

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Meteorologia
Graduação em Meteorologia



Trabalho de Conclusão de Curso

**Estudo de eventos de granizo e enxurradas ocorridos no Rio
Grande do Sul entre 2008 e 2010**

João Rodrigo de Castro

Pelotas, 2014

João Rodrigo de Castro

**Estudo de eventos de granizo e enxurradas ocorridos no Rio Grande do Sul
entre 2008 e 2010**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr Mateus da Silva Teixeira
Prof. Dr. William Silva Barros

Pelotas, 2014

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C355e Castro, João Rodrigo de

Estudo de eventos de granizo e enxurradas ocorridos no rio grande do sul entre 2008 e 2010 / João Rodrigo de Castro ; Mateus da Silva Teixeira, Willian Silva Barros, orientadores. — Pelotas, 2014.

48 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) — Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2014.

1. Granizo. 2. Enxurradas. 3. Previsão. I. Teixeira, Mateus da Silva, orient. II. Barros, Willian Silva, orient. III. Título.

CDD : 551.5787

Elaborada por Maria Beatriz Vaghetti Vieira CRB: 10/1032

Banca examinadora:

Prof^ª Dr^ª Claudia Rejane Jacondino Campos

Prof. Dr. Júlio Renato Marques

Prof. Dr. Mateus da Silva Teixeira

Resumo

CASTRO, João Rodrigo. **Estudo de eventos de granizo e enxurradas ocorridos no Rio Grande do Sul entre 2008 e 2010**. 2014. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A ocorrência de granizo é um dos tipos de eventos meteorológicos extremos que causam grande impacto econômico nos locais onde são verificados. Baseado nessa importância, o objetivo principal deste estudo foi analisar o ambiente termodinâmico e sinótico associado à ocorrência de granizo e enxurradas. Os dados meteorológicos utilizados são de reanálise do CFSR-NCEP (Climate Forecast System Reanalysis – National Centers for Environmental Prediction) que têm resolução temporal de 6h e resolução espacial de 0,5°. Estas informações das variáveis meteorológicas são representativas das condições meteorológicas reinantes nas regiões de ocorrência de eventos de granizo e enxurrada ocorridos no Rio Grande do Sul no período entre os anos de 2008 e 2010. Os eventos foram selecionados a partir dos registros da Defesa Civil/RS. Foi possível observar que o período com maior ocorrência de granizo, são os meses de primavera e verão (de Setembro à Fevereiro) totalizando 35 eventos no período. Os meses preferenciais para a ocorrência de enxurradas também foram os do período de Setembro à Fevereiro, totalizando 79 eventos. Além disso, se determinou subjetivamente quais foram as variáveis atmosféricas mais importantes para a ocorrência de granizo dentro do período analisado, sendo encontrada como variável mais importante a umidade específica em 700hPa. Foi possível obter também resultados interessantes em relação às anomalias entre os eventos de granizo e enxurradas, o que mostrou uma diferença marcante, sob o ponto de vista do ambiente sinótico, entre os dois eventos. Por fim, através da Análise Discriminante de Fischer, foi possível obter um acerto de 71,74% na distinção entre os eventos de granizo e os de enxurradas, dentro do conjunto de casos de granizo e enxurradas avaliados.

Palavras-chave: granizo, enxurradas, previsão.

Abstract

CASTRO, João Rodrigo. **Study of hail and floods events occurred in Rio Grande do Sul state between 2008 and 2010.** 2014. 48f. Final Project (Undergraduate) - Undergraduate Program in Meteorology. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The occurrence of hail is a type of extreme weather events that cause great economic impact wherever they are checked. Based on this importance, the main objective of this study was to analyze the thermodynamic and synoptic environment associated with the occurrence of hail and floods . The meteorological data used are from NCEP - CFSR reanalysis (Climate Forecast System Reanalysis - National Centers for Environmental Prediction) that have temporal resolution of 6 hours and a spatial resolution of 0.5 °. This information on weather variables are representative of prevailing weather conditions in the regions of occurrence of hail and flood events that occurred in Rio Grande do Sul in the period between the years 2008 and 2010. The events were selected from the records of Civil Defense / RS. It was observed that the period with higher occurrence of hail, are the months of spring and summer (September to February) totaling 35 events in the period. The preferred months for the occurrence of floods were also the period from September to February, totaling 79 events. Furthermore, it was determined subjectively what were the most important atmospheric variables for the occurrence of hail within the period analyzed, being found as the most important variable in 700hPa specific humidity . It was also possible to obtain interesting results in relation to anomalies between the events of hail and floods, which showed a marked difference from the point of view of the synoptic environment between the two events. Finally, through the Fischer discriminant analysis, it was possible to obtain an adjustment of 71.74% in distinguishing between events of hail and floods within the set of 140 cases of hail and floods reviews.

Keywords: hail, floods, forecast.

Lista de Figuras

Figura 1	Região de estudo	21
Figura 2	Ilustração geométrica da discriminação pelo método de Fischer.....	25
Figura 3	Total de eventos de granizo e enxurradas no período entre os anos 2008 e 2010	27
Figura 4	Número de eventos de granizo por trimestre	28
Figura 5	Número de eventos de enxurradas por trimestre	28
Figura 6	Total mensal de ocorrências de granizo e enxurradas entre os anos 2008 e 2010	29
Figura 7	a) Anomalia de umidade específica em 700hPa; b) Anomalia de umidade específica em 850hPa;.....	
Figura 8	a) Anomalia da divergência do fluxo de umidade em 850hPa; b) Anomalia do escoamento em 850hPa.....	36

Figura 9	a) Anomalia da Temperatura do ar em 850hPa, b) Anomalia da diferença de geopotencial entre os níveis de 500 e 850hPa.....	37
Figura 10	a)Anomalia da magnitude do vento em 700hPa, b) Anomalia da altura geopotencial em 500hPa.....	38
Figura 11	a) Anomalia da altura geopotencial em 850hPa; b) Anomalia da altura geopotencial em 500hPa, c) Anomalia da temperatura do ar em 500hPa.....	39
Figura 12	a) Anomalia do cisalhamento vertical do vento entre os níveis de 700 e 850hPa, b) Anomalia da umidade relativa em 850hPa.....	40
Figura 13	a) Anomalia da advecção de temperatura em 850hPa, b) Anomalia da advecção de temperatura em 500hPa.....	42
Figura 14	a) Anomalia da altura geopotencial para toda a América do Sul em 850hPa, b) Anomalia da altura geopotencial para toda a América do Sul em 500hPa.....	43

Lista de abreviaturas e siglas

ABR	Abril
AGO	Agosto
AMJ	Abril-Maio-Junho
CAPE	Convective Available Potencial Energy
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CP	Componente Principal
CT	Cross Total
DEZ	Dezembro
EL	Equilibrium Level
FEV	Fevereiro
hPa	Hecto Pascal
IS	Índice Showalter
JAS	Julho-Agosto-Setembro
JBN	Jato de Baixos Níveis
JFM	Janeiro-Fevereiro-Março
JUL	Julho
JUN	Junho
K	Kelvin
Km	Kilômetro

LFC	Level Free Convective
LI	Lifted Index
MAI	Maio
NCEP	National Center Environment Prediction
NOV	Novembro
OND	Outubro-Novembro-Dezembro
OUT	Outubro
SET	Setembro
TT	Totals Totals Index
UTC	Universal Time Cordinated

Lista de equações

Equação 1	Anomalia	21
Equação 2	Vetor médio dos dados	21
Equação 3	Matriz de covariância conjunta	22
Equação 4	Vetor discriminante	22
Equação 5	Função discriminante linear de Fisher	22
Equação 6	Ponto médio	23
Equação 7	Componentes Principais	24
Equação 8	Teste de Jollife	2

Sumário

Introdução	13
Revisão Bibliográfica	15
2.1 Ingredientes necessários para a ocorrência de granizo	15
2.2 Sistemas meteorológicos contribuintes para a formação de granizo	18
2.3 O problema da previsão de granizo	19
Materiais e métodos	20
3.1 Materiais.....	20
3.2 Métodos	21
3.2.1 Análise de Componentes Principais.....	22
3.2.2 Função discriminante	24
Resultados e discussão	28
4.1 Eventos de granizo e enxurradas ocorridos no período	28
4.2 Variáveis meteorológicas mais importantes para a ocorrência de granizo	30
4.2.1 Da primeira componente principal.....	31
4.2.2 Da segunda componente principal	32
4.2.3 Da terceira componente principal.....	33
4.2.4 Da quarta Componente Principal	34
4.3 As diferenças de padrão sinótico entre os eventos de granizo e enxurradas	35
4.4 Resultados da discriminação	43
Conclusões.....	46
Referências	47

Introdução

A ocorrência de eventos severos é de extrema importância tanto sob o ponto de vista econômico como também social, visto que eventos de tempo severo podem trazer grandes prejuízos para a população, sejam devido às altas taxas de precipitação, ventos intensos, granizos e até mesmo tornados. Todos esses fenômenos podem ser muito prejudiciais à economia dos locais nos quais eles são observados, pois dependendo de sua intensidade, podem destruir lavouras inteiras de diversas culturas agrícolas. Uma atenção especial deve ser prestada em relação à ocorrência de granizo, pois dada a característica agrícola do estado do Rio Grande do Sul, o qual apresenta 30% de sua estrutura econômica relacionada à agroindústria (ASERS, 2011), este fenômeno atmosférico pode causar grandes perdas econômicas a uma região e até mesmo a todo o Rio Grande do Sul.

De maneira bastante simplificada pode-se definir o granizo como a precipitação na forma sólida, e sua ocorrência está altamente relacionada com a intensidade das tempestades, visto que são os transportes de ar no interior da tempestade que acabam possibilitando a sua formação. Segundo Vianello e Alves (1991) as fortes correntes ascendentes e descendentes presentes no interior das tempestades, acabam permitindo o estabelecimento de um ciclo de ar no interior da nuvem onde ocorre então, devido à colisão contínua das partículas de água e gelo, o crescimento das gotas e/ou pedras. Esse processo de formação ocorre a partir do momento no qual a água presente no interior da nuvem é elevada pelas correntes de ar até alturas além da isoterma de 0°C, permitindo assim que a água atinja a temperatura na qual ocorre o processo de fusão, formando assim as pedras de gelo.

Devido a sua característica destruidora, o granizo é um dos fatores que devem ser observados para que uma tempestade possa ser classificada como

severa, conforme a definição utilizada nos Estados Unidos proposta por Johns e Doswell (1992).

Tendo em vista a importância dos impactos econômicos gerados por este tipo de evento, torna-se evidente a necessidade de que sejam desenvolvidos estudos para que se possa prever com uma maior destreza a possibilidade de ocorrência de granizo. Com isso, o objetivo geral do trabalho é analisar o ambiente termodinâmico e sinótico associado à ocorrência de granizo e enxurradas.

Os objetivos específicos são:

- Selecionar os casos de ocorrência e não ocorrência de granizo dentro do período a ser estudado.
- Classificar quais grupos de variáveis meteorológicas representa melhor a condição de ocorrência de granizo.
- Analisar o padrão sinótico em eventos de granizo e enxurradas.
- Criar uma função discriminante para a detecção de situações favoráveis à ocorrência de granizo.

Revisão Bibliográfica

O estudo de tempestades é um dos grandes desafios da meteorologia, seja pela dinâmica complexa de sua formação e desenvolvimento, ou pelos impactos econômicos que eventos dessa natureza geram. As tempestades podem ser divididas em eventos menos intensos e os severos, sendo que o critério para classificar uma tempestade como severa, é que esta seja capaz de produzir granizo acima de 2 cm no solo, ventos destrutivos ou rajadas de 26 ms^{-1} (50kt), além de tornados (JOHNS; DOSWELL, 1992). Complementarmente a essa, existe também a definição utilizada pelos centros australianos (MILLS; COLQUHOUN, 1998), sendo que além dos itens acima mencionados, para uma tempestade ser considerada severa ela deve apresentar também, intensa precipitação e gerar enchentes.

2.1 Ingredientes necessários para a ocorrência de granizo

Antes de se introduzir uma discussão sobre os sistemas meteorológicos capazes de gerar granizo, é necessário fazer uma revisão a respeito dos processos de instabilização da camada atmosférica. Um dos principais combustíveis para a ocorrência de eventos severos é a advecção de umidade e calor, pois como discutido por Doswell et al. (1996), é necessário que exista um *Lapse Rate* ambiental condicionalmente instável, além de umidade suficiente associada as parcelas em ascensão até o nível de convecção livre (LFC).

O transporte de calor em baixos níveis instabiliza a atmosfera criando um ambiente propício para um grande desenvolvimento vertical, uma vez que uma camada de ar frio sobreposta a uma camada de ar quente é um dos fatores apontados por Nascimento (2012) como favorável ao desenvolvimento de

convecção profunda. Um dos mecanismos de instabilização da atmosfera na região Sul do Brasil, é conhecido como Jato de Baixos Níveis (JBN), que é o estabelecimento de um fluxo de norte localizado a leste da Cordilheira dos Andes e que tem como característica o transporte de umidade e *momentum*, favorecendo com isso o desenvolvimento vertical das nuvens (SALIO et al., 2006) sobre as regiões na qual atua.

Devido à necessidade de se quantificar o nível de instabilidade da atmosfera, os índices de estabilidade foram elaborados para tornar mais simples a avaliação do potencial de tempo severo de uma determinada região utilizando dados de registro observacional a partir de estações meteorológicas de ar superior (PETTY, 1958). O principal objetivo destes índices é descrever como está o estado termodinâmico da atmosfera baseado em equações relativamente simples e de fácil aplicação operacional que levam em conta medidas observadas ou mensuradas de diversos níveis da camada atmosférica, desde baixos até altos níveis.

Um exemplo de índice de estabilidade é o Índice Levantamento (*Lifted Index* – LI). O cálculo deste índice é bastante simples, pois consiste apenas da subtração entre a temperatura do ar em 500hPa e a temperatura de uma “parcela” ascendida desde a superfície até 500hPa. Se encontrarmos como resultado valores negativos, ou seja, a temperatura da parcela for maior que a do ambiente, então poderemos dizer que existe algum nível de instabilidade atmosférica. Valores entre -6 e -9 são considerados como muito instável e precursores de tempestades severas. Nota-se, que o índice LI tem como referência apenas um nível atmosférico e que, portanto, não leva em consideração toda a coluna atmosférica. Existem outros índices, nos quais outras camadas contribuem de alguma maneira em sua elaboração, porém, mesmo assim ainda são restritivos a apenas algumas camadas. Segundo Yamasaki (2012) o uso de apenas um índice de instabilidade, ou até mesmo de índices que combinem uma camada ou outra da atmosfera não é recomendado, pois não é possível descrever de maneira adequada o comportamento dinâmico da atmosfera baseado apenas em um índice de instabilidade, sendo que o ideal é a avaliação conjunta de vários índices.

O único índice que leva em conta todos os níveis da atmosfera é a CAPE (*Convective Available Potential Energy*), pois é uma medida integral entre o Nível de Convecção Livre (LFC) e o Nível de Equilíbrio (EL). Com isso é calculado o quanto de energia tem-se disponível para a convecção. Assim como os demais índices,

para a CAPE também são atribuídos valores indicadores da intensidade das tempestades, sendo que para a ocorrência de tempestades muito severas esses valores estão acima de 2500 J/kg.

Existem outros índices de estabilidade bastante utilizados. São eles:

- Índice de Showalter – similar ao *Lifted*, com a diferença de que a parcela de ar deve ser ascendida desde o nível de 850 hPa. Nesse índice, para valores menores que -4 indicam a possibilidade de ocorrência de tempestade forte à severa.
- Índice dos totais – é a conjunção de dois outros índices que levam em consideração a diferença entre as temperaturas do ar em 850 hPa e em 500 hPa (VT), além de levar em conta a umidade em baixos níveis. TT é dado por: $TT=VT + CT$, VT é o índice Vertical Total e CT é o índice Cross Total. VT é dado pela subtração da temperatura do ar nos níveis de 850 hPa e 500 hPa respectivamente. Já O CT leva em conta a umidade em baixos níveis, e é dado pela subtração da temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa e a temperatura do ar em 500 hPa. Para valores de TT acima de 49 se pode esperar a ocorrência de algumas tempestades severas e até mesmo de tornados.
- Índice K – é semelhante ao Total Total, diferenciando-se pela presença de umidade em 700 hPa. Associa probabilidades de ocorrência de tempestade em função dos valores encontrados em sua expressão. Probabilidade de ocorrência acima de 90% é atribuída para valores maiores de 40.

Uma pergunta pertinente é: qual é o melhor índice para cada região? Ainda, aqueles valores considerados como indicativos de tempestades severas funcionam em outros locais? Tomaziello e Gandu (2006) avaliaram os índices de estabilidade Showalter (IS) e o índice Totals Totals (ITT) para a região de São Paulo e sugeriram que é necessário o desenvolvimento de um ajuste em relação a estes valores para que indiquem melhor a ocorrência de tempestades na região por eles avaliada. Seguindo outra linha, Cardoso et al. (2006) analisaram vários índices de estabilidade para verificar qual melhor explicava a variabilidade de determinadas faixas de precipitação para a cidade de Porto Alegre, chegando a conclusão de que havia uma dependência da época do ano (o estudo foi feito para os meses de Janeiro e Julho) indicando uma dependência do tipo de massa de ar atuante. Os autores observaram

ainda, que para Janeiro os que melhor explicavam a variabilidade da precipitação eram os índices K, Lifted e Cross Total, enquanto que para o mês de Julho eram os índices Vertical Total e Cross Total que melhor explicavam a variabilidade da precipitação para a localidade em estudo.

2.2 Sistemas meteorológicos contribuintes para a formação de granizo

São vários os sistemas de precipitação que podem ocasionar eventos severos na região sul do Brasil e, conseqüentemente, a ocorrência de granizo em superfície. Dentre eles, os mais comumente observados são os sistemas frontais, as linhas de instabilidade, os cavados pré-frontais, além dos sistemas convectivos de meso-escala, sendo que estes sistemas possuem como mecanismos de formação fatores mecânicos e termodinâmicos, como aquecimento desigual do solo e levantamento do ar.

Os sistemas frontais são consequência do surgimento de ciclones em superfície devido à instabilidade baroclínica, que é resultado do gradiente meridional de temperatura (PINTO; ROCHA, 2006). Já os cavados, são “alongamentos” dos sistemas de baixa pressão, e por isso possuem as mesmas características destes como circulação horária e convergência em baixos níveis, fatores estes que proporcionam o levantamento do ar. Fatores termodinâmicos também influenciam na severidade das tempestades ocasionadas pelos sistemas frontais, por exemplo, quando o gradiente horizontal de temperatura é muito intenso as parcelas de ar são impulsionadas para cima, já que o ar frio por ser mais denso acaba agindo como uma cunha, dando início a uma grande ascensão vertical e conseqüente formação de intensas nuvens convectivas. Conceituados por Houze (1993), existem também os Sistemas Convectivos de Mesoescala que são aglomerados de células tempestuosas. Estes sistemas possuem como característica comum, uma área de precipitação contínua, que pode ser parte estratiforme e parte convectiva. Estes podem ser divididos em linhas de instabilidade e também em um tipo muito especial chamado Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM). Estes sistemas consistem de uma grande área de precipitação, que se mantém de forma organizada por um longo período de tempo e com uma extensa área. A técnica proposta por Maddox (1980) para classificação de evento como CCM é baseada em imagens de sensoriamento

remoto, mais especificamente em técnicas de realce em imageamento do satélite meteorológico, que levam em conta a temperatura de brilho do topo do aglomerado convectivo, além de considerar, também, a sua área de abrangência e também o seu tempo de vida. Ressalta-se que o regime de precipitação na região sul do Brasil é resultado principalmente da ação de sistemas frontais, sendo que os demais mecanismos de precipitação como os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM's) agem principalmente na primavera (PIVA; ANABOR, 2006).

Por outro lado, as linhas de instabilidade são sistemas nos quais ocorre o avanço organizado de uma série de células convectivas, sendo que esta organização pode dar-se em linha reta ou curva (REBOITA et al, 2010). Dependendo da orientação com a qual ocorre a propagação das células, podem ser registradas altas taxas de precipitação, sendo comum a observação de intensa atividade elétrica, fortes ventos, granizo e até tornados (NEWTON, 1950).

2.3 O problema da previsão de granizo

A previsão de granizo é baseada na previsão da ocorrência de tempestades, pois se assume que em condições de uma atmosfera extremamente instável irá ocorrer um grande desenvolvimento vertical e com isso a célula poderá ultrapassar facilmente a isoterma de 0°C (273 K) permitindo assim o início do processo de fusão.

Um dos grandes problemas da previsão de granizo é a dinâmica complexa das tempestades, que soma-se com o relativo curto alcance do instrumento (operacionalmente os radares operam com um alcance de 200km), dificultando assim que seja feita uma previsão mais precisa. Além disso, a única informação concreta de que se dispõem é de que existem bolsões de granizo no interior da tempestade (no caso de utilização de radares de dupla polarização), não há, portanto, certeza se o granizo existente no interior da nuvem irá de fato chegar ao solo na forma sólida.

Tendo em vista os pontos apontados até então, torna-se evidente a necessidade de que sejam desenvolvidos estudos para que se possa prever com uma maior destreza a possibilidade de ocorrência de granizo, dado o grande impacto que este tipo de evento severo causa na sociedade em geral.

Materiais e métodos

3.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados dados de ocorrência e não ocorrência de granizo que fazem parte do banco de dados da Defesa Civil do Rio Grande do Sul, registrados dentro do período de 2008 até 2010. Estes dados encontram-se disponíveis no banco de dados da Defesa Civil (<http://www.defesacivil.rs.gov.br>).

As variáveis meteorológicas utilizadas neste estudo, foram escolhidas em função da fundamentação teórica sobre instabilização da atmosfera (NASCIMENTO, 2012) e também através das variáveis que teoricamente contribuem para a manutenção e/ou desenvolvimento de tempestades. Em função disso, foram selecionadas as seguintes variáveis: temperatura do ar em 850hPa (K), temperatura do ar em 500hPa (K), geopotencial em 500hPa e 850hPa (gpm), componentes u e v do vento nos níveis de 850hPa, 700hPa e 200hPa (m/s), umidade específica (g/kg) e umidade relativa em 850hPa e 500hPa (%). Além disso, foram calculadas a divergência do vento em 200hPa, a advecção de temperatura em 850hPa e também a divergência do fluxo de umidade em 850hPa e em 700hPa.

Os dados atmosféricos utilizados neste estudo advêm da Reanálise do NCEP-CFSR (SAHA et. al, 2010) e podem ser obtidos através do site: (csf.ncep.noaa.gov/cfsr/downloads). Estes dados possuem resolução espacial de 0,5° de latitude e longitude, com abrangência global, e resolução temporal de 6 horas, sendo os dados referentes ao horário sinótico das 12 UTC (*Universal Time Cordinated*). A justificativa pela opção de utilizar informações de dados referentes ao horário sinótico das 12 UTC é pelo fato de que neste horário, há uma quantidade maior de observações meteorológicas, o que pode melhorar a qualidade da reanálise.

3.2 Métodos

Os dados utilizados dividem-se em casos (eventos) de “ocorrência” e “não ocorrência” de granizo, sendo que foram classificados como dados de “não ocorrência”, aqueles classificados junto à Defesa Civil como casos de enxurradas, eventos estes que, além de causar grandes impactos sócio-econômicos, devem apresentar as mesmas características em relação às informações meteorológicas dos eventos de granizo. Os casos selecionados, não possuem a data de ocorrência coincidente com os demais casos. Essa metodologia justifica-se pelo fato de que dentro da escala sinótica, as variáveis meteorológicas apresentam aproximadamente os mesmos valores. O conjunto de dados de ocorrência e não ocorrência de granizo foram organizados por frequência mensal, trimestral e também anual com a intenção de permitir que fosse feita uma análise sazonal da ocorrência destes eventos, a fim de verificar os períodos de maior probabilidade de ocorrência.

Do grupo de eventos organizados de acordo com a frequência trimestral, foram calculadas as médias de cada uma das 18 variáveis meteorológicas citadas, a fim de gerar campos de anomalias entre os eventos de granizo e enxurradas. Tais campos, foram gerados através da subtração entre a média trimestral de cada variável meteorológica do grupo 1 e a média trimestral das variáveis do grupo 2 como definido pela equação 1 :

$$\text{Anomalia} = M_{g1} - M_{g2} \quad (\text{Eq. 1})$$

M_{g1} se refere à média de cada variável do grupo 1 (granizo) e M_{g2} se refere à média de cada variável do grupo 2 (enxurradas).

Foram empregados neste estudo dois métodos estatísticos que nos permitem obter informações a respeito dos conjuntos de dados utilizados: Análise de Componentes Principais (ACP) e Função Discriminante Linear de Fischer, sendo que ambos os métodos são realizados de maneira independente, onde não é necessário utilizar resultados de um para gerar o outro.

A Análise de Componentes Principais foi utilizada com o intuito de determinar quais eram as variáveis mais importantes para a ocorrência de granizo na região de estudo. Já a Função Discriminante de Fischer foi utilizada por que permite que seja realizada uma distinção entre dois grupos diferentes através da aplicação de técnicas estatísticas.

Os dados utilizados para o cálculo de ambos os métodos foram as médias das 18 variáveis citadas anteriormente. Estes dados correspondem às médias obtidas para a região de estudo (Fig. 1), que é formada pelo território do estado do Rio Grande do Sul e também as áreas adjacentes a este como o Oceano Atlântico, Uruguai, Argentina e também o estado de Santa Catarina.

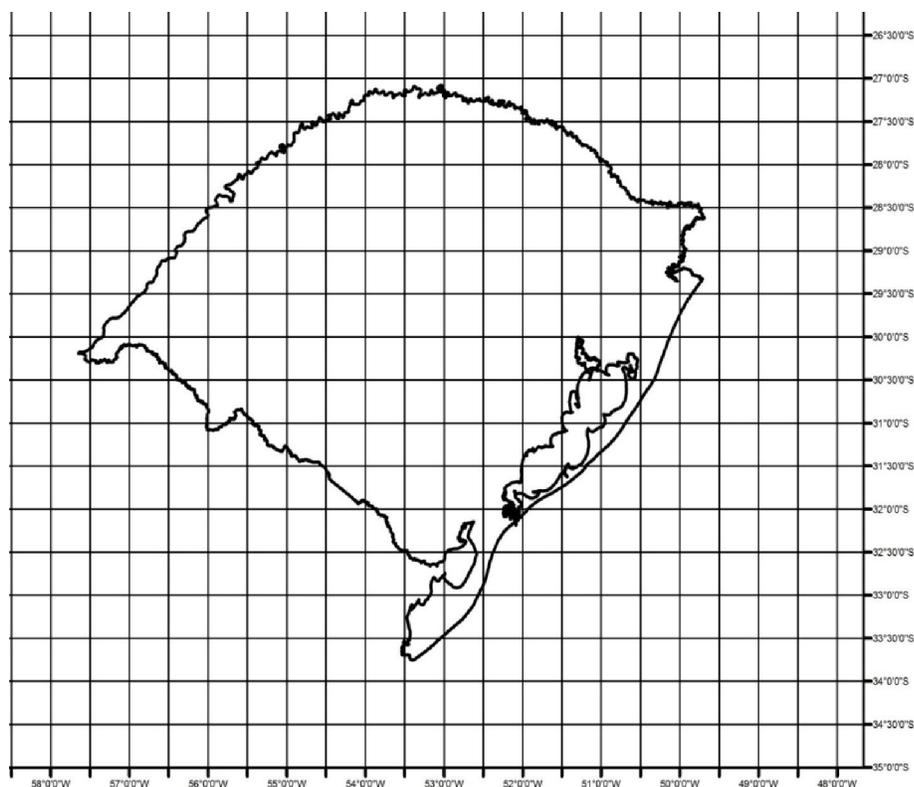


Figura 1 – Representação da região de estudo, sendo que os pontos de grade apresentam resolução espacial de $0,5^\circ$.

3.2.1 Análise de Componentes Principais

A determinação das variáveis mais importantes para a ocorrência de granizo foi efetuada através da Análise de Componentes Principais. Este método permite reduzir um conjunto com um grande número de dados, em um conjunto muito menor

formado de novas variáveis (WILKS, 2006). Este conjunto de novas variáveis são combinações lineares de cada uma das variáveis originais, e estas combinações lineares são escolhidas como a fração máxima possível da variabilidade contida nos dados originais. Dados atmosféricos e outros campos geofísicos, geralmente apresentam uma grande correlação entre as variáveis e por isso, o uso da ACP resulta na obtenção de uma representação mais compacta dessas variações.

A ACP foi obtida através da matriz de correlação do grupo de granizo já que esta padroniza os dados evitando assim erros que podem ser causados devido a maior magnitude de algumas das variáveis atmosféricas como por exemplo a umidade relativa do ar. As componentes principais (CP's) (Equação 2) são obtidas através da projeção das anomalias dos dados originais $[X - X']$, nos autovetores da matriz de correlação $[R]_X$:

$$U_{kk} = e^T x' \quad (\text{Eq. 2})$$

Na Equação 2, e^T é a transposta da matriz de autovetores obtida a partir da matriz de correlação de X. Já X' , é a matriz de anomalia obtida através da subtração entre cada variável atmosférica e sua respectiva média.

Uma porção do total da variabilidade dos dados está distribuído em cada uma das CP's, sendo que a primeira CP é a que retém a maior variabilidade, a segunda CP contém a segunda maior variabilidade e assim sucessivamente. Com o objetivo de escolher com quantas CP's o estudo seria realizado, foi aplicado o teste proposto por Jolliffe (2002) que determina limites mínimos e máximos ($70\% < R < 90\%$) do somatório das variabilidades contidas em cada CP. Tal limite é obtido através da equação 3:

$$R^2 = \lambda / \sum \lambda_{kk} \quad (\text{Eq. 3})$$

Na Equação 3, λ são os autovalores da matriz de correlação e R é o total da variabilidade contida em cada CP. Assim, como cada CP possui apenas um autovalor associado, é possível obtermos o quanto da variabilidade dos dados está contida em cada uma das 18 CP's. O cálculo é realizado então para cada uma das

CP's, sendo atribuído no numerador o autovalor respectivo de cada CP, e no denominador, temos o somatório dos 18 autovalores.

A informação de quais variáveis são mais importantes para a ocorrência de granizo, foi obtida através da interpretação dos autovetores da matriz de correlação dos dados de granizo. Estes constituem um novo sistema ordenado, onde são projetadas as componentes principais, sendo que cada autovetor está associado a uma variável atmosférica.

Neste estudo foi adotado um critério subjetivo de truncamento dos autovetores, onde foram avaliados somente 5 dos 18 autovetores. A ordem de importância de cada elemento do autovetor (e portanto, de cada variável) é dada pelo módulo destes, sendo então o módulo interpretado como o peso de cada autovetor, ou a importância de cada variável meteorológica na CP. Por outro lado, o sinal de cada autovetor indica de que forma é a contribuição deste para a CP, se positivo a contribuição é construtiva e se o sinal for negativo, então a contribuição do autovetor é destrutiva. Contudo, neste estudo não é avaliada de que maneira se dá a contribuição de cada autovetor para cada CP.

3.2.2 Função discriminante

Ao conjunto de casos de granizo e não granizo, neste caso enxurradas, identificados por meio dos dados da Defesa Civil, aplicou-se uma análise linear discriminante, método estatístico multivariado que permite a separação de dados multivariados objetivamente em dois ou mais grupos (WILKS, 2006).

Para a implementação deste método, primeiramente é necessário obter-se o vetor da média dos dados observados, sendo a média obtida através do seguinte cálculo:

$$\mathbf{X}_m = \frac{1}{n} [\mathbf{x}] \mathbf{1} \quad (\text{Eq. 4})$$

Nesta equação, \mathbf{X}_m (em negrito, seguindo a notação convencional de vetores) representa o vetor da média das variáveis de cada grupo; n representa o

número de elementos no grupo; $[X]$ é a matriz de dados de cada grupo; e $\mathbf{1}$ é o vetor ($n \times 1$) contendo somente o número 1.

Para dar continuidade no processo de obtenção da função discriminante, é necessário obter-se a matriz de covariância conjunta $[S_{pool}]$, entre os grupos de granizo (grupo 1) e enxurradas (grupo 2). Para tanto, utiliza-se a expressão:

$$[S_{pool}] = \frac{n_1 - 1}{n_1 + n_2 - 2} S_1 + \frac{n_2 - 1}{n_1 + n_2 - 2} S_2 \quad (\text{Eq. 5})$$

Na equação X, n_1 é o número de elementos do grupo 1; n_2 é o número de elementos do grupo 2, S_1 é a matriz de covariância do grupo 1; e S_2 é a matriz de covariância do grupo 2.

O vetor discriminante, que aponta para a máxima separação entre os dois grupos no espaço K-dimensional, definido pelas k variáveis, é dado pela seguinte equação:

$$\mathbf{a} = [S_{pool}]^{-1} (X_1 - X_2) \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo o primeiro termo a inversa da matriz de covariância conjunta entre os grupos de dados, X_1 e X_2 são as médias dos grupos 1 e 2;

A decisão de classificar um evento como pertencente ao grupo 1 ou grupo 2, é feita de acordo com a Função Discriminante de Fischer. Como cada grupo tem uma projeção dos dados no vetor discriminante \mathbf{a} , a discriminação é feita comparando os valores da função discriminante com o valor do ponto médio que separa os dois grupos de dados no vetor \mathbf{a} . A função discriminante é dada por:

$$\bar{\delta} = \mathbf{a}^T X \quad (\text{Eq. 7})$$

sendo o primeiro termo a transposta do vetor discriminante e X é o grupo de dados ;

O valor que determina o ponto de separação dos grupos é dado pelo ponto médio entre as médias dos grupos, que é obtido na equação X :

$$m = \frac{1}{2} (\mathbf{a}^T X_1 + \mathbf{a}^T X_2) \quad (\text{Eq. 8})$$

cujos termos são aqueles citados nas equações anteriores.

A análise discriminante de Fischer permite então, após projetar os dados representativos dos eventos de granizo e enxurradas no vetor \mathbf{a} , obter um fator espacialmente delimitante entre os dois grupos. Assim, elementos posicionados acima do ponto médio são interpretados como eventos do grupo 1, e os elementos posicionados abaixo do ponto médio, são interpretados como eventos do grupo 2.

Na figura Fig. 2, é apresentado um exemplo em duas dimensões da discriminação pelo método de Fischer. No exemplo, as variáveis de temperatura e precipitação de duas regiões distintas dos Estados Unidos foram utilizadas para realizar a discriminação. O grupo 1 (x's) e o grupo 2 (círculos) foram discriminados utilizando o mesmo método apresentado neste estudo.

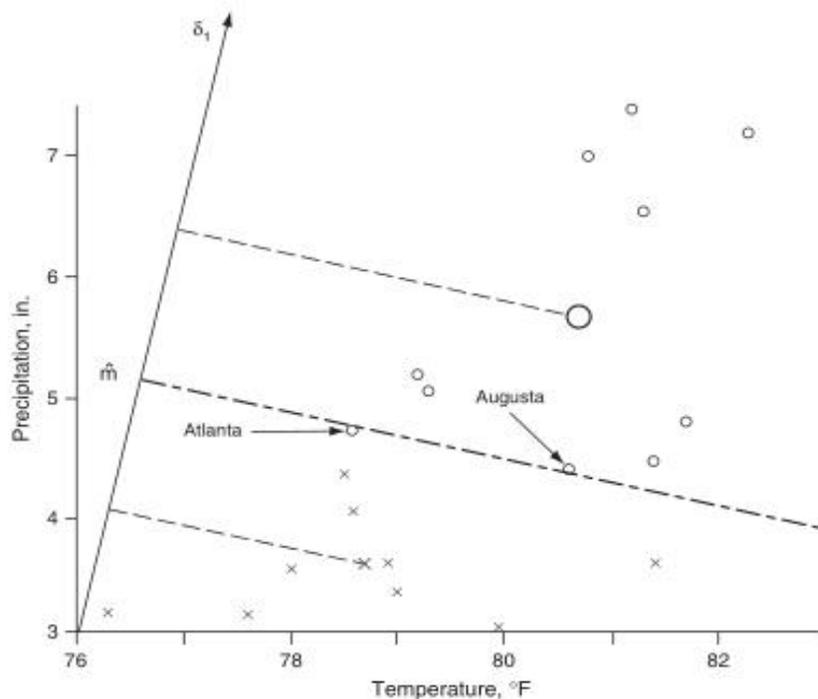


Figura 2 - Ilustração geométrica da discriminação pelo método de Fischer para um caso com $k=2$ variáveis.

Fonte: Adaptado de Wilks, 2006

Na Figura 2, o eixo das ordenadas são os valores de precipitação em polegadas (inch). Já nas abscissas, os valores correspondem à temperatura do ar ($^{\circ}\text{F}$). A linha pontilhada na parte inferior representa a média do grupo 1, enquanto a linha pontilhada da parte superior é a média do grupo 2. O ponto médio (m) é a linha tracejada entre as médias dos dois grupos. Assim, com a figura apresentada, é possível observar de que maneira se dá a discriminação entre os grupos fazendo uso da Função Discriminante de Fischer, sendo o resultado obtido uma separação espacial dos dados em função das médias de cada grupo.

Resultados e discussão

4.1 Eventos de granizo e enxurradas ocorridos no período

Depois de selecionados os casos, uma análise sazonal foi realizada com a intenção de identificar os períodos do ano nos quais as ocorrências de granizo e enxurradas foram mais observados.

Considerando a frequência anual (Fig. 3), observa-se que: i) no ano de 2009 foi registrada a maior frequência da ocorrência de granizo, totalizando vinte quatro casos, seguido do ano de 2008 com treze casos e 2010 que totalizou apenas nove casos registrados pela Defesa Civil; ii) o ano com maior frequência de enxurrada foi 2009 com quarenta e quatro casos, seguido de 2010 com quarenta e três casos e 2008 com cinco casos.

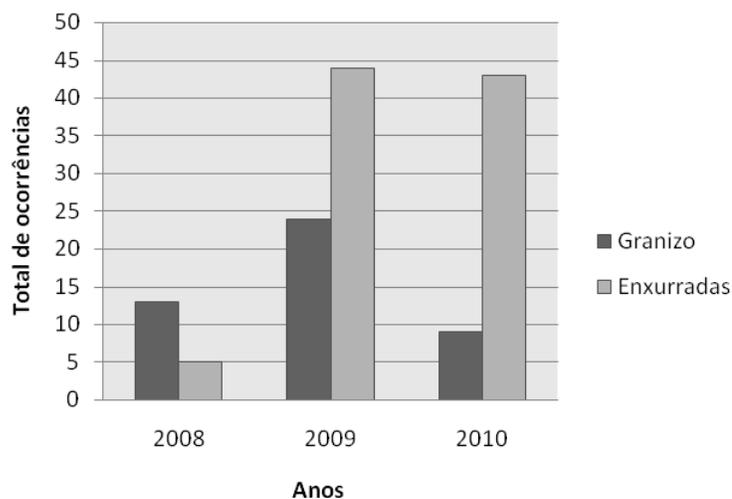


Figura 3 – Total de eventos de granizo e enxurradas no período entre os anos 2008 e 2010.

A análise trimestral dos eventos (Fig. 4) mostrou que: i) para os eventos de granizo os trimestres com maior frequência de ocorrência foram JAS-OND de 2010, ambos com nove casos, seguidos de OND de 2008 e JFM de 2009 com seis casos;

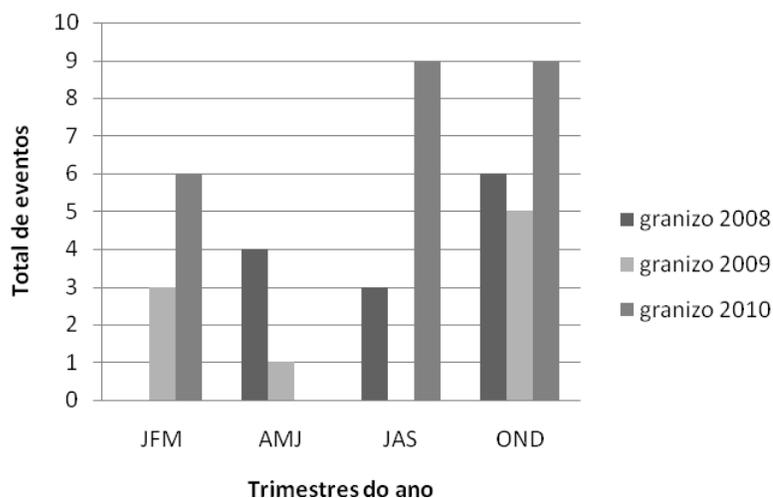


Figura 4 – Número de eventos de granizo por trimestre entre os anos de 2008 e 2010.

ii) para o evento enxurrada (Fig. 5), o trimestre com maior ocorrência foi OND de 2009 com trinta casos, seguido do trimestre JFM de 2010 com 25 casos e OND de 2008 com apenas quatro casos.

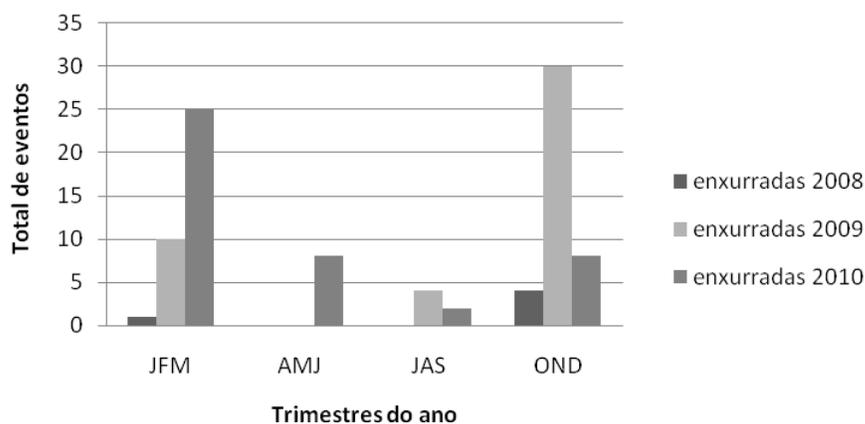


Figura 5 – Número de eventos de enxurradas por trimestre entre os anos de 2008 e 2010.

Analisou-se ainda, a frequência mensal de ambos os tipos de eventos e para o período em questão obteve-se o seguinte resultado: Os meses em que

predominam as ocorrências de granizo são os meses de primavera e verão (de SET à FEV), totalizando 35 eventos no período (Fig. 6); similarmente aos resultados obtidos para granizo, os meses preferenciais para a ocorrência de enxurradas também foram os do período de Setembro à Fevereiro, totalizando 79 eventos. A maior frequência de eventos de granizo observada nos meses de primavera, também foi observada por Nedel et al. (2012), oportunidade na qual estes autores analisaram um período de dados de 20 anos (1989 à 2009), também utilizando dados de registro junto à Defesa Civil do estado do Rio Grande do Sul. Cabe ressaltar que justamente neste período rotineiramente são observados Sistemas Convectivos de Mesoescala atuando sobre o sudeste da América do Sul (ANABOR et al. 2008), sendo que boa parte desses sistemas atingem o estado do Rio Grande do Sul.

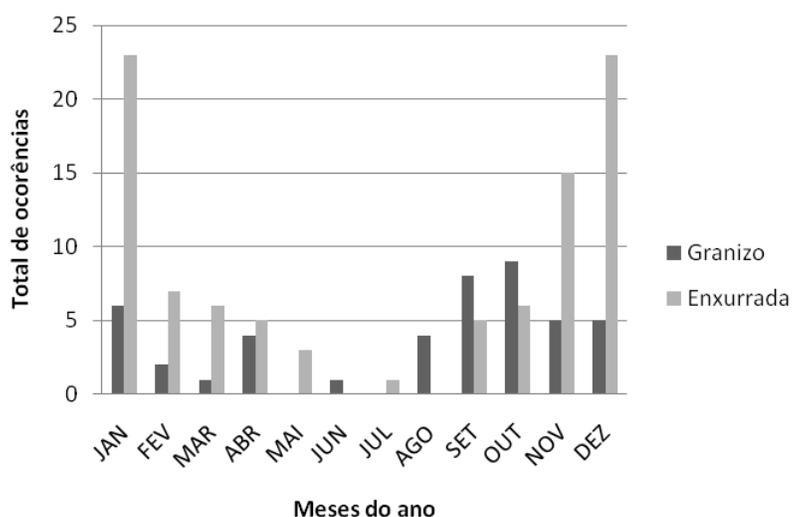


Figura 6 – Total mensal de ocorrências de granizo e enxurradas entre os anos 2008 e 2010.

4.2 Variáveis meteorológicas mais importantes para a ocorrência de granizo

Através do truncamento dos autovalores, obteve-se que a primeira componente principal continha 41,46% da variância dos dados, enquanto que a segunda componente principal continha 19,1%, a terceira componente principal 8,95%, e a quarta componente principal 7,27% da variabilidade dos dados. Foram

descartadas as demais CP's, já que a soma das quatro primeiras CP's contém 76,78% da variabilidade total dos dados. A partir dessa informação, foram avaliadas as cinco variáveis meteorológicas mais importantes de cada CP, seguindo o indicado pelos autovetores.

4.2.1 Da primeira componente principal

Os resultados indicam que a variável meteorológica de maior importância dentro do conjunto de dados correspondentes à ocorrência de granizo foi a umidade específica nos níveis de 700hPa e 850hPa, respectivamente. Este é um dos ingredientes que teoricamente devem estar presentes como parte das condições ideais de formação de nuvens ou tempestades, pois é necessário o aporte de umidade para ocorrer a conversão do vapor de água do estado gasoso para o líquido durante o processo de formação das nuvens.

Obtida como a terceira variável mais importante, a divergência do fluxo de umidade no nível de 850hPa também está relacionada com o conteúdo de umidade nos baixos níveis e conseqüente formação de nuvens. Os três itens classificados até então como mais importantes (todos se referindo a mesma variável atmosférica, porém em condições e níveis diferentes), pertencem a uma condição bem específica e muito verificada nas latitudes médias da América do Sul em situações de convecção profunda, que é o transporte de umidade em baixos níveis realizados pelo JBN (SALIO et al., 2006; NASCIMENTO, 2005; ROMATSCHKE; HOUZE, 2010), sendo este um processo importante para a desestabilização da atmosfera.

A temperatura do ar no nível de 850hPa foi identificada como quarta variável mais importante para a ocorrência de granizo. A instabilidade do ar é diretamente relacionada com o quão quente, e por tanto leve, encontram-se as parcelas de ar, fato este que acaba facilitando a ascensão das parcelas e a conseqüente formação de nuvens de tempestade.

A quinta variável mais importante encontrada foi a diferença entre as alturas geopotencial entre os níveis de 500hPa e 850hPa. Esta diferença está relacionada com a temperatura média na camada atmosférica entre estes dois níveis, assim, quanto maior essa diferença, mais quente estará a camada. É uma variável de extrema importância, pois indica o quão alto pode estar a isoterma de 0°C (ponto no

qual se dá o início do processo de fusão), sendo este um importante fator que pode ser limitante para a ocorrência de granizo ou não.

4.2.2 Da segunda componente principal

A análise da segunda componente principal, indicou que a variável mais importante para a ocorrência de granizo foi a magnitude do vento no nível de 700hPa, sendo esta variável meteorológica muito importante para a evolução de tempestades devido a importância do cisalhamento vertical do vento na manutenção de tempestades. Em ambientes com forte cisalhamento vertical do vento, a inclinação da corrente ascendente provocada pelo cisalhamento permite que ocorra uma alimentação contínua e rápida por correntes de ar potencialmente quente (nos baixos níveis) e potencialmente frio (nos níveis médios e altos) (SILVA DIAS, 1987). Essa característica torna esta variável de extrema importância para a ocorrência de tempestades com potencial para a geração de granizos.

A segunda variável mais importante indicada pela segunda componente principal, foi a altura geopotencial no nível de 500hPa. Esta informação corresponde à altura no qual a superfície geopotencial de 500hPa está posicionada, permitindo extrair informações em relação a uma maior facilidade para a ascensão das parcelas de ar, e indiretamente informações a respeito da profundidade da camada atmosférica.

Obtida como a terceira variável mais importante, a magnitude do vento no nível de 850hPa é uma variável importante pois está relacionada ao cisalhamento vertical do vento, fator este que pode ser crucial para o desenvolvimento e também manutenção de tempestades.

A quarta variável mais importante (altura geopotencial em 850hPa) está relacionada com a facilidade de ascensão de uma parcela de ar até os níveis mais baixos da atmosfera, sendo a altura deste nível aproximadamente a altura da base de nuvens de tempestade.

A quinta variável mais importante foi a umidade relativa do ar no nível de 700hPa. Uma informação do nível de saturação da atmosfera foi determinada como importante, o que era esperado, pois necessariamente é preciso um ambiente saturado para a formação de nuvens e conseqüente desenvolvimento destas, até

tornarem-se nuvens de tempestades, as quais são precursores dos eventos de granizo.

4.2.3 Da terceira componente principal

Analisando a terceira componente principal, foi obtida como variável mais importante a temperatura do ar nos níveis médios (500hPa). Fisicamente esta informação é de grande importância, pois este nível atmosférico corresponde a aproximadamente a altura da metade de uma nuvem de tempestade e, portanto, consiste de uma informação a respeito da instabilidade do ar neste nível.

A segunda variável mais importante foi magnitude do vento no nível de 700hPa, sendo esta já determinada pela segunda componente principal como fator importante para a ocorrência de granizo.

O cisalhamento do vento foi determinado como a terceira variável mais importante para a ocorrência de granizo, sendo o cisalhamento em questão o verificado entre os níveis de 700hPa e 850hPa, referindo-se portanto ao ambiente nos níveis mais baixos da atmosfera. O cisalhamento vertical do vento é de extrema importância, pois este garante a manutenção do abastecimento de calor e umidade para a tempestade, permitindo assim que as tempestades tenham um tempo de vida maior que aquelas ocorridas em ambiente sem intenso cisalhamento vertical do vento. Esta variável, porém considerando como limites o nível de levantamento e o topo da área de energia positiva, já foi utilizada no estudo de Barber e Mahrt (1981) onde estes buscaram obter, através de regressão linear, um modelo para previsão de eventos de granizo utilizando o cisalhamento do vento em conjunto com outras 8 variáveis.

Obtida como quarta variável mais importante para a ocorrência de granizo, a umidade específica no nível de 700hPa é outra variável que têm sua importância marcada em duas componentes principais, sendo esta variável obtida como a mais importante já na primeira componente principal.

A quinta variável mais importante (altura geopotencial em 500hPa), assim como a variável anterior, também foi anteriormente determinada como variável determinante da ocorrência de granizo, já que esta variável foi classificada como importante na segunda componente principal.

4.2.4 Da quarta Componente Principal

O grau de saturação (umidade relativa) no nível de 850hPa, foi determinado como a variável mais importante na quarta componente principal. Esta variável está diretamente relacionada com o teor de umidade na camada inferior da atmosfera e assim, torna-se uma informação importante em relação à presença de nebulosidade nas camadas mais baixas da atmosfera.

A segunda variável mais importante foi a advecção de temperatura no nível de 850hPa. Diretamente relacionada com a instabilidade do ar, esta variável é de extrema importância, pois a presença de ar quente (instável) é fundamental para a ocorrência de tempestades.

Obtida como a terceira variável mais importante, a temperatura do ar no nível de 500hPa novamente é indicada por duas componentes principais como fator importante para a ocorrência de granizo, já que esta variável já havia sido indicada pela terceira componente principal.

Outra variável que já foi indicada por outra componente principal, como importante para a ocorrência de granizo é a umidade específica em 850hPa. Tal variável teve sua importância discutida na primeira componente principal, onde esta foi indicada como a segunda variável mais importante para a ocorrência de granizo na região de estudo.

A quinta e última variável mais importante é a advecção de temperatura no nível de 500hPa. Esta é uma informação importante, pois além do transporte em baixos níveis, se obteve aqui que é necessário também que ocorra a instabilização em níveis médios da atmosfera, o que pode facilitar o processo convectivo com a presença de ar quente também na camada média da atmosfera.

Todos os itens classificados pela quarta CP como importantes, são variáveis reconhecidamente importantes para a instabilização da atmosfera como discutido por Doswell et al. (1996)

Através da ACP foi possível determinar que as variáveis mais importantes para os eventos de granizo estão relacionadas ao teor de umidade em baixos níveis (umidade específica em 700hPa e Umidade Relativa em 850hPa), escoamento em

700hPa (magnitude do vento) e também à estabilidade como a temperatura do ar em 500hPa.

4.3 As diferenças de padrão sinótico entre os eventos de granizo e enxurradas

Considerando o período dos meses de OND, onde ocorreu o maior número de eventos de granizo no período avaliado (2008 até 2010), é feita uma avaliação das anomalias das variáveis meteorológicas utilizadas neste estudo. Os campos de anomalia correspondem às médias de cada variável meteorológica representativa dos eventos de granizo, subtraído da média de cada variável meteorológica correspondente aos eventos de enxurradas. Com isso, obteve-se qual foi a diferença nos campos meteorológicos entre os dois tipos de eventos, permitindo assim determinarmos qual a distinção entre os padrões de ocorrência dos casos de granizo e enxurradas.

A seguir são discutidas quais foram as diferenças obtidas entre os eventos, avaliando as cinco variáveis meteorológicas mais importantes para a ocorrência de granizo determinadas através da ACP como discutido no item anterior. A análise retém-se nas cinco variáveis mais importantes, determinadas em cada uma das quatro primeiras componentes principais, já que estas contém a maior variabilidade dos dados.

Importante lembrar que o campo de anomalia é obtido através da subtração dos valores das variáveis atmosféricas entre os eventos de granizo e os de enxurradas. Assim, valores positivos, indicam que a variável apresenta uma magnitude maior nos eventos de granizo, e valores negativos indicam maior magnitude das variáveis representativas nos eventos de enxurradas.

O campo de anomalia de umidade específica (Fig. 7a) mostrou que o conteúdo de umidade é maior na metade norte do estado para os eventos de enxurradas, e maior na metade sul do estado para os eventos de granizo. O aporte maior de umidade na metade norte, pode estar relacionado com a atuação do JBN que é muito marcante nessa região, especialmente nos setores Norte e Noroeste do estado.

O campo de umidade específica no nível de 850hPa (Fig. 7b) não apresentou diferença muito grande entre os dois tipos de eventos. Contudo, notou-

se que nos eventos de enxurradas esta variável atmosférica apresentou valores acima dos observados nos eventos de granizo em praticamente toda a região de estudo, sendo a única exceção a região mais ao sul da área de estudo (Uruguai), e também a região compreendida no Oceano Atlântico.

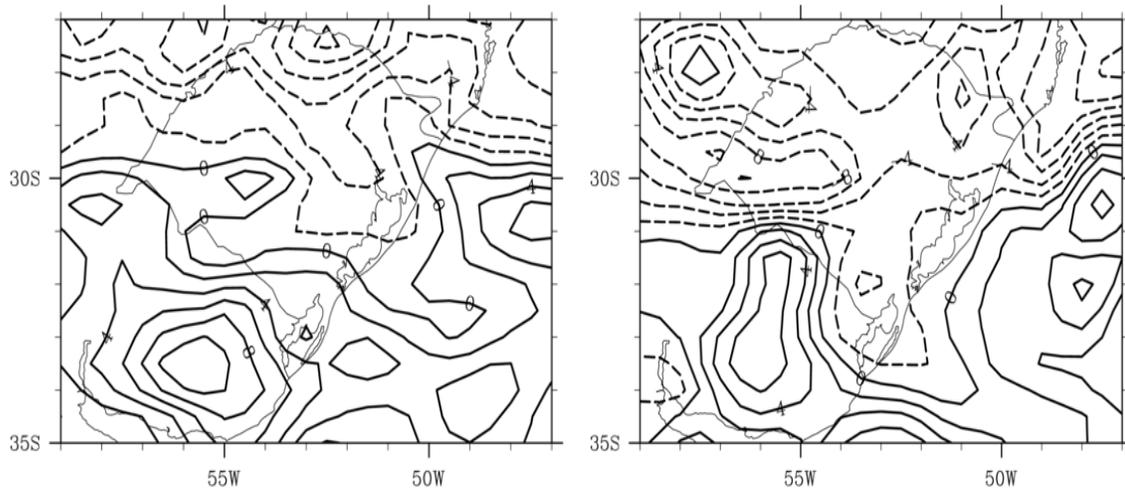


Figura 7 – a) Anomalia da umidade específica do ar em 700hPa. Contornos variam de -0,0012 até 0,001 com intervalos de 0.0002g/kg. b) Anomalia da umidade específica do ar em 850hPa. Contornos variam de -0,0012 até 0,0006 com intervalos de 0.0002g/kg.

A anomalia do campo de divergência do fluxo de umidade (Fig. 8a) mostrou que os dois eventos possuem praticamente nenhuma diferença sob o ponto de vista da advecção de umidade em 850hPa. Contudo, é possível observar que divergência do fluxo de umidade é maior nos eventos de enxurradas do que nos eventos de granizo. Complementarmente, é apresentado o campo de anomalia do escoamento do vento em 850hPa (Fig. 8b), onde é possível observar a presença de um fluxo com orientação NW, que em tese seria o responsável pela convergência de umidade para a região de estudo.

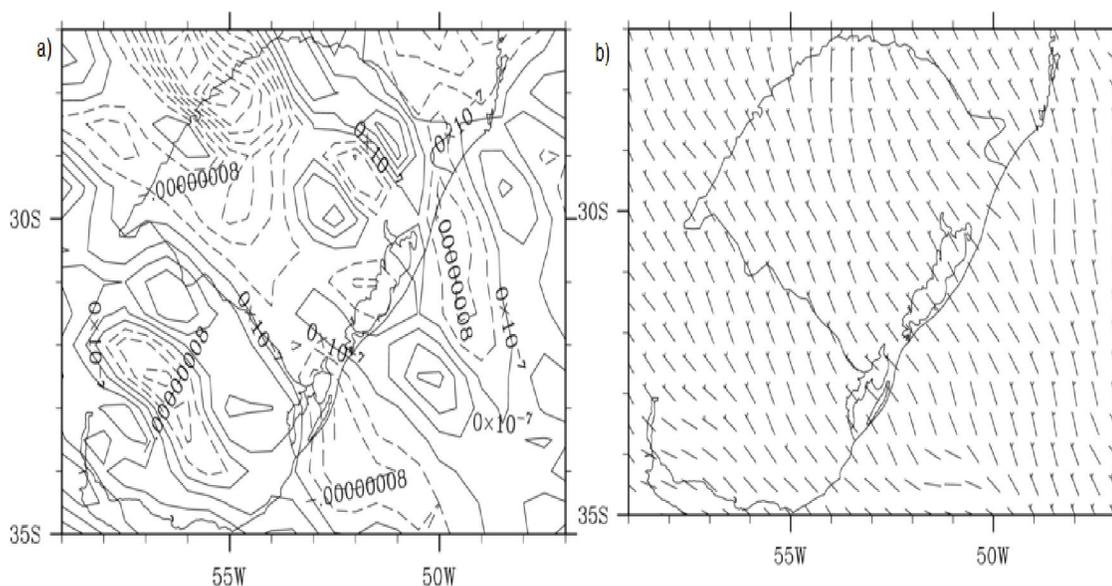


Figura 8 - Anomalia da divergência do fluxo de umidade em 850hPa. Contornos variam de -32×10^{-7} a 2×10^{-7} com intervalos de 4×10^{-8} . d) Anomalia do escoamento em 850hPa. Nas figuras as linhas tracejadas indicam valores negativos e linhas contínuas indicam valores positivos.

A temperatura média do ar em 850hPa nos eventos de granizo ficou entre 284.5K e 292K sobre toda a região de estudo. Já o campo de anomalia apresentou valores entre 0.9K e -0.5K, sendo que os locais onde se verificou valores negativos, e, portanto temperaturas dos eventos de enxurradas maiores que dos eventos de granizo, foram exatamente sobre o Oceano Atlântico. Na Fig. 9a é apresentado o campo de anomalia de temperatura do ar no nível isobárico de 850hPa, onde é possível observar que em praticamente toda a região de estudo, as temperaturas do ar eram maiores nos eventos de granizo do que nos de enxurradas, indicando assim uma maior instabilidade nesse nível nos eventos de granizo.

O campo de anomalia de altura geopotencial (Fig. 9b) mostrou que a diferença das alturas do geopotencial de 850hPa e 500hPa, eram maiores nos eventos de enxurradas do que nos eventos de granizo. Essa informação pode ser interpretada como a presença de uma atmosfera “mais fria” nos eventos de granizo. Outra informação que se pode retirar desse campo, é de que o levantamento do ar nos eventos de granizo é mais facilitado, já que a altura geopotencial refere-se à altura geométrica onde é localizada a superfície de geopotencial (neste caso, dos níveis de 500hPa e 850hPa). Tal facilidade em relação ao levantamento nos eventos

de granizo pode estar diretamente relacionada à presença de ar mais quente nos níveis mais baixos da atmosfera (neste caso o nível isobárico de 850hPa).

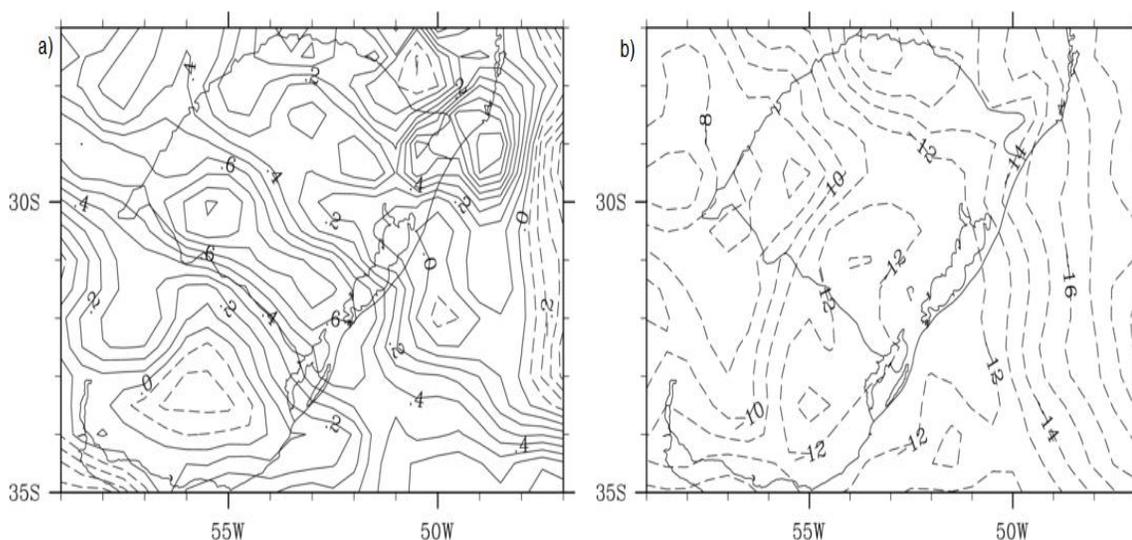


Figura 9 – a) Anomalia da temperatura do ar em 850hPa. Contornos variam de -0.5 até 0.9 com intervalos de 0.1K. b) Anomalia da diferença de altura geopotencial (m_{gp}) entre os níveis de 500 e 850hPa. Contornos variam de -19 até -7 com intervalos de 1m_{gp}.

A magnitude do vento em 700hPa (Fig. 10a) mostrou-se mais intensa nos eventos de granizo, em praticamente toda região de estudo. Este pode ser um fator que intensifica a convecção e, portanto, muito importante para identificar ambientes com potencial para convecção profunda e conseqüentemente, com condições para a formação de granizo.

O campo anomalia da altura geopotencial em 500hPa (Fig. 10b), mostrou que nos eventos de granizo ocorre uma facilidade maior para a elevação das parcelas de ar até o referido nível, já que o campo mostrou que para os eventos de enxurradas esta variável apresenta maior valor. Tal facilidade pode estar relacionada com a maior temperatura do ar verificada em baixos níveis nos eventos de granizo. Este campo corrobora com o que foi observado até então: nos eventos de granizo a atmosfera é mais comprimida (fria), do que nos eventos de enxurradas.

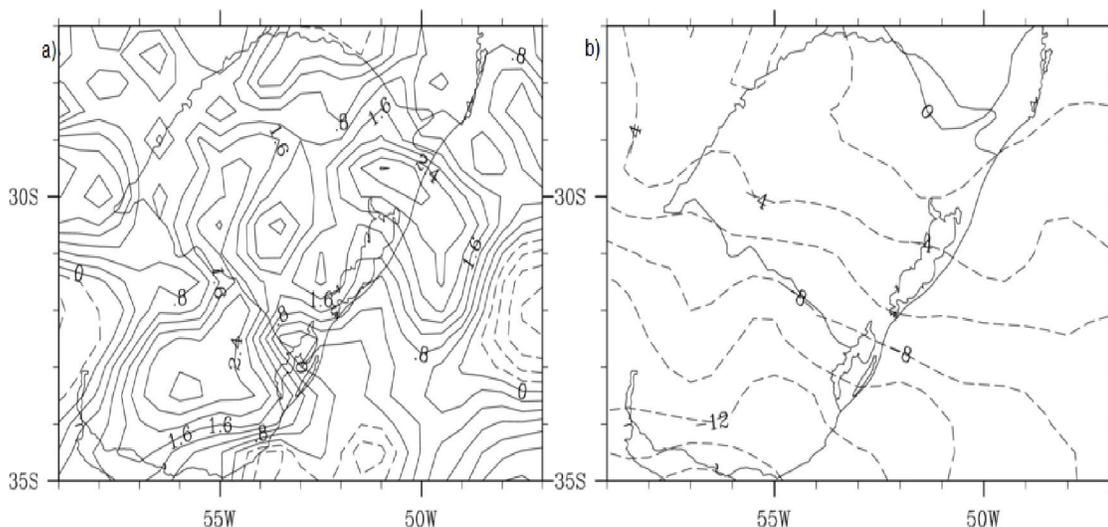


Figura 10 – a) Anomalia da magnitude do vento (m/s) no nível de 700hPa. Contornos variam de -1.6 até 3.2 com intervalos de 0.4m/s. b) Anomalia da altura geopotencial em 500hPa. Contornos variam de -16 até 0 com intervalos de 2mgp. Nas figuras as linhas tracejadas indicam valores negativos e linhas contínuas indicam valores positivos.

No campo de anomalia da magnitude do vento em 850hPa (Fig. 11a), é possível observar que esta variável apresenta maior magnitude nos eventos de granizo do que nos de enxurradas em praticamente todo o estado do Rio Grande do Sul. Apenas duas regiões dentro do estado apresentam maior magnitude do vento nos eventos de enxurradas: a região Norte e uma pequena porção da região da Campanha.

O campo de anomalia da umidade relativa em 700hPa (Fig. 11b) mostrou que para os eventos de enxurradas, esta variável apresenta maiores valores em toda a metade Norte do estado do Rio Grande do Sul. Já na metade Sul, os valores de umidade relativa são iguais para ambos os tipos de eventos, excetuando-se somente o extremo sul do estado onde os eventos de enxurradas apresentam valores maiores para esta variável atmosférica.

A temperatura do ar no nível de 500hPa (Fig. 11c), apresentou valores maiores nos eventos de enxurradas em comparação com os eventos de granizo, em toda a região de estudo. Este resultado confirma a indicação de que nos eventos de granizo, há a presença de uma atmosfera mais fria em comparação com o ambiente de ocorrência de enxurradas

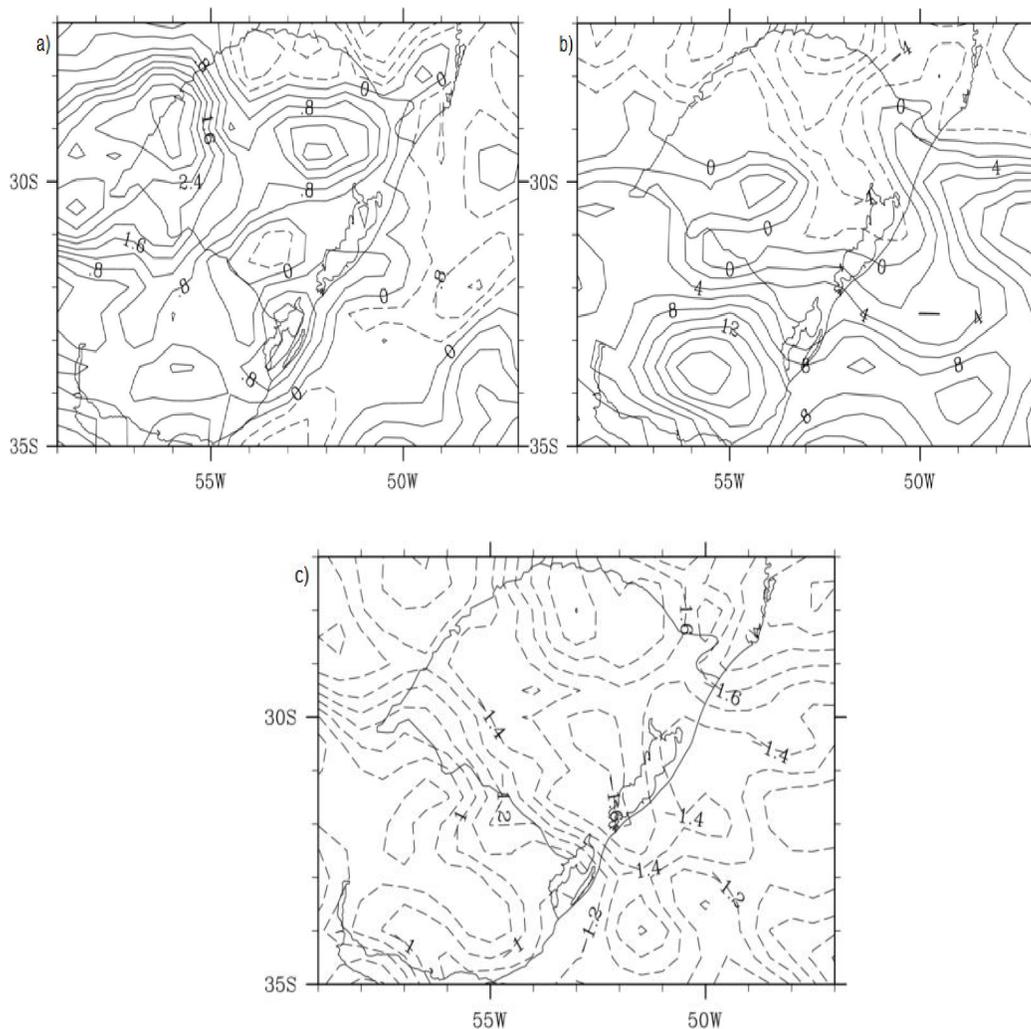


Figura 11 – a) Anomalia da magnitude do vento em 850hPa. Contornos variam de -1,6 até 3,2 com intervalos de 0,4m/s.. b) Anomalia da umidade relativa em 700hPa. Contornos variam de -10 até 16 com intervalos de 2. c) Anomalia da temperatura do ar em 500hPa. Contornos variam de -1,9 até 0,6 com intervalos de 0,1K. Nas figuras as linhas tracejadas indicam valores negativos e linhas contínuas indicam valores positivos.

A anomalia do cisalhamento vertical do vento (Fig. 12a) mostrou que os eventos de enxurradas apresentavam maior cisalhamento no setor oeste da região do estudo (norte da Argentina e oeste do estado do Rio Grande do sul), e também no extremo sul. Já os eventos de granizo, apresentaram cisalhamento mais intenso no setor leste, norte e também em boa parte da região central do estado. Tanto a região oeste como a região norte do estado, são reconhecidamente áreas de grande incidência de tempestades severas as quais são muitas vezes acompanhadas por granizo; por isso, esperava-se que essas duas regiões apresentassem maiores

valores de cisalhamento vertical do vento. Contudo, o campo de anomalia mostrou que na verdade o cisalhamento é maior nos eventos de enxurradas, o que contradiz com a discussão de Silva Dias (1987), onde são apresentados e discutidos estudos nos quais fica evidenciado que a forte precipitação é tanto maior, quanto menor for o cisalhamento do vento. Porém, neste estudo não é discutida a escala de cisalhamento vertical do vento, não dispondo assim de limiares para discutir o quanto o cisalhamento é intenso ou não, tornando impossível qualquer afirmação a respeito da magnitude maior desta variável nos eventos de enxurradas.

Sobre o estado do Rio Grande do Sul, o campo de anomalia de umidade relativa no nível de 850hPa (Fig. 12b) apresenta maiores valores para os eventos de enxurradas. Por se tratar de um evento necessita da ocorrência de um grande volume de precipitação, então se espera que o ambiente na grande escala apresente maior conteúdo de umidade para este tipo de evento. Este mesmo padrão foi observado tanto nos campos de umidade específica em 700 e 850hPa, como também no campo de umidade relativa em 700hPa. Já os eventos de granizo, apresentam valores de umidade relativa maiores somente no Uruguai e no Oceano Atlântico.

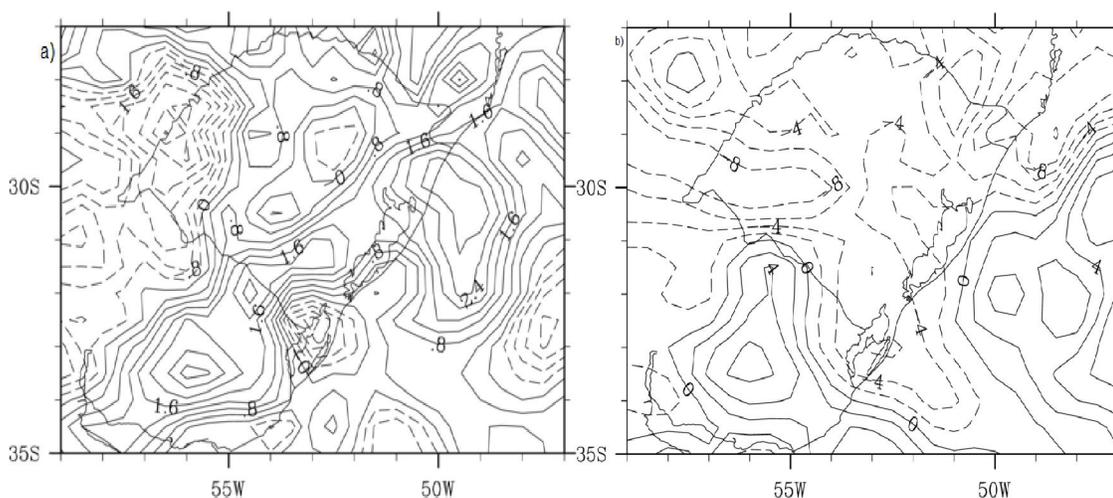


Figura 12 – a) Anomalia do cisalhamento vertical do vento entre os níveis de 700 e 850hPa. Contornos variam de -2,8 até 2,8 com intervalos de 0,4m/s. b) Anomalia de umidade relativa em 850hPa. Contornos variam de 10 até 8 com intervalos de 2. Nas figuras as linhas tracejadas indicam valores negativos e linhas contínuas indicam valores positivos.

A advecção de temperatura em 850hPa (Fig. 13a) foi mais intensa nos eventos de granizo do que nos de enxurradas em praticamente toda a região de estudo. Este fato pode ser importante na manutenção da temperatura mais elevada neste nível, como já verificado no respectivo campo de temperatura do ar. Os dois campos de anomalias (temperatura do ar em 850hPa e advecção de temperatura em 850hPa), mostraram que para os eventos de granizo o ambiente apresenta um grau de instabilidade maior que nos eventos de enxurradas, facilitando assim a convecção profunda e a ocorrência de tempestades mais severas e com um potencial maior para a geração de granizo.

O campo de anomalia de advecção de temperatura em 500hPa (Fig. 13b), mostra que a advecção foi maior nos eventos de granizo em praticamente todo o estado, com exceção somente de uma pequena região no extremo sul e também de uma pequena porção da região Norte do estado. Assim como no campo anterior, esta variável pode ser de extrema importância para a manutenção da instabilidade também em níveis médios. Com presença de instabilidade também em níveis médios, a profundidade da convecção sobre essas regiões pode ser maior já que o nível de equilíbrio pode ficar mais elevado permitindo então a livre ascensão da parcela de ar. Contudo, um fato curioso é que o campo de temperatura do ar em 500hPa apresentou maiores valores para os eventos de enxurradas, o que contraria o ilustrado pelo campo de advecção. Este fato levanta uma dúvida a respeito da real importância desta variável para a ocorrência de granizo, pois fica evidente que embora a advecção de temperatura seja maior, ela não consegue tornar o ambiente suficientemente mais quente a ponto de tornar a atmosfera mais quente nos eventos de granizo.

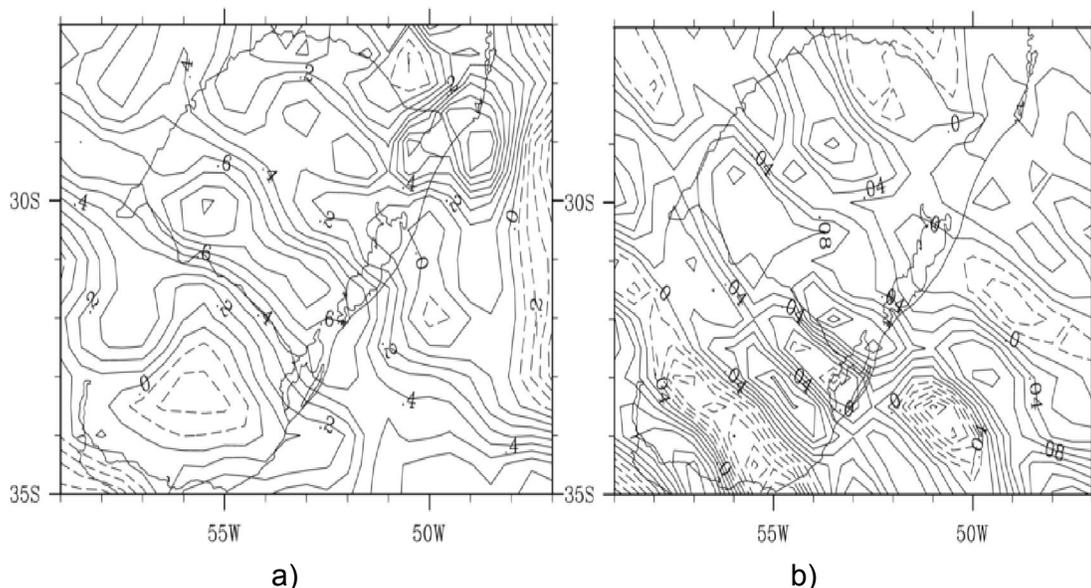


Figura 13 – a) Anomalia da advecção de temperatura em 850hPa. Contornos variam de -0,14 até 0,12 com intervalos de 0,2Ks. b) Anomalia da advecção de temperatura em 500hpa. Contornos variam de -0,12 até 0,16 com intervalos de 0,2K. Nas figuras as linhas tracejadas indicam valores negativos e linhas contínuas indicam valores positivos.

Para efeito de comparação, são apresentados lado a lado os campos de altura geopotencial no nível de 850hPa (Fig. 14a) e altura geopotencial no nível de 500hPa (Fig. 14b). É possível observar que na região de estudo, a altura geopotencial do nível de 850hPa é maior nos eventos de granizo, diferentemente do que ocorre no nível de 500hPa. Por outro lado, no nível de 500hPa é possível observar que, sobre a região de estudo, os eventos de enxurradas apresentam altura geopotencial maior que os eventos de granizo, o que corrobora com o observado no campo de anomalia da temperatura do ar em 500hPa onde é possível observar que a temperatura do ar, de fato é maior na região de estudo nos eventos de enxurradas

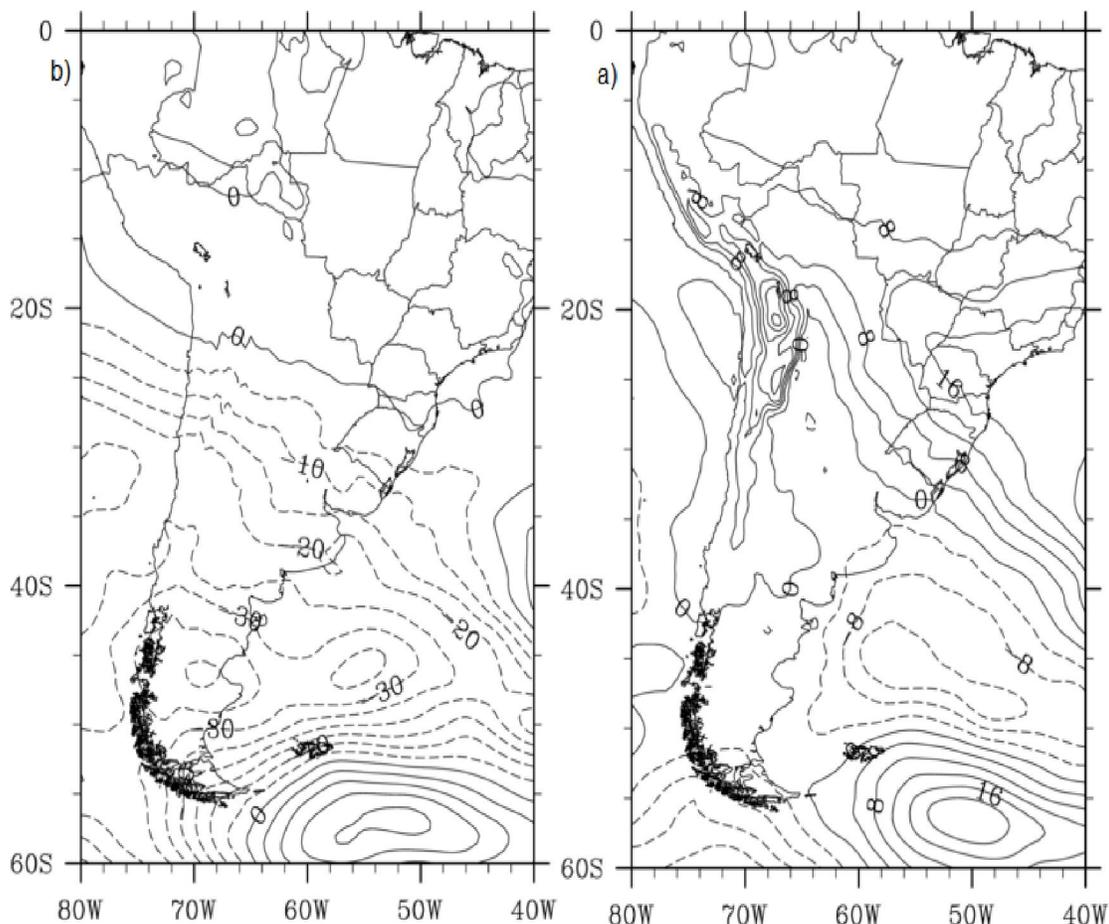


Figura 14 - a) Anomalia da altura geopotencial em 850hPa. Contornos variam de -16 até 18 com intervalos de 4mgp. b) Anomalia da altura geopotencial no nível de 500hPa. Contornos variam de 20 até -40 com intervalos de 5mgp. Nas figuras as linhas tracejadas indicam valores negativos e linhas contínuas indicam valores positivos.

4.4 Resultados da discriminação

A partir da obtenção da função discriminante para cada evento do conjunto de casos de granizo e enxurradas, foi possível obter o ponto médio (m) que separa os dois grupos, sendo obtido $m = -330,4$. Das 140 funções discriminantes (δ) obtidas, se destacam o valor máximo (pertencente a um evento de granizo) $\delta_{\max} = -334,9$ e o valor mínimo (pertencente a um evento de enxurrada) $\delta_{\min} = -326,5$. Assim, eventos que apresentaram δ maior que $-330,4$ foram classificados como

eventos de granizo. Por outro lado, os eventos cuja função discriminante apresentou valor menor que -330,4 foram classificados como eventos de enxurradas.

Utilizando este método, a precisão em relação a classificação correta dos eventos de granizo foi a seguinte: i) dos 46 eventos de granizo, foi possível classificar corretamente 71,74% destes, sendo mal classificados 13 eventos. Dos 13 eventos de granizo ocorridos em 2008, 3 foram mal classificados. Para o ano de 2009, 8 eventos de um total de 24 foram mal classificados. Já para o ano de 2010, 3 eventos foram mal classificados dentro de um grupo de 9 eventos.

Uma melhora no resultado obtido, talvez possa ser possível com a utilização de um grupo maior de eventos de granizo, o que tornaria a implementação do método uma ferramenta valiosa para utilização operacional. Para tanto, se acredita que seja necessário um estudo mais aprofundado, considerando um período maior e com mais casos de granizo avaliados.

Conclusões

A análise sazonal dos eventos de granizo e enxurrada permitiu observar que os períodos em que foram registradas as maiores ocorrências, foram as estações da primavera e verão.

Observou-se também que as variáveis atmosféricas relacionadas à instabilidade do ar predominaram, ao serem classificadas como mais importantes para a ocorrência dos eventos de granizo. Vale ressaltar, que fatores dinâmicos importantes como a magnitude do vento e cisalhamento vertical do vento, também foram determinados como variáveis importantes para a ocorrência de eventos de granizo.

Os resultados indicaram que as variáveis que podem futuramente ser adotadas como fatores de distinção entre os dois tipos de eventos são: i) fatores relacionados à instabilidade como umidade específica em 700hPa, a temperatura do ar em 850hPa e a temperatura média da camada 500—850hPa; ii) fatores dinâmicos como a magnitude do vento nos níveis de 700 e 850hPa. Estes resultados motivam estudos futuros, com a intenção de determinar valores das variáveis atmosféricas que sirvam como ferramenta de apoio para o meteorologista operacional, à tarefa de previsão de granizo.

Por fim, a Função Discriminante de Fischer mostrou ser uma ferramenta promissora na tentativa de distinguir ambientes favoráveis à ocorrência de granizo, apresentando uma discriminação correta em 71,74% dos casos.

Referências

ANABOR, V.; STENSRUD, D. J.; MORAES, O. L. L. Serial Upstream-Propagating Meso-scale Convective System Events over Southeastern South America. **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 3087-3105, 2008.

ASERS - ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre: SCP/DEPLAN. Disponível em:
< <http://www1.seplag.rs.gov.br/atlas/#>>. Atualizado em: 23/09/2011. Acesso em: 16 jul. 2013.

BARBER, D. A.; MAHRT, L. J. A Statistical Study of Dependence of Hailstorm Severity on Environment Conditions. **Monthly Weather Review**, v. 109, p.1348-1352, 1981.

CARDOSO, N. K. R., DINIZ, G. B, MARQUES, J. R., DAMÉ, S. P., Relações entre índices de instabilidade e as chuvas em Porto Alegre-RS. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 14. 2006, Florianópolis.

DOSWELL, C. A., BROOKS H. E., MADDOX R. A. Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. **Weather and Forecasting**, v.11, p.560-581, 1996.

HOUZE, R, A, JR. **Cloud Dynamics**, Academic Press, 1993.

JOHNS, R. H.; DOSWELL, C. A. Severe local storms forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 7, p. 588-612, 1992.

JOLLIFFE, I. T. Principal Component Analysis. 2ed. 487p. Springer – Verlag. New York, 2002.

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complexes. **Bulletin American Meteorological Society**, v.11, p.1374-1387, 1980.

MILLS, G. A., COLQUHOUN, J. R. Objective prediction of severe thunderstorm environments: preliminary results linking a decision tree with an regional NWP model. **Weather and Forecasting**, v. 13, p.1078-1092, 1998.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.

- NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades convectivas severas: teorias e aplicações. In: NASCIMENTO, E. L., **Nota Técnica/Centro de Previsão e Pesquisas Meteorológicas**, 2012.
- NEDEL, A. S., SAUSEN, T. M., SAITO, S. M. Zoneamento dos Desastres Naturais Ocorridos no Rio Grande do Sul no período 1989 – 2009: granizo e vendaval. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 119-126, 2012.
- NEWTON, C. W., Structure and mechanism of the prefrontal squall line. **Journal of Meteorology**. v.7, p.210 – 222, 1950.
- PETTY, G. W. **A first course in atmospheric thermodynamics**, 1ed, Sundog Publishing, 1958.
- PINTO, J. R. D., ROCHA, R. P., Estudo sinótico de uma ciclogênese na costa Sul e Sudeste do Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 14. 2006, Florianópolis.
- PIVA, E. D., ANABOR. V., Desenvolvimento de convecção profunda associada a uma frente fria sobre o Sul da América do Sul. Um estudo de caso. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 14. 2006, Florianópolis.
- REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P., AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.25, n.2, p.185-204, 2010.
- ROMATSCHKE, U., HOUZE JR, R. A. Extreme Summer Convection in South America. **Journal of Climate**. v. 32, p. 3761-3791, 2010.
- SAHA, S., MOORTHI, S., PAN, H., WU, X., WANG, J., NADI GA, S., TRIPP, P., KISTLER, R., WOOLLEN, J., BEHRINGER, D., LIU, H., STOKES, D., GRUMBINE, R., GAYNO, G., WANG, J., HOU, Y., CHUANG, H., JUANG, H. H., SELA, J., IREDELL, M., TREADON, R., KLEIST, D., DELST, P., DENNIS, K., DERBER, J., EK, M., MENG, J., WEI, H., YANG, R., LORD, S., DOOL, H., KUMAR, A., WANG, W., LONG, C., CHELLI AH, M., XUE, Y., HUANG, B., SCHEMM, J., EBISUZAKI, W., LIN, R., XIE, P., CHEN, M., ZHOU, S., HIGGINS, W., ZOU, C., LIU, Q., CHEN, Y., HAN, Y., CUCURULL, L., REYNOLDS, R. W., RUTLEDGE, G., GOLDBERG, M., The NCEP Climate Forecasting System Reanalysis. **Bulletin of American Meteorological Society**, p. 1015-1057, 2010.
- SALIO, P., NICOLINI, M., ZIPSER, E. J., Mesoscale Convective Systems over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet. **Monthly Weather Review**. v.135, p.1229-1309, 2006.
- SILVA DIAS, M. A. F. S. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.2, p.133-150, 1987.
- TOMAZIELLO, A. C. N., GANDU, A. W. Análise estatística de índices de instabilidade em São Paulo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 14. 2006, Florianópolis
- VIANELLO, R. L; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa, 1991, 449p.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2ed. Elsevier. San Diego, 2006. 630p.

YAMAZAKI, Y. **Notas de aula disciplina de Meteorologia Física**. Universidade Federal de Pelotas, 2012. 210p.