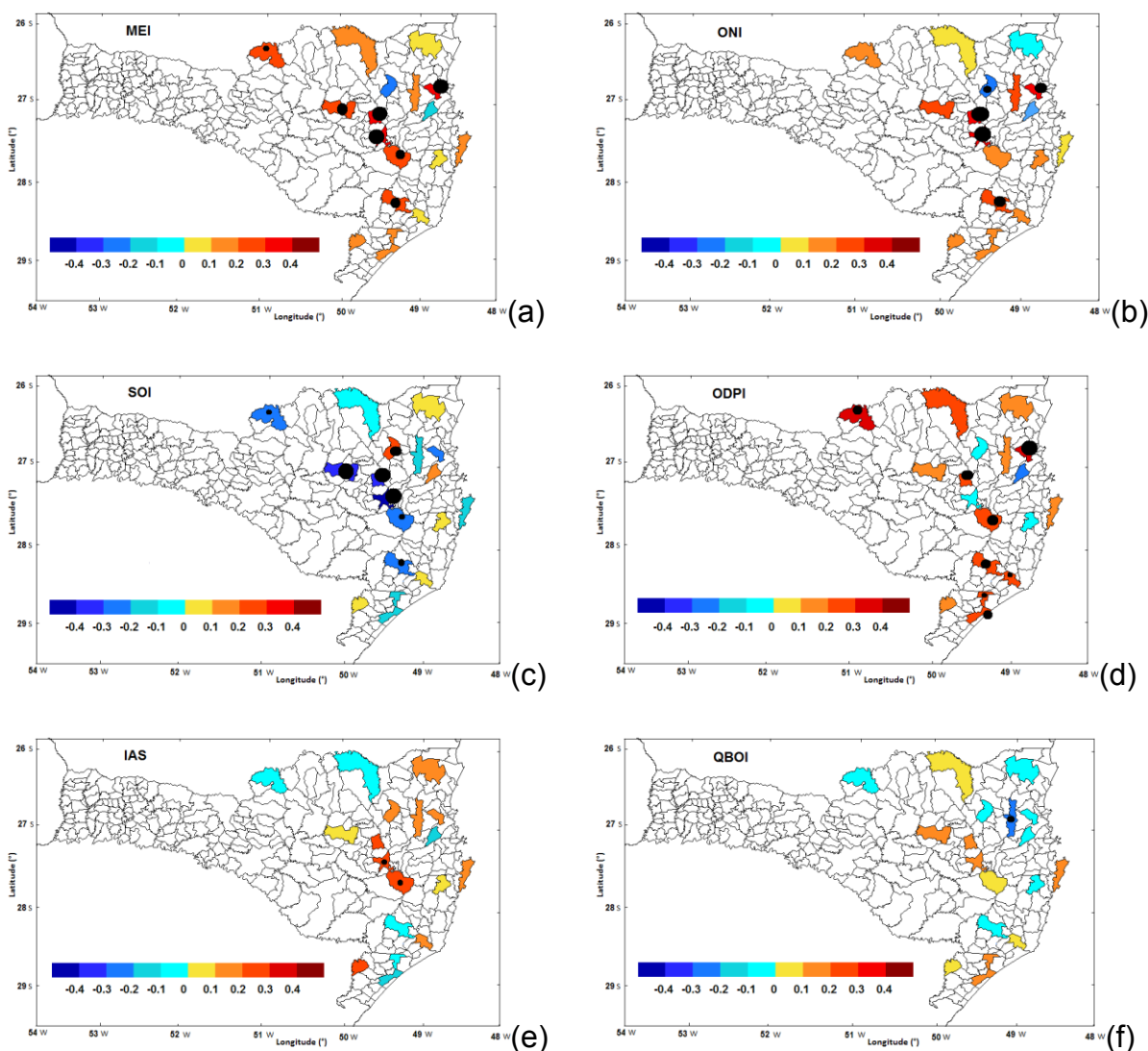


Fig. 8 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo 1º limiar com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODPI; e) IAS e f) QBOI. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).

O fenômeno climático que apresentou maior associação com os eventos extremos deste limiar foi a Oscilação Decadal do Pacífico, denotado pelo índice ODP (Fig. 8d). Em seis cidades houve correlação positiva significativa a, pelo menos 5%, e duas a 10%, indicando que na fase quente (fria) a tendência é de que ocorra alta (baixa) frequência de eventos extremos de precipitação. O Sul do Estado mostrou homogeneidade no sinal de associação, apresentando correlações positivas.

Já o índice IAS (Fig. 8e) teve pouca homogeneidade no sinal da correlação, igualmente ao que ocorreu com o índice QBOI (Fig. 8f), porém com predomínio de valores positivos. Este último índice apresentou relação inversa e significativa na cidade de Blumenau. A influência da TSM do Atlântico subtropical no regime de precipitação no sul do Brasil foi estudada por Díaz et al. (1998) e Barros et al. (2000), mostrando também pouca relação com esta variável. Santos (2011) encontrou para o Estado do Rio Grande do Sul predominância de sinal positivo da relação entre o índice IAS e a precipitação média mensal, especialmente nos meses de novembro.

Na Fig. 9 são mostrados os resultados obtidos da correlação anual dos índices com os eventos extremos quantificados pelo limiar de 10 dias. No geral houve pouca mudança nos sinais dos coeficientes de correlação, porém mantendo os sinais das cidades com níveis mais significativos. No entanto, nota-se maior homogeneidade espacial das correlações como no índice ODP (Fig. 9d) e boa associação com o fenômeno ENOS (Fig. 9a, 9b, 9c), apresentando significância a 1% em várias cidades do norte e Vale do Itajaí. Foi observada homogeneidade regional no sinal para o índice IAS (Fig. 9e), com valores negativos na parte sul da região de estudo e valores positivos na parte centro-norte. O mesmo foi observado para o índice QBOI (Fig. 9f), mas de sinal oposto, agora com várias cidades apresentando sinal negativo na parte centro-norte do Estado e positivo no centro-sul, inclusive com significância a 10% na cidade de Florianópolis.

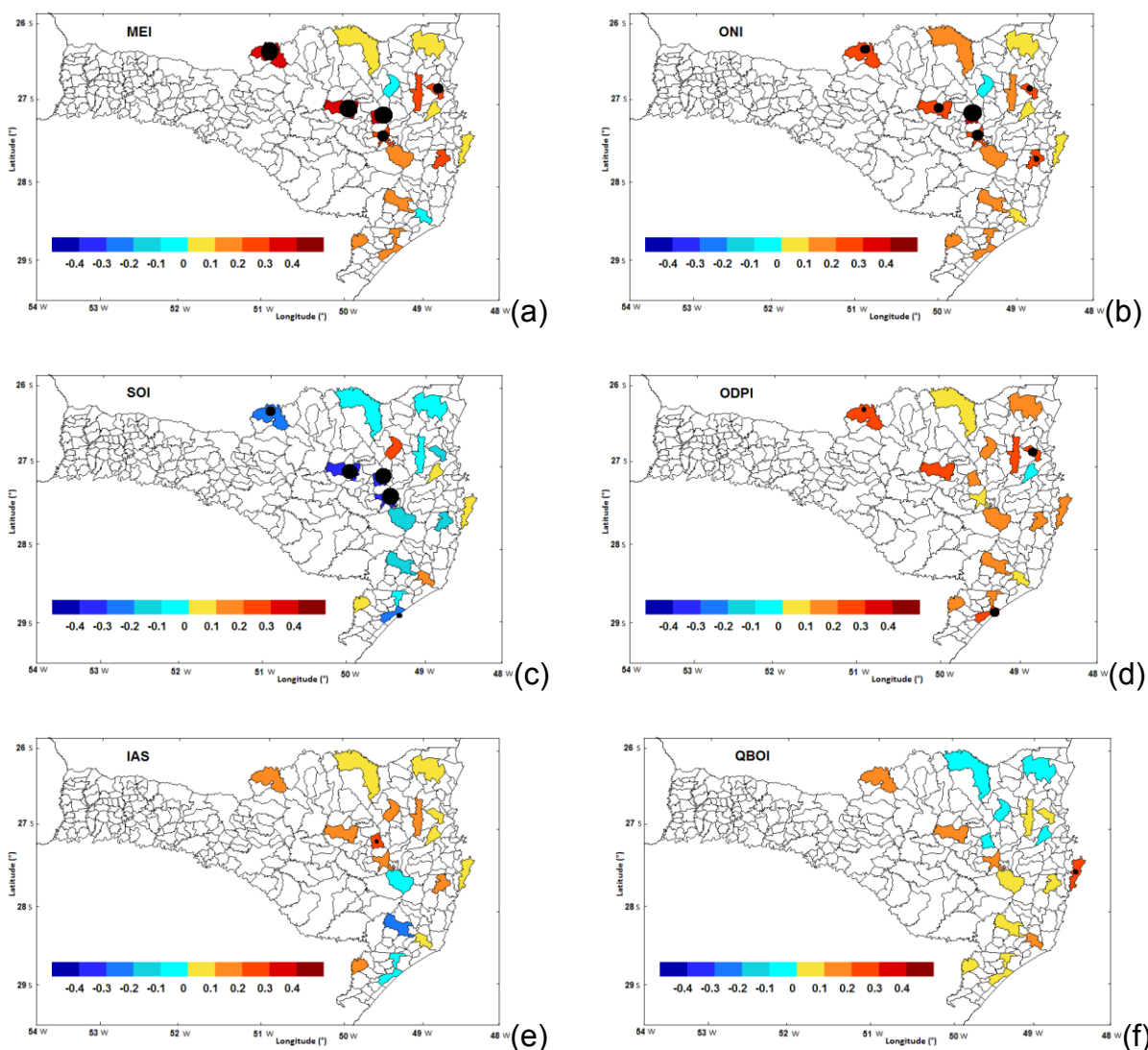


Fig. 9 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo limiar de 10 dias com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODP; e) IAS e f) QBOI. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).

Na Fig. 10 estão os resultados da correlação anual dos índices com o total anual de eventos extremos obtidos pelo limiar de 15 dias. Estes episódios de chuva estão mais associados aos sistemas atmosféricos que permanecem semiestacionários, proporcionando maiores condições de ocorrências das inundações graduais e enchentes, no qual ocorrem no Estado preferencialmente em eventos quentes de ENOS, de El Niño (HERRMANN, 2006), e observado através do

histórico de casos de enchentes registradas na cidade de Blumenau (SILVA, 2003; HERRMANN e MENDONÇA, 2007).

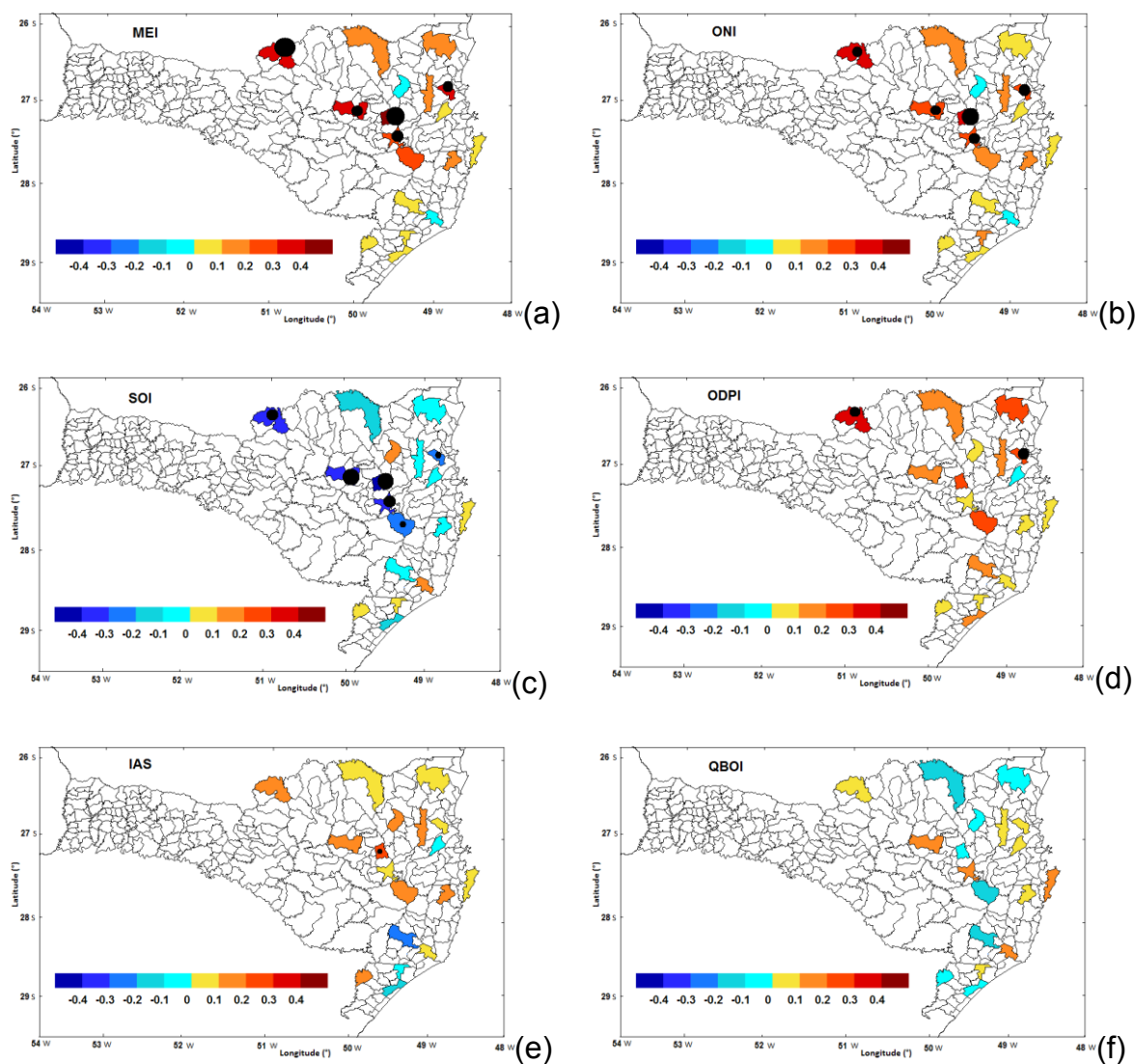


Fig. 10 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo limiar de 15 dias com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODP; e) IAS e f) QBO. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).

Através dos mapas pode ser observada a continuidade da forte associação dos eventos extremos ocorridos no Vale do Itajaí com o fenômeno ENOS (Fig. 10a, 10b, 10c) como em Rio do Sul, Taió, Ituporanga, Ilhota e também na cidade de Porto União, na parte norte. Na parte sul parece haver diminuição da influência do ENOS, com correlações mais baixas, indicando que o comportamento desse padrão de

precipitação é modulada por outros forçantes de grande escala, ou ao clima regional. Também é observado para o índice ODP (Fig. 10d) muita semelhança com os casos extremos de 10 dias, ou seja, homogeneidade no sinal da correlação positiva e significância a 5% em Ilhota e Porto União. O mesmo pode ser encontrado para o índice IAS (Fig. 10e) que mostrou-se diretamente relacionado na parte centro-norte e inversamente na parte sul, com exceção de Timbé do Sul, no sul e Brusque, na região do Vale do Itajaí. Grande variação espacial do sinal das correlações foi observada novamente para o índice QBOI (Fig. 10f), inclusive com pouca intensidade no grau de associação, mas alguma predominância do sinal positivo nas cidades localizadas em planícies, exceto Joinville e Araranguá.

Na Fig. 11 é mostrada a correlação anual dos eventos extremos 5d100 com os índices dos fenômenos de escala global.

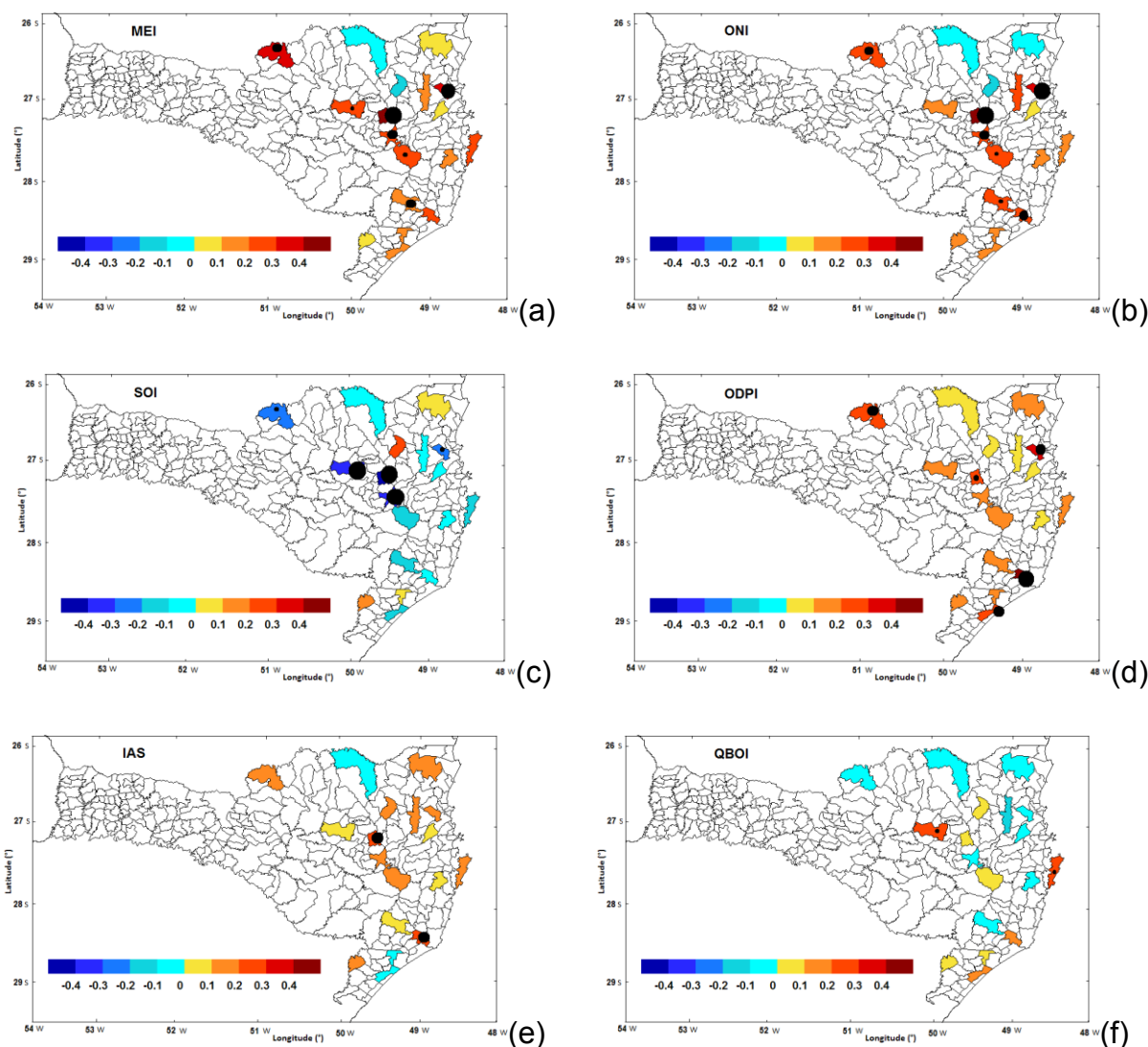


Fig. 11 - Mapas de correlação dos eventos extremos anuais quantificados pelo limiar de 5d100 com fenômenos climáticos de grande escala: a) MEI; b) ONI; c) SOI; d) ODP; e) IAS e f) QBOI. Os níveis de significância estão indicados pelos círculos maior (1%); intermediário (5%) e menor (10%).

Como nos demais limiares este também mostra forte associação com os índices indicadores de ENOS (Fig. 11a, 11b, 11c). Curiosamente, observa-se que o sinal da cidade de Benedito Novo novamente apresenta sinal contrário, ou seja, há algum aspecto físico local do clima que se opõe à influência exercida nas outras cidades pelo fenômeno ENOS. O índice ODP (Fig. 11d) apresentou valores todos positivos de correlação com eventos de acumulado de 100 mm no período de 5 dias, sendo então o padrão de evento extremo que sofre maior influência pelos

fenômenos de escala planetária, ao menos em termos de sinal. Com relação ao índice IAS (Fig. 11e) foi verificada homogeneidade espacial de sinal, positivo, em cidades da parte Centro-leste do Estado, e significância a 5% em Tubarão e Rio do Sul. Houve indícios de influencia da QBO na metade sul, e com bastante semelhança ao 1º limiar.

Estes resultados concordam com Haylock et al. (2006), que verificaram a correlação entre casos extremos de precipitação e o índice SOI no Brasil e observaram a presença de forte sinal negativo da correlação em grande parte do sudeste da América do Sul, principalmente na região Sul do Brasil, incluindo então a região de estudo em Santa Catarina.

4.4 Análise sazonal e variação climática

Foi visto que o comportamento dos eventos extremos é influenciado por fenômenos de grande escala, principalmente de ENOS, e este tem capacidade de influência intra-sazonal pontualmente diferenciada. Deste modo, a climatologia (Fig. 12) indica, para os limiares (1º limiar, 10 dias, 15 dias e 5d100) que a estação do ano de maior ocorrência é preferencialmente o verão (DJF) nos limiares mais longos, e na maioria das cidades.

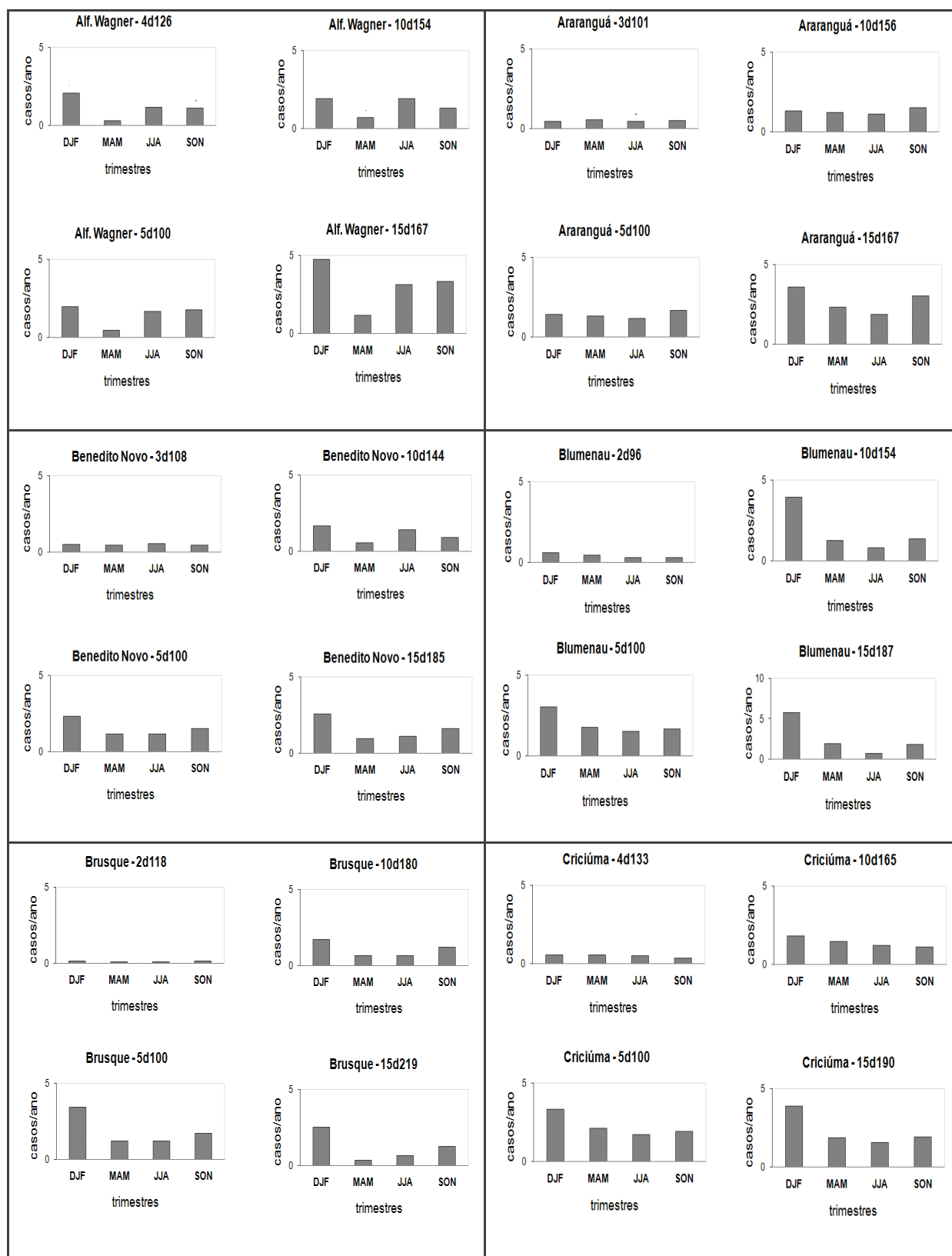


Fig. 12 - Climatologia de eventos extremos no presente (1951-2010) para as 18 cidades. Cada cidade possui os 4 limiares representados: 1º limiar (superior esquerda); 10 dias (superior direita); 15 dias (inferior direita) e 5d100 (inferior esquerda). A unidade do eixo vertical é fixa em 5 (nº de casos por trimestre).

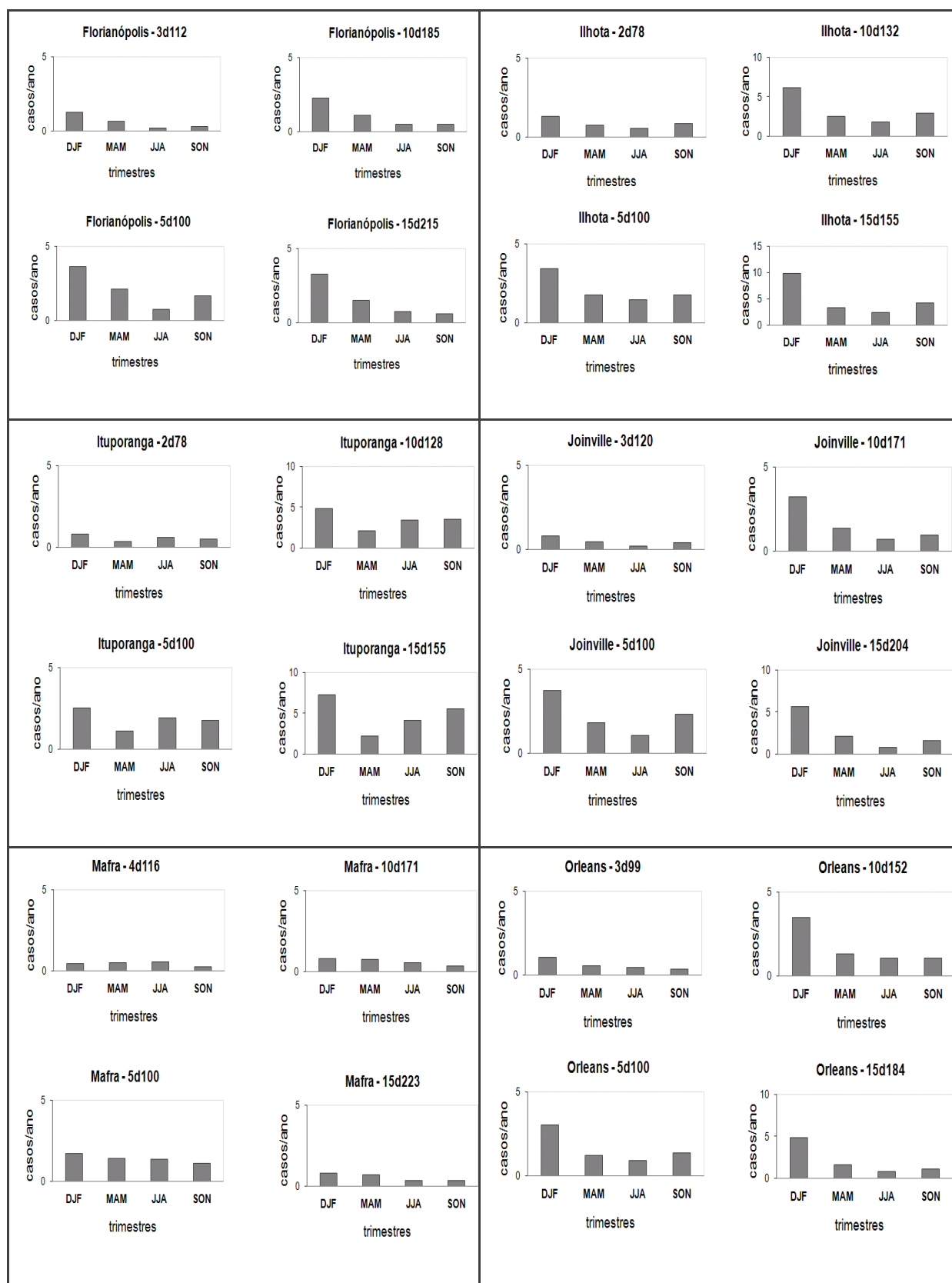


Fig. 12 - Continuação...

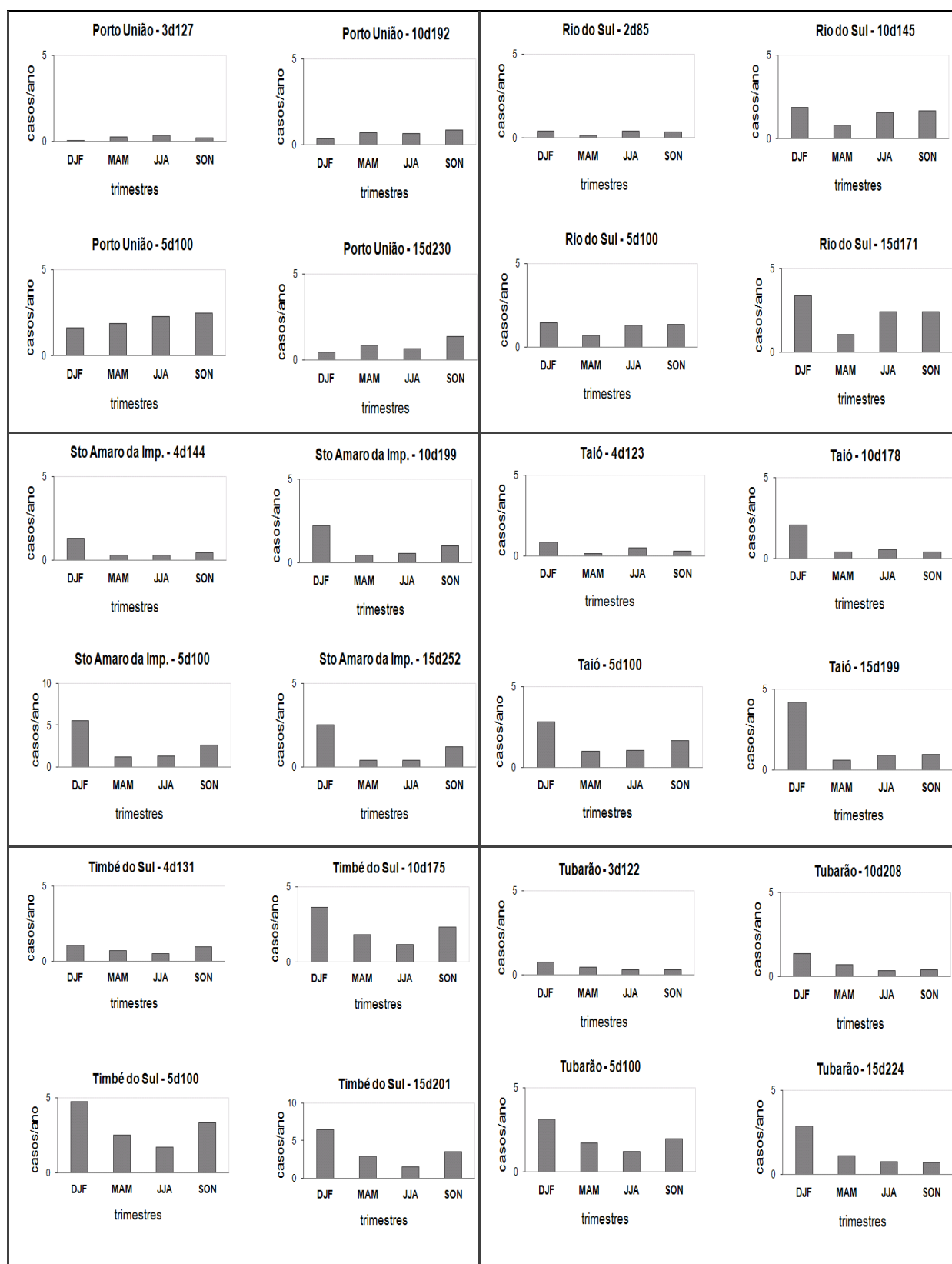


Fig. 12 - Continuação.

Algumas destas cidades, porém, apresentam valores muito próximos na primavera e verão, como observado em Araranguá, Mafra, Porto União e Benedito Novo. Nota-se que estas cidades apresentam menores índices de eventos no total. As cidades que possuem o maior número de eventos estão no Vale do Itajaí e Sul do Estado, conforme a Fig.7. Os limiares de maior período de tempo e magnitude de chuva apresentam os maiores valores, isto pelo fato de que captam tanto eventos longos quanto as sequências de eventos mais curtos e intensos de precipitação. Consequentemente, o 1º limiar é o que mostra menor número de eventos por trimestres.

Conhecendo a distribuição temporal dos eventos extremos ocorridos nos últimos 60 anos, pôde-se obter, como apresentado nas Fig. 13 e 14 (1º limiar e 15 dias), a climatologia sazonal dos eventos extremos no futuro (2070-2100) simulada pelo Modelo Regional HadRM3P (MARENGO et al., 2009a), possibilitando uma análise comparativa da variação sazonal dos eventos com os ocorridos no presente. São analisados apenas os resultados obtidos pelo 1º limiar e o de 15 dias, pelo fato de apresentarem valores semelhantes aos de 5d100 e 10 dias, respectivamente.

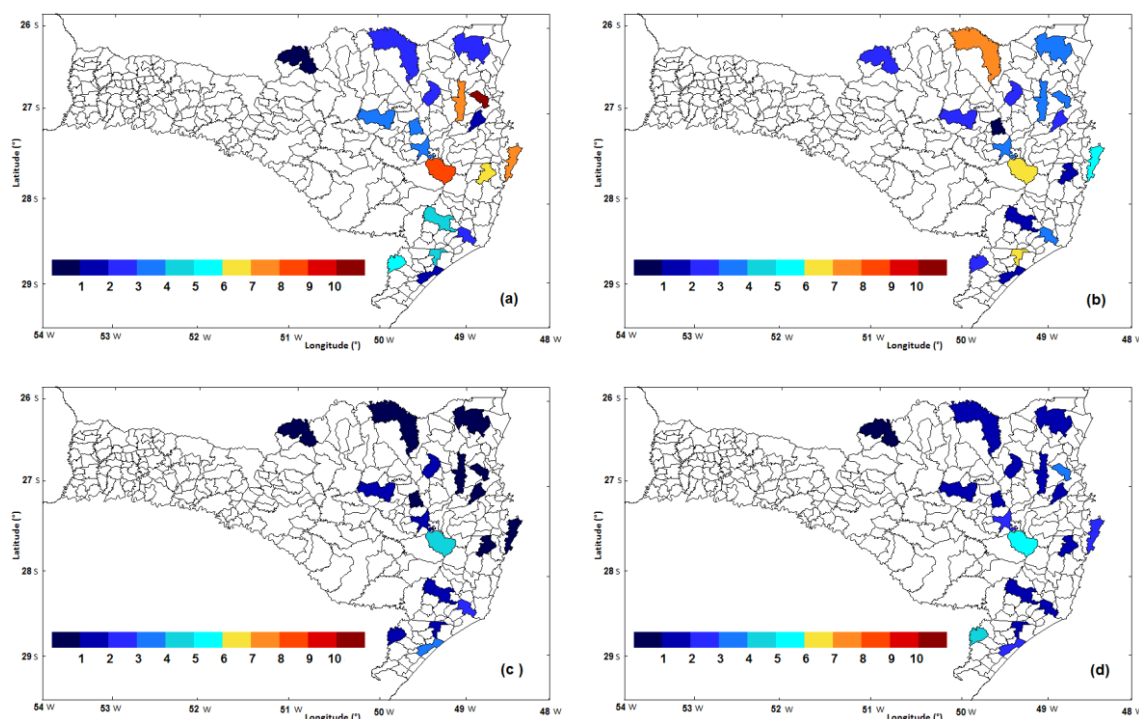


Fig. 13 - Climatologia sazonal dos eventos extremos no futuro (2070-2100) do 1º limiar. a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON (casos por estação).

No verão (Fig. 13a) houve grande número na cidade de Ilhota (10 casos), Alfredo Wagner (8 casos), Florianópolis e Blumenau (7 casos), indicando problemas futuros para elas se a situação climática se confirmar. Já as cidades dos extremos Norte e Sul do Estado tiveram relativamente poucos casos, inclusive nas outras estações. Uma exceção vista foi no outono (MAM) (Fig. 13b) para as cidades Mafra e Criciúma que apresentaram a maior frequência. Os limiares de maior período e quantidade de chuva apresentam os maiores valores, pois captam tanto eventos longos quanto mais curtos e intensos de precipitação. Consequentemente, o 1º limiar é o que mostra menos eventos nos trimestres do ano.

O comportamento sazonal dos eventos extremos obtidos no limiar de 15 dias mostra que no verão (Fig. 14a), novamente, verifica-se maior frequência esperada no cenário futuro em relação às demais estações. O HadRM3P estima para todas as cidades, exceto Mafra e Porto União, um número maior que 10 casos por cidade no trimestre, significando que as inundações serão mais frequentes em praticamente todas as cidades. No outono (Fig. 14b) haverá menor crescimento de casos em relação às outras estações no Sul do Estado, e da mesma forma maior aumento na parte noroeste da região de estudo.

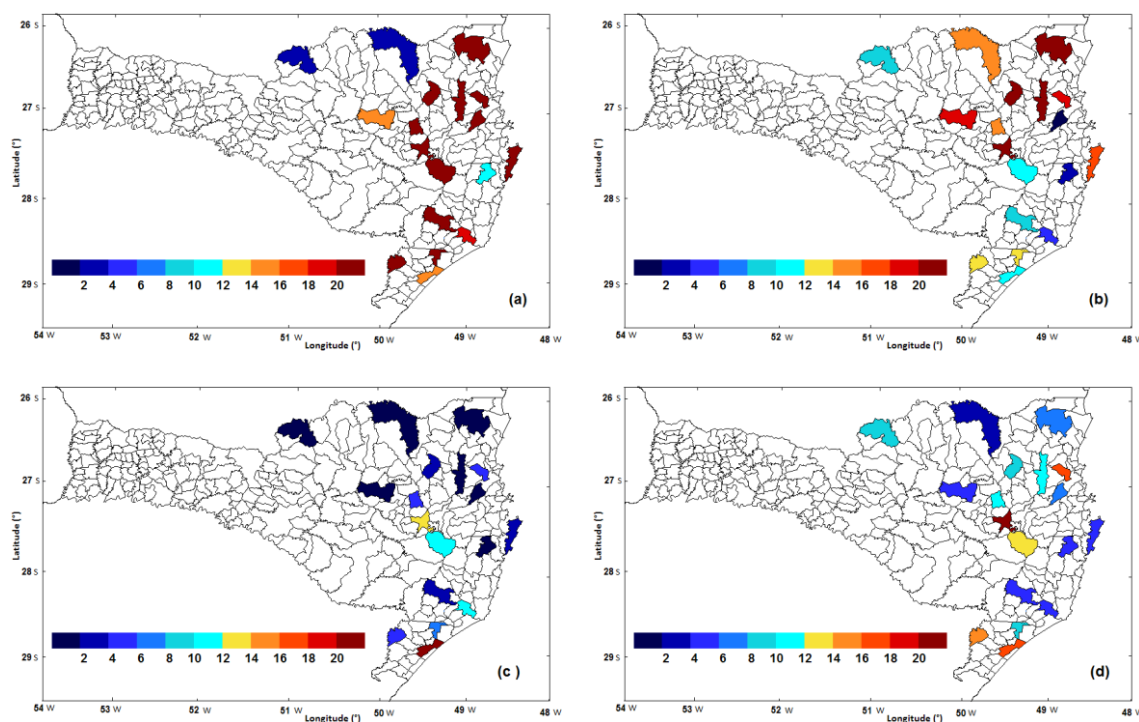


Fig. 14 - Climatologia sazonal dos eventos extremos no futuro (2070-2100) do limiar de 15 dias. a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON (casos por estação).

Na parte norte da região de estudo (latitudes menores que a de Florianópolis), pode-se dizer que apresenta um comportamento muito semelhante ao do verão. Para a inverno (JJA) e primavera (SON) (Fig. 14c e Fig. 14d) nota-se que algumas cidades tem casos discrepantes, mas no geral a tendência é de que estes trimestres do ano tenham ocorrência de eventos extremos bem menor que no 1º semestre, principalmente com relação ao inverno. Entretanto, o modelo climático sugere que em um clima mais quente haveria aumento dos extremos em todas as cidades.

Contudo, deve ser levado em conta que os modelos numéricos apresentam tendências reduzidas de representação das tendências de índices de chuvas simuladas – o que em geral todos os modelos climáticos apresentam – especialmente em regiões de topografia irregular.

Nas Figs. 15 a 18 é apresentado a variação climática (diferença entre o clima futuro e o presente) sazonal dos eventos extremos. Os dados obtidos são de todos os limiares de precipitação (1° limiar, de 10 dias, de 15 dias e 5d100).

O comportamento da variação climática para o 1° limiar é mostrado na Fig. 15. De todas as estações o outono (Fig. 15b) é apontado como o de maior ocorrência de casos, com aumento igual ou superior a 100% ao número atual. O inverso é visto no inverno (Fig. 15c) que é o trimestre que apresenta menor variação na parte norte, de forma que um terço das cidades não apresenta variação, ou variação máxima de até 50% superior ao presente. No verão (Fig. 15a) e primavera (Fig. 15d) há um comportamento semelhante de variação, porém o crescimento é sempre o dobro (no mínimo), do que ocorre no presente.

Verifica-se que os eventos quantificados pelo limiar de 10 dias (Fig. 16) possuem padrão semelhante ao 1° limiar. Nota-se uma leve tendência superior em todos os trimestres do ano e distribuição regional mais homogênea. Novamente, no outono (Fig. 16b) é que ocorre maior número de eventos e no inverno (Fig. 16c) menor, tendo inclusive os menores valores na parte norte.

Na Fig. 17 é mostrada a variação climática obtida pelo limiar de 15 dias. O comportamento é muito semelhante ao caso anterior, com exceção do inverno (Fig. 17c) que é detectado leve aumento na frequência de casos. As estações de mais casos continuam sendo, em ordem decrescente, o outono (Fig. 17b), o verão (Fig. 17a) e a primavera (Fig. 17d).

A Fig. 18 mostra a tendência de número de casos no futuro para o limiar de 5 dias e 100 milímetros de chuva (5d100). Aparentemente é o limiar que apresentou menor crescimento em todos os trimestres de modo geral, sendo que nas cidades da parte norte ocorre menor variação do número de casos no inverno (Fig. 18c). O outono (Fig. 18b) apresenta praticamente todas as cidades com aumento superior a 100% no número de eventos extremos para o futuro.

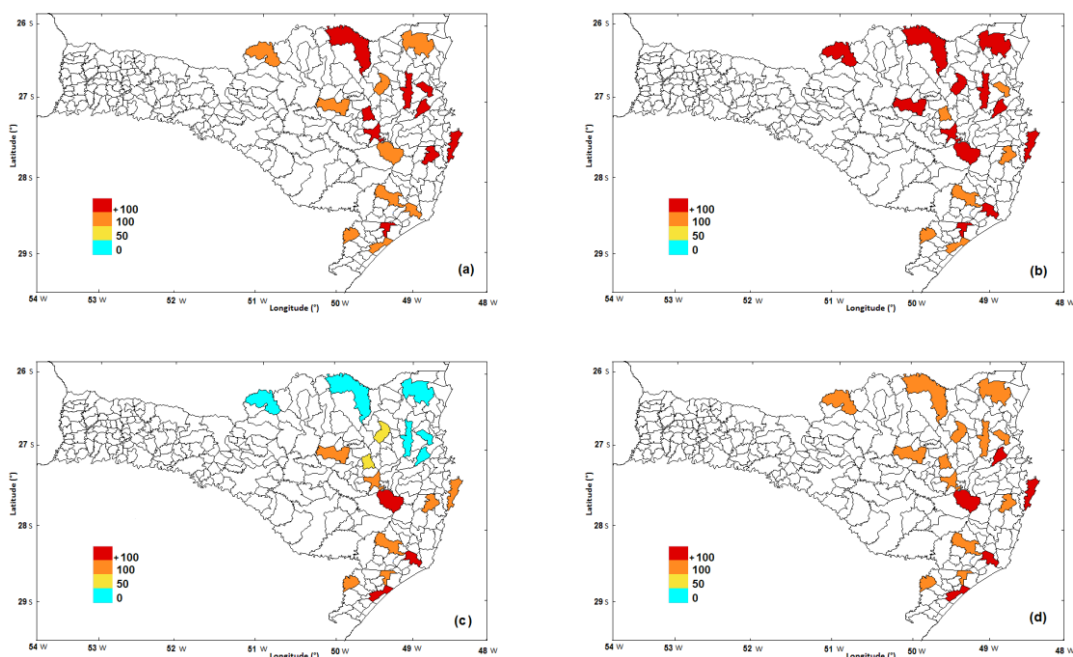


Fig. 15 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo 1° limiar de precipitação, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.

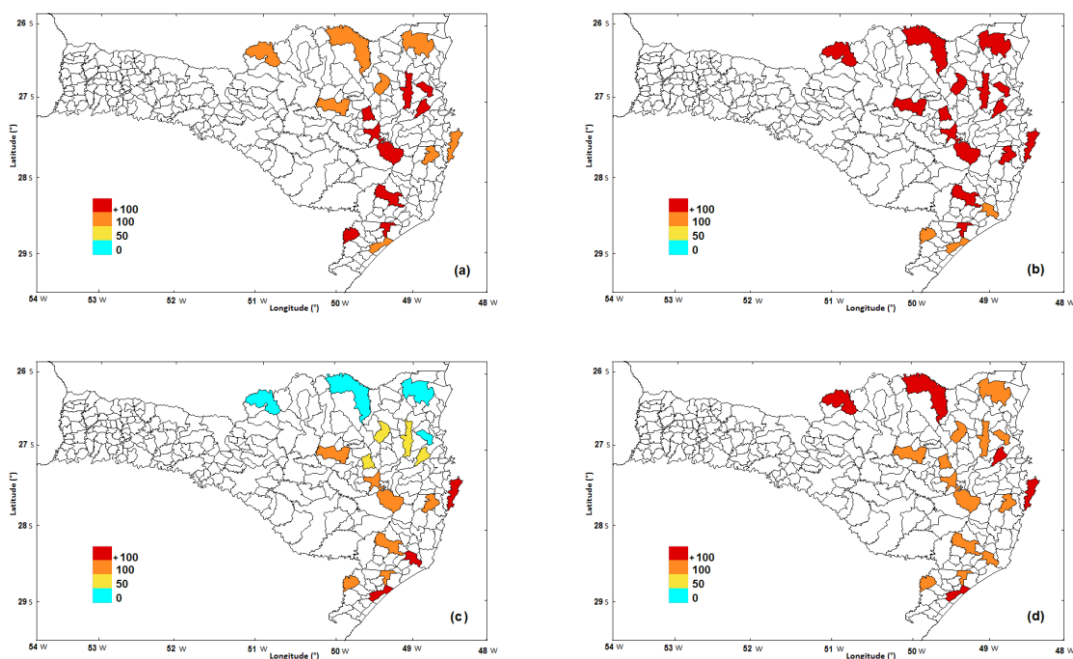


Fig. 16 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo limiar de 10 dias, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.

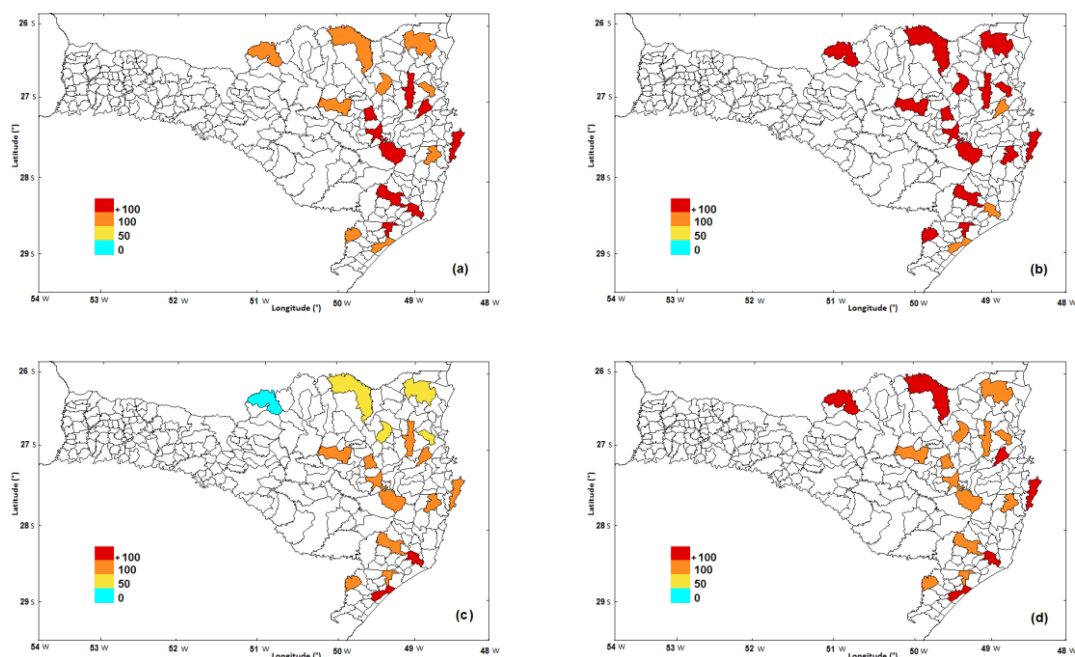


Fig. 17 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo limiar de 15 dias, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.

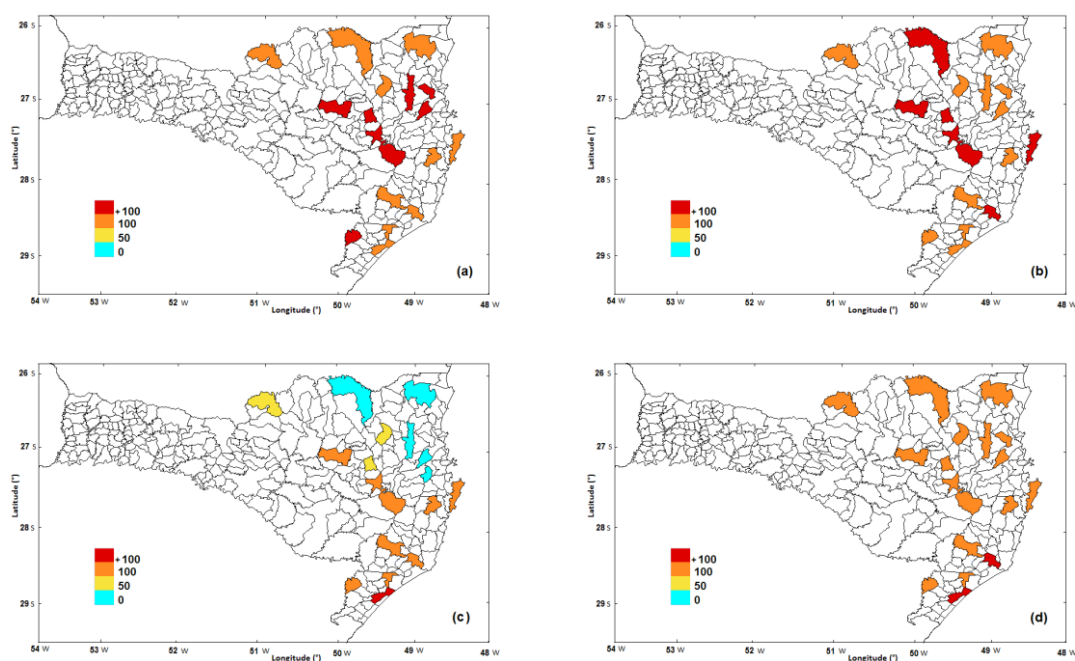


Fig. 18 - Variação climática dos eventos extremos nas cidades em estudo, simulados pelo modelo HadRM3P para o futuro (2070-2100) em relação ao presente (1951-2010), detectados pelo limiar de 5d100, em (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A medida de variação é em % de número de casos.

Segundo as figuras, em todos os limiares a primavera (SON) é caracterizada pela mais homogênea mudança, com praticamente todas as cidades apresentando o dobro do que é observado no presente. O inverso pode ser visto no inverno (JJA), na qual o acréscimo será de no máximo de 50% na metade norte, para todos os índices usados. Também é percebido que as regiões que apresentam as maiores taxas sazonais de aumento de casos são o Vale do Itajaí e o Sul do Estado, e as que apresentam pouca variação são as do Norte de Santa Catarina.

De maneira resumida, em todas as cidades é visto um aumento na frequência dos eventos extremos previstos no futuro em relação ao presente, concordando com diversos estudos (IPCC, 2007; MARENGO et al., 2007, 2009a,b; SILVA DIAS et al., 2009). A estação do ano que terá maior aumento no número de eventos é o outono (MAM), mas o trimestre do verão (DJF) apresenta variações muito semelhantes. Nestas estações, a maioria das cidades tem acréscimo maior do que 100% em relação ao período de 1951-2010. Segundo Soares e Marengo (2008), o modelo regional HadRM3P simulando para um período futuro (2080-2089) apresentou tendência de intensificação dos jatos de baixos níveis na região para o cenário A2 do IPCC, e com isso favoreceria maior ocorrência de sistemas precipitantes intensos e eventos extremos de chuva no sul do Brasil.

Na estimativa do clima futuro também é observada mudança sazonal do comportamento das chuvas intensas em algumas cidades; como por exemplo, em Joinville, em que o máximo migra do verão para o outono (MAM). Em Rio do Sul a estação do inverno deixará de ser uma das mais ativas e passará ser a de menor frequência. Na cidade de Tubarão o inverno, que tem a menor frequência, passa a ser tal como o verão, uma das mais ativas, com exceção dos casos do 1° limiar. Também a cidade de Taió apresenta mudança no padrão das chuvas intensas, sendo que o outono terá a maior ocorrência ao invés do verão, principalmente em relação aos eventos mais prolongados de chuva.

Ao que se vê pelos resultados obtidos, parece haver alguma alteração no padrão da circulação atmosférica em praticamente toda a região no final do século, inclusive com acréscimo significativo na frequência dos eventos extremos. Os resultados concordam com Soares e Marengo (2008) que verificaram, para o período de 2080-2089, um padrão de maior convergência de umidade nesta região, originadas ou que atravessam as regiões equatoriais e tropicais do Brasil.

Entretanto, com relação à precipitação média, o modelo indica que a região Sul do Brasil não será a que sofrerá mais drasticamente as consequências das mudanças climáticas, a não ser por valores relativamente altos nas estações do outono e verão (Anexo 1). Contudo, tal informação não necessariamente se confirma se considerarmos os eventos com potencial para causar inundação.

Em relação aos casos em que houve maior frequência de eventos extremos no futuro, de fato é esperado maior crescimento em períodos mais prolongados, determinados pelos limiares de 10 e 15 dias. O alto índice de eventos deve ser levado em conta que a metodologia utilizada considera o efeito de memória da umidade no solo, isto é, uma grande precipitação não pode “desaparecer” no dia seguinte, sendo assim, o número de casos são referentes ao número de dias sob influência do evento. Além disso, o número total sazonal de eventos simulados pelo modelo climático deve ser analisado com cautela, pelo fato da variação climática realizada por modelos climáticos estar sendo analisada há poucas décadas e haver grande complexidade envolvida no estudo climático, além das incertezas quanto à influência antrópica no clima global e regional.

5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foram analisados os seguintes aspectos: tendência de eventos extremos de precipitação no período de 1951 a 2010 (60 anos) nas regiões leste e norte de SC, possíveis relações destes eventos com fenômenos climáticos de escala planetária e a climatologia sazonal neste período e num cenário de clima futuro usando modelagem climática regional, no caso o modelo HadRM3P. Foram coletados dados referentes às inundações em cidades que apresentam históricos de casos, permitindo definir quatro limiares para detectar prováveis eventos locais de chuva que causaram ou causarão inundação.

Os resultados mostraram que a tendência anual dos eventos extremos foi crescente na maioria das cidades em estudo. Os testes usados, t-Student (para o coeficiente b da Análise de Regressão) e de Mann-Kendall, identificaram tendências significativas a 5% de significância em sete cidades, em pelo menos um limiar: Tubarão, Benedito Novo, Ilhota, Timbé do Sul, Rio do Sul, Mafra e Porto União. Estas estão bem distribuídas regionalmente, sendo que tiveram as maiores taxas de crescimento, em todos os limiares definidos: Benedito Novo, Ilhota, Timbé do Sul, Tubarão e Joinville. Este é um resultado consistente, pois todos os limiares seguem praticamente o mesmo comportamento e em todo o setor Leste do Estado, e assim verifica-se que os eventos estão mais frequentes nas últimas décadas. Apenas duas cidades apresentaram tendência significativa de decrescimento. Em Orleans o teste t-Student apontou significância a 10% e para Araranguá houve significância a 5% pelo Teste de Mann-Kendall, ambas no sul, mostrando também que pode existir algum fator local que influencia na ocorrência temporal dos extremos.

A tendência decenal de eventos extremos para o 1º limiar, que é mais favorável para causar inundações em relação aos demais, mostrou, além da predominância de aumento, que há alguma variabilidade anual e espacial. As séries temporais mostram tendências não só lineares como até exponenciais em alguns casos (Apêndice B: Benedito Novo, Joinville, Tubarão), e em várias cidades observa-se uma correlação mais significativa com fenômenos de grande escala e de baixa frequência, – entretanto, isto não acontece simultaneamente em todas as cidades. No geral, é encontrado sinal positivo na região de estudo, indicando alguma conexão com eventos quentes e frios de ENOS e ODP.

Houve correlação linear mais significativa da ODP no 1º limiar e no 5d100, em praticamente todas as cidades. A ODP também mostrou ser bastante homogênea espacialmente em termos de sinal, influenciando de forma direta e positiva, isto é, eventos extremos são mais frequentes em fases quentes e menos frequentes em fases frias da ODP. De forma geral, os resultados obtidos na correlação entre os eventos extremos e os índices climáticos foram satisfatórios, pois concordam com outros estudos que apontam maior (menor) ocorrência de anomalias positivas de chuva e inundações em eventos de El Niño (La Niña), no Sul do Brasil.

O Oceano Atlântico Sul demonstrou ter pouca influência no comportamento dos eventos extremos, apresentando uma influência regionalmente heterogênea no sinal do coeficiente de correlação, com exceção de algumas cidades do Alto Vale do Itajaí. A parte Centro-norte do Estado teve correlação positiva bastante homogênea espacialmente, e nas cidades do Sul a predominância foi de sinal negativo, mostrando fraca influência da TSM do Atlântico Sul. A QBO apresentou os menores indícios de conexão, inclusive com os sinais pouco homogêneos, tanto espacialmente entre as cidades, quanto entre os tipos de limiares.

A distribuição sazonal dos eventos extremos no presente (1951-2010) demonstrou predominância no verão e menor ocorrência no inverno, concordando com a climatologia da região, na qual no verão existe tanto a atuação de massas de ar instáveis tropicais, equatoriais e polares como chuvas rápidas e intensas. As cidades com mais casos estão no Vale do Itajaí (Ilhota, Ituporanga, Blumenau) e Joinville.

Para o futuro (2070-2100) o modelo climático HadRM3P simulou o cenário A2 do IPCC, que é o mais pessimista em relação à emissão de gases de efeito estufa, e mostrou grande variação climática em todas as cidades. Em termos gerais, há a manutenção no futuro da tendência observada no presente dos casos positivos de tendências, mas alguma mudança no padrão sazonal, com os máximos migrando para outras estações – como identificado, por exemplo, em Joinville, onde a estação mais ativa passará do verão para o outono. Em Rio do Sul, a estação mais ativa deixará de ser o inverno, passando a ser o verão.

Desta forma, espera-se que este trabalho contribua com o planejamento urbano das cidades do leste e norte catarinense, no sentido de prevenção e mitigação de futuros desastres naturais provocados pelos eventos extremos de precipitação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 01 Ago. 2010.

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, TC; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN T. A.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; AMBENJE, P.; RUPA, K. K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, JL. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **J. Geophys. Res.**, n. 111. D05109, DOI 10.1029/2005JD006290. 2006.

ALMEIDA, L. Q.; PASCOALINO, A. Gestão de risco, desenvolvimento e (meio) ambiente no brasil - um estudo de caso sobre os desastres naturais de Santa Catarina. Viçosa, MG. XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. **Anais**. Viçosa, MG, 2009.

ALVES, L. M. **Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do Sul utilizando um modelo climático regional**. 2007. 92f. Dissertação (Mestrado) - INPE, São José dos Campos, 2007.

BACK, A.J. **Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas**. Pesq. Agropec. Brasileira, Brasília, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BARBIERI, D. W.; MARCELINO, I. P. V. O.; SAUSEN, T. M. Anomalias de Precipitação para a Região Sul do Brasil: análise de consistência. **Geografia. Ensino & Pesquisa**, v. 12, p. 3981-3903, 2008.

BJERKNES, J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. **Tellus**, v. 18, n. 4, p. 820-829, 1966.

BUREAU OF METEOROLOGY (BOM). **The southern oscillation index**. Disponível em: < <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>>. Acesso em 10 Out. 2011.

CLIMATE DIAGNOSTICS CENTER (CDC). **Multivariate enso index**. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/mei.html>>. Acesso em 10 Out. 2011.

CLIMATE PREDICTION CENTER (CPC). **Cold & warm episodes by season. Changes to the oceanic Niño index (ONI)**. Disponível em: <http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/>. Acesso em 10 Out. 2011.

FRANK, B. **Uma abordagem para o gerenciamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Itajaí, com ênfase no problema das enchentes**. 1995. 325f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), UFSC, Florianópolis, 1995.

GOERL R. F. **Estudo de inundações em Rio Negrinho sobre a ótica dos desastres naturais**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J. M.; JOHNS, T. C.; MITCHELL, J. F.B. WOOD, R. A. The simulation of SST, sea ice extent and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. **Climate Dynamics** v.16, 147–168, 2000.

GROISMAN, P. Y.; KARL, T. R.; EASTERLING, D. R.; KNIGHT, R. W.; JAMASON, P. F.; HENNESSY, K. J.; SUPPIAH, R.; PAGE, C. M.; WIBIG, J.; FORTUNIAK, K.; RAZUVAEV, V. N.; DOUGLAS, A.; FORLAND, E.; ZHAI, P. M. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. **Climatic Change**, 42, 243-283, 1999.

HERRMANN, M. L. P.; PELLERIN, J. R. C. M.; SAITO, S. M. Análise das Ocorrências de Escorregamentos no Estado de Santa Catarina com base nos Formulários de Avaliação de Danos da Defesa Civil- 1980 a 2003. In: Iº SIBRADEN-Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. **Anais**. Florianópolis, 2004.

HERRMANN, M. L. P. (org.). **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: IOESC, 146 p, 2006.

HERRMANN, M. L. P.; MENDONÇA, M. Desastres Naturais no Estado de Santa Catarina durante o período 1980 a 2004: inundações e estiagens associadas aos sistemas meteorológicos nas escalas global e regional. In: II Encontro Sul brasileiro de Meteorologia, 2007, Florianópolis-SC. Avanços tecnológicos da Meteorologia no sec XXI!. **Anais**. v. 1. p. 1-13. Florianópolis, 2007.

HERRMANN, M. L. P.; CARDOZO, F. S.; BAUZYS, F. Frequência dos desastres naturais no Estado de Santa Catarina no período de 1980 a 2007. In: XII Encuentro

de Geógrafos de América Latina, 2009, Montevideo - Uruguay. **Anais do XII Encuentro de Geógrafos de América Latina**, 2009.

IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

ISLAM, S.; REHMAN, N. Future change in the frequency of warm and cold spells durations over Pakistan simulated by the PRECIS regional climate model. Paper presented in the Second International Young Scientists' Global Change Conference, Beijing, 7–9 November 2006, organised by START (the global change SysTem for Analysis, Research and Training) and the China Meteorological Administration, 2006. Disponível em :<http://precis.metoffice.com/docs/poster-china-final_siraj.pdf>.

JORNAL DIÁRIO CATARINENSE. Florianópolis. Disponível em: <<http://www.clicrbs.com.br/diariocatarinense>>. Acesso em: 20 Set. 2010.

JORNAL A NOTÍCIA. Joinville. Disponível em: <<http://www1.an.com.br>>. Acesso em: 20 Set. 2010.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin. 120 p, 1975.

LAY, J. A.; AIELLO, J. L. Relaciones entre el MEI (Multivariate ENOS Index) y las precipitaciones en la Argentina continental. In: Congresso Latino Americano de Meteorologia, ix. Congresso Argentino de Meteorologia, VIII. CLIMET IX, COMET VIII, 2001, Buenos Aires - Arg. **Anais....** Buenos Aires, 2001

LOPES, F. Z. **Relação entre o MEI (Multivariate ENOS Index) e a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. 2006**. 122f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2006.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M. & FRANCA, R. C. A. Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production, **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vol. 78, p. 1069-1079. 1997.

MARCELINO, E. V.; GOERL, R. F.; RUDORFF, F. M. Distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina (período 1980 - 2003). In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 2004, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: GEDN/UFSC, p. 554-564. 2004.

_____; RUDORFF, F. M.; MARCELINO, I. P. V. O.; GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Impacto do Furacão Catarina sobre a região sul catarinense: monitoramento e avaliação pós-desastre. **Geografia**, v.30, n.3, p. 559-582. 2005.

_____; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. Mapeamento de risco de desastre naturais do Estado de Santa Catarina. **Caminhos da Geografia** (UFU. Online), Uberlândia, v. 8, n. 17, p. 72-84, 2006.

_____; RUDORFF, F. M.; GOERL, R. F.; HAAS, R. Observações "in loco" realizada durante a passagem do furacão Catarina. **Caminhos da Geografia** (UFU. Online), v. 9, p. 37-56, 2008.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T. Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales. The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South America. **Proceedings of 8 ICSHMO**, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, p. 291-296. 2006.

_____; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C.; ROCHA, R. P.; LABORBE, R. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. **Relatório 5**. MMA/SBF/DCBio, Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade, Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília. 2007.

_____. Água e Mudanças Climáticas. **Estudos Avançados**. 63. 1-14. 2008.

_____; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S.V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**. DOI 10.1007/s00382-009-0721-6. 2009a.

_____; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **Int. J. Climatol**. DOI: 10.1002/joc.1863. 2009b.

MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITO, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z. C. Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt K. B., Tignor, M., Miller H. L. (eds). **Anais**. Cambridge University Press: Cambridge, New York, Chapter 10.

MILLY, P. C. D.; DUNE, K. A.; VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. **Nature**, 438, 347-350. 2005.

_____; WETHERALD, R. T.; DUNE, K. A.; DELWORTH, T. L. Increasing risk of great floods in a changing climate. **Nature**, 415, 514-518. 2002.

OBREGÓN, GUILHERMO O. **Dinâmica da variabilidade climática da precipitação sobre a América do Sul**. Tese (Doutorado). - INPE, São José dos Campos. 2003.

PHILANDER, S. G. H. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. **Academic Press**, San Diego, CA. 1990.

POLEZA, M. M. **Mudanças na estrutura urbana de Rio do Sul em decorrência das enchentes de 1983**. 2003. 122 f. Dissertação (Mestrado em Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Fundação Universidade Regional de Blumenau, 2003.

REINKE, G. L.; REINKE, R. L.; PADILHA, C. K. R. Análise preliminar de um caso de vcan que favoreceu a ocorrência de grandes enchentes no Sul do Brasil em dezembro de 1995. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2006.

RUPA, K. K.; SAHAI, A. K.; KRISHNA, K. K.; PATWARDHAN, S. K.; MISHRA, P. K.; REVADEKAR, J. V.; KAMALA, K.; PANT, G. B. High-resolution climate change scenarios for India for the 21st century. **Current Science** 90: 334–345. 2006.

SANTA CATARINA. Recurso Hídricos de Santa Catarina.

SANTOS, E. B. **Índices oceânicos e sua relação com a precipitação pluvial do Rio Grande do Sul**. Pelotas-RS. 2011. 88 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, 2011.

SEVERO, L. D. **Estudo de casos de chuvas intensas no estado de Santa Catarina**. Master Science Dissertation, INPE, São José dos Campos, Brazil. 1994.

SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C.; MARENGO, J.; RODRIGUES, M. L. G.; LIMA, M.; MINUZZI, R. B. As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando a melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, 2009.

SILVA, H. S. **Análise Sociotécnica da Meteorologia Brasileira: Uma Aplicação para o Vale do Itajaí (SC)**. 2003. 208f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) – Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas – Centro de Filosofia e Ciências Humanas – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SILVEIRA, W.N.; KOBAYAMA, M. Histórico de inundação em Joinville/SC – Brasil, no período de 1851-2007. IN XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo, 2007. ABRH. **Anais**. CD-rom 16p. 2007.

_____. **Análise histórica de inundação no município de Joinville – SC, com enfoque na bacia do rio Cubatão do Norte**. 2008. 165f. Dissertação de Mestrado – UFSC, Florianópolis, 2008.

SOARES, W. R. **Caracterização dos fluxos de umidade sobre a América do Sul associados ao jato de baixos níveis ao Leste dos Andes utilizando o modelo HadRM3P em um cenário de aquecimento global**. 2008. 190f. Tese (Doutorado) – INPE, São José dos Campos. 2008.

_____; MARENGO, J. A. Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario. **Int. J. Climatol.** 29, 1395-1414. 2009.

TADROSS, M.; JACK, C.; HEWITSON, B. On RCM-based projections of change in southern African summer climate. **Geophysical Research Letters** 32: L23713, DOI:10.1029/2005GL024460. 2005.

TEBALDI, C.; HAYHOE, K.; ARBLASTER, J. M.; MEEHL, G. A. Going to extremes - An Intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. **Climatic Change**, 79. 185–211. 2006.

TEIXEIRA, M. S. **Atividade de ondas sinóticas relacionada a episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil**. 2004. 121f. Dissertação de Mestrado – São José dos Campos, INPE, 2004.

_____; SATYAMURTY, P. Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, n.135, 598-617. 2007.

VANHONI, J. F. **Fachada Atlântica Sul do Brasil: Clima e Dinâmica atmosférica no contexto as mudanças climáticas globais**. Curitiba: UFPR, 2009. Dissertação de Mestrado em Geografia. 2009.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. San Diego-CA: Academic Press, 1995. 467p.

XU, Y. L.; HUANG, X. Y.; ZHANG, Y.; LIN, W. T.; LIN, E. D. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century. **Advances in Climate Change Research** 2(Suppl. 1): 50–53. 2006a.

_____; ZHANG, Y.; LIN, E. D.; LIN, W. T.; DONG, W. J.; JONES, R.; HASSELL, D.; WILSON, S. Analyses on the climate change responses over China under SRES B2 scenario using PRECIS. **Chinese Science Bulletin** 51(18): 2260–2267. 2006b.

ZARBATTO, S. Tubarão não esquece a enchente de 1974: hoje completam 30 anos da tragédia que marcou a cidade pelo saldo de destruição e mortes. Jornal A Notícia, 24/03/2004. Disponível em: <<http://www1.an.com.br/2004/mar/24/0pai.htm>>. Acesso em: 20 set. 2010.

ZHANG, Y.; YINLONG, X.; WENJIE, D.; LIJUAN, C.; SPARROW, M. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate events over China using the PRECIS climate model. **Geophysical Research Letters** 33: L24702, DOI:10.1029/2006GL027229. 2006.

Apêndices

Apêndice A

Fig. 19 - Tendência anual do total acumulado de eventos extremos obtidos pelo 1º limiar, 10 dias, 15 dias e 5d100 nas cidades de Alfredo Wagner e Araranguá, para o período 1951 a 2010. A unidade do eixo principal é 5 para todos os gráficos.

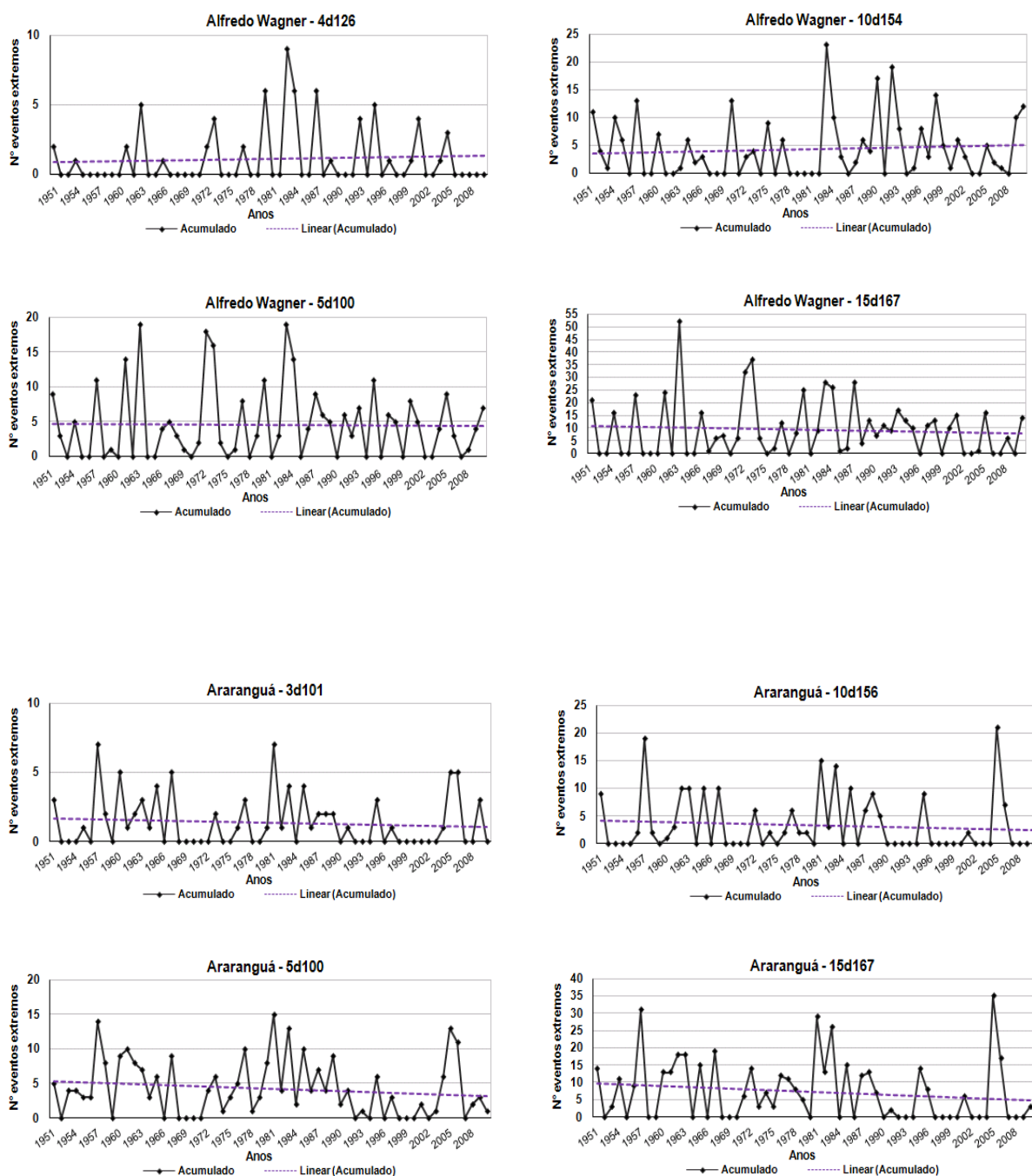


Fig. 20 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Benedito Novo e Blumenau.

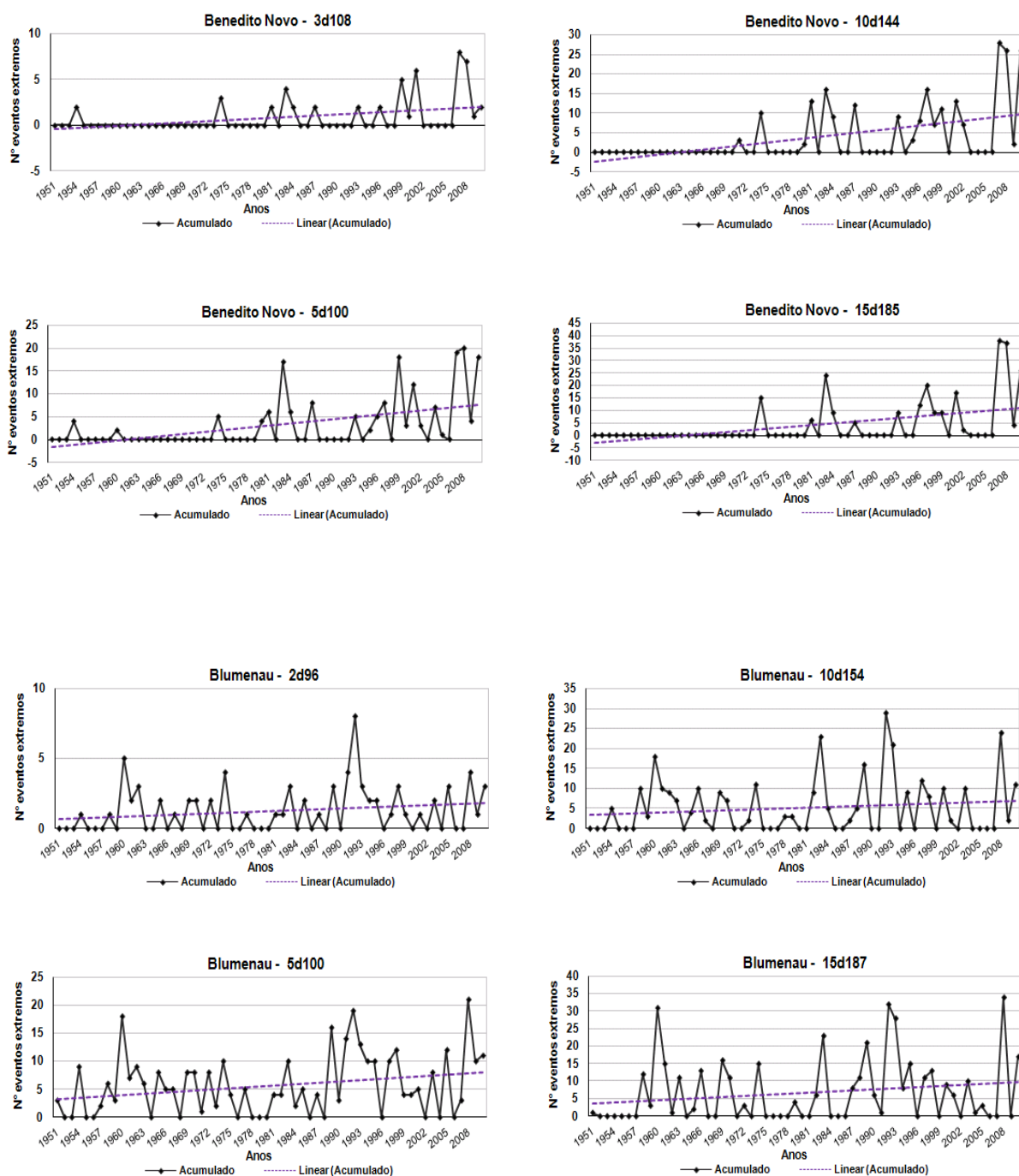


Fig. 21 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Brusque e Criciúma.

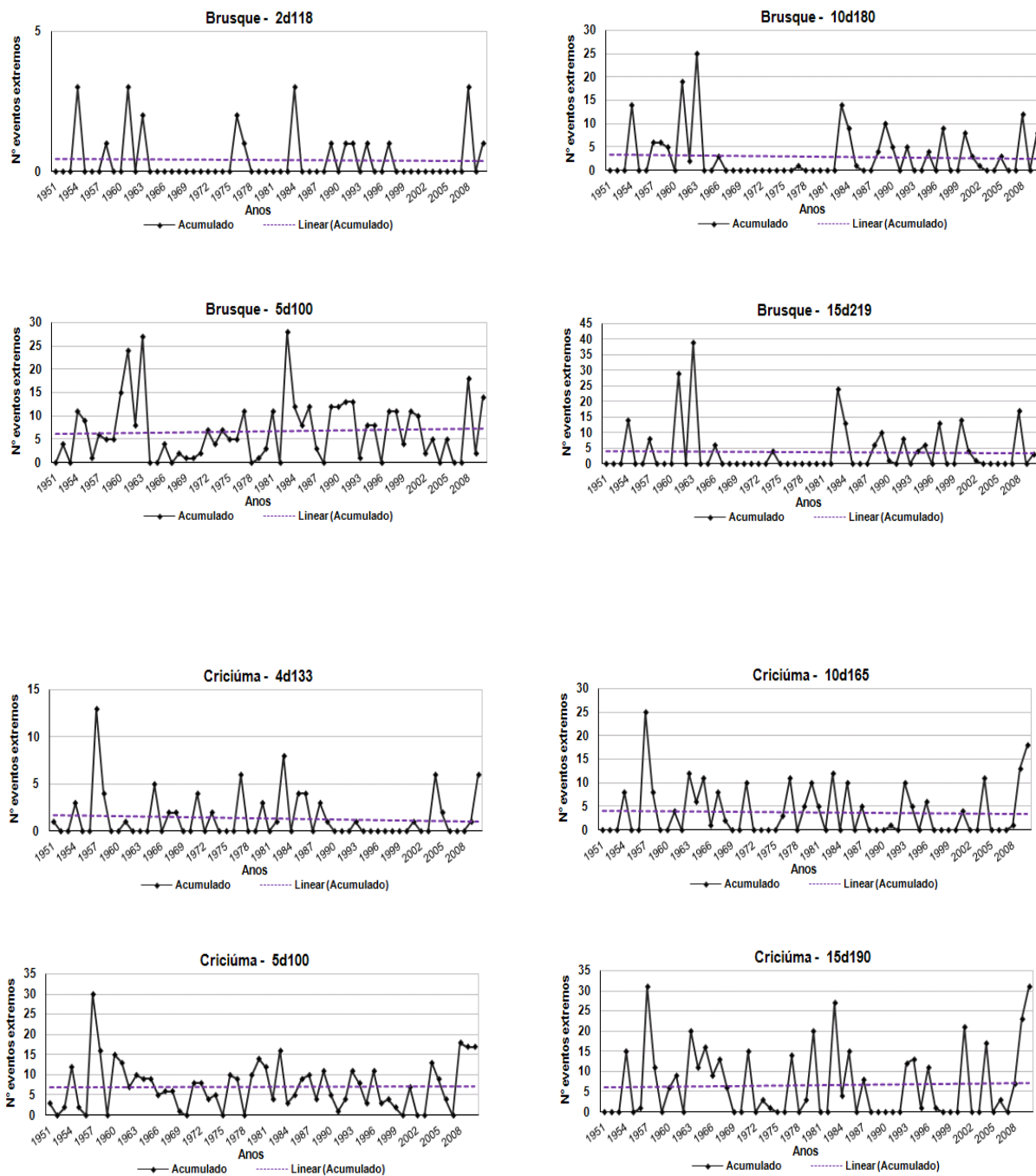


Fig. 22 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Florianópolis e Ilhota.

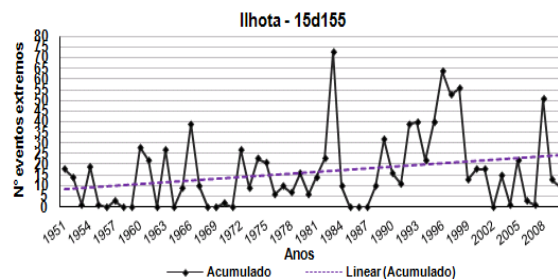
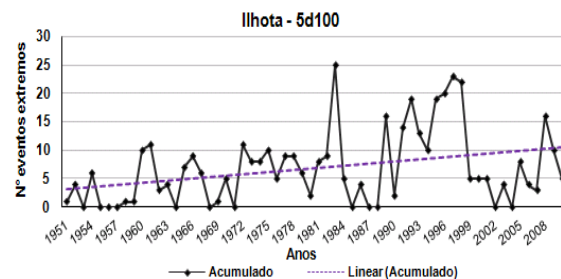
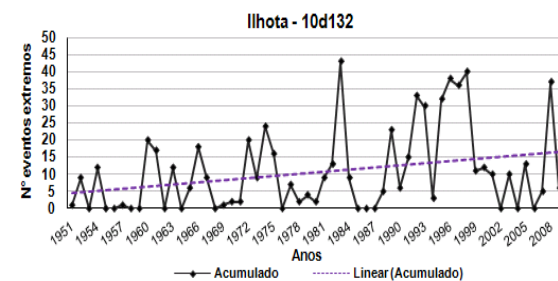
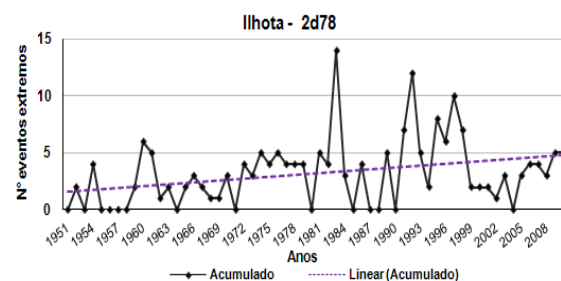
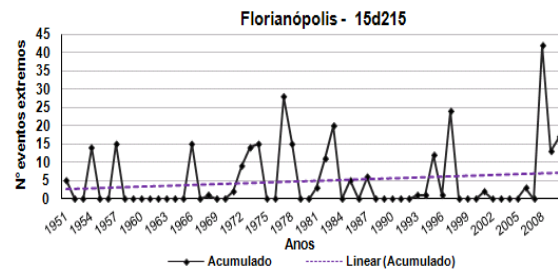
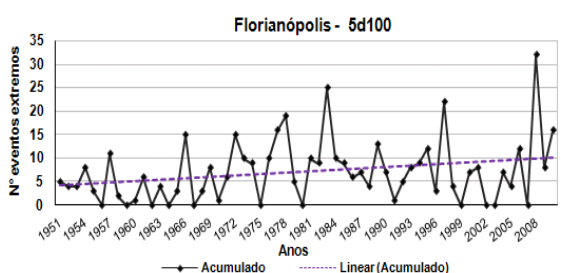
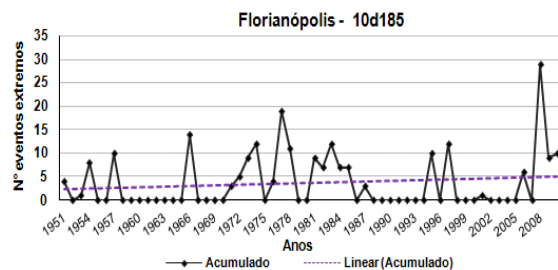
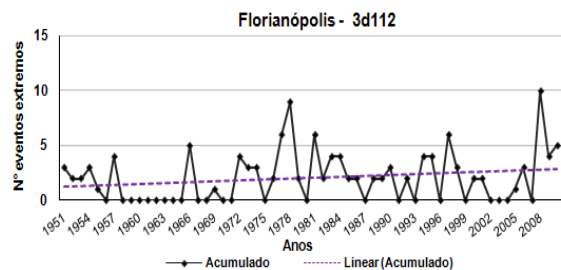


Fig. 23 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Ituporanga e Joinville.

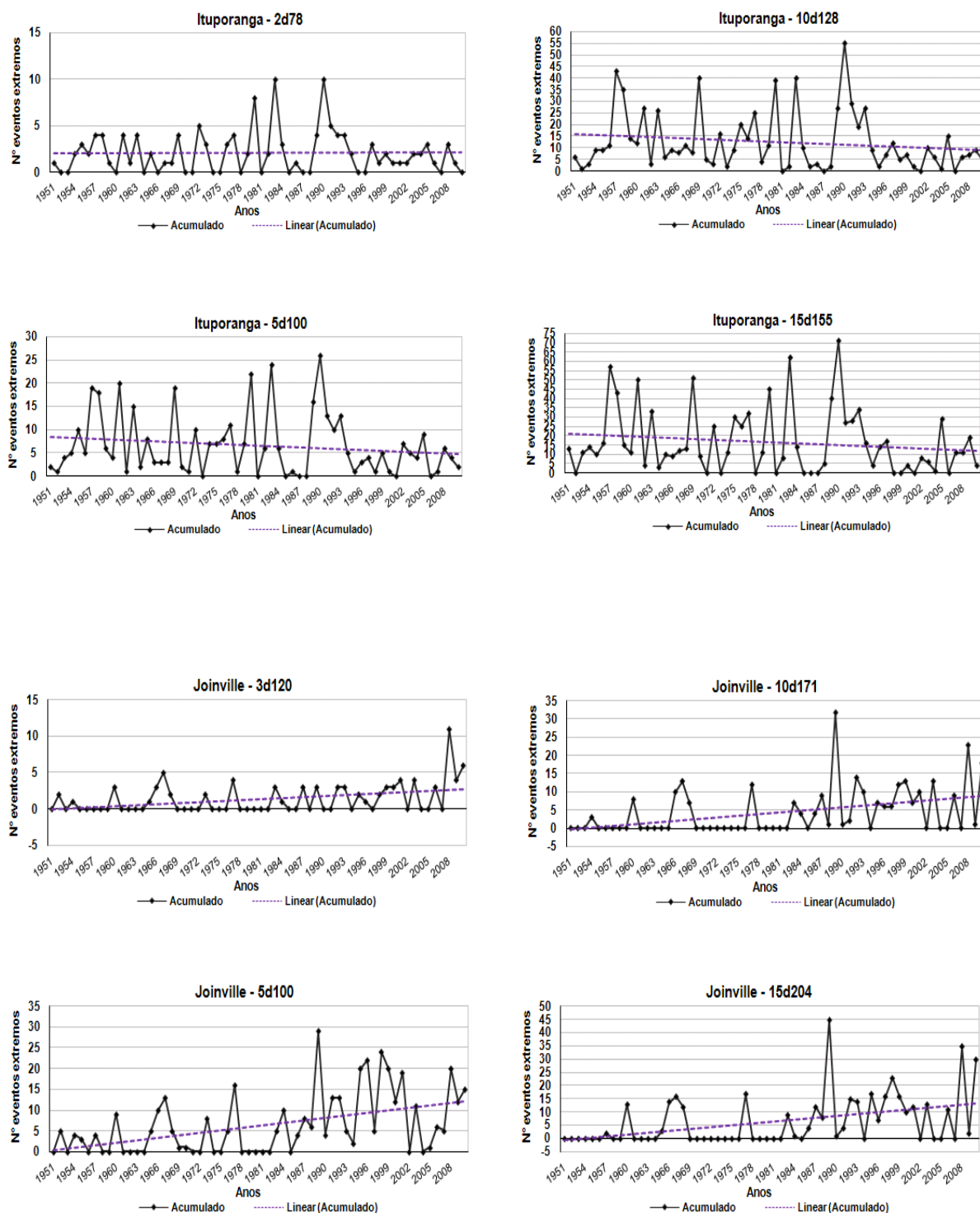


Fig. 24 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Mafra e Orleans.

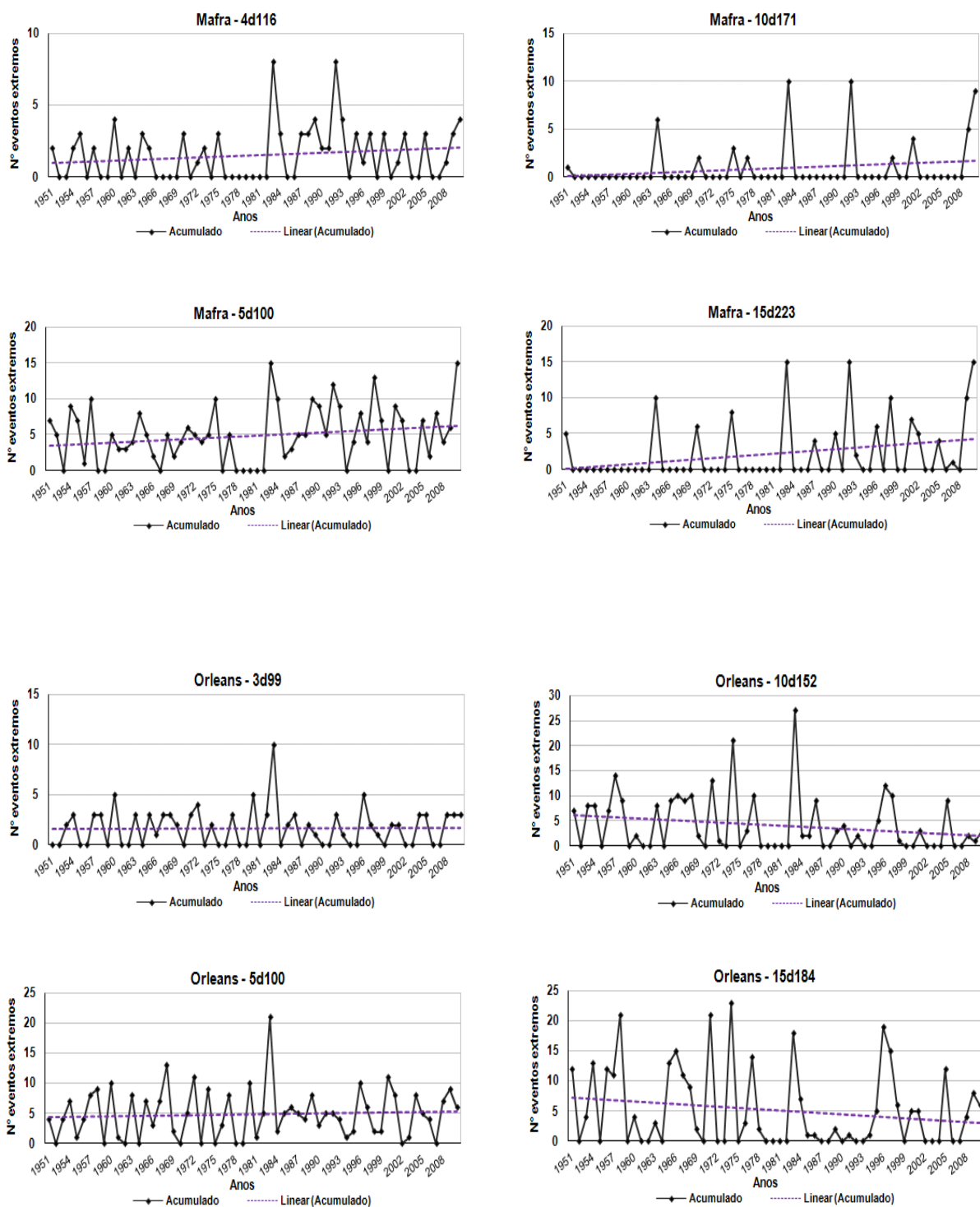


Fig. 25 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Porto União e Rio do Sul.

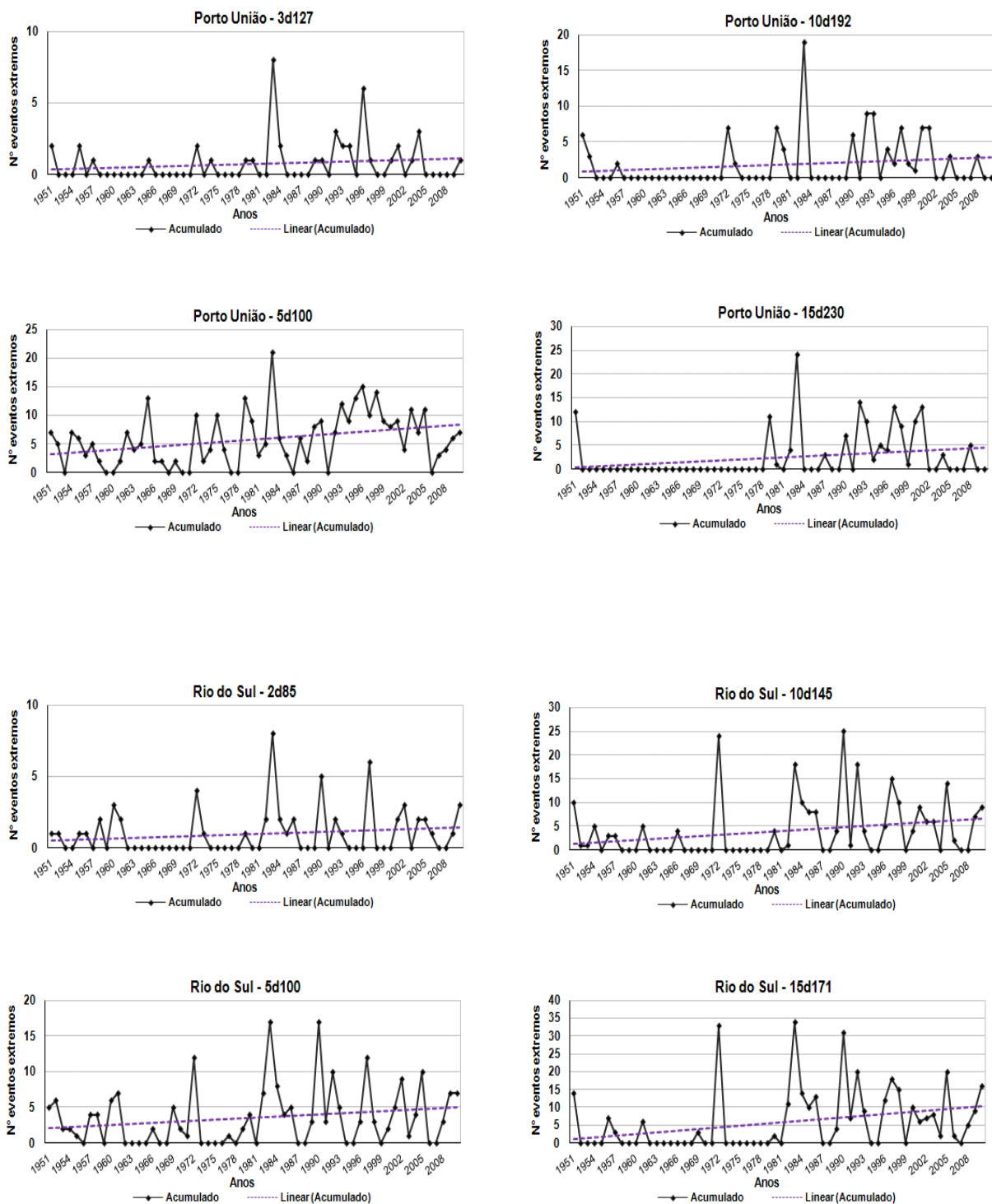


Fig. 26 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Santo Amaro da Imperatriz e Taió.

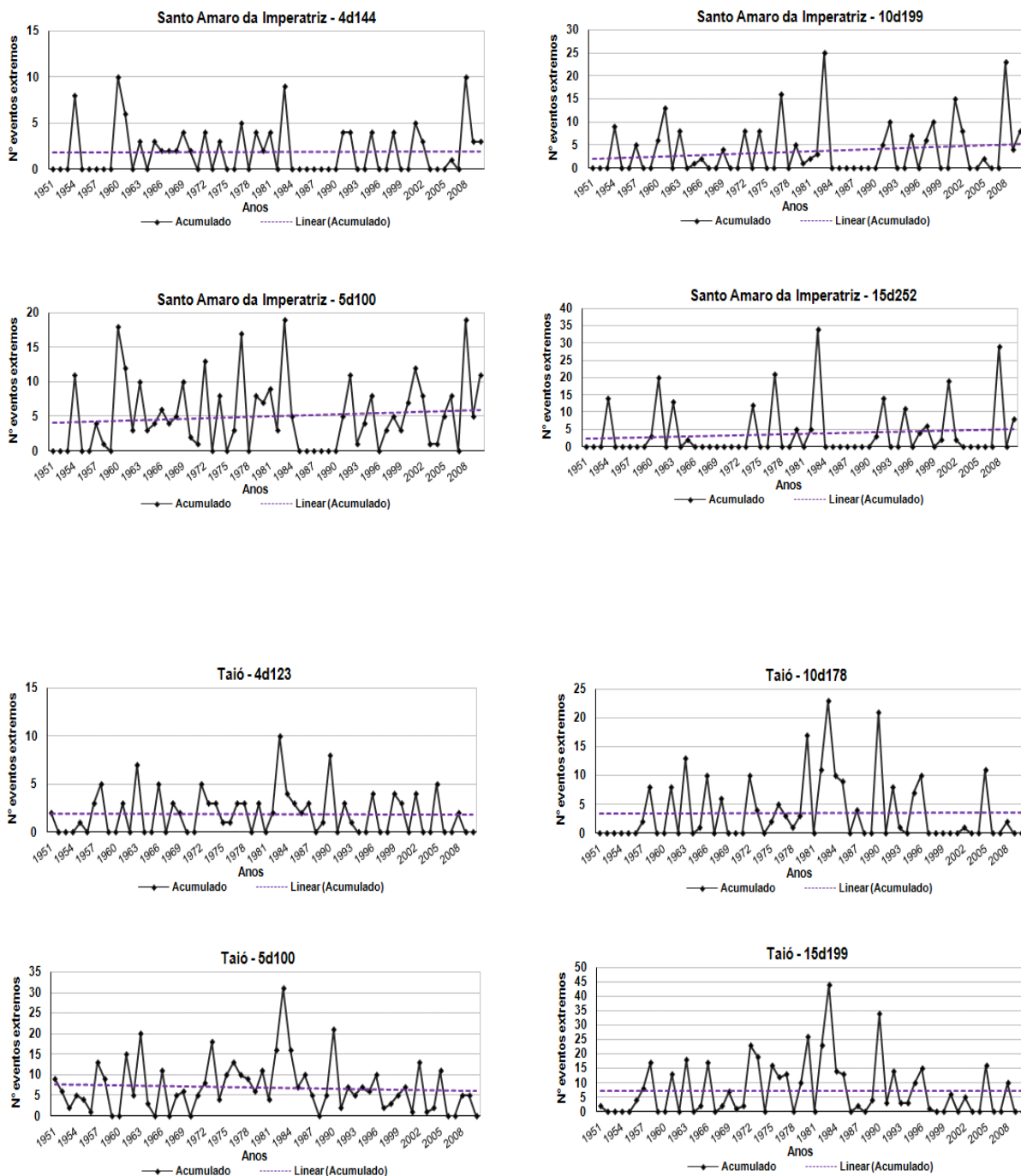
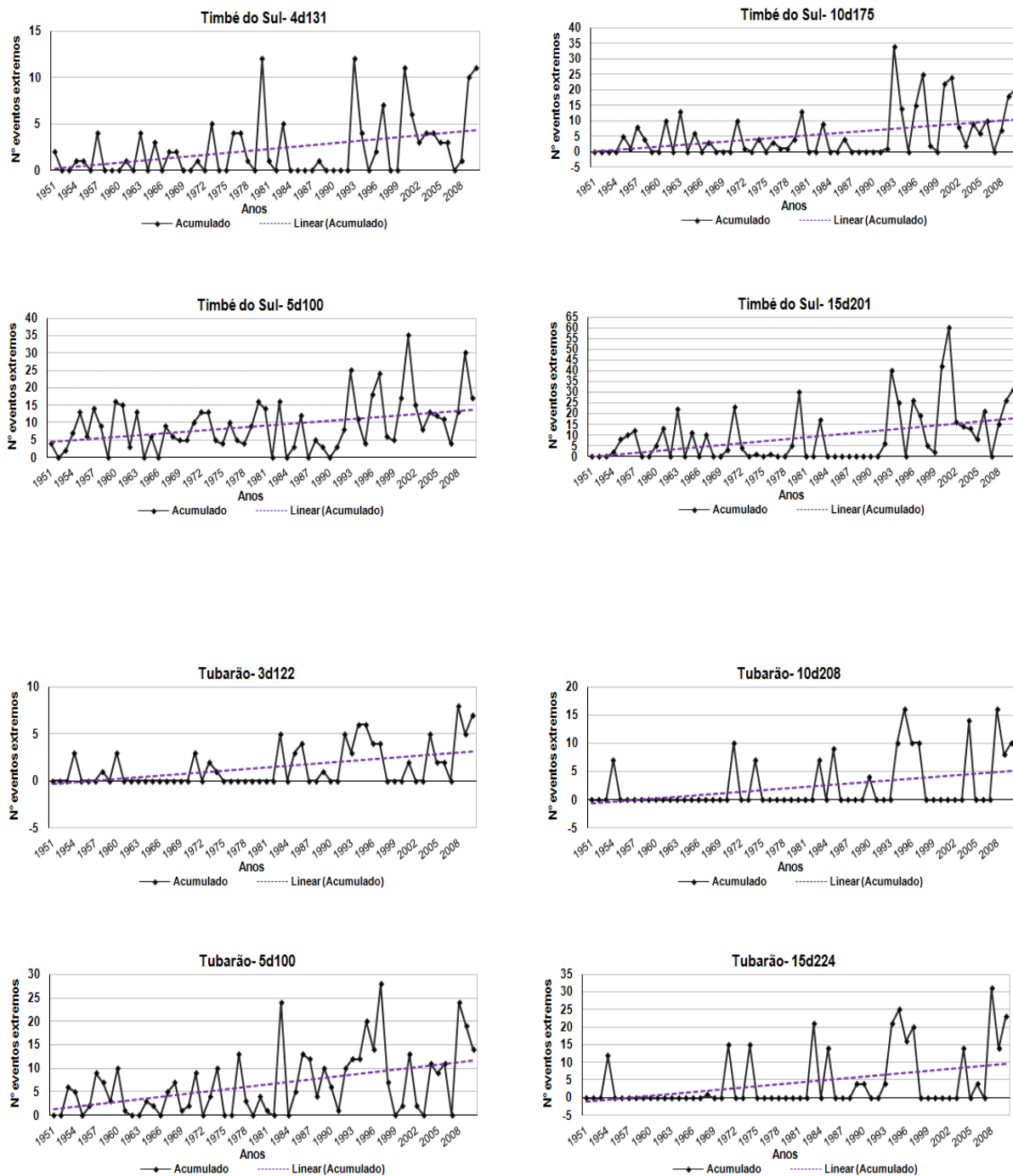
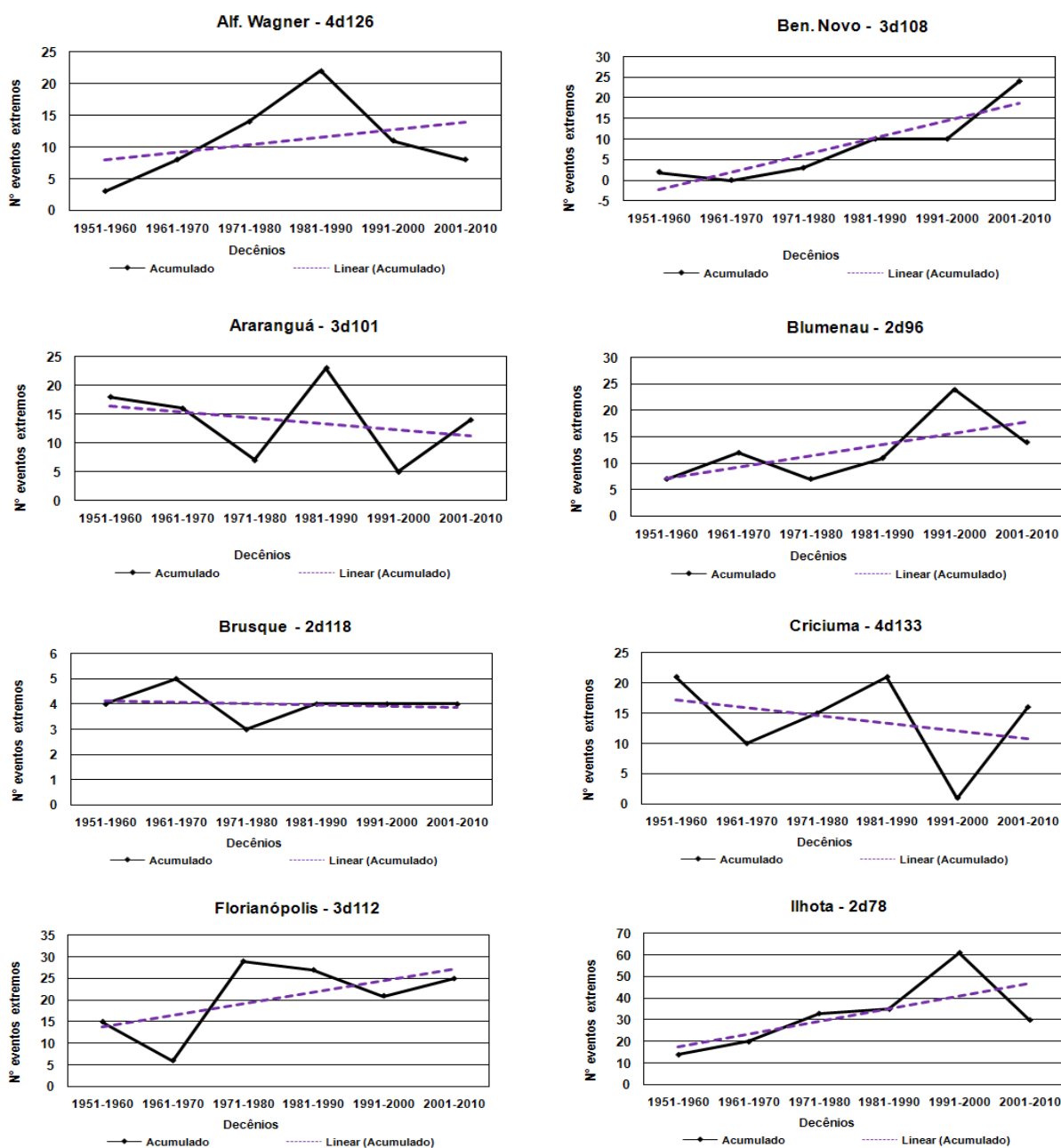


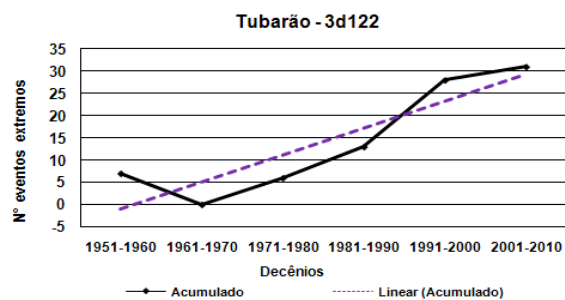
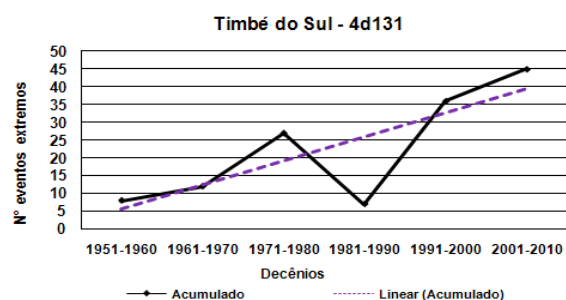
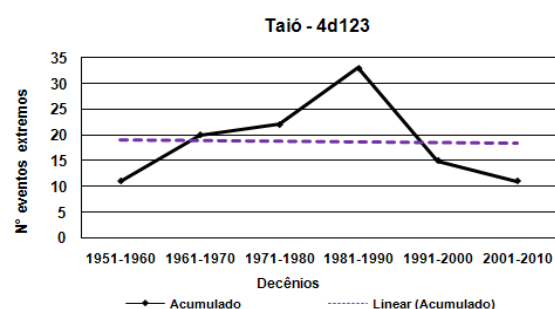
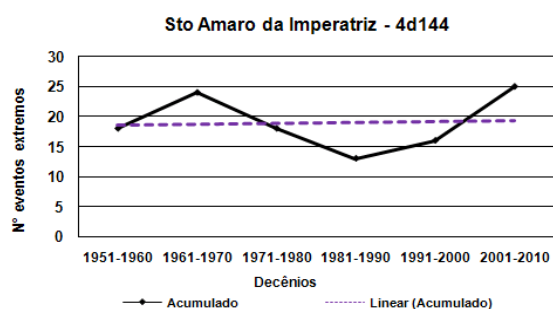
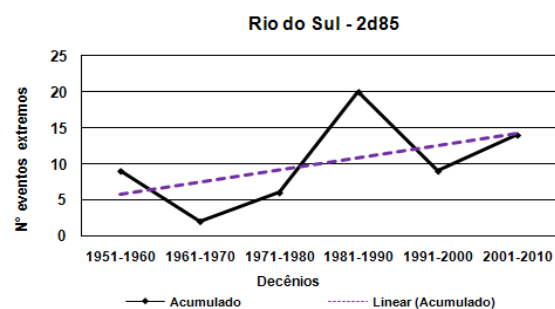
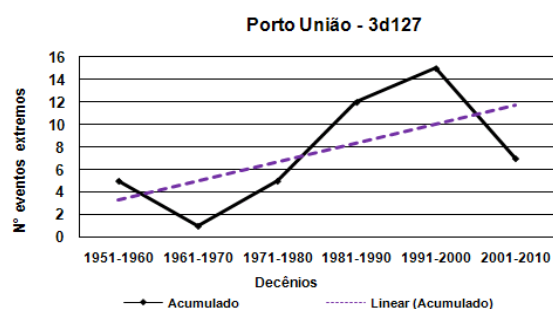
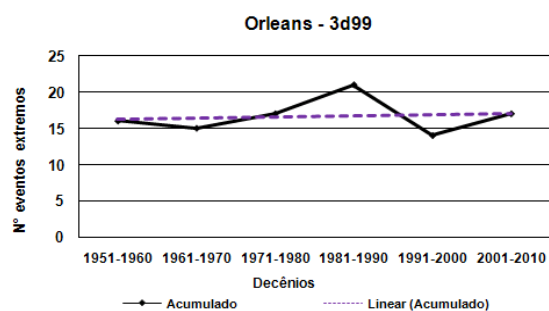
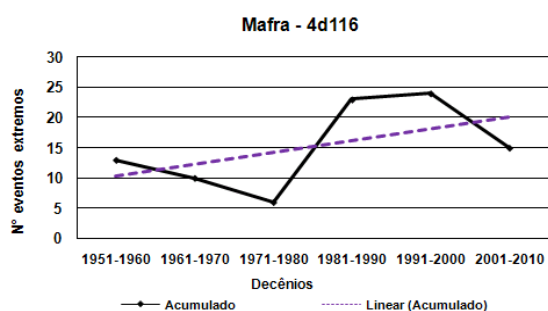
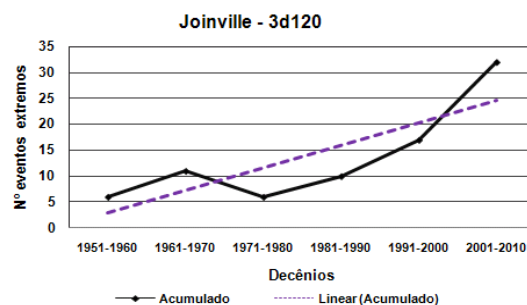
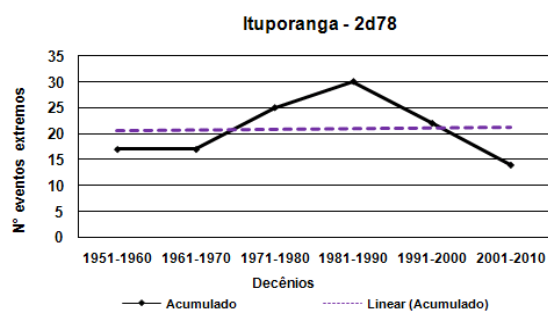
Fig. 27 - Ídem à Fig. 19, mas para as cidades de Timbé do Sul e Tubarão.



Apêndice B

Fig. 28 - Tendências do total acumulado (em decênios) de eventos extremos obtidos pelo 1º limiar nas cidades do Leste e Norte de Santa Catarina, para o período 1951 a 2010.





Anexo A

Resultados da simulação do modelo climático regional HadRM3P para o Brasil. As figuras abaixo representam a variação climática da precipitação média considerando os cenários B2 e A2, otimista e pessimista, respectivamente.

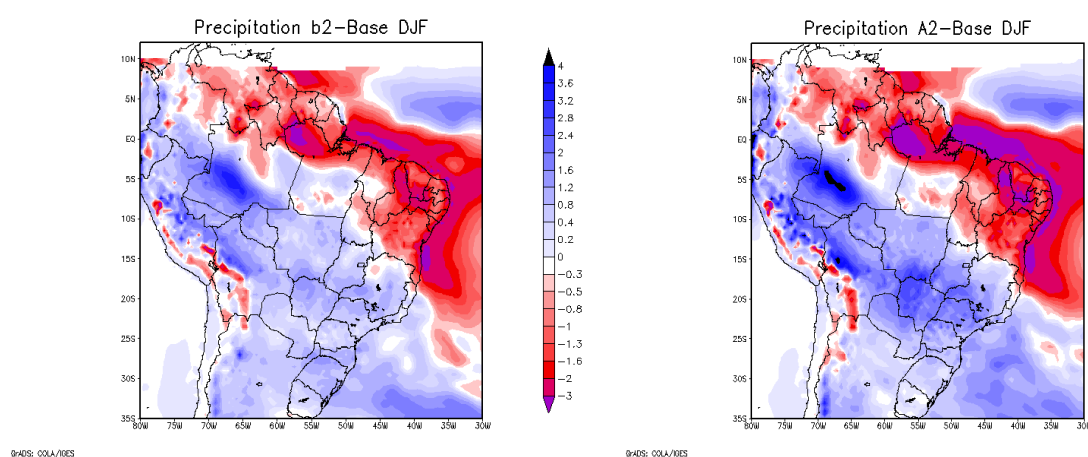


Fig. 29 - Diferença entre a precipitação média do cenário b2 e o baseline (esquerda) e entre o cenário a2 e o baseline (direita) para o verão. Os valores da barra de cores estão em mm dia^{-1} .

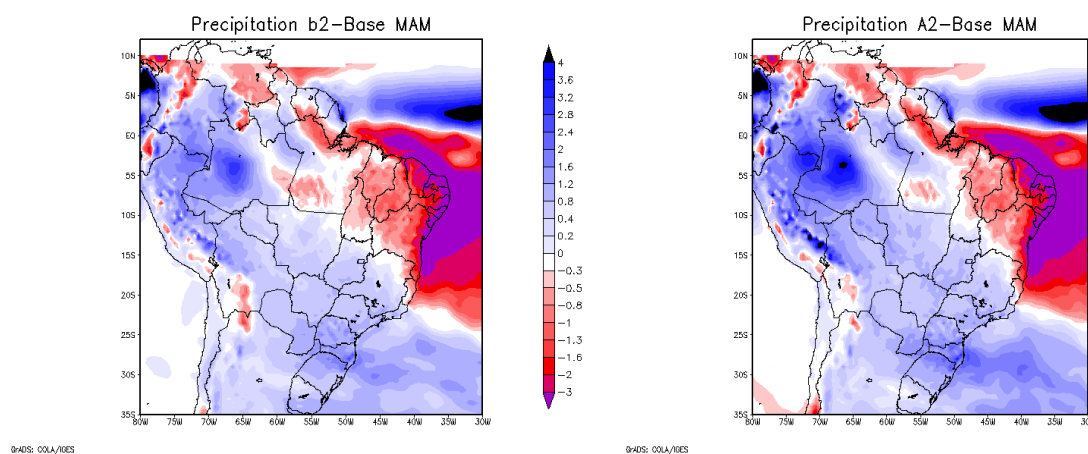


Fig. 30 - Idem a Fig. anterior, mas para o outono.

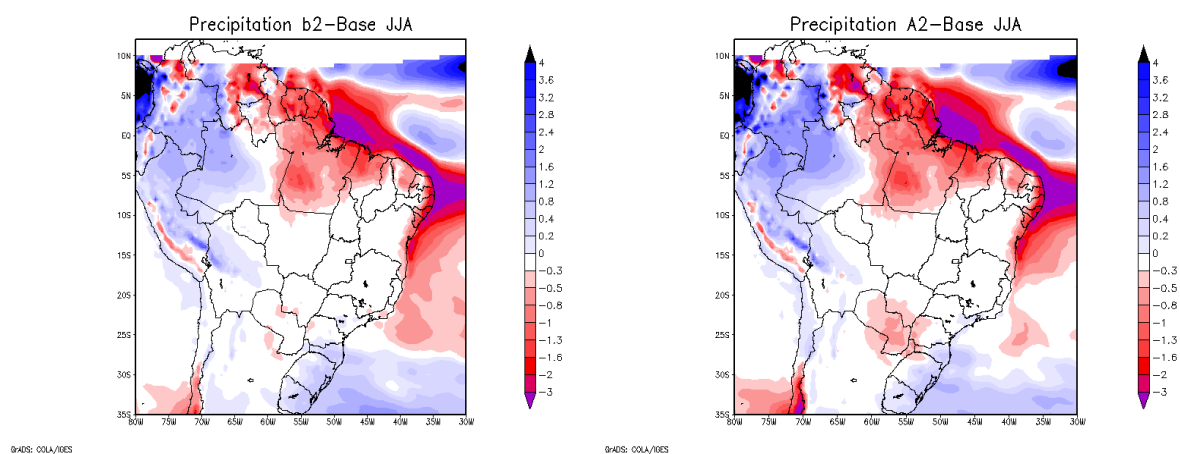


Fig. 31 - Idem a Fig. 29, mas para o inverno.

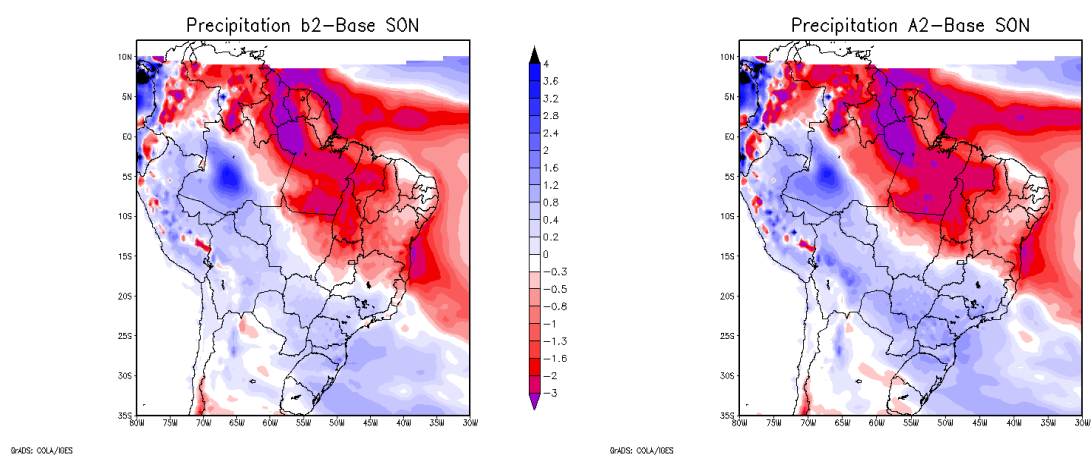


Fig. 32 - Idem a Fig. 29, mas para a primavera.