



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16631-PRP/255

**AS CHUVAS DE NOVEMBRO DE 2008 EM SANTA
CATARINA: UM ESTUDO DE CASO VISANDO A
MELHORIA DO MONITORAMENTO E DA PREVISÃO
DE EVENTOS EXTREMOS**

Maria Assunção Faus da Silva Dias

Publicação Interna - sua reprodução para o público externo está sujeita à
autorização da chefia

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.05.11.33>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos

Conteúdo

As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos.....	1
Editor Responsável.....	3
Colaboradores	3
Sumário Executivo.....	5
1. Introdução	7
2. Aspectos geomorfológicos regionais do Estado de Santa Catarina e sua relação com desastres naturais	11
Causas dos movimentos de massa e inundações.	11
Compartimentação geomorfológica do Estado de Santa Catarina observada por satélites. .	13
Probabilidade de novos eventos de desastres naturais.....	16
3. Detecção e mapeamento de áreas inundadas no Vale do Itajaí com imagens orbitais de radar	20
Objetivo.....	20
Fundamentação	20
Dados SAR utilizados	20
Abordagem metodológica.....	22
Resultados preliminares.....	23
4. A chuva observada: diagnóstico, previsibilidade e alertas	27
A chuva observada	27
A natureza das chuvas observadas	34
As causas da chuva observada	37
Aspectos hidrológicos	42

Previsibilidade	42
Os alertas e o impacto na mídia.....	45
5. Variabilidade Interanual e Interdecadal e Mudanças Climáticas.....	48
Condições atmosféricas e oceânicas de escala planetária associadas aos eventos de excessos pluviométricos ocorridos no vale do rio Itajaí-Açu, em Santa Catarina, em novembro de 2008	48
Relações das chuvas anormais com o fenômeno El Niño em escalas interanuais	50
Variabilidade climática em escalas interdecadais.....	51
Variabilidade de longo prazo e tendências de extremos de chuva no sul do Brasil e possível relação entre extremos climáticos e aquecimento global	54
Mudanças climáticas e projeções de extremos de precipitação	57
6. Como melhorar o monitoramento e a previsão de um evento extremo.....	60
Sistemas de observação	61
Previsão Numérica do Tempo	64
Referências.....	66

Editor Responsável

Maria Assunção F. Silva Dias

Colaboradores

INPE

Carlos Frederico de Angelis

Carlos Nobre

Edison Crepani

Gilberto Câmara

Guillermo Obregón

José Marengo

João Viane

Luiz Augusto Machado

Marcelo Seluchi

Maria Assunção Dias

Milton Kampel

Paulo Nobre

Teresa Gallotti Florenzano

Waldir Paradella

INMET

Antonio Divino Moura

Luiz Cavalcanti

EPAGRI

Maria Laura Rodrigues

Marilene de Lima

Murilo Flores

Sérgio Zampieri

Rosandro Minuzzi

Apoio: SBMET

Sumário Executivo

O evento de Santa Catarina proporcionou uma elevada quantidade de chuva, que devido à sua continuidade ocasionou enchentes e diversos deslizamentos sobre as encostas. Os dias que apresentaram a maior precipitação estão compreendidos entre 20 e 24 de novembro de 2008.

A região costeira do Estado de Santa Catarina, localizada entre o oceano e o Planalto da Serra Geral, está submetida a processos naturais de denudação que, dadas as condições climáticas, geológicas, geomorfológicas e de uso da terra se constitui em área com alto risco de ocorrência de desastres naturais na forma de inundações e corridas de massa.

A análise expedita das imagens SAR de Santa Catarina realça a importância de uso deste tipo de sensor orbital na detecção, mapeamento e monitoramento de áreas sujeitas ou afetadas por eventos de inundação. Pelas características deste tipo de informação (rapidez na obtenção das imagens devido à elevada resolução temporal e operacionalidade em condições atmosféricas adversas), seu uso deveria ser rotineiro em um sistema de gerenciamento vinculado às ações de detecção e de mitigação de inundações de ambientes deste tipo de riscos no país.

Não há registro de um novembro tão chuvoso nas regiões da Grande Florianópolis, Vale do Itajaí e Litoral Norte como observado em 2008, quando diversos recordes históricos foram quebrados. Em Blumenau e Joinville, os totais do mês ficaram em torno de 1000 mm (equivalente a 1.000 litros/m²), para uma média climatológica mensal de aproximadamente 150 mm. As chuvas acumuladas horárias observadas no Vale do Itajaí foram classificadas na maior parte do tempo como moderadas, porém com poucos períodos sem chuva.

A precipitação elevada observada no litoral de Santa Catarina no período analisado foi proveniente de nuvens quentes, o que é relativamente raro na região. Formou-se um sistema muito eficiente em gerar chuva sem haver nuvens com alto desenvolvimento vertical.

As chuvas intensas que se abateram sobre partes de Santa Catarina (SC), especialmente no vale do rio Itajaí-Açu, no período de 20 a 24 de novembro, foram causadas pelo estabelecimento de um bloqueio atmosférico no oceano Atlântico, acompanhado por um vórtice ciclônico em altitude (entre 4000 m e 5000 m), localizado entre o leste de Santa Catarina e o leste do Paraná, que favoreceu a ascensão do ar úmido ao longo da Serra do Mar. A combinação destes dois fatores favoreceu a intensificação das chuvas sobre Santa Catarina. A persistência da situação de bloqueio fez com que o fenômeno tenha sido ainda mais significativo, resultando nos grandes volumes de chuvas registrados ao longo deste período.

Os modelos numéricos previram a situação meteorológica e indicavam acúmulos de precipitação acima do normal com alguns dias de antecedência. Porém falharam em prever os valores extremos observados.

O evento extremo de Santa Catarina foi consequência de um padrão de longa duração que culminou com as precipitações intensas no final de novembro e que não pode ser facilmente enquadrado num modo de variabilidade climática conhecida. Especulativamente, supõe-se que as anomalias positivas de TSM observadas sobre o Atlântico Sudoeste durante grande parte do ano de 2008 possam estar relacionadas com o comportamento anômalo da pluviometria sobre o litoral de Santa Catarina durante o ano. No entanto, padrões globais de precipitação com anomalias significativas na Indonésia foram fundamentais para o estabelecimento do bloqueio observado em novembro.

Historicamente, a tendência observada de aumento no volume total de chuvas ao longo das últimas décadas, parece ser na forma de aumento nos extremos de chuva e não de chuvas distribuídas regularmente no tempo e espaço. Nota-se que dezenas de municípios gaúchos enfrentavam estiagem acentuada, simultaneamente à ocorrência de chuvas excessivas em Santa Catarina em novembro de 2008. Estes dados tomados em conjunto são característicos de aumento de extremos climáticos associados ao aquecimento global, ainda que a relativa curta duração das séries históricas não permita conclusões mais definitivas.

O aumento generalizado das chuvas no sudeste da América do Sul nos últimos 30 anos pode ser atribuído, em primeira instância, à influência remota da Oscilação Decadal do Pacífico, através da ocorrência de um número maior de eventos El Niño em relação a eventos La Niña. É fato que o aquecimento global vem ocorrendo simultaneamente e pode também estar associado à intensificação de eventos extremos de precipitação. No entanto, o caso presente foge a regra por estar associado a um evento de La Niña.

Avaliações do Quarto Relatório do IPCC e do Relatório de Clima do INPE têm mostrado que eventos extremos de precipitação podem tornar-se mais frequentes, podendo gerar enchentes e alagamentos mais severos e intensos num clima mais quente.

Eventos como os observados no fim de 2008 em vários estados do Brasil e, em particular, em Santa Catarina, demonstram que há significativa vulnerabilidade dos centros urbanos aos extremos de precipitação e indicam a urgência de melhoria da infraestrutura em geral, e em específico, uma necessidade de investimentos nos sistemas de observação e sua manutenção, no tratamento e disseminação da informação, e na constante atualização da infraestrutura e das pesquisas associadas ao desenvolvimento do software ajustado para a previsão numérica do tempo e do clima no Brasil.

1. Introdução

As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina demonstraram, mais uma vez, e de forma surpreendente, a vulnerabilidade da população a eventos extremos. Dia após dia, as chuvas provocaram inundações nos vales e encharcaram o solo das encostas, que deslizaram morro abaixo com consequências trágicas. As fotos ilustram apenas algumas dessas ocorrências. Esses desastres afetaram em torno de 60 cidades e mais de 1,5 milhões de pessoas, com 133 mortes, 22 desaparecidos e mais de 78.000 habitantes forçados a sair de suas casas.

Eventos como este motivam uma série de perguntas com relação à infraestrutura das cidades e das vias de transporte, à segurança pública em situações de emergência e ao fenômeno que causou a tragédia. Este documento analisa o último aspecto, o diagnóstico das causas e dos impactos das chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos.

O estudo foi dividido em capítulos enfocando os aspectos geomorfológicos da região, a detecção das áreas inundadas através de imagens orbitais com radar, o mapeamento da chuva observada e a sua previsibilidade e sua possível relação com variabilidade climática e com mudanças climáticas. No último capítulo, é feita uma análise de como seria possível melhorar a observação e a previsão de eventos extremos como este, que podem atingir não só esta, mas muitas regiões do Brasil.

Para preparação deste estudo participaram pesquisadores do INMET, do EPAGRI/CIRAM e do INPE, com o apoio da SBMET.



Balneário de Camboriú



Blumenau



Região costeira





Rodovias federais e estaduais interditadas

2. Aspectos geomorfológicos regionais do Estado de Santa Catarina e sua relação com desastres naturais

O texto a seguir procura contribuir para o entendimento dos processos naturais que causaram os desastres em Santa Catarina, destacando os aspectos geomorfológicos e a sua influência no clima regional e nesses processos.

Causas dos movimentos de massa e inundações

O principal elemento causador dos movimentos de massa e das inundações é a hidrometeorologia, que controla esses eventos diretamente através da precipitação pluviométrica.

As águas das precipitações atmosféricas sobre os continentes, nas regiões não geladas, podem seguir três caminhos: evaporação imediata, infiltração e escoamento. Os movimentos de massa e as inundações estão diretamente ligados ao destino das águas pluviais sobre os continentes.

A relação entre essas três possibilidades, assim como das respectivas intensidades quando ocorrem em conjunto, o que é mais frequente, depende de vários fatores tais como clima, relevo, cobertura vegetal, além da permeabilidade e porosidade do solo e do substrato rochoso. Em regiões de relevo muito acidentado (altas altitudes, grande extensão e declividade das encostas) como na Serra do Mar, a tendência maior é de escoamento imediato das águas para riachos e rios, o que causa as inundações.

A cobertura vegetal desempenha papel importantíssimo na diminuição do escoamento imediato das águas pluviais auxiliando o solo na tarefa de absorção pela infiltração lenta e eficiente. Em regiões semelhantes do ponto de vista morfológico (forma, altitude, declividade, etc.), litológico e pedológico as áreas com cobertura vegetal nativa infiltram até 40% e deixam escoar imediatamente até 20% das águas pluviais, enquanto as áreas cobertas por pastagens deixam escoar até 40% e infiltram até 20% das águas das precipitações atmosféricas.

Associados à intensa infiltração de água estão os deslizamentos do manto de decomposição das rochas em relevos inclinados, os chamados movimentos de massa. Com relação ao relevo, além da inclinação das vertentes (declividade das encostas, a sua extensão, orientação e forma) também exercem um papel importante nesses movimentos. A variável orientação indica o grau de exposição da encosta ao vento e à insolação, que influenciam a umidade e a

cobertura vegetal, afetando indiretamente a resistência ao cisalhamento. Quanto à forma das encostas, as seções côncavas, por serem zonas de convergência de sedimentos e de água (normalmente possuem lençol freático mais próximo da superfície) são as mais favoráveis para a ocorrência de deslizamentos. Variáveis morfométricas de interesse para análises de deslizamento podem ser geradas a partir de dados de satélites, como por exemplo, do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com o uso de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

No Brasil, devido às características geológicas e climáticas, o manto de decomposição pode atingir até várias dezenas de metros de espessura e, quando se localiza imediatamente sobre rochas frescas de permeabilidade mais baixa, como é o caso das rochas gnáissicas e graníticas da Serra do Mar, está sempre em movimento, seja ele de velocidade muito baixa, da ordem de centímetros por décadas, como no rastejamento, a velocidades muito altas, da ordem de metros por segundo, que ocorre na corrida de massa.

A corrida de massa é um movimento caracterizado pela presença de uma superfície impermeável dentro do solo ou no embasamento rochoso, responsável pela saturação em água do regolito, causando a movimentação dos detritos que cobrem toda a superfície da encosta. A supersaturação da massa encharcada causada por chuvas de intensidade elevada pode levá-la a, sob ação gravitacional, comportar-se como um fluido altamente viscoso e a deslocar-se rapidamente, com velocidades de metros por segundo, ao longo das linhas de drenagem na forma de corridas de massa.

O relevo pode determinar modificações profundas no clima local. Uma corrente de ar saturado de umidade vinda do oceano, obrigada a ascender por conta de uma barreira orográfica, como uma montanha, resfria-se devido à expansão que se dá graças à queda de pressão atmosférica, e esse resfriamento faz com que o ar condense e forme a nebulosidade que poderá dar origem a precipitações. Muitos desertos têm a sua origem relacionada a esse fenômeno por se localizarem atrás de cadeias montanhosas que barram a umidade vinda do mar. No Brasil, a Serra do Mar é um exemplo desse tipo de barreira, onde se localiza o município de Cubatão, SP, que apresenta os maiores índices pluviométricos do país, da ordem de até 5000 mm anuais e, entre outros, os de Santa Catarina recentemente afetados por esse fenômeno.

Compartimentação Geomorfológica do Estado de Santa Catarina observada por satélites

O Estado de Santa Catarina apresenta uma compartimentação geomorfológica bastante peculiar, e esta peculiaridade tem forte influência nos processos que levam aos eventos de desastres naturais relacionados a movimentos de massa e inundações.

De maneira simplificada, o Estado de Santa Catarina, quando observado em imagens obtidas por satélites, pode ser dividido em três compartimentos geomorfológicos, conforme pode ser visto na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Compartimentação geomorfológica do Estado de Santa Catarina. Imagem de fundo: combinação SRTM + Mosaico Landsat GeoCover 2000.

O primeiro compartimento é representado pelo Planalto da Serra Geral, denominação relacionada à Serra Geral do Planalto Meridional brasileiro e à Bacia Serra Geral, bacia sedimentar que compreende os arenitos eólicos da Formação Botucatu e os derrames basálticos da Formação Serra Geral, reunidos no Grupo São Bento.

A Formação Serra Geral consiste de derrames basálticos continentais que formam uma das grandes províncias ígneas do mundo e compreende sucessão de derrames com cerca de 1.500 m de espessura junto ao depocentro da bacia e recobre área de 1.200.000 km², abrangendo toda a região centro-sul do Brasil e estendendo-se ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina.

O segundo compartimento corresponde à Serra do Mar, grande sistema montanhoso que corre pela costa brasileira desde o Espírito Santo até o Sul de Santa Catarina, esculpido em rochas graníticas cristalinas da Província Mantiqueira.

O terceiro compartimento, aqui referido como baixada, diz respeito às planícies costeiras quaternárias, superfícies de relevo plano de origem flúvio-marinha, onde predominam os processos de acumulação de materiais. Corresponde às áreas litorâneas deprimidas em relação às elevações da Serra do Mar.

Esses três compartimentos geomorfológicos podem ser facilmente identificados por meio de um perfil altimétrico. A Figura 2.2a mostra a localização do perfil AB, enquanto a Figura 2.2b apresenta o perfil com os níveis altimétricos das três unidades geomorfológicas discriminadas.



Figura 2.2a - Localização do perfil altimétrico AB. Imagem de fundo: combinação SRTM + Mosaico Landsat GeoCover 2000.

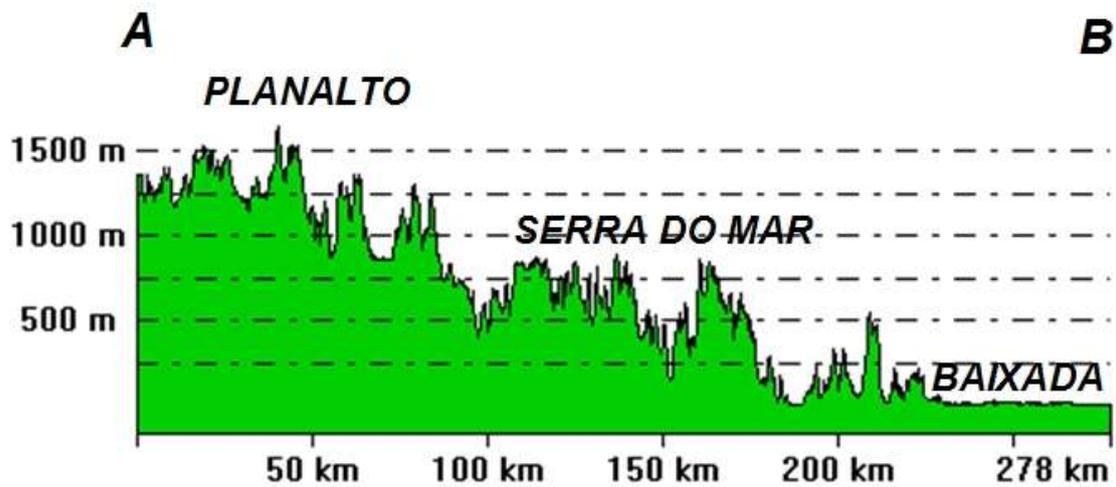


Figura 2.2b - Perfil altimétrico AB mostrando a caracterização altimétrica das unidades geomorfológicas (ver texto). Perfil altimétrico obtido de dados SRTM.

Neste perfil, o Planalto da Serra Geral se destaca com as maiores altitudes, entre 800 m até 1600 metros, enquanto a Serra do Mar apresenta altitudes máximas em torno de 750 metros. As baixadas têm as menores altitudes, inferiores a 10 metros em relação ao nível do mar.

Os municípios mais atingidos pelos últimos desastres em novembro de 2008, segundo a Defesa Civil de Santa Catarina, localizam-se no Vale do Itajaí. A Figura 2.3 mostra algumas das localidades que apresentaram o maior número (entre parênteses) de vítimas fatais - Ilhota (41), Blumenau (24), Gaspar (17), Luis Alves (10), Rodeio (4), Benedito Novo (2), Brusque (1), Pomerode (1), no Vale do Itajaí. As cores avermelhadas (magenta) correspondem às áreas mais ocupadas por atividades humanas, destacando-se as manchas urbanas. A distribuição destas localidades mostra que não há concentração dos eventos em determinados pontos de uma única unidade geomorfológica, mas que, obviamente, as inundações ocorreram nas planícies (baixadas) e as corridas de massa ocorreram nas encostas extensas, inclinadas e predominantemente côncavas da Serra do Mar.

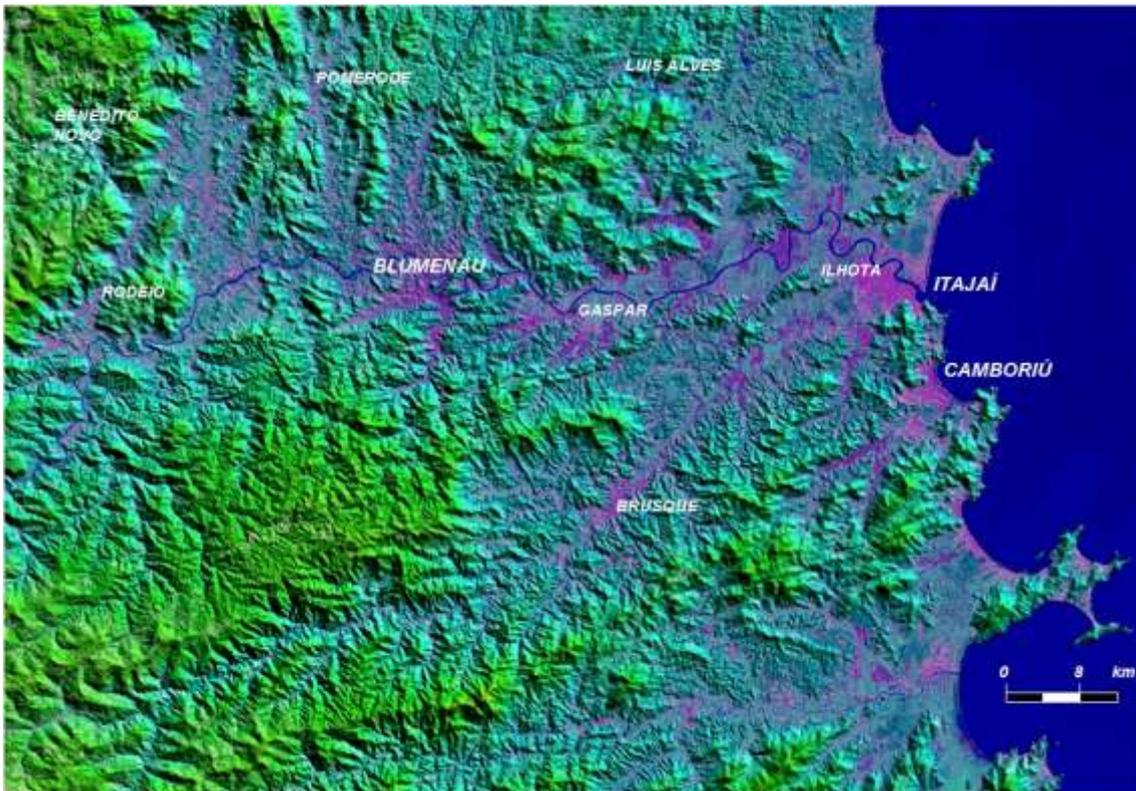


Figura 2.3 – Vale do Itajaí com localização de algumas das principais cidades atingidas pelo desastre de novembro de 2008. Cores avermelhadas correspondem às áreas com uso da terra. Imagem de fundo composta pela combinação SRTM e Mosaico Landsat GeoCover 2000.

Probabilidade de novos eventos de desastres naturais

A análise das variáveis envolvidas no processo dos desastres naturais indica que é grande a possibilidade da ocorrência de novos eventos na região costeira do Estado de Santa Catarina. A localização geográfica do estado, vizinha ao oceano, já o coloca em condições de receber grande quantidade de umidade através da brisa marítima. Aliado a isso, o próprio desenho da costa, sem golfos ou baías que limitem a ação das marés, favorece a ação de represamento do fluxo de água vindo do continente através dos rios, potencializando o nível das enchentes.

A compartimentação geomorfológica do território catarinense, que mostra em última análise a natureza da superfície continental que receberá a água proveniente da condensação do vapor d'água na forma de chuva e a encaminhará em direção ao oceano no interminável processo de denudação, também é favorável à ocorrência dos processos naturais que se constituem em eventos de desastres para as populações que habitam as áreas suscetíveis.

A escarpa do Planalto da Serra Geral, com seus mais de 1500 m de altitude e orientação paralela à costa se constitui em um verdadeiro paredão que dificulta a interiorização das nuvens e provoca a precipitação da chuva nas encostas da Serra do Mar. Aqui, a água em excesso infiltra-se muito depressa, encharcando o profundo manto de alteração das pouco permeáveis rochas cristalinas, provocando a corrida de massa nas áreas com cobertura vegetal alterada e acúmulo de material inconsolidado, ou escoo rapidamente em direção às baixadas, onde seu acúmulo, em planícies de sedimentação urbanizadas, se configura em inundações. A Figura 2.4a mostra a compartimentação geomorfológica da região de Criciúma, Tubarão e Laguna, representada em imagens orbitais, e a localização do perfil altimétrico CD. A Figura 2.4b apresenta o perfil com os níveis altimétricos da região obtidos a partir de dados SRTM. O efeito do paredão (escarpa do Planalto da Serra Geral) pode ser observado nessas imagens (Figura 2.4c). Nesta região, as rochas da Bacia do Paraná, contidas na depressão permo-carbonífera, que se encaixa entre a Serra do Mar, a leste, e o Planalto da Serra Geral, a oeste, apresentam as feições típicas de fluxo em drenagem obsequente das “frentes de cuevas”, passíveis de discriminação na imagem da Figura 2.4c.

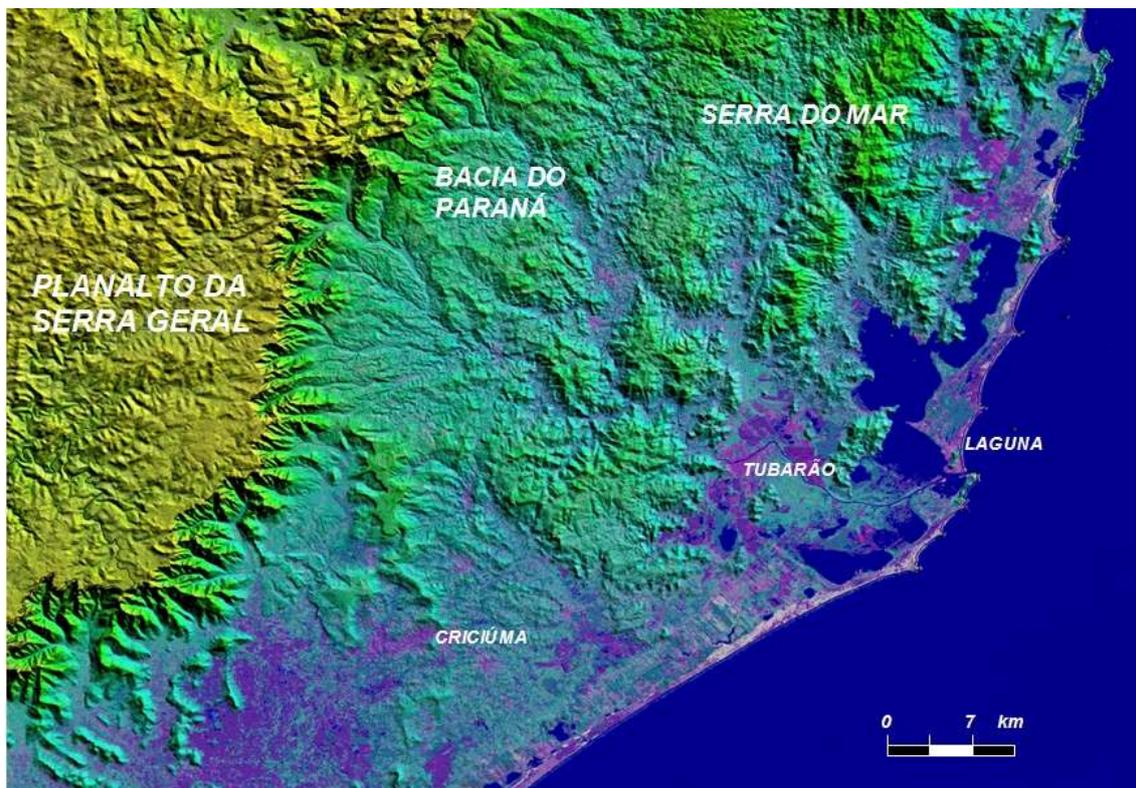


Figura 2.4a – Compartimentação geomorfológica da região de Criciúma, Tubarão e Laguna com a localização do perfil altimétrico CD (ver Figura 2.4b). Cores avermelhadas

correspondem às áreas com uso da terra. Imagem de fundo composta pela combinação SRTM e Mosaico Landsat GeoCover 2000.



Figura 2.4b - Perfil altimétrico CD (ver Figura 2.4a) mostrando a caracterização altimétrica das unidades geomorfológicas.

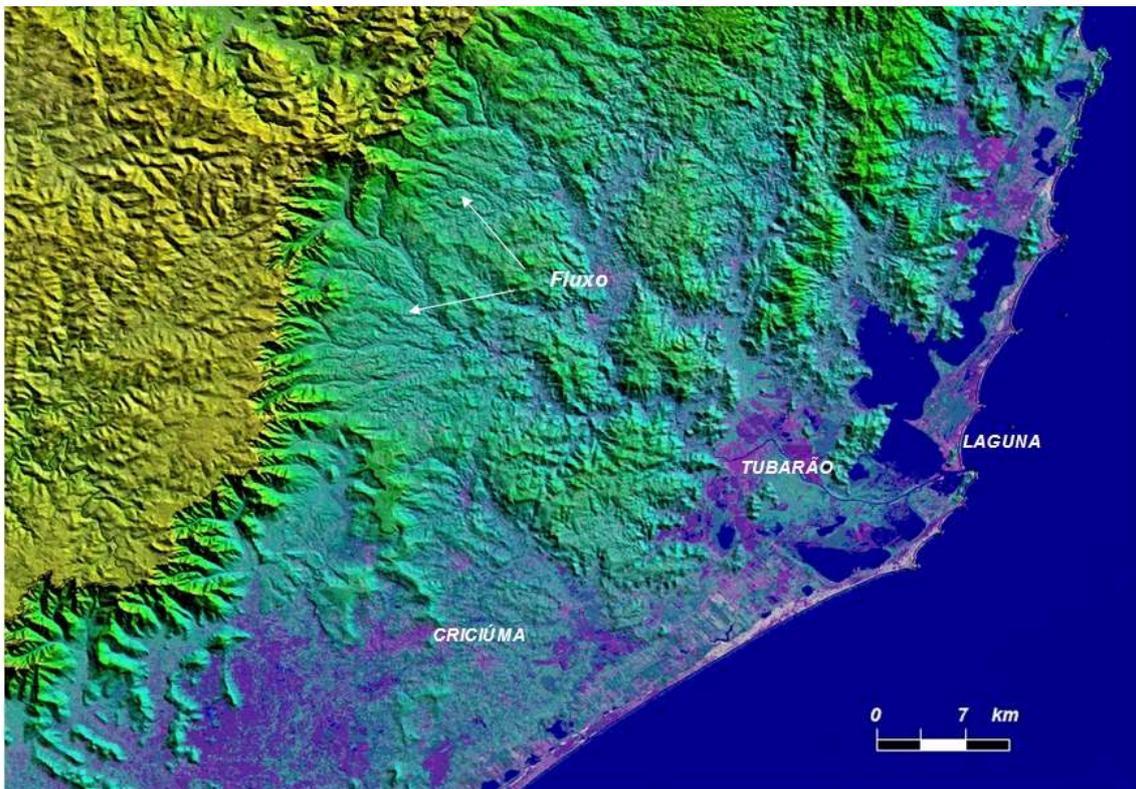


Figura 2.4c - Feições de fluxo (setas brancas) em drenagem obsequente na "frente de cuesta" do Planalto da Serra Geral (Bacia da Serra Geral). Cores avermelhadas correspondem

às áreas com uso da terra. Imagem de fundo composta pela combinação SRTM e Mosaico Landsat GeoCover 2000.

Em resumo, a região costeira do Estado de Santa Catarina, localizada entre o oceano Atlântico e o Planalto da Serra Geral, está submetida a processos naturais de denudação que, dadas as condições climáticas, geológicas, geomorfológicas e de uso da terra se constitui em área com alto risco de ocorrência de desastres naturais na forma de inundações e corridas de massa.

3. Detecção e mapeamento de áreas inundadas no Vale do Itajaí com imagens orbitais de radar

Objetivo

Neste capítulo estão mapeadas as áreas afetadas pela inundação de novembro de 2008 no baixo vale do rio Itajaí (Santa Catarina) através de imageamento multitemporal com dados SAR (Synthetic Aperture Radar) dos programas ALOS (sensor PALSAR, Japão), ENVISAT (sensor ASAR, Comunidade Européia) e TerraSAR-X (Alemanha).

Fundamentação

Distinto dos sensores que operam no espectro óptico e que dependem de fonte solar para imageamento, um SAR opera no espectro das micro-ondas e fornece informações geométricas e elétricas dos alvos. Sua capacidade de prover imagens com elevada resolução espacial, independente de condições atmosféricas (presença de chuvas, nuvens, etc.) e de iluminação solar (elevada resolução temporal com imageamentos diurnos e noturnos), torna-se estratégica para aplicações de desastres naturais, particularmente inundações. Isto ocorre porque a superfície inundada funciona como um refletor especular e resulta em um sinal de retroespalhamento muito baixo (níveis mais escuros nas imagens). Esta resposta contrasta com o retroespalhamento difuso da superfície mais rugosa do terreno emerso, com retroespalhamento muito mais elevado (níveis mais claros nas imagens). Estas diferenças de contrastes de respostas ligadas às variações de rugosidade superficial e de constante dielétrica dos alvos, permitem a detecção de áreas inundadas com grande precisão.

Dados SAR utilizados

Três conjuntos de imagens foram utilizados cobrindo o intervalo pré-inundação (PALSAR) e pós-inundação (ASAR e TerraSAR-X). As especificações das imagens SAR e a indicação das áreas de recobrimento são dadas na Tabela 3.1 e Figura 3.1.

Tabela 3.1 - Especificação dos dados PALSAR, ASAR e TerraSAR-X usados.

SATÉLITE/ SENSOR	IDENTIFICADOR	ÓRBITA	POLARIZ AÇÃO	ÂNGULO DE INCIDÊN CIA	DATA DE AQUISIÇÃO	HORÁRIO DE PASSAGEM (GMT)
ALOS/PALSAR	ALPSRP140766630	ASC.	HH+HV	38°	15/SET/2008	02:19:06
ALOS/PALSAR	ALPSRP140766640	ASC.	HH+HV	38°	15/SET/2008	02:19:14
ALOS/PALSAR	ALPSRP143246630	ASC.	HH+HV	38°	02/OUT/2008	02:21:35
ALOS/PALSAR	ALPSRP143246640	ASC.	HH+HV	38°	02/OUT/2008	02:21:43
ENVISAT/ASAR	ASA_IMP_1PNUPA	DESC.	HH	33,7°	27/NOV/2008	12:39:28
TERRASAR-X	TSX1_SAR_GEC_SE_SM	ASC.	HH	29,74°	01/DEZ/2008	21:41:49

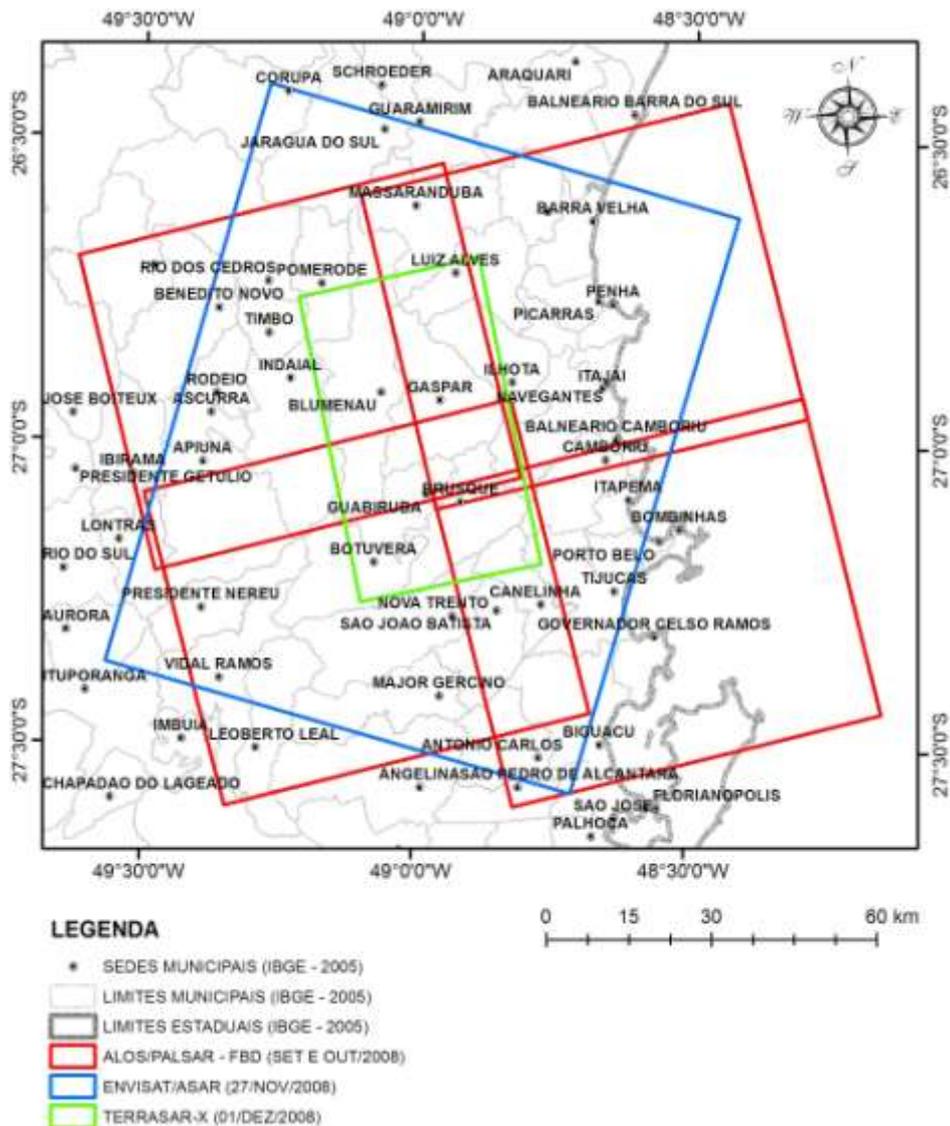


Figura 3.1 - Articulação das coberturas das imagens PALSAR, ASAR e TerraSAR-X usadas no trabalho.

Abordagem metodológica

As imagens foram corrigidas geometricamente (ortorretificação), radiometricamente (ruído speckle) e realçadas por ampliação linear de contraste para análise visual posterior. A ortorretificação foi realizada com uso de informações planimétricas (GCPs) contidas nos descritores (headers) originais das cenas PALSAR e ASAR e com altimetria extraída do DEM SRTM-3. A cena TerraSAR-X foi fornecida pela Infoterra com nível de processamento original já



Figura 3.3 - Composição colorida multipolarizada do radar PALSAR (L-HH em verde e azul, L-HV em vermelho) da região de Gaspar, de 02 de outubro de 2008 (Fonte: JAXA 2008).

As Figuras 3.4 e 3.5 correspondem à imagem do radar europeu ASAR (Vale do Itajaí e detalhe de Gaspar) adquirida em 27 de novembro de 2008, durante o ciclo de inundação. As manchas escuras nas imagens mostram a localização de áreas inundadas.

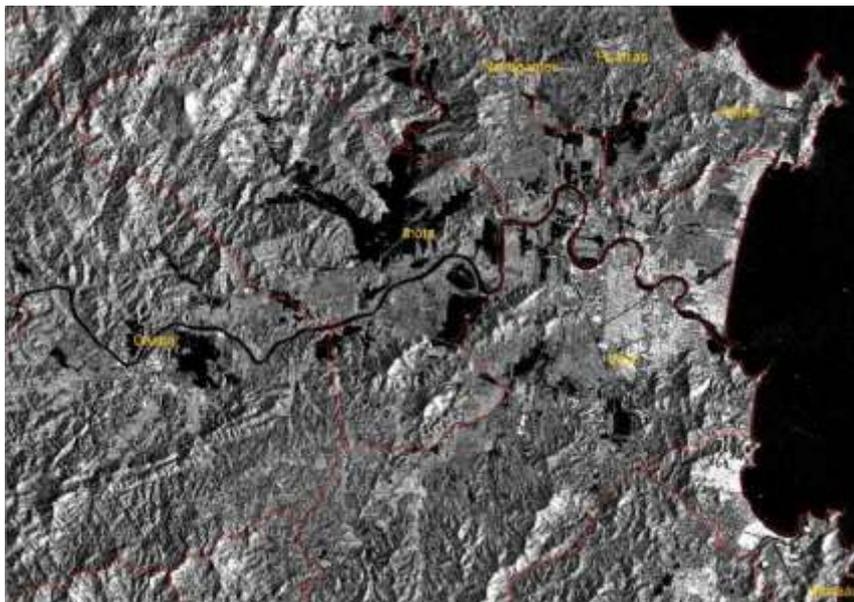


Figura 3.4 - Imagem ASAR (polarização C-HH) de 27/11/2008 do vale do rio Itajaí (fonte: ESA 2008).

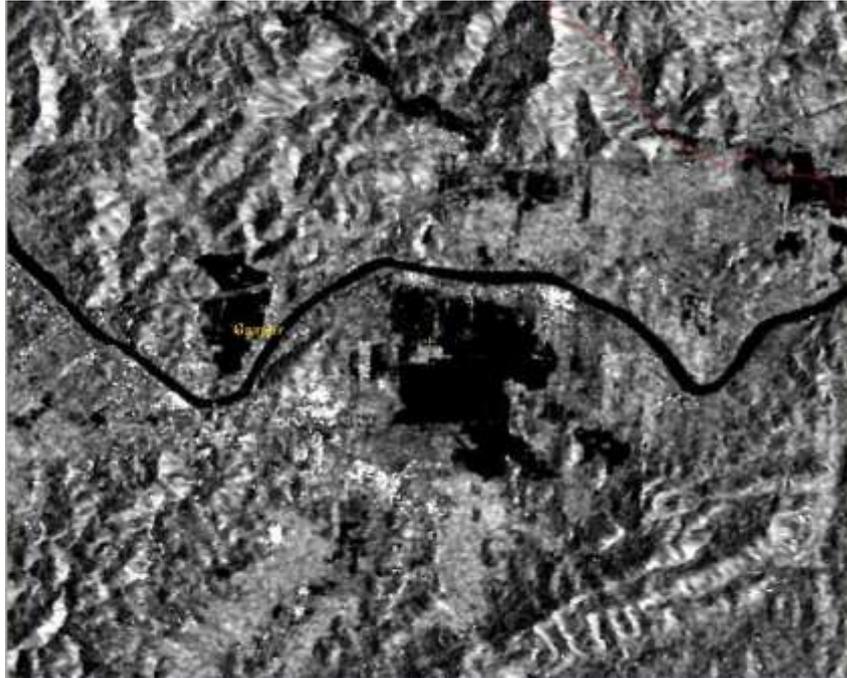


Figura 3.5 - Imagem ASAR (polarização C-HH) de 27/11/2008 da região de Gaspar (fonte: ESA 2008).

Finalmente, a Figura 3.6 representa uma imagem do radar alemão TerraSAR-X obtida em 01 de dezembro de 2008, logo após o pico das inundações. A imagem enfatiza a persistência das áreas alagadas na fase pós-evento, através da pequena diminuição das dimensões das áreas em preto.



Figura 3.6 - Imagem TerraSAR-X (polarização X-HH) de 01/dezembro/2008 de Gaspar (fonte: Infoterra 2008).

A análise expedita das imagens de radar de Santa Catarina realça a importância de uso deste tipo de sensor orbital, no auxílio à tomada de decisão (detecção, mapeamento e monitoramento) de ações de minimização dos efeitos de eventos de inundação e desastres naturais. Pelas características deste tipo de informação (rapidez na obtenção das imagens devido à elevada resolução temporal e operacionalidade em condições atmosféricas adversas), seu uso deveria ser rotineiro em um sistema de gerenciamento vinculado às ações de detecção e de mitigação de inundações de ambientes deste tipo de riscos no país.

4. A chuva observada: diagnóstico, previsibilidade e alertas

A chuva observada

O evento de Santa Catarina proporcionou uma elevada quantidade de chuva, que devido à sua continuidade ocasionou enchentes e diversos deslizamentos sobre as encostas. Os dias que apresentaram a maior precipitação estão compreendidos entre 20 e 24 de novembro de 2008. A Figura 4.1 mostra a distribuição espacial das precipitações diárias no Estado de Santa Catarina, proveniente da rede pluviométrica do INMET, do EPAGRI/CIRAM e das estações que utilizam o SCD (Sistema de Coleta de Dados) do INPE. As cidades que apresentaram os maiores totais foram aquelas localizadas próximo ao litoral Norte, principalmente no Vale do Itajaí. Nos dias 21 e 22, a precipitação acumulada alcançou o valor de 100 mm, no dia seguinte 150 mm e nos dias 22 e 23 os registros mostram a ocorrência de até 300 mm no Vale do Itajaí; no dia 24 a intensidade decresceu, mas chegou a acumular 150 mm.

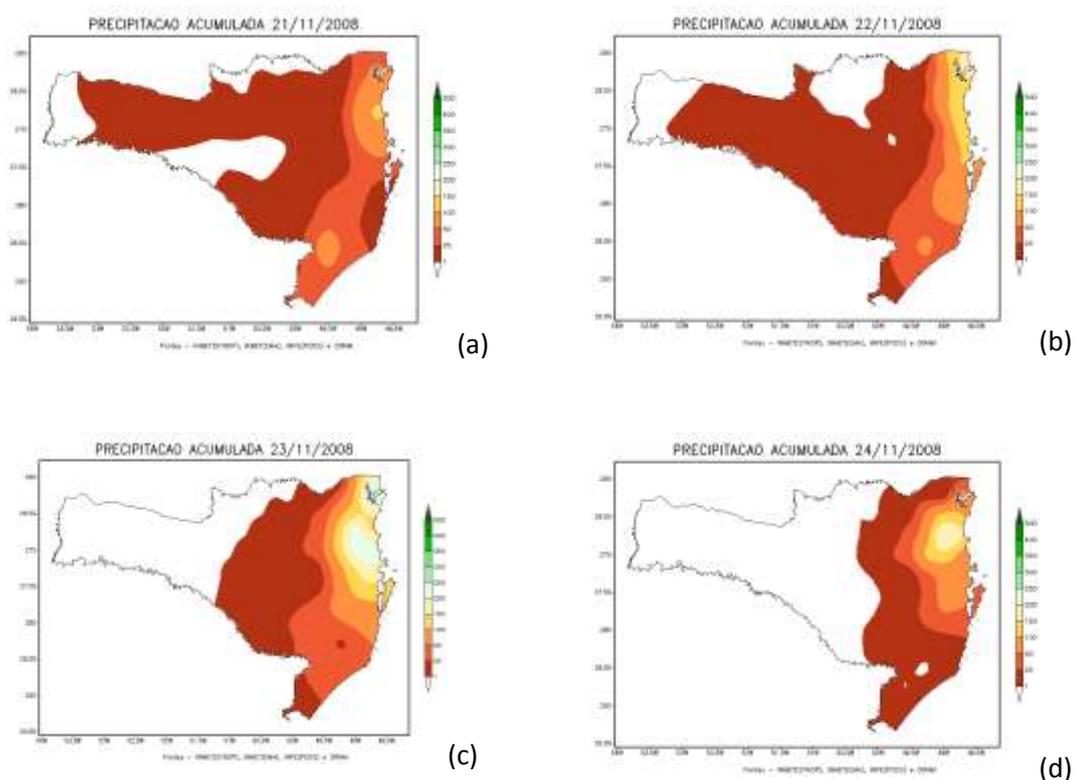


Figura 4.1 - Precipitação observada (mm) para o período de análise sobre a região de Santa Catarina: (a) dia 20-21, (b) 21-22, (c) 22-23 e (d) 23-24 de novembro de 2008. Dados de INMET, CIRAM e INPE.

Não há registro de um novembro tão chuvoso nas regiões da Grande Florianópolis, Vale do Itajaí e Litoral Norte, como observado em 2008, quando diversos recordes históricos foram quebrados. Em Blumenau e Joinville, os totais do mês ficaram em torno de 1000 mm (equivalente a 1000 litros/m²), para uma média climatológica mensal de aproximadamente 150 mm.

As informações destacadas na Figura 4.2 mostram os totais acumulados em novembro em alguns municípios da Grande Florianópolis, Vale do Itajaí e Litoral Norte, comparados com os maiores registros obtidos em anos anteriores para o referido mês, com seus respectivos valores e ano de ocorrência. Como exemplo, a estação meteorológica da Epagri/FURB, localizada em Blumenau, registrou do dia 1º até o dia 30 de novembro de 2008, um total de 1002 mm, sendo que o recorde anterior obtido nesta estação era de 167,2 mm, e pela estação da Agência Nacional de Águas (ANA) era de 281,8 mm, registrados em 2006 e 1961, respectivamente.

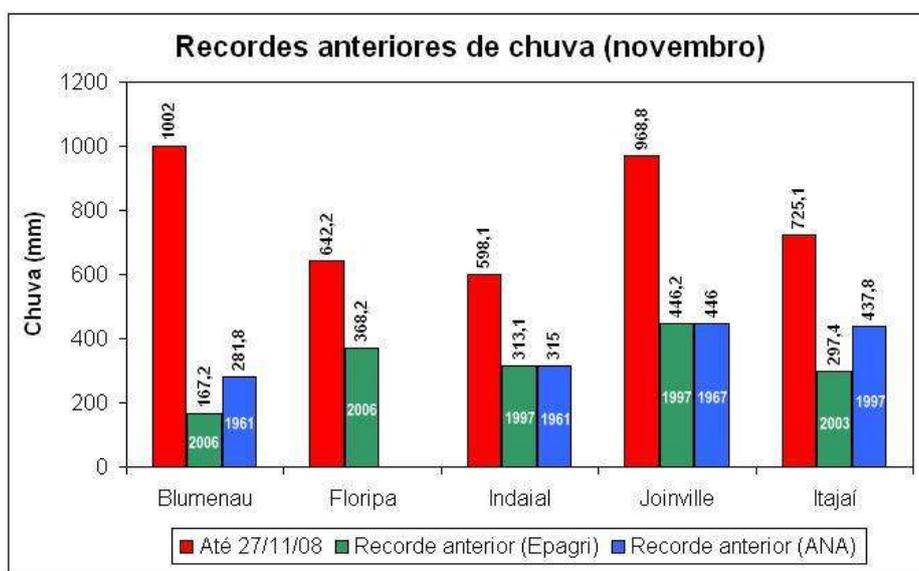


Figura 4.2 - Recordes de novembro e respectivos anos de ocorrência (estações da Epagri e ANA - Agência Nacional de Águas).

A Figura 4.3 apresenta os valores diários máximos registrados em novembro de 2008 (todos obtidos entre os dias 22 e 23) em alguns municípios da Grande Florianópolis, Vale do Itajaí e Litoral Norte, comparados com os maiores registros (recordes) obtidos em anos anteriores para novembro, com seus respectivos valores e data de ocorrência. Como exemplo, a estação da Epagri/FURB, localizada em Blumenau, registrou no referido mês 283,1 mm em apenas 24

horas, sendo que, o recorde anterior obtido pela estação da Epagri/FURB era de 74,9 mm e pela estação da Agência Nacional de Águas (ANA) era de 110,9 mm, registrados no dia 3 de novembro de 2007 e 1º de novembro de 1961, respectivamente.

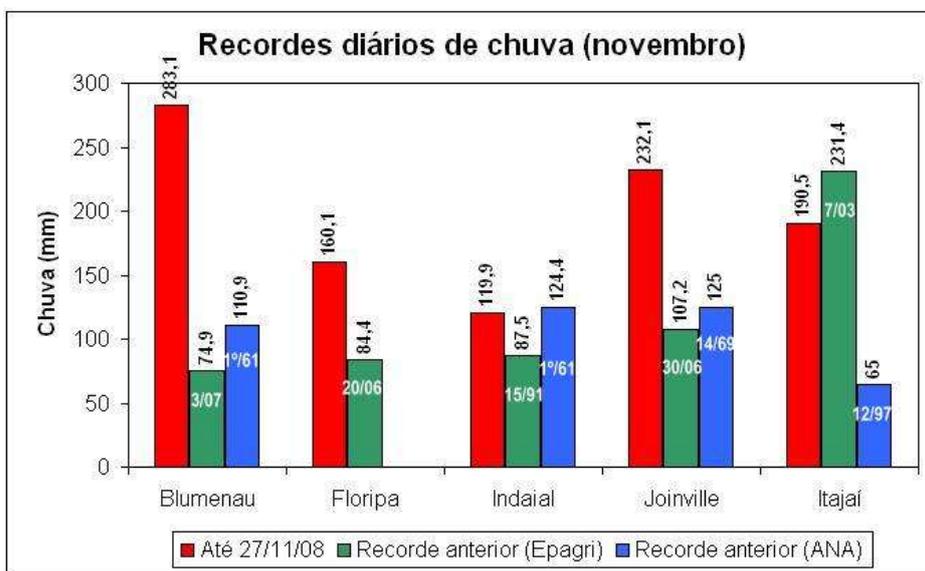


Figura 4.3 - Recordes diários de novembro e respectivas datas de ocorrência - dia/ano - (estações Epagri e ANA).

Quando incluídos outros meses na análise, os totais acumulados de chuva de novembro de 2008 persistem como os de maior registro histórico, inclusive, na comparação com o marcante evento ocorrido em julho de 1983, conforme apresentado na Figura 4.4. Como exemplo, Joinville detinha o recorde de 831,9 mm, obtido em fevereiro de 1995, sendo superado pelos 968,8 mm registrados em novembro último. Em Blumenau, os 1002 mm registrados em novembro de 2008 superaram os recordes de mais de 500 mm registrados em janeiro de 1989 e julho de 1983.

Análise semelhante é apresentada na Figura 4.5, da comparação dos maiores registros diários obtidos em novembro de 2008 (todos obtidos entre os dias 22 e 23), com o evento de julho de 1983 e durante qualquer outro período. Como exemplo, os 283,1 mm registrados em novembro de 2008, em Blumenau, superaram o recorde anterior de 190,4 mm observados no dia 1º de fevereiro de 1970. Dentre os municípios analisados, apenas os registros de Florianópolis e Joinville, observados em novembro último, não superaram os respectivos recordes anteriores, datados em 11 de março de 1978 e 26 de setembro de 1995, respectivamente.

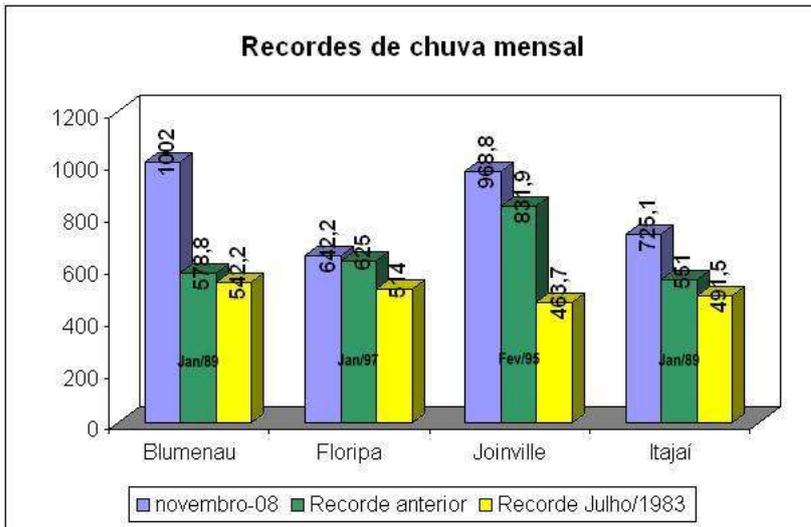


Figura 4.4 - Recordes de novembro de 2008, comparados com julho/1983 e outros meses.

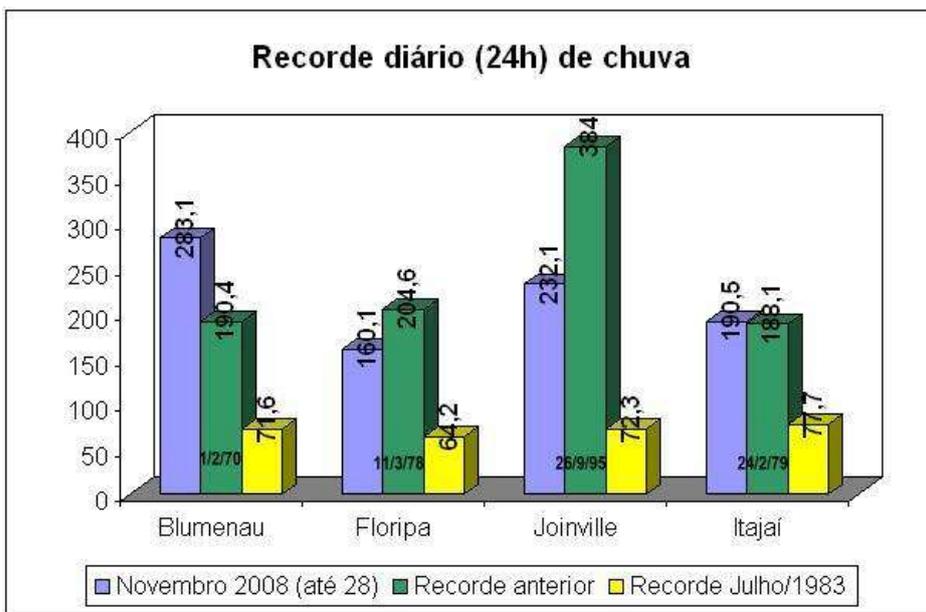


Figura 4.5 - Recordes diários de novembro de 2008, comparados com julho/1983 e outros meses.

Uma outra forma de monitoramento da precipitação é o radar meteorológico. Santa Catarina está coberta por um radar meteorológico banda S pertencente ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que se encontra instalado no Morro da Igreja. O Morro da Igreja é uma elevação situada na Região Sul do Brasil, no sudeste do Estado de Santa Catarina, na Serra Geral, no município de Urubici. Seu pico, onde está localizado o radar, está situado a 1.822

metros de altitude. O radar monitora uma área de aproximadamente 200 km de raio e tem rotina de monitoramento em diferentes inclinações do feixe. Assim, as chuvas abaixo da altitude de 1822 metros não são monitoradas. Por outro lado como a maioria das nuvens de chuva tem altura superior a 3000 metros, há uma estimativa razoável através desse radar.

A Figura 4.6a mostra o acumulado das precipitações observadas para o período de análise pela rede de pluviômetros, onde nota-se um grande núcleo sobre toda a região do Vale do Itajaí, com um total pluviométrico que chegou a 600 mm durante os quatro dias. A Figura 4.6b apresenta o acumulado da precipitação (mm) no nível de 3 km para o mesmo período obtido pelo radar meteorológico do Morro da Igreja. Como iremos mostrar, essa precipitação foi proveniente de nuvens quentes (sem a formação de gelo característico das nuvens de tempestades) e, portanto, nesse nível espera-se uma menor quantidade de chuva do que na superfície. Se o valor absoluto não reflete completamente a precipitação observada na superfície, o campo de radar mostra com maior detalhe a distribuição espacial do campo de chuva. Observa-se claramente que a precipitação se concentrou próximo à costa, na região do Vale do Itajaí, entre a serra e o litoral.

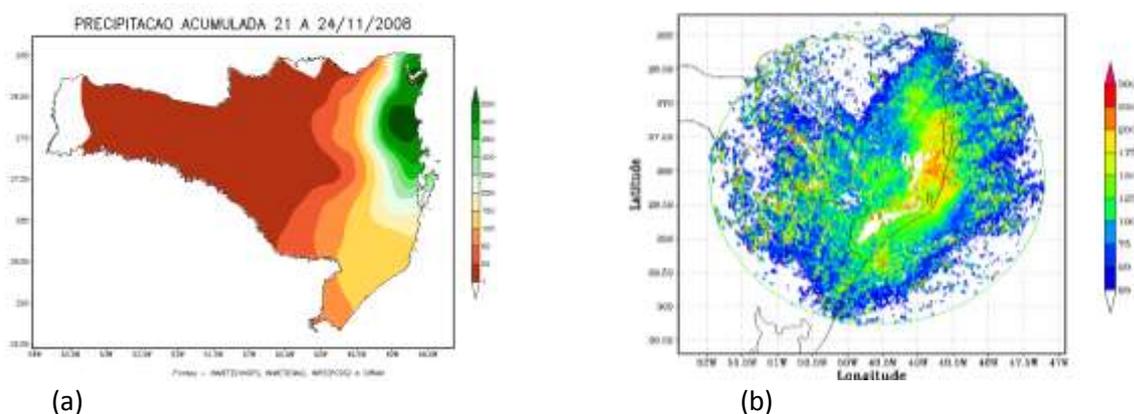


Figura 4.6 - Acumulados de precipitação em mm: (a) observada por estações de superfície (dados do INMET, CIRAM e INPE) e (b) estimada pelo radar (DECEA, Morro da Igreja) para o período de 20 a 24 de novembro de 2008.

A evolução horária das chuvas em Santa Catarina foi observada pela rede de estações automáticas do INMET. Dentre as estações existentes, a Figura 4.7 destaca a evolução horária em Itapoá e em Indaial, durante o período de 20 a 24 de novembro.

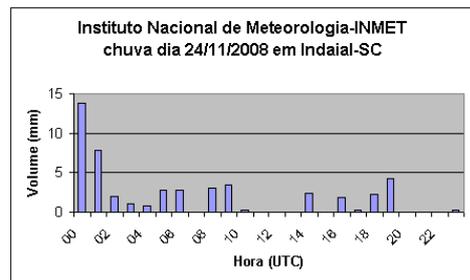
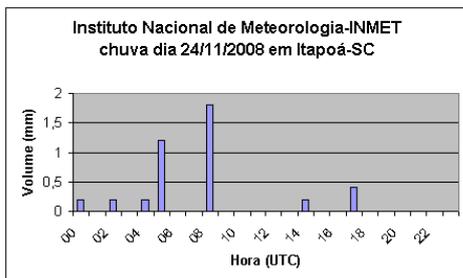
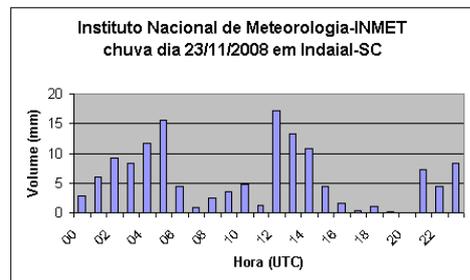
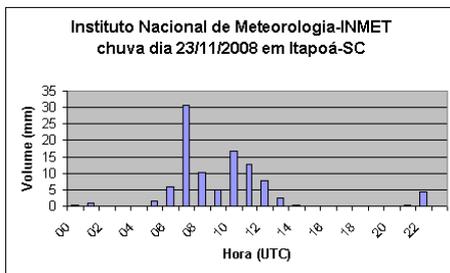
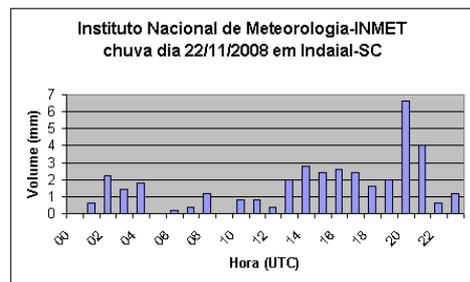
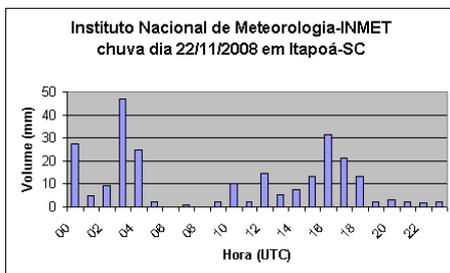
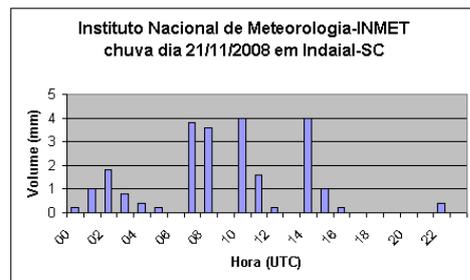
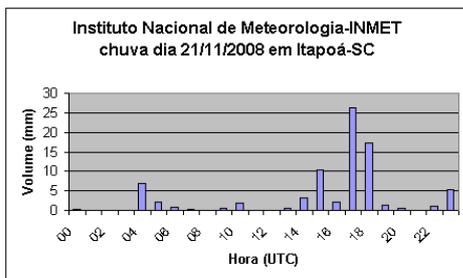
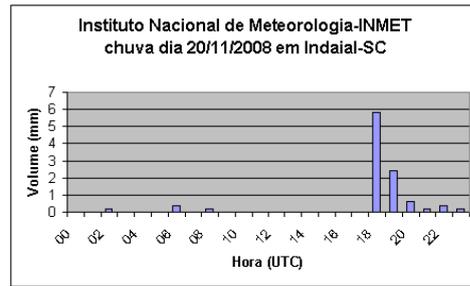
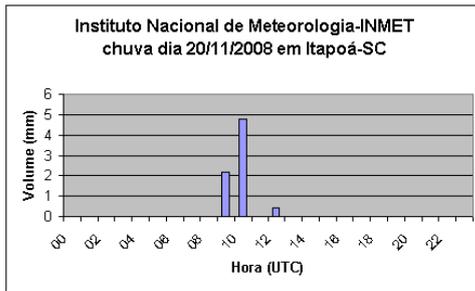


Figura 4.7 - Evolução horária da precipitação para duas estações automáticas do INMET, em Santa Catarina, para o período de 20 a 24 de novembro de 2008. O horário é UTC (horário de verão no Brasil é UTC – 2 horas).

Pode-se notar que em Itapoá, localizada na costa, ao norte de Itajaí, no dia 21 já ocorreram acumulados horários superiores aos 15 mm, porém no dia 22 e 23 houve vários acumulados horários superiores a 30 mm. Por outro lado, em Indaial, localizada a oeste de Blumenau no Vale do Itajaí, os valores horários passam dos 15 mm a partir do dia 23, notando-se também que nessa estação a chuva é praticamente contínua nos dias 22, 23 até a manhã do dia 24. A maior parte da chuva em Indaial se concentrou na madrugada e manhã do dia 23, com alguns períodos de chuva mais fraca seguidos de períodos de chuva moderada e chuva forte.

Os totais de chuva horária podem ser classificados, de um modo geral, em:

Chuva fraca (entre 0,25 mm/hora e 1,0 mm/hora)

Chuva moderada (entre 1 e 4 mm/hora)

Chuva forte (entre 4 e 16 mm/hora)

Chuva muito forte (entre 16 e 50 mm/hora)

Chuva extrema (mais de 50 mm/hora)

Com essa classificação a Tabela 4.1 mostra, para cada dia do período de 20 a 24 de novembro, e para as duas estações da Figura 4.7, o número de horas em que a chuva foi classificada em cada categoria, assim como a porcentagem do tempo em que a categoria foi observada.

Nota-se desta forma resumida que em Indaial, no Vale do Itajaí, a chuva esteve entre moderada e forte, 55,0% do tempo e sem chuva, 29,2% do tempo. Chuva forte ou muito forte ocorreu 15,6% do tempo. Para Itapoá, na costa, a chuva fraca e moderada ocorreu 28,4% do tempo, houve 47,5% do tempo sem chuva e a chuva forte ou muito forte ocorreu 24,2% do tempo. O que distingue a chuva em Indaial é, portanto, não necessariamente a chuva mais intensa, mas a grande porcentagem do tempo em que choveu. Os eventos de chuva horária mais forte ocorreram na costa.

Tabela 4.1. Número de horas em que a chuva horária foi classificada em categorias e porcentagem do tempo em que a categoria foi observada durante o período de 20 a 24 de novembro, para as estações do INMET de Indaial e Itapoá.

Indaial						
	sem chuva	fraca	moderada	forte	muito forte	extrema
20	15	7	1	1		
21	9	9	6			
22	3	7	13	1		
23	1	4	5	13	1	
24	7	5	9	3		
%	29,2	26,7	28,3	15,0	0,8	
Itapoá						
	sem chuva	fraca	moderada	forte	muito forte	extrema
20	21	1	1	1		
21	7	6	4	5	2	
22	2	1	8	8	5	
23	10	4	2	6	2	
24	17	5	2			
%	47,5	14,2	14,2	16,7	7,5	

A natureza das chuvas observadas

A Figura 4.8 apresenta os CAPPis (*Constant Altitude Plan Position*) de refletividade (dBZ) a 3 e 5 km de altitude, para a madrugada do dia 23, num horário em que as chuvas estavam concentradas basicamente sobre a região do Vale do Itajaí. Observa-se que picos de refletividade de até 55 dBZ em 3km, porém em 5 km de altura a precipitação ainda pode ser observada, entretanto com intensidade bem menor, o que caracteriza uma estrutura vertical de nuvens quentes – sem gelo - com fraco desenvolvimento vertical. Em tempestades severas, normalmente as nuvens apresentam topos em torno de 15 km, com forte atividade elétrica (raios) e o conteúdo de gelo é crescente a partir dos 4-5 km de altura com um máximo ao redor de 7-9 km de altura. Contudo, esse evento foi caracterizado por nuvens estratiformes com fraco desenvolvimento vertical, mas muito eficientes em transformar em precipitação o vapor d'água que convergia do oceano Atlântico para a serra.

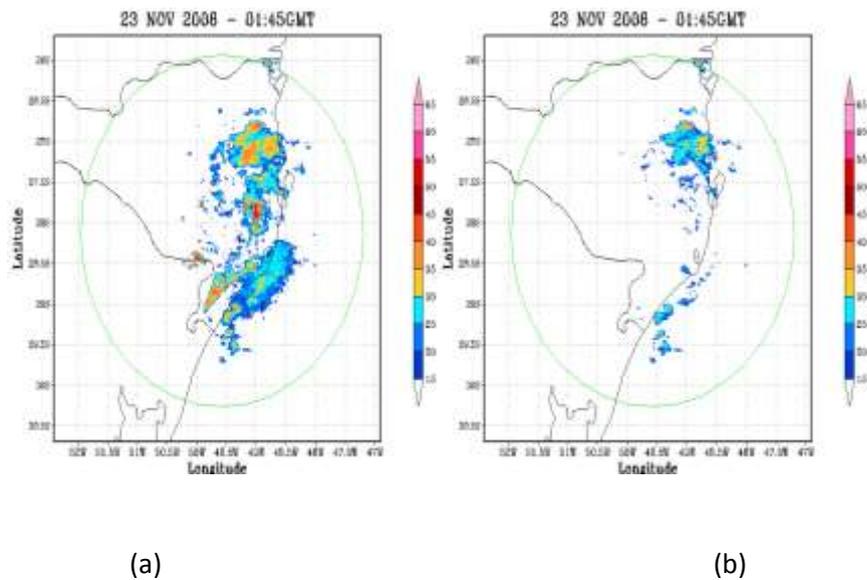
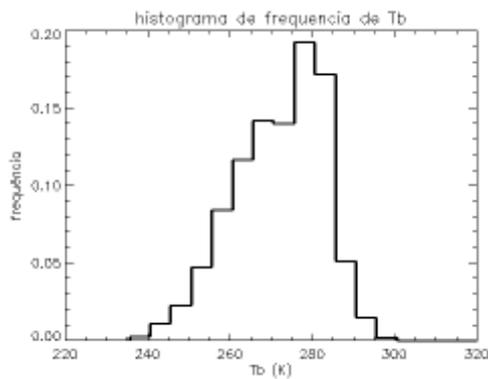


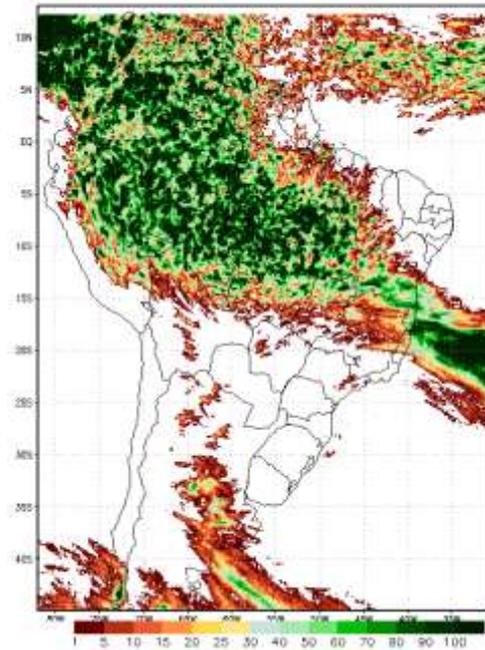
Figura 4.8 - Refletividade (dBz) medida pelo radar do Morro da Igreja para: (a) 3 km e (b) 5 km para o dia 23 de novembro a 01:45 UTC.

As temperaturas de brilho (T_b) observadas pelo satélite GOES-10 sobre Santa Catarina ficaram acima de 235 K, como pode ser observado no histograma de frequência relativa da Figura 4.9a, sendo que a maioria das T_b ficaram entre 260 e 290 K. Uma estimativa utilizando dados do satélite GOES-10 mostrou que aproximadamente 97% das nuvens durante o evento de Santa Catarina eram quentes e somente 3% alcançaram a fase fria, formando gelo.

A chuva associada a nuvens estratiformes é de difícil estimativa por satélite, tanto por modelos de micro-ondas e, principalmente, por modelos que utilizam canais infravermelhos, como é o caso do hidrestimador. A Figura 4.9b mostra o acumulado diário das estimativas realizadas com base nos canais infravermelhos realizadas para o período de análise. Nota-se na Figura que sobre Santa Catarina, principalmente a norte, região onde foram registradas as precipitações mais intensas, que não houve detecção por satélite.



(a)



(b)

Figura 4.9 - (a) Histograma de frequência relativa de temperatura de brilho (Tb) sobre a região de Santa Catarina e (b) as estimativas de precipitação diárias acumuladas entre 20 e 24 de novembro sobre a América do Sul.

Um indicador da presença de gelo nas nuvens é o número de descargas elétricas. Conforme demonstrado na literatura (por exemplo Petersen et al. 2002) há uma relação direta entre o conteúdo de gelo na nuvem e o número de descargas elétricas. Durante o período foram detectadas somente 50 descargas elétricas nuvem-solo medidas pelos sensores da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Elétricas (RINDAT) sobre todo o Estado de Santa Catarina (Figura 4.10) durante o período de 20 a 24 de novembro. Para se ter uma idéia um sistema convectivo típico atuante na região chega a ter 300 descargas em 15 minutos. O número extremamente baixo de descargas elétricas confirma a natureza quente das nuvens associadas ao evento.

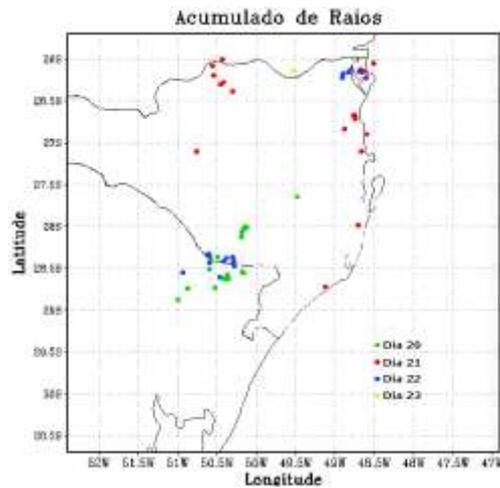


Figura 4.10 - Descargas elétricas detectadas sobre Santa Catarina no período de 20 a 24 de novembro de 2008.

Em resumo, a precipitação elevada observada no litoral de Santa Catarina no período analisado foi proveniente de nuvens quentes, o que é relativamente raro na região. Formou-se um sistema muito eficiente em gerar chuva sem haver nuvens com alto desenvolvimento vertical.

As causas da chuva observada

Do ponto de vista meteorológico, a tragédia em Santa Catarina foi o resultado de uma combinação de sistemas de diferentes escalas espaciais e temporais. No aspecto global, os meses de setembro, outubro e novembro, assim como as primeiras semanas de dezembro, foram caracterizados pela presença de fortes anomalias de pressão atmosférica, de sinal alternado, em praticamente todo o hemisfério sul, como mostra a Figura 4.11.

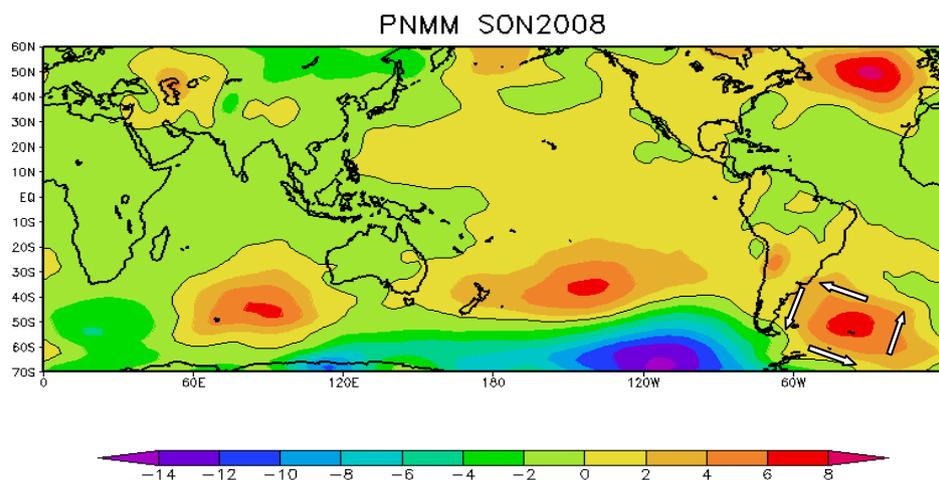


Figura 4.11 - Anomalias de pressão atmosférica na superfície do mar, em hPa, com respeito à normal climatológica (1961-1990) no período de setembro, outubro e novembro de 2008. As áreas com cores quentes indicam a presença de anomalias positivas de pressão, vinculadas à ocorrência de sistemas de alta pressão (anticiclones) de bloqueio. As setas representam o sentido da circulação dos ventos em torno do anticiclone de bloqueio localizado no oceano Atlântico.

As causas da ocorrência de tais anomalias devem ser ainda pesquisadas, mas provavelmente respondem, pelo menos parcialmente, a alterações nas precipitações no sudeste do continente asiático e à presença do fenômeno La Niña, conforme discussão na próxima seção. Em particular, áreas com anomalias positivas (pressão atmosférica mais elevada que o normal) se localizaram sobre os oceanos Índico, Pacífico e Atlântico Sul, conformando o que se conhece na literatura como “Anticiclones de Bloqueio”. O termo “bloqueio” é utilizado quando áreas de alta pressão (que podem perdurar durante vários dias ou, inclusive, semanas) são muito intensas e estáveis, e bloqueiam o deslocamento de sistemas meteorológicos como as frentes frias, que são responsáveis pelas variações das condições de tempo. Em outras palavras, quando um bloqueio atmosférico se estabelece, as condições do tempo persistem quase sem variações até que o sistema se desloca ou dissipa. Essa situação se torna ainda mais persistente quando, como neste caso, existem sistemas simultâneos em diferentes pontos do hemisfério. A localização do anticiclone de bloqueio no oceano Atlântico (com ventos que giram no sentido anti-horário no Hemisfério Sul, como esquematizado na Figura 4.10) determinou a ocorrência de ventos de leste sobre boa parte da costa da Região Sul. Esses ventos, devido à orientação Norte-Sul da costa, incidiram mais diretamente sobre o litoral de SC, transportando, portanto, a umidade típica do oceano para o continente. Os ventos

persistentes e úmidos vindos do mar foram levantados pela serra catarinense causando o esfriamento e a condensação do ar. Como consequência disso, chuvas de fraca ou moderada intensidade atingiram continuamente a região litorânea de SC. A Figura 4.12 mostra que já no período entre 1º de setembro e 20 de novembro (período que antecedeu os deslizamentos de terra), os maiores volumes de chuva do país ocorreram no Estado de SC e, principalmente na região do litoral e do Vale do Itajaí. Desta forma, num período de três meses anterior às ocorrências do fim de novembro, as precipitações fracas, porém constantes, foram se infiltrando lenta e gradativamente no solo argiloso do litoral de SC, que foi ficando cada vez mais saturado d'água.

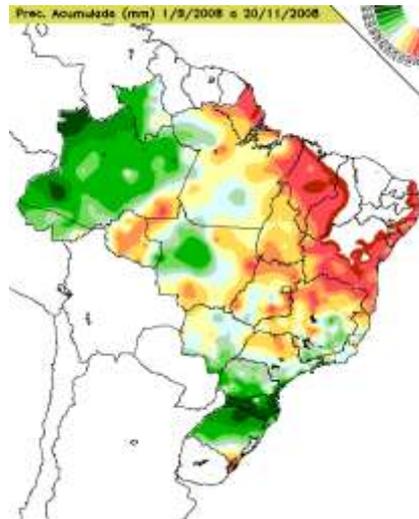


Figura 4.12 - Chuva acumulada em mm (escala de cores) no período de 1º de setembro a 20 de novembro de 2008.

O bloqueio atmosférico tornou-se especialmente intenso a partir do dia 19 de novembro. Nesta semana, o centro do anticiclone se localizou próximo dos 40° de latitude (Figura 4.13), determinando o aumento dos ventos de leste que atingiram de forma praticamente perpendicular à costa catarinense, incrementando a intensidade das chuvas orográficas.

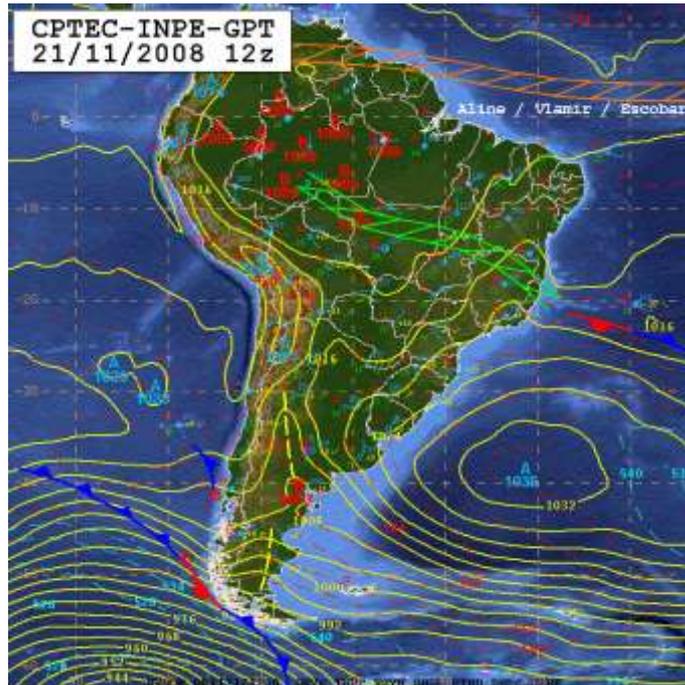


Figura 4.13 - Carta meteorológica de superfície, onde se destacam os principais sistemas meteorológicos que atuavam no dia 21 de novembro às 12:00 h TMG. Em particular se destaca a área de alta pressão (assinalada com a letra A) no oceano Atlântico, correspondente ao anticiclone de bloqueio. A direção dos ventos é aproximadamente paralela às isóbaras (linhas amarelas) girando no sentido anti-horário em volta dos sistemas de alta pressão.

A situação meteorológica se agravou a partir do dia 21 de novembro, quando o padrão de grande escala se combinou com um sistema de baixa pressão nos altos níveis da atmosfera, relativamente frequente em situações de bloqueio, conhecido cientificamente como vórtice ciclônico de altos níveis (mostrado na Figura 4.14). Esse novo sistema de escala menor, mais rápido e com centro frio, se deslocou na direção do Estado de SC, provocando uma gradativa queda da pressão na alta atmosfera (acima dos 5000 m). A diminuição da densidade do ar nos altos níveis provocou um efeito dinâmico de sucção que aumentou o levantamento do ar. Por outro lado, o contraste entre as baixas temperaturas nos altos níveis da atmosfera provocados pelo núcleo frio (a temperatura registrada no centro do vórtice foi de -19°C , considerada típica para a estação de inverno nas latitudes médias) e o calor da superfície, criaram condições termodinâmicas adequadas para incrementar o levantamento do ar. O efeito dinâmico e termodinâmico gerado pelo vórtice ciclônico se combinou com o levantamento do ar marítimo produzido pelas montanhas que cercam o Vale do Itajaí, provocando o drástico aumento das

precipitações. Desta forma, as chuvas se estenderam durante todo o fim de semana de forma quase ininterrupta e com uma intensidade considerável, porém ainda suficientemente baixa para permitir que a chuva penetrasse no solo já quase saturado, em vez de escoar superficialmente.

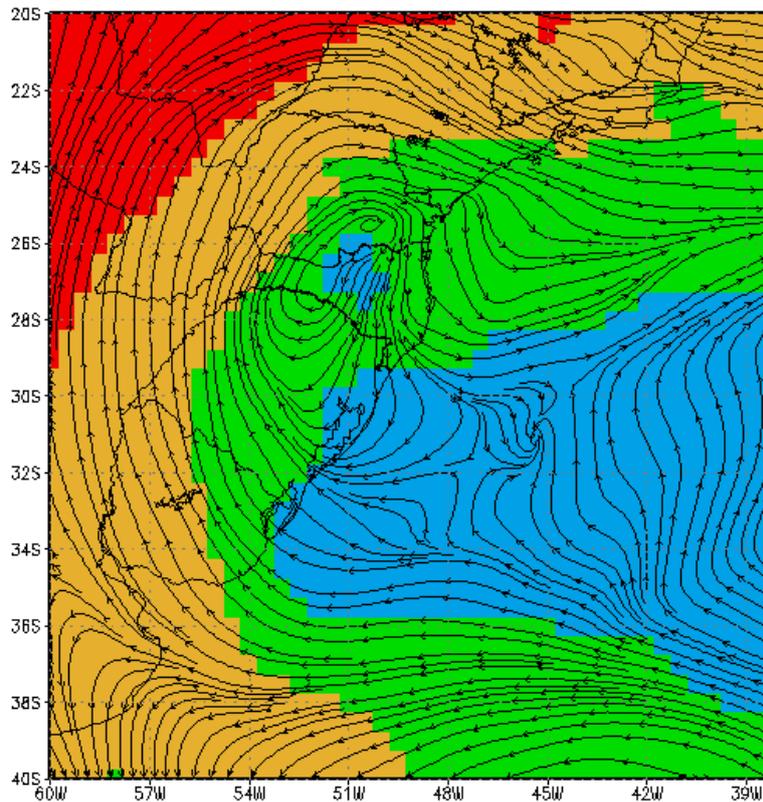


Figura 4.14 - Linhas de corrente (circulação dos ventos) no nível isobárico de 500 hPa (aproximadamente a 500 m de altura) e temperatura (°C, escala de cores) correspondente ao mesmo horário.

Assim, do ponto de vista sinótico, as chuvas intensas que se abateram sobre partes de Santa Catarina (SC), especialmente no vale do rio Itajaí-Açu, no período de 22 a 25 de novembro, foram causadas pelo estabelecimento de um bloqueio atmosférico no oceano Atlântico.

Aspectos hidrológicos

A resposta hidrológica na bacia do rio Itajaí-Açu foi devastadora. As cidades de Itajaí e Blumenau foram algumas das mais atingidas pelas chuvas e pelas inundações resultantes. Em Itajaí, o rio Itajaí-Açu chegou a subir 11 metros no período de 23-24 novembro. Este rio transbordou as barragens de contenção e, em poucas horas, elevou-se 12 metros acima de seu nível normal. As chuvas provocaram deslizamentos e desmoronamentos generalizados, analisados em outro capítulo deste documento, e que foram os responsáveis pela maior parte das fatalidades.

Obviamente, a ocorrência de inundações no vale do rio Itajaí-Açu não é novidade. De 1850 a 1992, foram 66 enchentes, das quais 11 (onze) até 1900, 20 (vinte) nos 50 anos subsequentes e 35 (trinta e cinco) nos últimos 43 anos daquele período. Relatos históricos registram 9 metros de elevação do rio Itajaí-Açu na enchente de 1862, tornando terras agrícolas e cidades alagadas. Destaca-se que a configuração topográfica do vale do rio Itajaí-Açu favorece inundações e, muitas vezes, acontecendo de forma abrupta.

Previsibilidade

Os modelos de previsão numérica capturaram com relativa precisão os principais sistemas atmosféricos envolvidos. Em particular, os modelos globais (previsão de mais longo prazo com resolução mais baixa) capturaram especialmente o sistema de bloqueio com muito boa antecedência (aproximadamente 10 dias). Os modelos regionais, mais sofisticados, de maior resolução e de prazo mais curto, permitiram também prever o vórtice ciclônico, cujo diâmetro foi de apenas 500-1000 km. Contudo, todos os modelos consultados (inclusive os rodados no exterior) subestimaram significativamente o volume das chuvas, especialmente para os dias 22 e 23 de novembro. Por essa razão, embora tenham sido emitidos avisos advertindo sobre a gravidade da situação meteorológica, não foi possível alertar as autoridades da SEDEC e da Defesa Civil de SC sobre a verdadeira dimensão da catástrofe.

A Figura 4.15 mostra a chuva acumulada prevista no dia 20 de novembro, para os dias 20 a 24, pelo modelo Eta que é rodado no CPTEC/INPE com uma resolução horizontal de 20 km. Embora o modelo conseguisse prognosticar com boa precisão a localização das chuvas mais intensas no litoral norte de SC, os volumes previstos foram aproximadamente 50% dos observados. Houve também modelos, como o Global T299 do CPTEC, que previram

acumulados mais próximos da realidade, ainda subestimados, porém indicaram de forma deficiente a localização das chuvas.

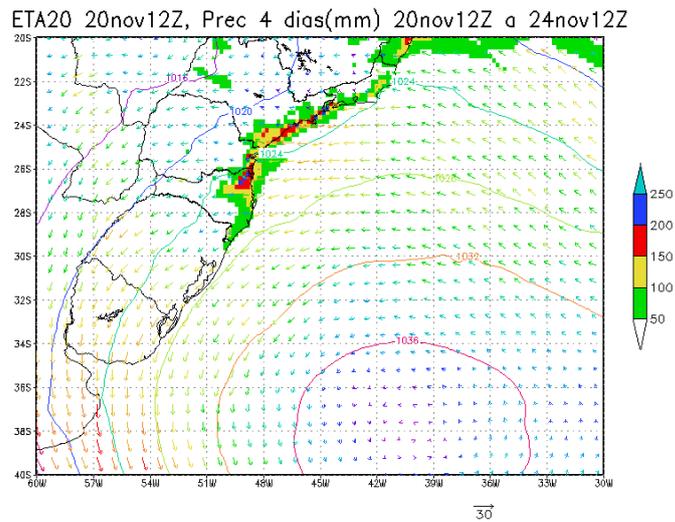


Figura 4.15 - Chuva acumulada prevista pelo modelo Eta/CPTEC (resolução horizontal de 20 km) no dia 20 de novembro, para o período de 20 a 24 de novembro de 2008.

A Figura 4.16 mostra a comparação das previsões feitas com diferentes modelos, com as observações da estação automática do INMET de Florianópolis e com as estimativas TRMM (combinação de dados do satélite TRMM e dados do GOES), em verde.

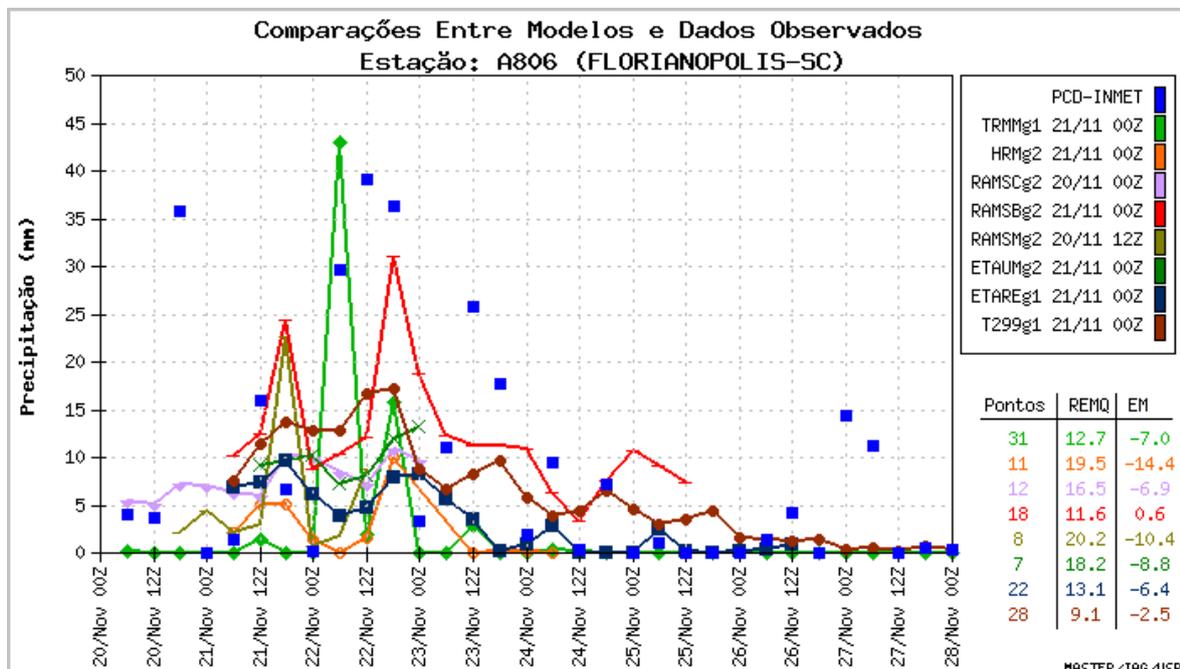


Figura 4.16 - Intercomparação entre previsões de diferentes modelos e as observações (mais detalhes em <http://www6.cptec.inpe.br/iodopweb/intercomparacao/phps/>)

Em síntese, embora os modelos numéricos tenham capturado a situação meteorológica geral, assim como previsto a ocorrência de precipitações consideráveis, nenhum deles teve a precisão necessária para fazer uma previsão quantitativa das chuvas. Essa limitação é comum a todos os modelos numéricos de previsão meteorológica conhecidos, tanto no Brasil como no resto do mundo.

O aumento da resolução horizontal, vertical e temporal, tanto a nível regional como global, são também absolutamente necessárias para melhorar o desempenho das previsões. Como exemplo, a Figura 4.16 mostra previsões numéricas realizadas com o modelo Eta/CPTEC, utilizando uma resolução horizontal de 20 km (Figura 4.17a) e de 5 km (Figura 4.17b), onde pode-se notar que o aumento do nível de detalhamento horizontal permite obter uma previsão de chuva muito mais precisa. No entanto, apenas com a mudança da parametrização de nuvens, cujo resultado é mostrado na Figura 4.17c, é que se consegue uma melhoria substancial da quantidade de precipitação prevista.

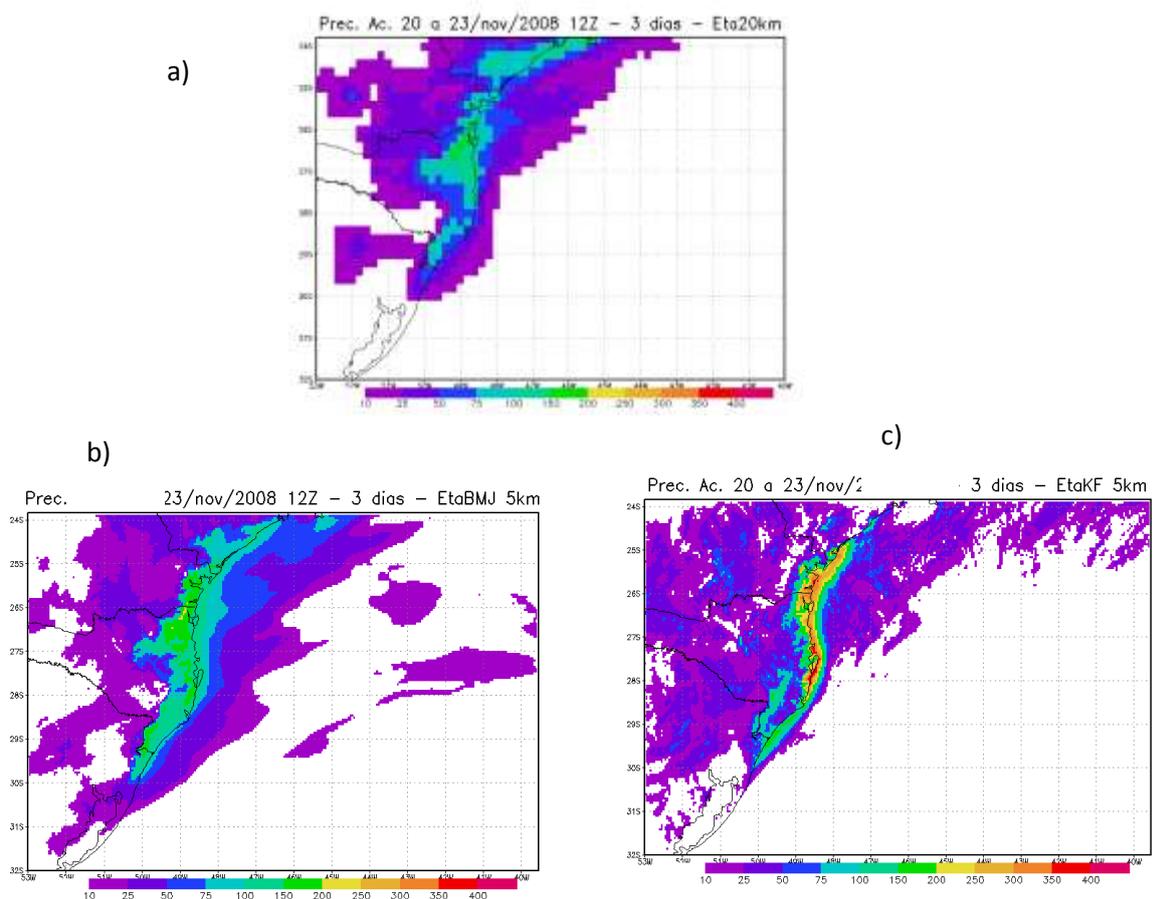


Figura 4.17 - Chuva acumulada no período de 20 a 23 de novembro de 2008 prevista pelo modelo Eta/CPTEC: (a) resolução de 20 km; (b) resolução de 5 km; (c) mesmo que o (b), porém alterando a parametrização de nuvens.

As deficiências dos modelos numéricos apontadas estimulam a comunidade científica nacional e internacional para tentar achar possíveis soluções. Neste sentido, as linhas de pesquisa incluem o desenvolvimento de algoritmos que permitam representar de forma mais exata os processos atmosféricos, ambientais e geoquímicos (conhecidos como parametrizações físicas) envolvidos nas variações das condições do tempo e que não são bem representadas pelos atuais modelos.

Os alertas e o impacto na mídia

Embora os modelos numéricos de previsão não tenham prognosticado com exatidão o volume das chuvas ocorridas, as instituições operacionais de meteorologia, tanto a nível nacional como regional, conseguiram antecipar a gravidade da situação meteorológica, com vários dias de antecedência, e alertar tanto as autoridades da Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC) como a Defesa Civil de Santa Catarina sobre o possível impacto social.

No âmbito nacional, os avisos meteorológicos elaborados pelo Grupo de Previsão de Tempo do CPTEC/INPE (GPT) são encaminhados para a SEDEC que, por sua vez, os envia para os estados e municípios correspondentes, cada vez que uma situação meteorológica tem o potencial de causar danos pessoais ou materiais à população.

Na atualidade são considerados três níveis de “alerta” meteorológico no CPTEC/INPE:

- 1- O “Estado de Observação” se utiliza quando o fenômeno em questão está previsto para ocorrer num prazo maior que cinco dias. Nesse caso, não é divulgado nenhum aviso para a SEDEC, mas o fenômeno é especialmente acompanhado e discutido no âmbito do GPT.
- 2- O “Estado de Atenção” é determinado quando existe uma probabilidade considerável de ocorrência de algum fenômeno potencialmente perigoso nos próximos quatro dias. Também é utilizado quando o fenômeno está previsto para as próximas 24 horas, mas a previsão não tem uma alta confiabilidade. Os boletins de “Estado de Atenção” são enviados em forma quase diária para a SEDEC, já que a ocorrência de situações meteorológicas potencialmente perigosas é muito frequente, especialmente durante a estação chuvosa.
- 3- Os “Avisos Meteorológicos Especiais” são utilizados em situações de maior risco, quando a probabilidade de ocorrência de um fenômeno severo é elevada (previsão de alta confiabilidade) nas próximas 24 horas.

Em todos os casos, a confiabilidade da previsão é determinada a partir da coerência temporal das previsões numéricas dos modelos do CPTEC/INPE e das diferenças encontradas entre as previsões de todos os modelos consultados.

No nível do Estado de Santa Catarina, o Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia (CIRAM), através de seu Setor de Previsão de Tempo e Clima, mantém um contado direto e frequente com a Defesa Civil desse Estado. Sendo que o CIRAM é um órgão regional, sua missão é divulgar previsões e alertas meteorológicos para esse Estado com o maior detalhamento espacial e temporal possível.

Devido ao caráter praticamente estacionário dos sistemas meteorológicos que causaram as enchentes e deslizamentos em SC, foi possível estabelecer com muito boa antecedência a condição meteorológica favorável para a ocorrência de chuvas persistentes. Em particular, o “Estado de Observação” foi estabelecido no CPTEC/INPE com uma antecedência maior que 10 dias. No início da semana anterior à ocorrência da tragédia, os modelos numéricos de previsão indicavam a intensificação do sistema de bloqueio e o provável deslocamento do vórtice ciclônico sobre a Região Sul. Diante disso, os meteorologistas do CPTEC/INPE enviaram o primeiro “aviso de Estado de Atenção” à SEDEC no dia 18 de novembro, que foi ratificado nos dias 19 e 20. Em todos os casos foram previstos acumulados diários superiores a 100 mm, o que expressava a gravidade da situação, levando em conta que a média histórica no litoral de SC para o mês de novembro é de 130-150 mm (fonte CIRAM). O aviso ainda mencionava a possibilidade de chuvas significativas e persistentes em parte da Região Sudeste e no sul da Região Nordeste, também associadas indiretamente à atuação do bloqueio. Em forma simultânea, o CIRAM emitiu, também desde o dia 18 de novembro, boletins de aviso meteorológico alertando sobre a situação de “lestada” e a ocorrência de chuvas “significativas e persistentes” no litoral catarinense e na região do Vale do Itajaí. Dito boletim apontava expressamente a possibilidade de “alagamentos e deslizamentos” naquelas regiões. Vale salientar que, no marco do “Centro Virtual de Vigilância Prognóstico e Alerta Antecipado de Eventos Meteorológicos Severos para o Sudeste da América do Sul”, recentemente criado, graças à iniciativa do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os diferentes avisos meteorológicos foram partilhados pelas principais instituições de meteorologia nacionais e estaduais do país, assim como pelos Serviços Meteorológicos dos países vizinhos.

No dia 21 de novembro, a maioria dos modelos numéricos disponíveis, tanto a nível global como regional, previa o deslocamento do vórtice ciclônico, embora com diferenças na sua

posição e intensidade. Esse novo elemento, como já explicado, indicava claramente que as chuvas, já persistentes, deveriam se incrementar significativamente nas próximas horas. Por essa razão o CPTEC/INPE emitiu, às 11 horas do dia 21, um “aviso meteorológico especial” informando que eram esperados grandes volumes de chuva (“superiores a 100 mm”), na região que já tinha sido castigada por precipitações muito persistentes. Novamente em forma praticamente simultânea, o aviso meteorológico 73 do CIRAM apontava como “áreas mais críticas” o litoral catarinense e o Vale do Itajaí “devido não só aos elevados índices de chuva previstos, mas também por estarem em solo encharcado”, alertando explicitamente sobre a possibilidade de alagamentos e deslizamentos.

Os avisos meteorológicos foram renovados na manhã do dia 22 de novembro, alertando sobre a continuidade das chuvas e, no caso do CIRAM, sobre o aumento no nível do mar decorrente dos ventos intensos de leste, fato que dificultaria o escoamento dos rios para o mar. No dia 23, já após a ocorrência de vários deslizamentos e enchentes, os boletins detalhavam a previsão de chuvas para as próximas horas, assim como a melhora nas condições meteorológicas a partir do dia 24 de novembro.

O volume e a persistência das precipitações, especialmente entre os dias 22 e 23 de novembro, determinaram uma das piores catástrofes naturais da história de SC e do Brasil. A gravidade da situação social e ambiental foi o destaque principal de praticamente todos os jornais e telejornais do país, e também dos meios de comunicação do exterior. Nesta etapa, os centros meteorológicos também tiveram um papel relevante atendendo aos meios de comunicação que procuravam informações sobre as causas das chuvas, assim como sobre a previsão de tempo nos dias seguintes à tragédia. Desde um ponto de vista mais científico, algumas entrevistas indagaram o papel da previsão meteorológica na mitigação de desastres naturais e a responsabilidade que cabe ao homem nessas situações. Em particular, o CIRAM se tornou a instituição de consulta permanente da mídia e da Defesa Civil durante a catástrofe e nas semanas subsequentes, em questões ligadas a previsão e monitoramento hidrometeorológico. No caso do INPE, foram atendidas mais de 50 entrevistas e reportagens, tanto a nível nacional como regional. Essa cifra foi a maior registrada até o momento nessa instituição em relação à ocorrência de um fenômeno meteorológico em particular, superando o número de atendimentos relacionados com o “Furacão Catarina”, ocorrido em março de 2004.

5. Variabilidade Interanual e Interdecadal e Mudanças Climáticas

Pode-se perguntar se os copiosos volumes de chuvas registrados em Santa Catarina durante os meses de outubro e novembro de 2008 estão associados a algum padrão conhecido de variabilidade climática de grande escala interanual ou interdecadal ou até mesmo se sua intensidade extraordinária poderia estar relacionada ao aquecimento global. Para tanto, vale a pena, inicialmente, resumir o evento do ponto de vista sinótico e analisar se este pode ser enquadrado em algum modo de variabilidade climática conhecida.

Condições atmosféricas e oceânicas de escala planetária associadas aos eventos de excessos pluviométricos ocorridos no vale do rio Itajaí-Açu, em Santa Catarina, em novembro de 2008

As condições oceânicas sobre o Pacífico equatorial se mantiveram numa configuração semiestacionária durante os últimos três a quatro meses, oscilando em torno de um estado característico do fenômeno La Niña, isto é, predominância de anomalias negativas de temperatura da superfície do mar (ATSM) sobre o Pacífico Equatorial leste e aumento da precipitação convectiva profunda sobre o norte da Austrália e Indonésia, no Pacífico oeste. Tal excesso pluviométrico sobre o Pacífico Ocidental esteve associado à formação de um trem de ondas atmosférico estacionário de escala planetária que favoreceu o estabelecimento e permanência do bloqueio atmosférico sobre o Atlântico Sudoeste durante vários meses, incluindo novembro. Este centro de alta pressão mostrou uma estrutura praticamente uniforme na baixa troposfera e favoreceu a circulação atmosférica em baixos níveis, responsável por substantivo transporte de umidade do oceano Atlântico ao litoral de Santa Catarina durante todo o mês de novembro, transporte de umidade este favorecido por temperaturas do oceano Atlântico sudoeste acima da média climatológica.

Alguns estudos sobre a influência da temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico subtropical na precipitação no Sul do Brasil mostraram relações muito fracas (Díaz et al., 1998; Barros et al., 2000). No entanto, há indicações de que os dois padrões de precipitação característicos sobre a América do Sul, ao sul de 20°S, estão associados a anomalias de TSM do

Atlântico subtropical, que favorecem o fluxo de umidade para o continente (Nicoloni et al., 2002; Doyle e Barros, 2002).

Já nas escalas de variabilidade intrassazonal, a Região Sul do Brasil esteve afetada por oscilações com período de 30 a 45 dias, as quais apresentaram um sinal favorável à ocorrência de movimento vertical ascendente (favorável à formação de precipitação) durante outubro e início de novembro, causando chuvas superiores à normal, como pode ser visto na Figura 5.1a. Não obstante, durante o período de pluviosidade intensa no final de novembro, a onda intrassazonal apresentava sinal de subsidência (movimentos descendentes que inibem a formação de precipitação) sobre a região.

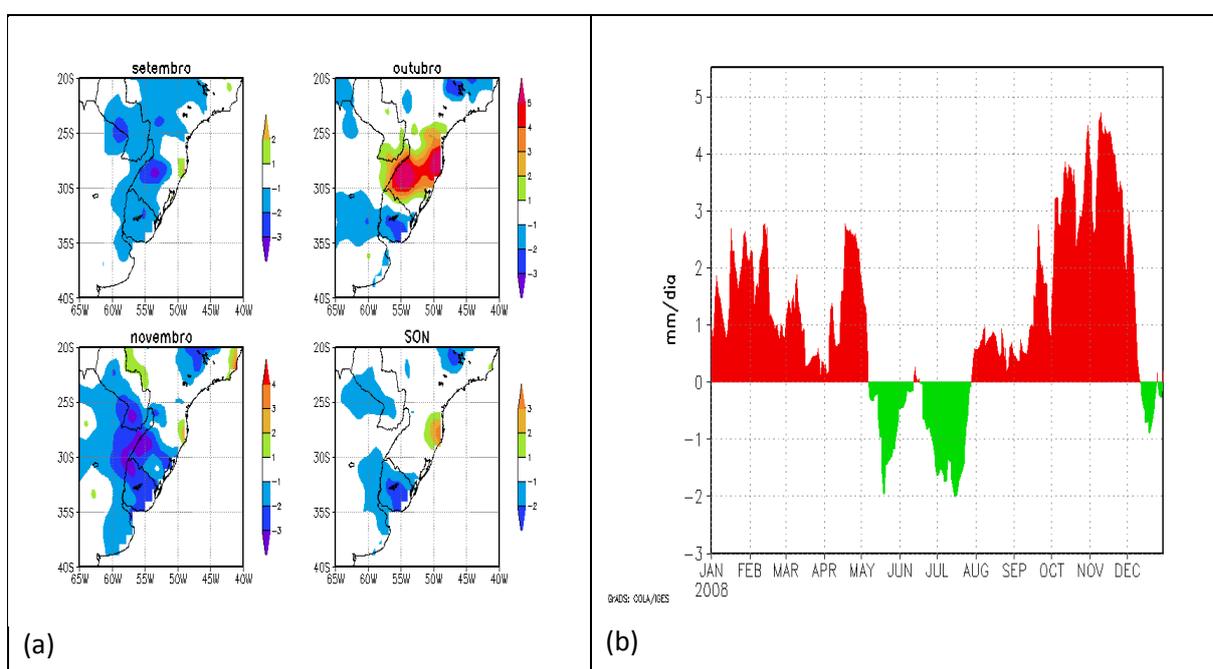


Figura 5.1 - Anomalias pluviométricas (a) sobre o sudeste da América do Sul (mm/dia) para os meses de setembro, outubro, novembro e a média desses três meses de 2008 e (b) série temporal diária de janeiro a dezembro de 2008 para a média na área da região litorânea de Santa Catarina (centrado em 27°S, 47°W). Fonte de dados: INPE/CPTC.

As previsões climáticas sazonais do INPE/CPTC para os totais pluviométricos no trimestre outubro-novembro-dezembro de 2008, no Sul do Brasil, indicavam tendência a chuvas de normal a abaixo da média. De fato, com exceção das chuvas acima da média em outubro sobre grande parte da Região Sul e chuvas acima da média no litoral de Santa Catarina em novembro (Figura 5.1a), partes do Rio Grande do Sul, norte da Argentina e Uruguai vêm enfrentando

pronunciada estiagem, consistente com o quadro climático de grande escala observado desde julho de 2008. É notável, contudo, que o litoral de Santa Catarina vem registrando anomalias pluviométricas acima da média durante praticamente todo o ano de 2008, à exceção dos meses de maio, junho, julho e dezembro, como pode ser observado na Figura 5.1b. Desta maneira, o evento extremo de Santa Catarina foi consequência de um padrão de longa duração que culminou com as precipitações intensas no final de novembro e que não pode ser facilmente enquadrado num modo de variabilidade climática conhecida.

Relações das chuvas anormais com o fenômeno El Niño em escalas interanuais

Historicamente, a maioria das chuvas anômalas acima da média climatológica no sudeste da América do Sul, incluindo Santa Catarina, tem sido associadas à simultânea ocorrência de eventos intensos do fenômeno El Niño, como aquelas em 1911, 1957, 1983, 1987, 1998, entre muitas outras. Entretanto, chuvas intensas, ainda que em escala espacial menor, podem ocorrer independentemente da influência de grande escala de eventos El Niño, como ocorreu em 1984 e em 2008. As enchentes de 1983, que causaram danos materiais na ordem de US\$ 1,1 bilhão em todo Estado de Santa Catarina, atingiram um pico no nível do rio Itajaí-Açu de 15,34 m. Estas foram seguidas pelas inundações de 1984, com um pico de 15,46 m. Em fevereiro de 1987, o fenômeno El Niño provocou enchentes em 15 municípios catarinenses e, em 1997, voltou a agir causando inundações de grandes proporções em Santa Catarina, nos meses de janeiro e outubro. Em janeiro, 35 municípios foram afetados, ao passo que, em outubro, as cheias atingiram 37 cidades.

Por serem fenômenos de escala planetária, eventos El Niño e La Niña afetam as variáveis climáticas em grande escala. Isto pode ser visto na Figura 5.2, que mostra a distribuição espacial das anomalias de precipitação associadas a eventos El Niño no sudeste da América do Sul. Notam-se anomalias entre 2 e 3 mm/dia para a maior parte de Santa Catarina, o que explica a comum ocorrência de inundações nesse Estado associadas ao fenômeno El Niño. Porém, ressalta-se que a escala espacial é ampla, não se constituindo em eventos que afetem isoladamente o vale do rio Itajaí-Açu. Nesse sentido, o extremo de chuvas de novembro de 2008, apresentou escala espacial significativamente inferior, tornando a previsão climática em escala sazonal ou mesmo intrassazonal bastante difícil. De modo geral, pode-se dizer que fenômenos sinóticos ligados à dinâmica interna da atmosfera, como provavelmente foi o caso

no episódio em tela, são praticamente previsíveis somente em escalas de previsão de tempo e contribuem para a diminuição da previsibilidade climática sazonal, mesmo em áreas onde tal previsibilidade pode ser utilizada, praticamente como é o caso do sudeste da América do Sul.

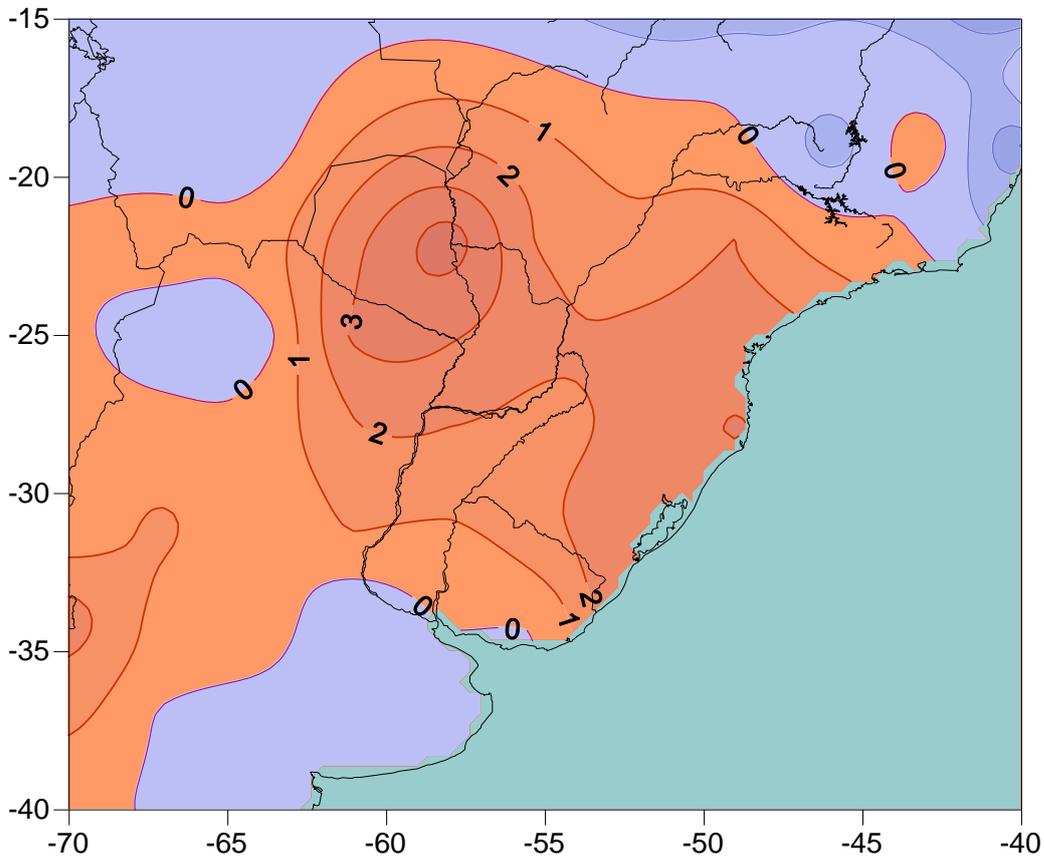


Figura 5.2 - Padrão espacial das anomalias de precipitação no sudeste da América do Sul para anos de El Niño, em mm/dia (Barros et al., 2008).

Variabilidade climática em escalas interdecadais

Na escala temporal interdecadal, constata-se um aumento significativo da temperatura do ar e da pluviosidade na região do litoral de Santa Catarina, conforme mostrado pelas séries temporais dos índices normalizados de anomalias anuais de temperatura e precipitação para o período de 1950 a 2000, mostrados na Figura 5.3. De modo geral, deve-se registrar que uma atmosfera mais aquecida comporta condições físicas para a ocorrência de eventos pluviométricos extremos. Nota-se na Figura 5.2 uma mudança de anomalias de negativas para positivas em meados da década de 70, o que é sugestivo de associação com fenômenos de escala planetária originários da Bacia do oceano Pacífico.

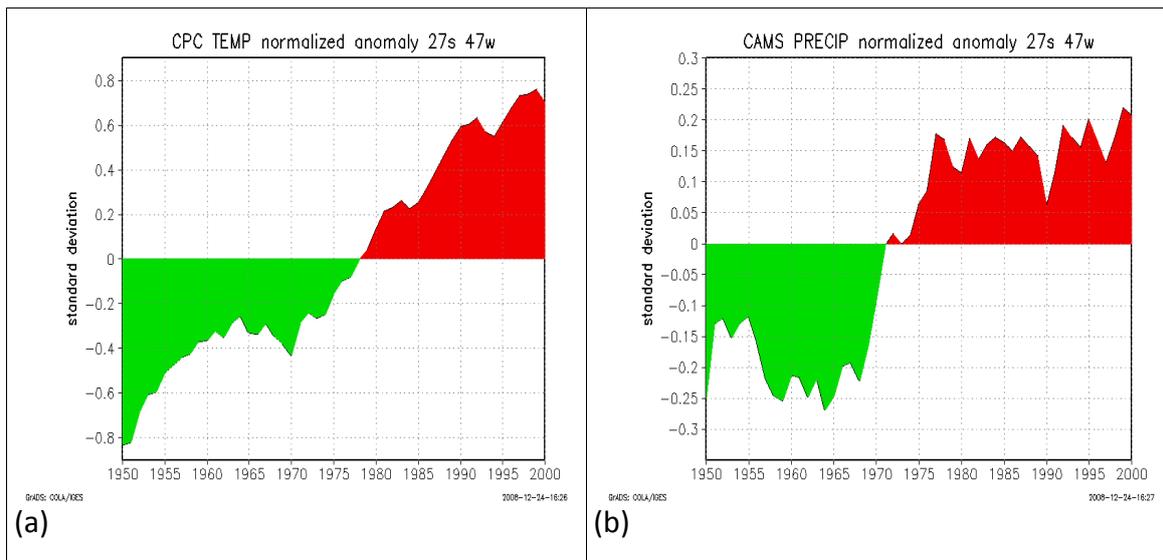


Figura 5.3 - Séries temporais de anomalias anuais de (a) temperatura do ar e (b) precipitação pluviométrica normalizadas pelos respectivos desvios padrões sobre a porção *leste do Estado de Santa Catarina* (47°S, 27°W) para o período 1950-2000. Fonte dos dados: Temperatura: Climate Prediction Center/NOAA; precipitação: CAMS, CPC/NOAA.

As chuvas do sudeste da América do Sul, ao serem fortemente influenciadas pelo El Niño, refletem também variabilidades interdecadais do fenômeno El Niño-Oscilação Sul e do oceano Pacífico, o que é conhecido como Oscilação Decadal do Pacífico (PDO-Pacific Decadal Oscillation). Até finais do século XX, a PDO encontrava-se na fase positiva, indicando maior frequência e intensidade de El Niños, o que explica, em parte, eventos de chuvas abundantes e inundações ocorridas do final da década de 70 até o final dos anos 90. Aparentemente, a PDO passou à fase negativa há poucos anos, como ilustrado na Figura 5.4. Se isso se confirmar, espera-se uma diminuição da frequência de eventos El Niño. Outra fase negativa da PDO anterior foi de meados da década de 40 até meados da década de 70.

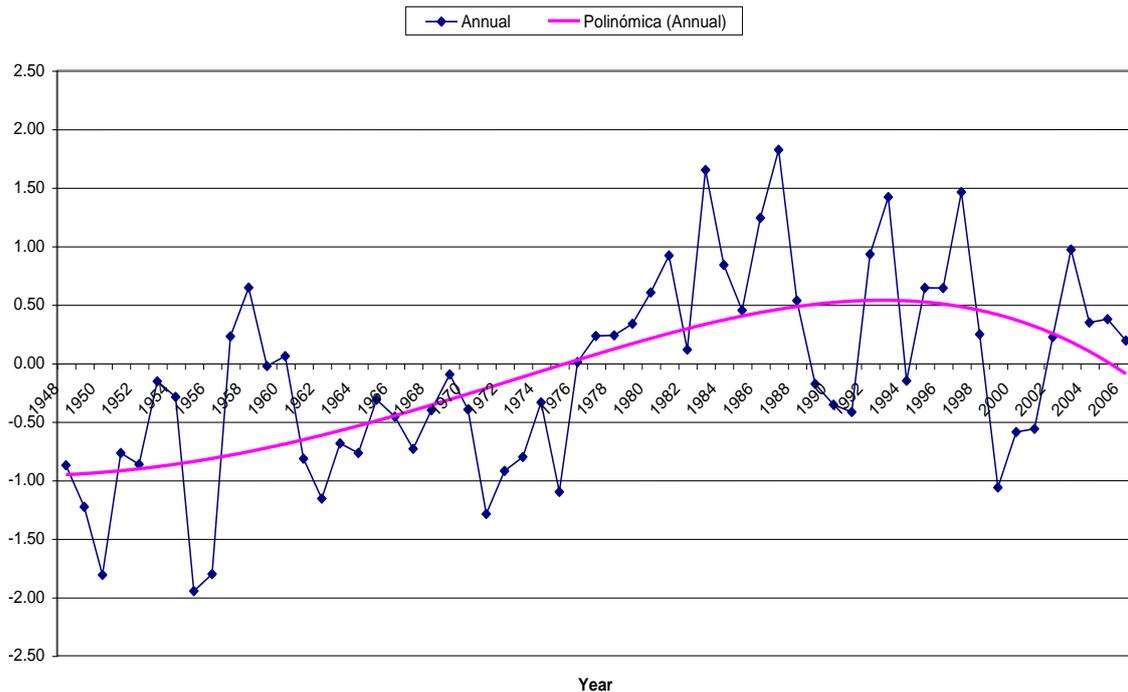


Figura 5.4 - Índice Anual da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) de 1948 a 2006 e ajuste polinomial (em vermelho). Note a mudança da fase negativa para a fase positiva em 1975-76 e possivelmente da fase positiva novamente para a fase negativa no início deste século (Vera e Silvestrini, 2008).

Outra circulação de grande escala que modula as precipitações em escalas quase-interdecadais é a Oscilação da Antártica, particularmente nos meses de primavera, setembro a dezembro, quando se observa uma relação quase direta entre a intensificação das precipitações no sul do Brasil e a intensificação da pressão ao nível do mar sobre o Polo Sul, e circundadas por regiões de baixa pressão em latitudes médias (45° S), o que facilitaria o bloqueio de sistemas frontais na região sul do Brasil (Obregón, 2003). A Oscilação da Antártica apresenta variabilidade quase-decadal que se encontra em fase próxima à neutralidade nos últimos anos.

Variabilidade de longo prazo e tendências de extremos de chuva no sul do Brasil, e possível relação entre extremos climáticos e aquecimento global

Ainda que chuvas intensas e inundações aconteçam há séculos em Santa Catarina, devido a causas naturais, principalmente ligadas a eventos El Niño, é importante verificar se o aquecimento global poderia estar exacerbando os extremos climáticos, como ocorre em outras partes do planeta. A análise de séries históricas de chuvas para Santa Catarina, nos últimos 50 anos, indica um aumento no total de chuvas na região Sul do Brasil (Figura 5.5), sendo que os extremos de chuva também têm aumentado em frequência e intensidade, também nos últimos 50 anos (Figura 5.6). Os dados das estações mostram uma tendência de aumento dos episódios de chuva intensa, definidos pelo índice R10 (número de dias com mais de 10 mm diários de precipitação) e pelo índice de extremos de chuva intensa, definido pelo índice RX5 dia (chuva intensa acumulada em cinco dias consecutivos que pode produzir enchentes) em grande parte do sudeste da América do Sul. Estas tendências sugerem aumento na frequência e intensidade de eventos de chuva no sudeste da América do Sul.

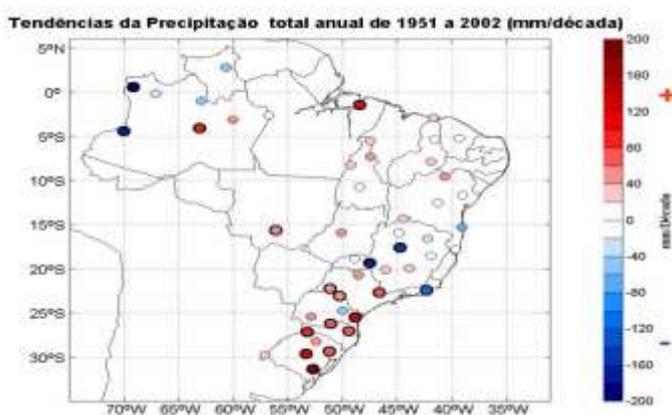
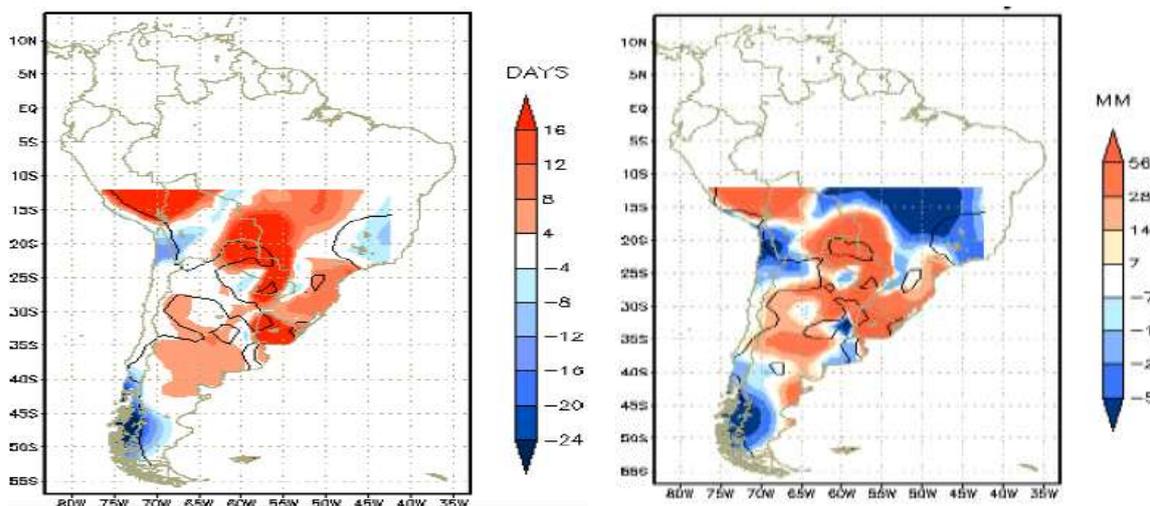


Figura 5.5 - Tendências da chuva anual de 1951-2002 para o Brasil, em mm/década. Escala de cor é indicada no lado direito de cada painel (Obregón e Marengo, 2007).



Índice R10

Índice RX5dia

Figura 5.6 - Tendências dos índices de chuva extrema R10 (número de dias com mais de 10 mm diários de precipitação) e R5Xdia (chuva intensa em mm acumulada em 5 dias consecutivos que pode produzir enchentes) de 1951-2002 para o Brasil, em dias. Escala de cor aparece do lado direito de cada painel (Marengo et al., 2008 – a, b).

Para Blumenau, uma análise dos registros de chuva desde 1940 mostra que o número de eventos com chuva acima de 100 mm ocorrendo em dois dias consecutivos têm aumentado nos últimos 20 anos, segundo a Tabela 5.1, aumentando em mais de 100% nos últimos 20 anos em relação a 1940-60. Porém, como esperado, o número de eventos extremos de precipitação nesta região apresenta forte variabilidade interanual.

Tabela 5.1. Distribuição temporal do número casos, para cada 20 anos, de precipitações totais maiores de 100 mm registradas em não mais de dois dias consecutivos (1945-2004). Os períodos de 1945-1947 e 1951-1953 apresentam dados diários em menos de 80% do total de dias dos três anos.

Período	Número de eventos
1940-60	20
1961-80	23
1981-2004	41

Isto pode indicar que a tendência observada de aumento no volume total de chuvas, seja mais na forma de aumento nos extremos de chuva e não de chuvas distribuídas regularmente no tempo e espaço. Nota-se que dezenas de municípios gaúchos enfrentavam (e ainda enfrentam, ao final de 2008) estiagem acentuada, simultaneamente à ocorrência de chuvas excessivas em Santa Catarina em novembro de 2008. Estes dados tomados em conjunto são característicos de aumento de extremos climáticos associados ao aquecimento global, ainda que a relativa curta duração das séries históricas não permita conclusões mais definitivas.

O mesmo tipo de tendências tem sido também observado no centro e leste da Argentina (Figura 5.7), onde o número de eventos com chuva acima de 100 mm, em dois dias consecutivos, cresceu de 15-20 entre 1970-80 até 80-85, no período de 1990-2002.

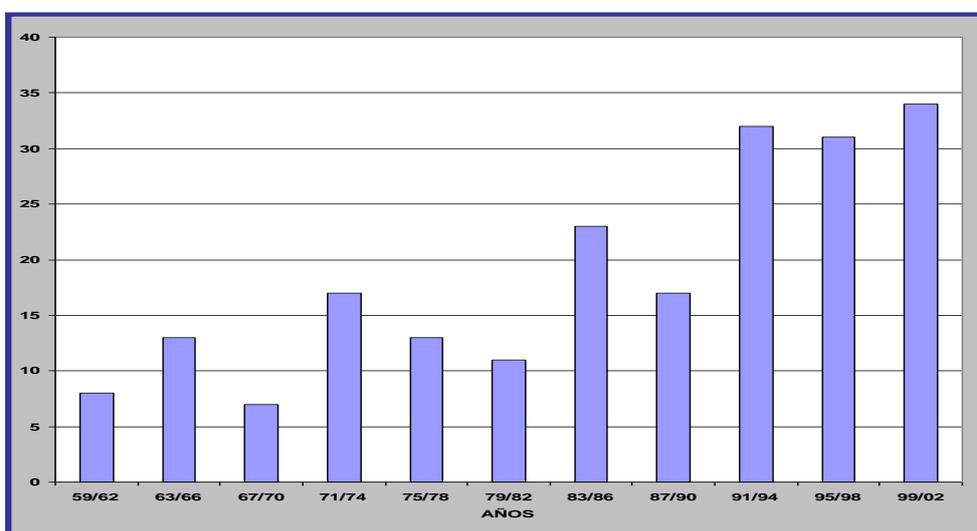


Figura 5.7 - Mudanças observadas nas precipitações extremas na Argentina. Número de eventos de precipitação superior a 100 mm, em não mais do que dois dias para 16 estações meteorológicas do centro-leste da Argentina (Camilloni et al., 2005).

Em resumo, ainda que o aumento generalizado das chuvas no sudeste da América do Sul nos últimos 30 anos, possa ser atribuído, em primeira instância, à influência remota da Oscilação Decadal do Pacífico, através da ocorrência de um número maior de eventos El Niño em relação a eventos La Niña, é fato que o aquecimento global vem ocorrendo simultaneamente e pode também estar associado à intensificação de eventos extremos de precipitação.

Mudanças climáticas e projeções de extremos de precipitação

Mudanças nos extremos de precipitação e temperatura, como por exemplo, a frequência de chuvas intensas e conseqüentemente de enchentes, podem potencialmente ter graves conseqüências econômicas e sociais. Isso se torna mais verdade ao se constatar que populações humanas podem já estar adaptadas a certa variabilidade climática existente, por exemplo, com certa frequência de extremos climáticos. Entretanto, a mudança da distribuição probabilística de extremos climáticos pode trazer óbices à adaptação. Daí a importância de se estimar o potencial de mudanças futuras em extremos de temperatura e precipitação, tendo grande utilidade na análise de impactos de mudanças do clima e nas avaliações de vulnerabilidade e de risco frente às mudanças do clima.

O exemplo do vale do rio Itajaí-Açu é bastante ilustrativo de complexas respostas sociais na busca de adaptação aos extremos climáticos. Em resposta às devastadoras inundações em Santa Catarina em 1983, atingindo de modo profundo o vale do rio Itajaí-Açu, desenvolveu-se um sistema de alerta para prever riscos de inundações e foram aperfeiçoados os sistemas de Defesa Civil, de modo a evacuar residências em áreas suscetíveis à inundação. Pode-se dizer que esta atividade foi coroada de sucesso, haja visto que diminuiu radicalmente o número de fatalidades devido a afogamento, inclusive nas recentes inundações. Porém, uma das respostas das pessoas para diminuir a exposição ao risco de residir na planície de inundação do rio foi se mudar para terrenos mais elevados, principalmente em áreas de declividade moderada ou acentuada, em cidades como Blumenau e vizinhas. Uma das conseqüências desta expansão populacional para áreas mais elevadas foi o desmatamento de encostas. O resultado é sobejamente conhecido no Brasil: a maior parte das fatalidades decorreu de deslizamentos de massa em encostas.

Avaliações do Quarto Relatório do IPCC e do Relatório de Clima do INPE têm mostrado que eventos extremos de precipitação podem tornar-se mais frequentes, podendo gerar enchentes e alagamentos mais severos e intensos num clima mais quente. Uma intensificação nos extremos de precipitação pode ser causada pelo aumento no conteúdo de umidade da atmosfera, o que pode aumentar sua disponibilidade para sistemas precipitantes associados a frentes, tempestades tropicais e extratropicais e complexos convectivos de mesoscala. As projeções de extremos de chuva até finais do século XXI, derivado dos modelos globais e regionais do IPCC e do INPE, para cenários de altas e baixas concentrações de gases de efeito

estufa, mostram aumentos nas tendências de eventos extremos de chuva, como mostrado na Figura 5.8, especialmente no norte e litoral de Santa Catarina. As projeções do modelo HadRM3-PRECIS sugerem aumentos na frequência e intensidade de eventos extremos de chuva em 2071-2100, comparado ao presente.

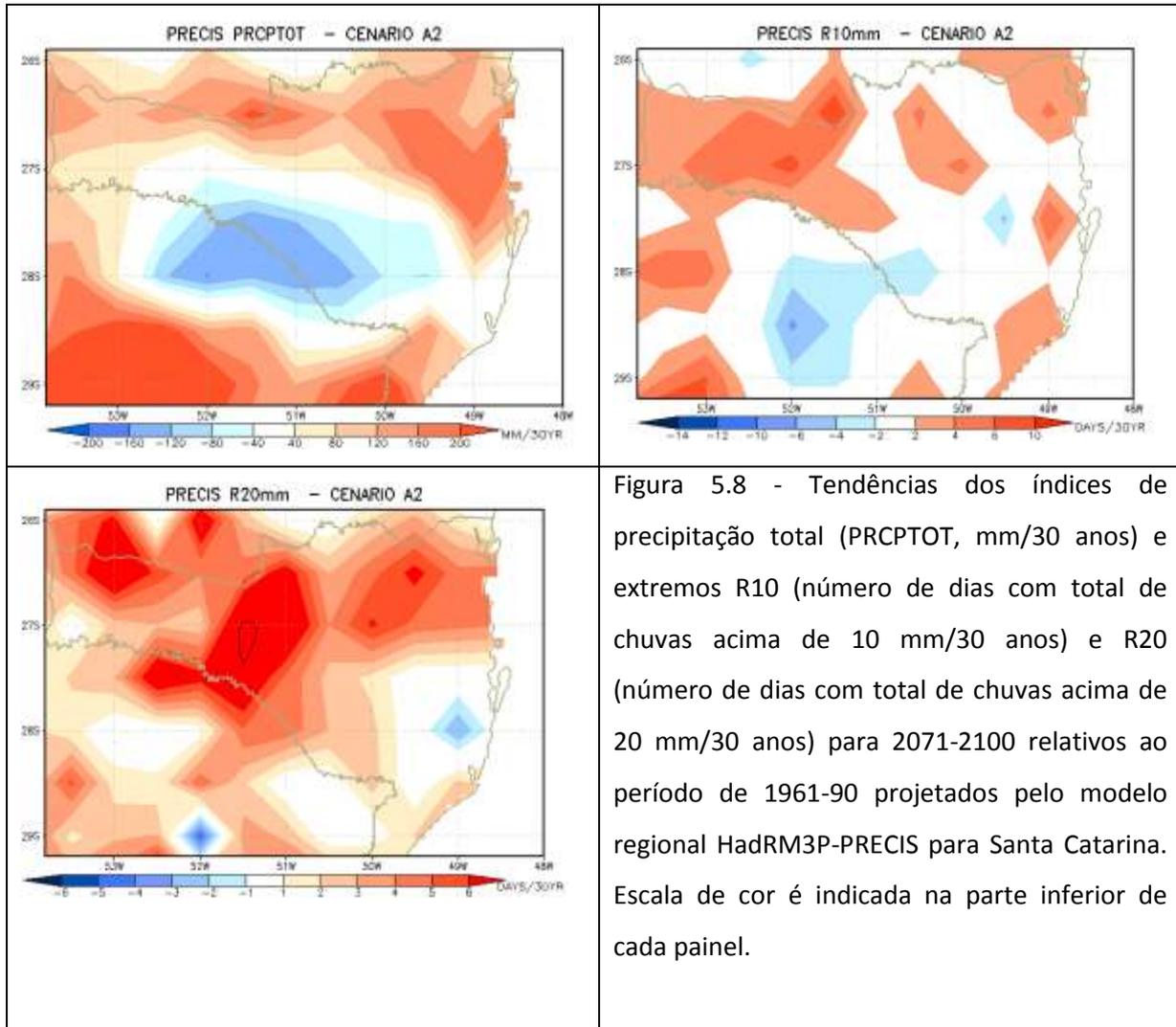


Figura 5.8 - Tendências dos índices de precipitação total (PRCPTOT, mm/30 anos) e extremos R10 (número de dias com total de chuvas acima de 10 mm/30 anos) e R20 (número de dias com total de chuvas acima de 20 mm/30 anos) para 2071-2100 relativos ao período de 1961-90 projetados pelo modelo regional HadRM3P-PRECIS para Santa Catarina. Escala de cor é indicada na parte inferior de cada painel.

Estas tendências são consistentes com uma continuidade na intensificação das tendências observadas nos últimos 50 anos no Sul do Brasil, com chuvas mais intensas. Isto pode ser afirmado com um alto grau de certeza para a América do Sul, ao sul de 20°S, a leste dos Andes, mas para a região tropical as incertezas ainda são altas. Porém, é importante lembrar que as projeções futuras de extremos mostram ainda grandes incertezas, inerentes aos resultados obtidos através da modelagem numérica, principalmente para projeções em escala regional.

Desta forma, podemos dizer que os padrões de anomalias positivas de precipitação no litoral de Santa Catarina durante a maior parte de 2008, culminando com recordes históricos mensais acima de 600 mm em novembro, no vale do rio Itajaí-Açu, não fazem parte dos padrões de variabilidade climática interanual mais conhecidos para a região, normalmente associados a fenômenos de escala planetária. As projeções de cenários de mudanças climáticas para o século XXI indicam aumento da incidência de fenômenos extremos de precipitação para Santa Catarina.

6. Como melhorar o monitoramento e a previsão de um evento extremo

O exemplo do vale do rio Itajaí-Açu é bastante ilustrativo de complexas respostas sociais na busca de adaptação aos extremos climáticos. Em resposta às devastadoras inundações em Santa Catarina, em 1983, atingindo de modo profundo o vale do rio Itajaí-Açu, desenvolveu-se um sistema de alerta para prever riscos de inundações e foram aperfeiçoados os sistemas de Defesa Civil, de modo a evacuar residências em áreas suscetíveis à inundação. Pode-se dizer que esta atividade foi coroada de sucesso, haja visto que diminuiu radicalmente o número de fatalidades devido a afogamento, inclusive nas recentes inundações. Porém, uma das respostas das pessoas, para diminuir a exposição ao risco de residir na planície de inundação do rio foi se mudar para terrenos mais elevados, principalmente em áreas de declividade moderada ou acentuada em cidades como Blumenau e vizinhas. Um dos resultados desta expansão populacional para áreas mais elevadas foi o desmatamento de encostas. O resultado é sobejamente conhecido no Brasil: a maior parte das fatalidades decorreu de deslizamentos de massa em encostas.

A análise expedita das imagens SAR de Santa Catarina realçam a importância de uso deste tipo de sensor orbital na detecção, mapeamento e monitoramento de áreas sujeitas ou afetadas por eventos de inundação. Pelas características deste tipo de informação (rapidez na obtenção das imagens devido à elevada resolução temporal e operacionalidade em condições atmosféricas adversas), seu uso deveria ser rotineiro em um sistema de gerenciamento vinculado às ações de detecção e de mitigação de inundações de ambientes deste tipo de riscos no país.

Dentro do processo de monitoramento das chuvas e de sua previsão, o Brasil tem hoje, condição bem melhor do que há uma década em função de investimentos que foram feitos em infraestrutura, em desenvolvimento de sistemas de observação, software de integração de dados e em formação de pessoal. No entanto, há ainda algumas fragilidades e carências onde investimentos ainda são necessários. Eventos como os observados no fim de 2008 em vários Estados do Brasil e, em particular, em Santa Catarina, demonstram que há vulnerabilidade a extremos de precipitação e indicam a necessidade de melhoria da infraestrutura em geral, mas em específico uma necessidade de investimentos nos sistemas de observação, no tratamento e disseminação da informação dos sistemas de previsão.

Sistemas de observação

Para realizar um prognóstico de tempo correto é absolutamente necessário fazer um diagnóstico adequado, o que depende da qualidade e quantidade das observações atmosféricas e ambientais, tanto convencionais como não-convencionais, assim como dos métodos de assimilação de dados usados pelos modelos numéricos.

Conforme visto na seção 4, a chuva foi monitorada por estações de superfície e por um radar do DECEA, instalado no Morro da Igreja, em Santa Catarina. As estações de superfície têm aumentado de número devido a investimentos expressivos feitos pelo Governo Federal, pelos Estados e até por empresas. Esses investimentos visaram a aquisição e instalação dos equipamentos. Em particular, no caso do INMET, está em fase de conclusão a instalação de aproximadamente 500 estações automáticas de superfície, distribuídas uniformemente pelo país e que permitiram analisar hora a hora o evento de Santa Catarina. No entanto, o custo maior envolvido numa rede de observações não é o investimento inicial, mas sim o de manutenção dessa rede e o custo de telecomunicação dos dados para as centrais de processamento. Garantia de recursos orçamentários para esse fim é fundamental para garantir seu bom funcionamento, 24 horas por dia, sete dias por semana. O Estado de Santa Catarina tem feito significativos investimentos na rede de observações de precipitação operada pelo CIRAM.

Radares meteorológicos são outras ferramentas fundamentais para o monitoramento da precipitação. O radar do DECEA, no Morro da Igreja, teve um papel importante para esse fim. No entanto, por estar localizado a uma altura de mais de 1800 metros, o radar não detecta com detalhe as chuvas na região litorânea. Investimentos em radares banda X para monitoramento local, em regiões como a costa de Santa Catarina, permitiriam uma melhor tomada de decisão pelos agentes de Defesa Civil. Outras regiões do país têm também carência de cobertura por radar. Analisando a cobertura de radar meteorológico no Brasil, na Figura 6.1, pode-se notar que, além de necessidades locais como a do Vale do Itajaí, há regiões em Minas Gerais e no Centro-Oeste que não estão cobertas.

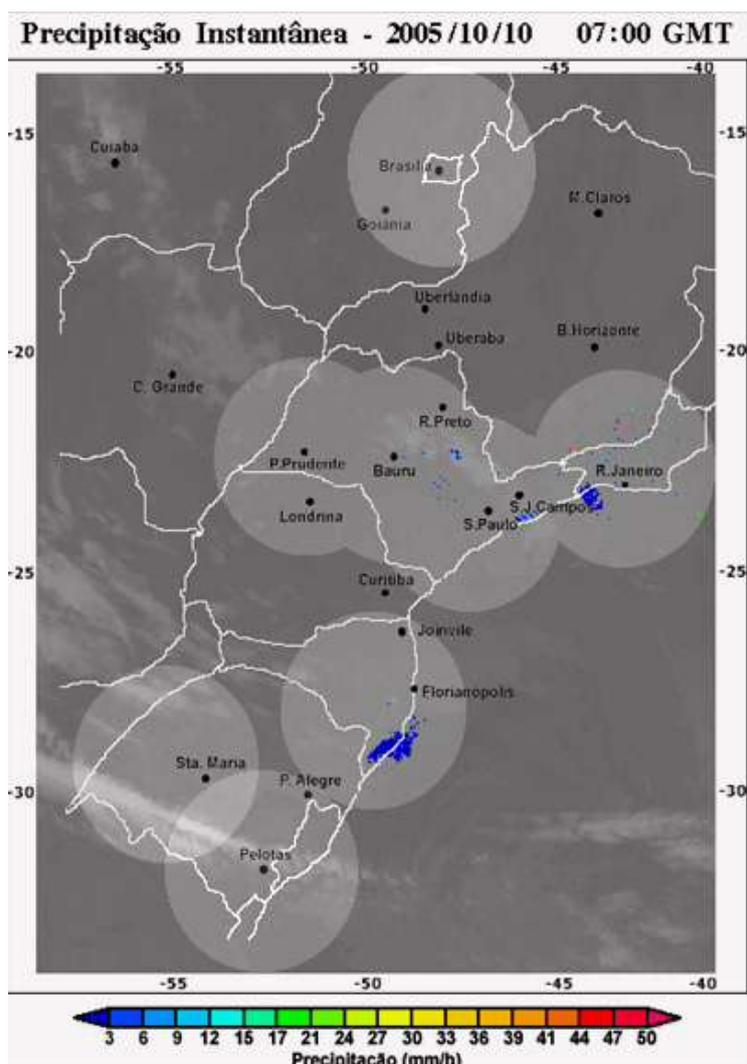


Figura 6.1 - Rede de radares meteorológicos nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Um aspecto que merece atenção no caso de eventos extremos é a cobertura por satélite geostacionário. Desde o final de 2006, um acordo com a NOAA/EUA promoveu o deslocamento do satélite GOES 10 para uma posição orbital no Equador sobre a América do Sul. Este satélite produz imagens do continente sul-americano a cada 15 minutos, permitindo o acompanhamento das causas da evolução das chuvas e dos sistemas meteorológicos. Ocorre que este satélite será desativado em 2009 e com isso o Brasil irá retornar à condição anterior, onde somente imagens a cada 3 horas são garantidas pela NOAA, proprietária e operadora dos satélites GOES. Outro satélite geostacionário que auxilia a cobertura do Brasil é o satélite europeu Meteosat, que se encontra numa posição desfavorável, muito à leste, para observação do Brasil. Nesse contexto temos uma situação desfavorável após a desativação do GOES 10, e o lançamento do novo GOES-R em 2015 que devido à sua alta capacidade de

varredura registrará imagens regulares da América do Sul pelo menos a cada 15 minutos. Nesse intervalo entre 2009 e 2015 teremos imagens insuficientes para monitorar as chuvas no Brasil se não houver nenhuma nova ação por parte da NOAA ou da EUMETSAT. Devemos lembrar que na época da guerra das Malvinas, os EUA, deliberadamente, alteraram a rotina de imageamento para impedir o uso de imagens pela Argentina, e por consequência o Brasil também ficou sem imagens. Por outro lado, países começam a se preocupar com essa deficiência, tal como a Venezuela que estuda adquirir um satélite geoestacionário para garantir acesso às imagens sobre seu país. Assim, é estratégico para o Brasil considerar a aquisição de um satélite geoestacionário para monitoramento das chuvas sobre o país. A Figura 6.2 mostra exemplos de cobertura do Brasil por um satélite geoestacionário.

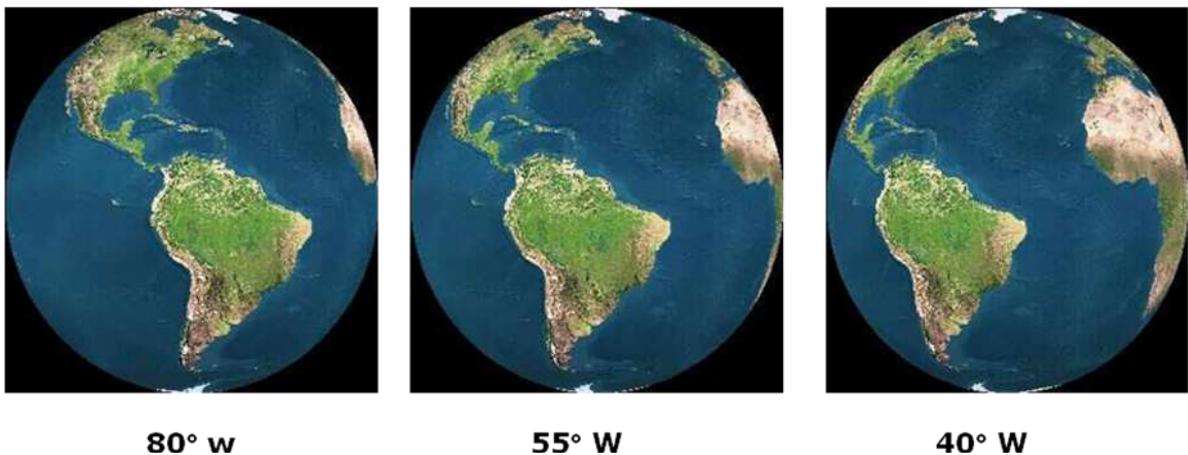


Figura 6.2 - Propostas de posicionamento orbital para um satélite geoestacionário para Meteorologia.

Além do satélite é importante mencionar que o processamento das imagens ainda tem algumas deficiências. O atual algoritmo baseado em imagens do satélite GOES 10, neste caso particular de fim de novembro, demonstrou que deve ser melhorado para chuvas quentes como as que ocorreram nessa ocasião sobre Santa Catarina. No entanto, outros casos de chuva extrema que envolvem tempestades são bem representados pelos dados oriundos de satélites. A grande contribuição do satélite GOES 10 neste caso, foi permitir ter uma visão geral e sinótica do fenômeno que estava ocorrendo. O satélite geoestacionário, devido sua alta resolução temporal e a capacidade de cobrir grandes áreas, permitiu reconhecer o fenômeno que estava ocorrendo e validar as previsões dos modelos numéricos.

Outro papel fundamental do satélite geoestacionário é o fornecimento de dados de temperatura, umidade e ventos que são utilizados para rodar os modelos numéricos de

previsão de tempo. Hoje o Brasil utiliza intensivamente esses dados que são responsáveis por uma significativa melhoria dos índices de acerto da previsão, principalmente nos últimos 10 anos. O satélite GOES 10 permitiu um acesso sem precedentes a esses dados que são assimilados pelos modelos de previsão.

Previsão Numérica do Tempo

Finalmente, a qualidade da previsão que é repassada para o público em geral, e para os órgãos tomadores de decisão, depende da equipe de meteorologistas, que com sua experiência, e conhecimento maximizam a utilidade dos modelos numéricos. A previsão numérica de tempo consiste em software que processa as informações de todas as fontes (estações de observação de superfície e radiossondas, radares e satélites, bóias marítimas, aviões comerciais, etc.) e utiliza as equações básicas da dinâmica dos fluidos e o conhecimento dos diversos processos físicos (nuvens, turbulência, radiação solar e terrestre, efeito da biosfera e da hidrosfera) para fazer previsões para os próximos dias. O detalhamento da previsão, chamado de resolução do modelo, é a distância entre pontos em que se obtém a previsão numa grade que cobre a região de interesse como esquematizado na Figura 6.3.

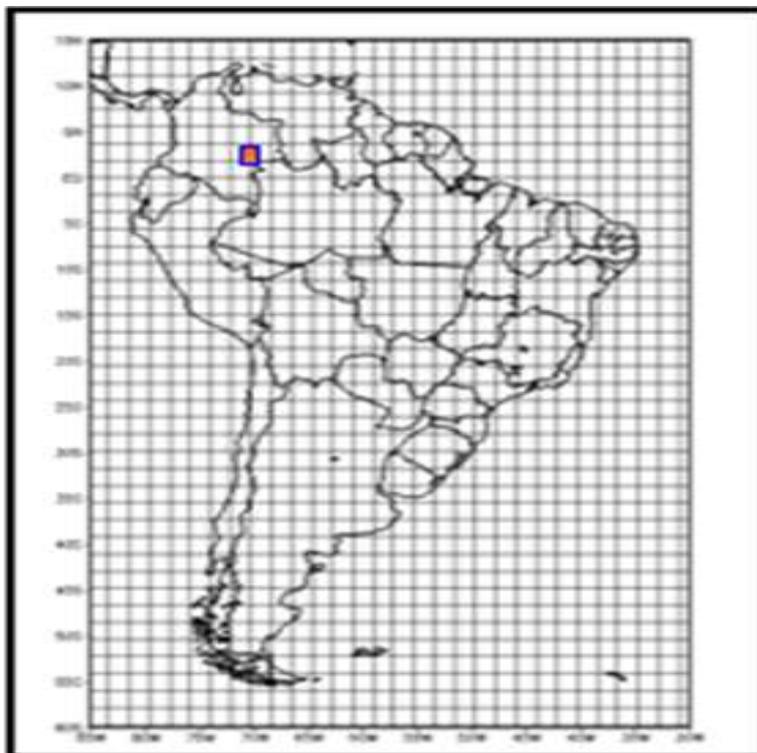


Figura 6.3 - Grade cobrindo a América do Sul e oceanos vizinhos.

A resolução com que um modelo de previsão operacional pode ser rodado depende fundamentalmente da capacidade dos sistemas de computação (supercomputadores) disponíveis. O sistema de supercomputação que está sendo adquirido para o INPE (recursos MCT/Fundos Setoriais e FAPESP) visa justamente melhorar a simulação de eventos extremos como este em todo o Brasil. Segundo o IPCC (2007) há indicações de que estes eventos podem se tornar mais frequentes com o aquecimento global. Idealmente, a simulação de eventos extremos de chuva deveria ter uma resolução de 1 km cobrindo toda a América do Sul.

Além de modelos numéricos de alta resolução, há um aspecto fundamental que é a representação de processos com características regionais marcantes. Na seção 4 foi mencionada a natureza das nuvens quentes que caracterizaram o evento de Santa Catarina e indicado que com alterações na forma de representar as nuvens é conseguida melhoria significativa da previsão de chuva na região do Vale do Itajaí. Essa demonstração é um exemplo de como o conhecimento que adquirimos através dos sistemas de observação deve ser usado para introduzir melhorias nos modelos de previsão numérica. Pesquisas enfocando os sistemas de precipitação que atingem o Brasil na estação chuvosa de cada região são fundamentais para a melhoria da previsão numérica dos mesmos. Este é um grande desafio para a comunidade científica brasileira.

Referências

Barros et al., 2008.

Barros, V., M. González, B. Liebmann and I. Camilloni, 2000: Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in southeastern South America. *Theor. Appl. Climatol.*, 67, 123-133.

Camilloni et al., 2005.

Díaz, A. F., C. D. Strudzinski and C. R. Mechoso, 1998: Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *J. Climate*, 11, 251-271.

Doyle M., e Barros V., 2002: Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. *J. Climate*, 15, 3394-3410

MARENGO J. A., Rusticucci, Matilde, Olga Penalba, M RENOM, 2008a. AN INTERCOMPARISON OF MODEL-SIMULATED IN EXTREME RAINFALL AND TEMPERATURE EVENTS DURING THE LAST HALF OF THE XX CENTURY: PART 2: HISTORICAL TRENDS In *Climatic Change* (In press)

MARENGO J. A., Jones, R, Alves, Lincoln Muniz, Valverde, M. 2008b, Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system In *International Journal of Climatology* (In press).

Nicolini, M., A. Celeste Saulo, Juan Carlos Torres and Paola Salio, CLIMATE VARIABILITY OVER SUBTROPICAL SOUTH AMERICA AND THE SOUTH AMERICAN MONSOON: A REVIEW, *Meteorológica*, 27 (1-2), 33-57, 2002

OBREGON, G. Dinâmica da variabilidade climática da precipitação sobre a América do Sul, Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, INPE-8604-TDI/789, 2003

OBREGON, G, MARENGO J. A. Caracterização do clima do século XX no Brasil: Tendências de chuvas e temperaturas médias e extremas. Relatório N°. 2. Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente – MMA, SBF, DCBio, 2007, p. 91

Vera and Silverstrini, 2008.