

Investigação do ambiente atmosférico durante chuva histórica ocorrida em São Lourenço do Sul - RS

Investigation of the atmospheric environment of the historical rainfall that occurred in São Lourenço do Sul – RS - Brazil

Alceu Lopes de Freitas Júnior^{1*}, André Becker Nunes¹

RESUMO

O evento de chuvas intensas ocorrido entre os dias 09 e 10 de março de 2011 no município de São Lourenço do Sul é discutido no presente trabalho. Devido aos efeitos desse evento, os objetivos do estudo são: a) levantar e comparar os dados disponíveis de precipitação para as datas e para o local do evento; b) fazer uma análise sinótica do evento, a partir dos campos de variáveis meteorológicas de reanálise do modelo ERA-5, identificando as forçantes que favoreceram sua ocorrência. Quanto à precipitação, este evento caracterizou-se por chuvas localizadas, de grande volume e concentrado em um curto espaço de tempo, com valores superiores aos do referencial de estado de alerta. A análise sinótica indicou que o fenômeno de chuvas intensas analisado esteve associado a um anticiclone de bloqueio originado no Oceano Atlântico e a formação de um vórtice ciclônico entre o sul do Rio Grande do Sul e o norte do Uruguai. O acompanhamento temporal de campos de variáveis meteorológicas permitiu identificar o momento de origem e o declínio dessas perturbações atmosféricas, que culminou em elevados níveis de precipitação e consequentes danos a infraestrutura e a população local.

Palavras-chave: Advecção de Vorticidade Ciclônica; Precipitação; Evento Extremo;

ABSTRACT

The event of intense rains that occurred between March 9 and 10, 2011 in the municipality of São Lourenço do Sul is discussed in the present work. Due to the effects of this event, the objectives of the study are: a) to collect and compare the available precipitation data for the dates and for the location of the event; b) make a synoptic analysis of the event, from the fields of meteorological variables of reanalysis of the ERA-5 model, identifying the forcings that favored its occurrence. As for precipitation, this event was characterized by localized rains, of large volume and concentrated in a short space of time, with precipitation values higher than those of the alert state reference. The synoptic analysis indicated that the intense rainfall phenomenon analyzed was associated with a blocking anticyclone originated in the Atlantic Ocean and the formation of a cyclonic vortex between southern Rio Grande do Sul and northern Uruguay. The temporal monitoring of meteorological variable fields made it possible to identify the moment of origin and the decline of these atmospheric disturbances, which culminated in high levels of precipitation and consequent damage to infrastructure and the local population.

Keywords: Advection of Cyclonic Vorticity. Precipitation. Extreme Event.

¹ Universidade Federal de Pelotas

*E-mail: alceu.junior@ufpel.edu.br

INTRODUÇÃO

No Brasil, ocorreram diversos eventos extremos ao longo dos últimos anos. De acordo com Wollmann (2014), esses eventos podem ser considerados uma das consequências da atuação e dinâmica de sistemas naturais sobre a superfície terrestre, que provocam maiores alterações no espaço geográfico. Essa dinâmica não se restringe apenas ao aumento da vazão que leva à enchente, mas também aos movimentos atmosféricos, aos processos geomorfológicos e, principalmente, às repercussões ocorridas nas áreas afetadas pelas enchentes, em especial nas áreas urbanas situadas às margens dos rios, onde são processos frequentes.

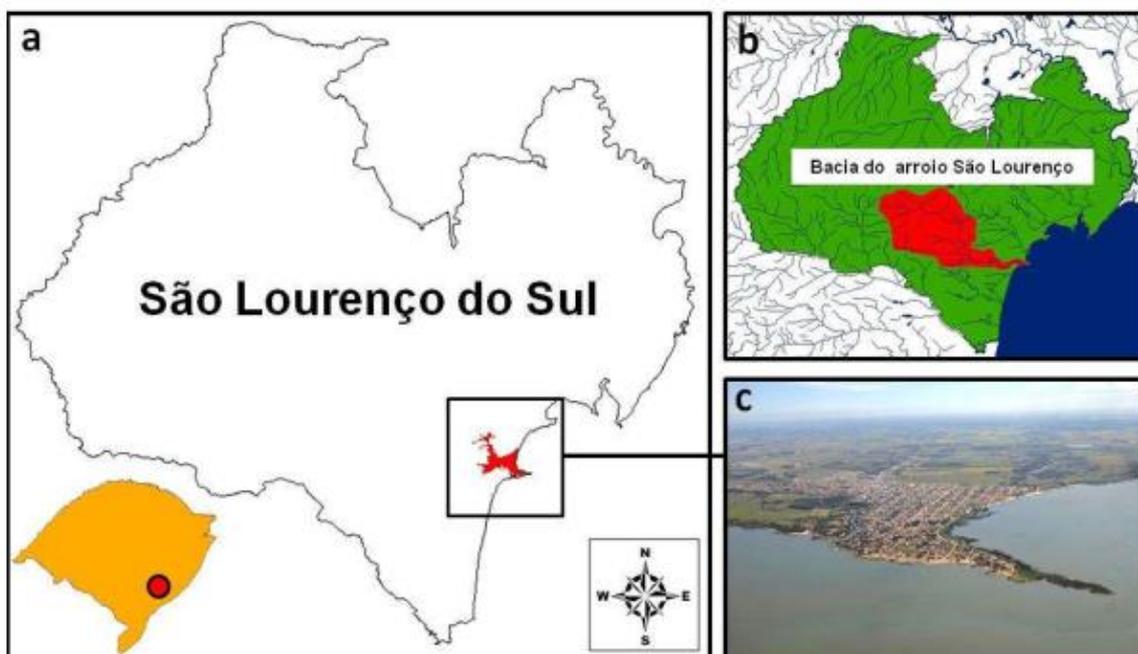
Ao longo das últimas décadas, diversos estudos, com auxílio de dados observacionais e simulações numéricas, têm sido publicados com o objetivo de analisar e quantificar os fatores de diferentes escalas que influenciam a frequência e a intensidade de distúrbios atmosféricos significativos sobre o sul do Brasil, como por exemplo, Teixeira e Satyamurty (2007), Reboita et al. (2009), Ribeiro et al. (2016), Caballero et al. (2018), Cardoso et al. (2020), Dorneles et al. (2020), Ogassawara et al. (2021), Ramos et al. (2021), Santos et al. (2022) e Scaglioni et al. (2022).

Tendo como ponto de partida imagens do satélite GOES-12 e as variáveis meteorológicas de reanálise do modelo ERA-5, o objetivo deste estudo é a realização da análise sinótica envolvendo o evento de precipitação intensa na cidade de São Lourenço do Sul, entre os dias 09 e 10 de março de 2011. Ressalta-se que a análise sinótica desse evento tem como proposta detalhar o momento de origem e de declínio das perturbações atmosféricas e identificar a influência das forçantes dinâmicas e térmicas nesse evento extremo.

METODOLOGIA - ÁREA DE ESTUDO, EVENTO EXTREMO E SUAS CONSEQUÊNCIAS

O município de São Lourenço do Sul está localizado no Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul, a 191km de Porto Alegre, via BR-116. Encontra-se na margem direita da Laguna dos Patos (latitude 31°21'55" Sul; longitude 51°58'42" Oeste) ocupando uma área de 2.036,125km² (IBGE, 2020). Está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã, tendo como uma das principais sub-bacias a do Arroio São Lourenço, com área de drenagem de 193,36km² (Figura 1).

Figura 1 – Panorama geral do município de São Lourenço do Sul: a) Limitação territorial e localização no Estado; b) Contexto hídrico do município (em verde), com destaque para a Sub-bacia do Arroio São Lourenço (em vermelho); c) Visão aérea do traçado urbano e de sua costa junto a Laguna dos Patos.



Fonte: GEHRKE et al. (2012).

Entre a tarde do dia 9 e a madrugada do dia 10 de março de 2011, a cidade foi atingida por chuvas concentradas que resultaram num episódio de enxurrada e consequente inundação. Mais de 50% da zona urbana do município ficou coberta por água entre 2,50 e 3,00m de altura. Cerca de vinte mil pessoas foram afetadas pela inundação (quase metade da população), sendo que 300 ficaram ilhadas e 500 pessoas tiveram que ser resgatadas sob condições de mau tempo (INPE, 2012). Ainda, segundo a Defesa Civil, duas mil pessoas ficaram desalojadas e 350 desabrigadas. As áreas mais alagadas foram aquelas localizadas nas proximidades do Arroio São Lourenço. A ponte sobre o Arroio São Lourenço, localizada no km 468 da BR-116, foi destruída pela enxurrada, bloqueando o deslocamento de veículos entre o sul e a capital do Estado. Sete pessoas perderam a vida. Casas, ruas e carros foram totalmente destruídos neste evento extremo (Figura 2), resultando num prejuízo superior a 160 milhões de reais.

Figura 2 – Destruição provocada pelo evento extremo: a) imagem aérea do Bairro Navegantes, em São Lourenço do Sul no dia 10/03/2011; b) Queda da Ponte sobre o Arroio São Lourenço, BR-116, na localidade de Passo do Pinto; c) Residência no centro urbano - Nível da enchente acima de 2,00m; d) Evacuação de área urbana após diminuição do nível de água.



Fonte: Acervo Público da Prefeitura Municipal de São Lourenço do Sul (2011).

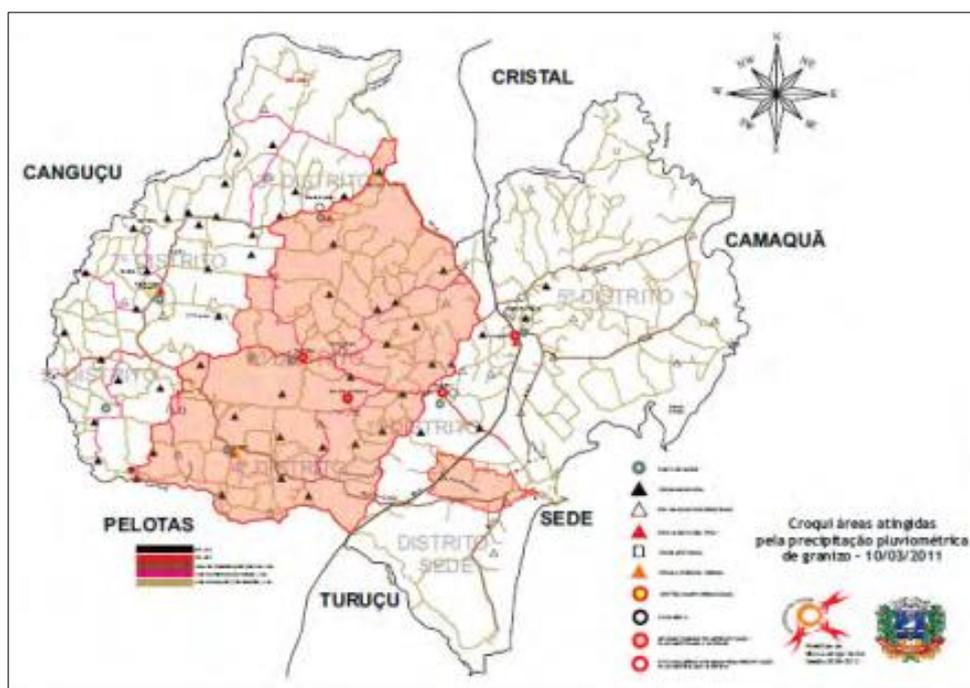
Através do Decreto n.º 3.437, a Prefeitura Municipal estabeleceu “Situação de Calamidade Pública” no dia 10 de março de 2011, onde menciona a “existência de situação anormal provocada por Enchente ou Inundações Graduais, em parte da área urbana e rural do Município, conforme limites definidos no AVADAN e mapa croqui do Município”. A Figura 3 mostra as áreas do município atingidas pelas chuvas do dia 10 de março e a Figura 4 identifica as áreas do perímetro urbano alagadas pela enxurrada.

Figura 3 – Mapa do Município de São Lourenço do Sul com demarcação das áreas atingidas pelo evento extremo de 10 de março de 2011.



Fonte: Acervo Público da Prefeitura Municipal de São Lourenço do Sul (2011).

Figura 4 – Demarcação da área do perímetro urbano alagada pela enxurrada.



Fonte: Defesa Civil - Prefeitura Municipal de São Lourenço do Sul (2011).

Apontado como fator determinante das cheias, o grande volume de precipitação concentrou-se na zona rural do município, em áreas de topografia elevada (maiores declividades e maiores gradientes de relevo). Como o escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, o volume e a velocidade da água

escoada para o Arroio São Lourenço foram muito maiores que as médias, elevando rapidamente seu nível. A BR-116, dada sua elevação em relação a superfície natural da bacia, provocou o efeito barragem, fazendo com que as águas do Arroio São Lourenço escoassem por um único ponto: sob a Ponte do Passo do Pinto, no km 468, em direção a sede do município.

METODOLOGIA – RECURSOS

No sentido de analisar o que ocorreu na região de estudo nos dias 09 e 10/03/2011, foram analisadas imagens do satélite GOES 12 (*Geostationary Operational Environmental Satellite 12*), realçadas no canal infravermelho, disponibilizadas no site do CPTEC/INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e as variáveis meteorológicas obtidas de dados em ponto de grade de reanálise do modelo ERA-5, que é a quinta geração de reanálise atmosférica do clima global implementado pelo *European Centre for Medium Range Weather Forecasts - ECMWF* (C3S, 2017; HERSBACH et al., 2020) com resolução horizontal de 0,25° e 37 níveis verticais, disponível em <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>. As Figuras obtidas do ERA5 foram geradas pelo software *Grid Analysis and Display System* (GrADS). Também foi realizado o levantamento de dados de precipitação no município e região, obtidas das estações meteorológicas e postos pluviométricos da Hidroweb da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), disponíveis no site <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>, do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e dados informais de agricultores do interior do município.

Um evento extremo de precipitação mesmo que localizado, como no caso em estudo, é provocado por um ambiente de grande escala (escala sinótica) favorável. Em outras palavras, é esperado que alguma(s) forçante(s) de grande escala favoreça(m) a ocorrência do evento. Pode-se definir, basicamente, estas forçantes como dinâmicas e térmicas. Este trabalho buscou identificar a influência destas forçantes no evento extremo de precipitação ocorrido em São Lourenço do Sul, nas datas supramencionadas.

METODOLOGIA – DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Quanto aos dados numéricos, o Hidroestimador do CPTEC/INPE previu uma precipitação acumulada de 100mm para São Lourenço do Sul no dia 10/03.

A estação meteorológica do INMET mais próxima de São Lourenço do Sul com dados disponíveis para as datas do evento é a de Rio Grande (distante 75km, em linha reta), que registrou 132,5mm e 107,9mm de precipitação nos dias 10/03 e 11/03, respectivamente.

Em São Lourenço do Sul existem duas estações convencionais cadastradas na Agência Nacional de Águas e operadas pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, instituição vinculada ao Ministério de Minas e Energia. A primeira se localiza na zona urbana do município e a segunda no distrito de Boqueirão, zona rural, distante 14km à noroeste do centro urbano, pela RS-265. Na Tabela 1 seguem os registros destas estações para os dias do evento.

Tabela 1 – Dados Registrados pelas Estações Pluviométricas para o evento.

Estação	Código ANA	Coordenadas		Altitude (m)	Dados de Precipitação Março/2011 (mm)		
		Lat.	Long.		Dia 09	Dia 10	Dia 11
São Lourenço do Sul	3151003	-31.3675	-51.9867	2,00	0	48,1	23,4
Boqueirão	3152002	-31.2839	-52.0831	120,00	0	229,8	22,3

Fonte: Agência Nacional de Águas - Séries Históricas.

Em contrapartida, nos pluviômetros particulares localizados no interior do município, principalmente nas áreas das cabeceiras da bacia hidrográfica do Arroio São Lourenço, foram registradas precipitações de até 630mm para o intervalo de 8 horas. No curso médio do Arroio São Lourenço foram registrados 595mm de chuva para as mesmas 8 horas. Estes dados foram coletados por agricultores da região em pluviômetros simples, e apesar do caráter empírico, são os únicos registros feitos no município de São Lourenço do Sul e na sub-bacia do Arroio São Lourenço, no momento da chuva.

Na literatura especializada, como por exemplo em Haylock et al. (2006), encontram-se vários exemplos de taxas de precipitação associadas à eventos extremos de precipitação. Contudo, sabe-se que uma determinada taxa de precipitação pode ocasionar transtornos em uma cidade, mas não em outra. Ou seja, a taxa de precipitação associada a um evento extremo com consequências sociais deve ser função das características físicas e geográficas do local (NUNES e DA SILVA, 2013). Pereira e Nunes (2018) identificaram que para Pelotas-RS, cidade 73km distante de São Lourenço do Sul, mas

mais urbanizada, um acumulado de 80mm em 48h já pode acarretar em alagamentos urbanos entre outros transtornos. No presente caso de São Lourenço do Sul, dados os valores observados e, principalmente os transtornos ocasionados, trata-se claramente de um evento extremo de precipitação histórico.

Assim, nota-se que este fenômeno apresentou como característica chuvas localizadas, de grande volume e concentrado em um curto espaço de tempo, com valores de precipitação superiores aos do referencial de estado de alerta.

Nesse contexto, este trabalho também visou identificar o ambiente atmosférico dessa chuva histórica em São Lourenço do Sul.

METODOLOGIA – IMAGENS DE SATÉLITE

Nas imagens do satélite GOES 12, observou-se que a quantidade de nuvens variou com certa rapidez ao longo dos dias 09 e 10 de março. Destacam-se as imagens da Figura 5 (18Z do dia 09; 0Z, 06Z e 12Z do dia 10 de março), onde se observa a presença de uma área de nebulosidade bastante carregada sobre o sul gaúcho.

Na Figura 6 foi feita uma ampliação da Figura 5d (12Z do dia 10 de março), sobre o estado do RS, mostrando a nebulosidade carregada sobre a área em estudo.

Figura 5 – Imagens do Satélite GOES-12, com a nebulosidade: a) dia 09/03, hora 18Z; b) dia 10/03, hora 0Z; c) dia 10/03, 06Z; d) dia 10/03,12Z.

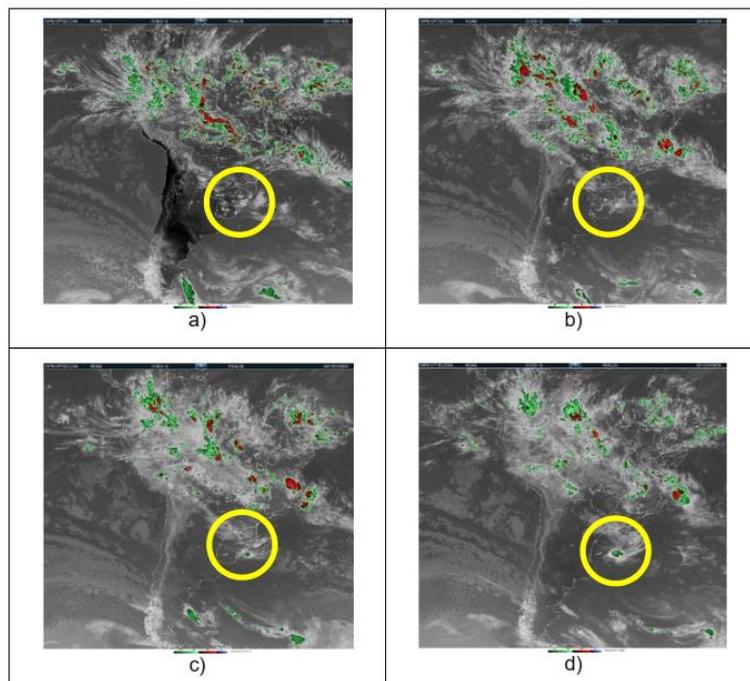
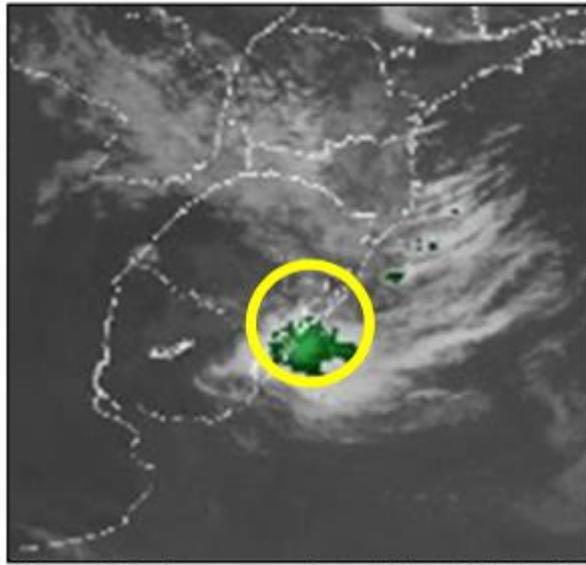


Figura 6 – Imagens do Satélite GOES-12, com a nebulosidade sobre a área de estudo, no dia 10/03,12Z.



METODOLOGIA – FORÇAS DINÂMICAS

As forçantes dinâmicas atuam em médios e altos níveis, como advecção de vorticidade ciclônica (AVC). A advecção de vorticidade ciclônica é exercida por um cavado em níveis médios da troposfera (tipicamente em 500hPa), situado à oeste do local da instabilidade de grande escala. Conforme a teoria quase-geostrófica, espera-se o aprofundamento do sistema de baixa pressão em superfície corrente abaixo do cavado observado em níveis médios (BLUESTEIN, 1993).

Assim, através dos campos de altura geopotencial em 500hPa, junto com as variáveis pressão ao nível do mar (PNMM) e velocidade vertical ômega, buscou-se identificar a ação da advecção de vorticidade ciclônica associada ao evento.

Outra força dinâmica associada a instabilidades é a Corrente de Jato. A Corrente de Jato, subtropical ou polar, é sempre de oeste para leste e situa-se normalmente sobre regiões de gradiente meridional de temperatura em superfície, ou seja, está associada com instabilidades baroclínicas (como sistemas frontais, frentes estacionárias) e, portanto, pode estar associado à precipitação. Além disso, o jato, que por si só já é uma aceleração do vento, apresenta um núcleo, onde o vento é mais intenso ainda. Segundo o Padrão de 4 Células (UCCELLINI e JOHNSON, 1979), espera-se instabilidades no lado tropical da entrada do núcleo e no lado polar da saída do núcleo.

Desta forma, foram analisados os campos de linha de corrente e magnitude do vento em 250hPa nos dias do evento, a partir da plotagem deste com o campo de PNMM, para relacionar-se o vento em altos níveis com os sistemas de pressão em superfície. Também, nestes mesmos campos, foi realizada a análise da difluência do vento, que é a separação das linhas de corrente. É esperado encontrar difluência em altos níveis sobre um local com forte instabilidade devido ao movimento ascendente (SANDERS, 1993; RIQUETTI et al., 2018).

METODOLOGIA – FORÇAS TÉRMICAS

Sabe-se que o aquecimento da superfície em latitudes médias pode provocar a ocorrência de nuvens de tempestades isoladas. Para isto é esperado um transporte horizontal (advecção) de calor e umidade. Esta advecção pode ser analisada, para maioria dos fins, em baixos níveis, tipicamente em 850hPa.

Desta forma, foram plotados campos de vento em 850hPa (Lc850) com a PNMM, para melhor análise do transporte de calor e umidade. Os campos também foram analisados visando identificar o fenômeno do Jato de Baixos Níveis (JBN), que sendo um jato que acelera o transporte de calor e umidade da Amazônia para o sul do Brasil, está quase sempre relacionado à eventos extremos de precipitação nesta região (MARENGO et al., 2004; SALIO et al., 2007; MONTINI et al., 2019). Outra forma de identificação da advecção de temperatura é por meio do campo de espessura, que mostra a diferença de altura entre os níveis de 500hPa e 1000hPa, uma vez que a espessura de uma camada é proporcional ao aquecimento no interior da mesma.

Analogamente, para analisar o transporte de umidade foram utilizados os campos de linhas de corrente e umidade específica em 850hPa.

Outro aspecto que contribui para a análise pode ser observado no Campo de Divergência de Umidade Integrada na Vertical (vimd). Quando este campo mostra valores positivos (tons em vermelho) indicam regiões de divergência, ou seja, umidade se dispersando, enquanto convergência (divergência negativa, tons em azul) indica umidade se agrupando, aumentando a chance de formação de nuvens.

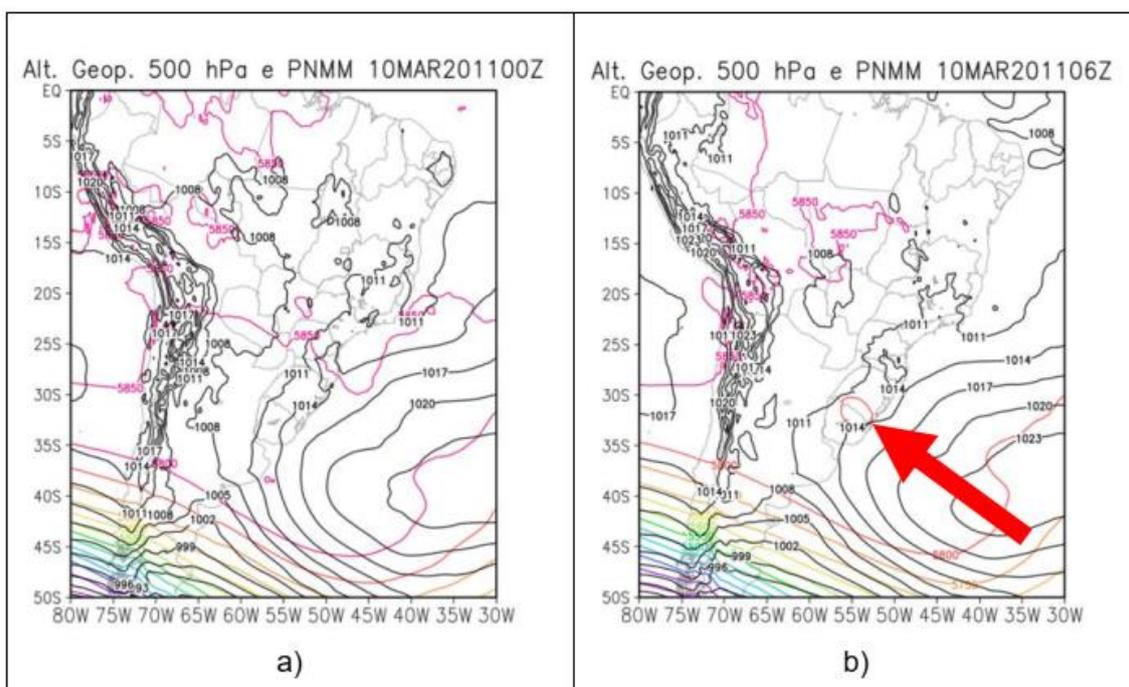
Como o evento foi localizado e para que se comprove que o modelo gerador dos dados (ERA5) conseguiu captar o mesmo, foram analisadas as imagens do Campo de Instabilidade do Índice K e o Total Totals.

E sendo o evento em análise uma tempestade convectiva, pela grande taxa de precipitação, também foi gerado o Campo de Coluna de Vapor d'água Integrado na Vertical (tcwv) junto da divergência de umidade (vimd).

RESULTADOS

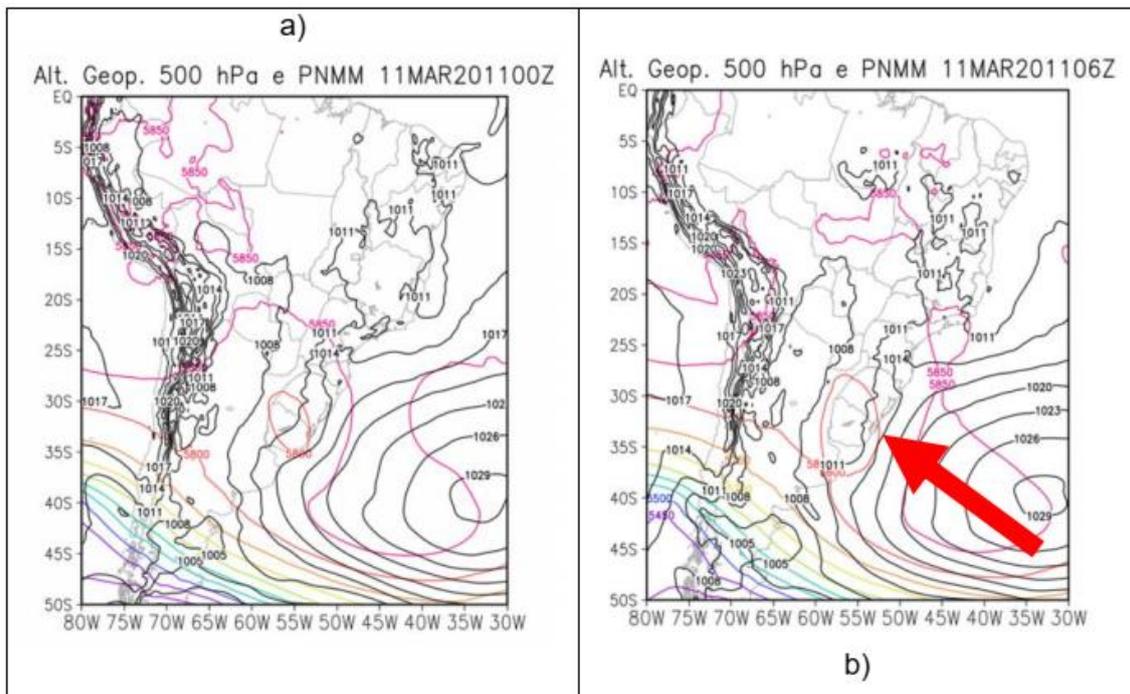
Constatou-se que forçantes dinâmicas e térmicas atuaram de forma associada ao evento. Notou-se um cavado no nível de 500hPa, formando-se sobre o Uruguai e o sul do Rio Grande do Sul, à oeste de São Lourenço do Sul. Associado a este cavado, observou-se no campo de PNMM um cavado sutil sobre a região de São Lourenço do Sul às 00Z (21h local) do dia 10 (Figura 7a). Seis horas depois (Figura 7b) verificou-se a queda da altura geopotencial na área compreendida entre o norte do Uruguai e o sul do RS (sinalizado com a seta vermelha em 7b).

Figura 7 – Campos de Altura Geopotencial em 500hPa (colorido) e Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) (em preto) do dia 10/03/2011, nas horas: a) 00Z; b) 06Z. A seta indica a região de estudo com centro de baixa em 500hPa entre o Uruguai e o RS.



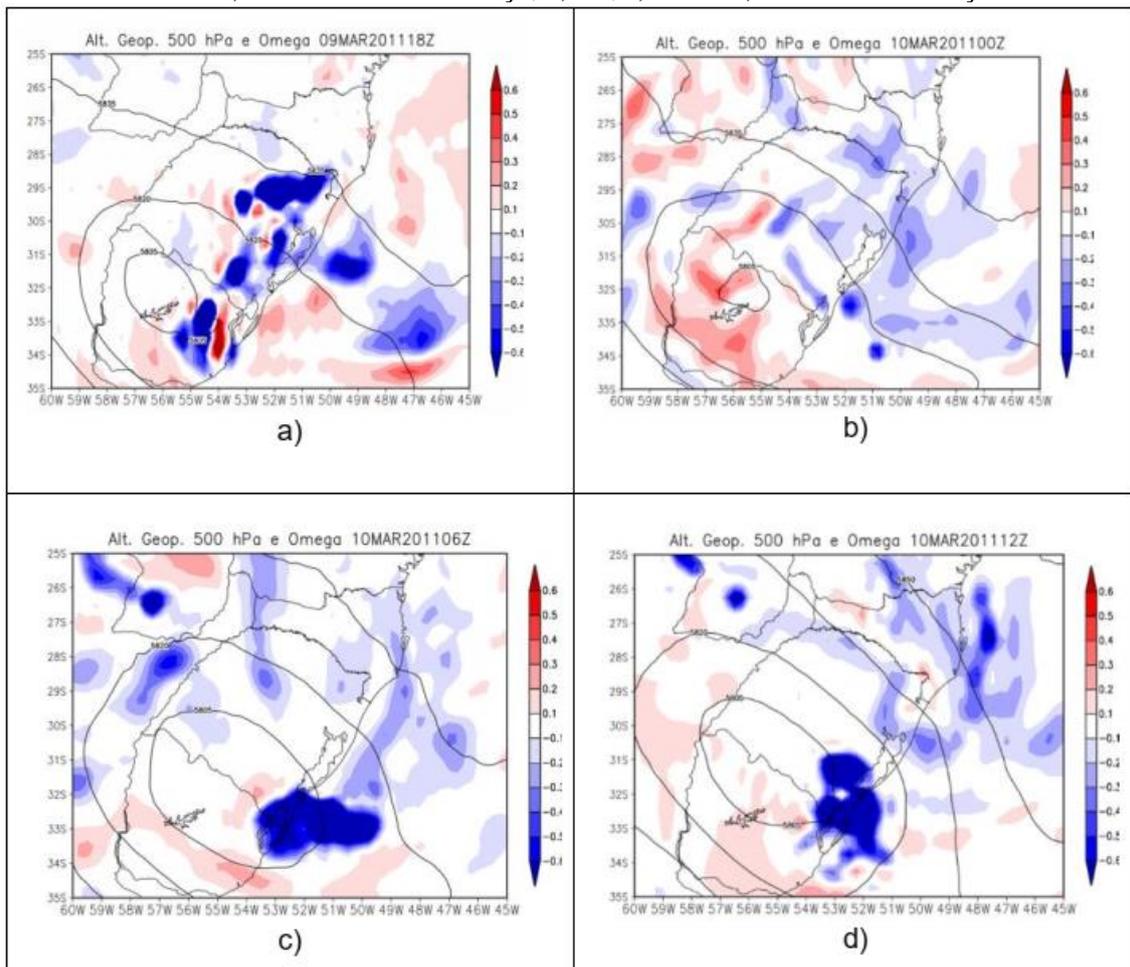
O centro de baixa em 500hPa se amplifica e se desloca em direção ao Uruguai, a partir de 11/03/2011, 0Z (Figura 8a), em concordância com o cavado em superfície, indicando condições de instabilidade.

Figura 8 – Campos de Altura Geopotencial em 500hPa (colorido) e Pressão ao Nível Médio do Mar -PNMM (em preto) do dia 11 de março de 2011, nas horas: a) 00Z e b) 06Z, com a seta indicando o centro de baixa em 500hPa.



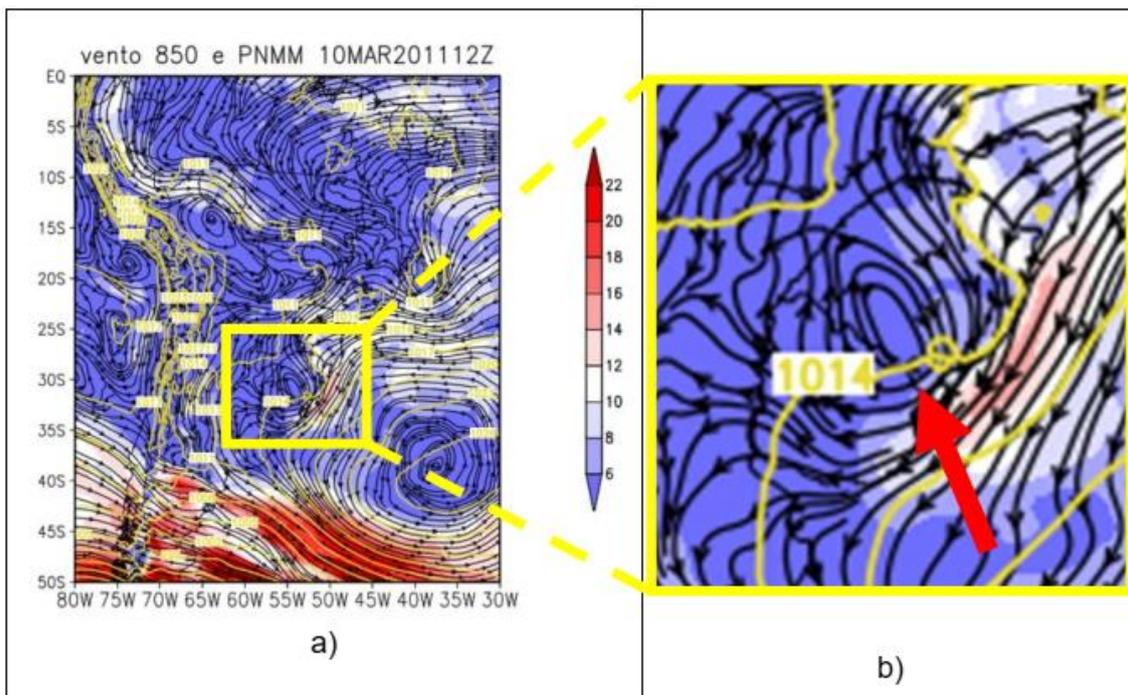
Nas imagens do campo de altura geopotencial em 500hPa associado ao movimento vertical (Figura 9), percebe-se um ômega negativo (portanto, ascendente) à leste do cavado, em concordância com a teoria quase-geostrófica, sobre São Lourenço do Sul (Figura 9a), o que retrata uma situação de instabilidade que se manteve até o dia seguinte (Figuras 9b, 9c e 9d).

Figura 9 – Campo de Altura Geopotencial (contorno) e Ômega (sombreado) em 500hPa com zoom sobre o RS: a) 18Z do dia 09 de março; b) 0Z, c) 06Z e d) 12Z de 10 de março.



Na Figura 10a, gerada a partir do Campo de Linha de Corrente e Magnitude do Vento em 850hPa e PNMM, do dia 10 de março de 2011, hora 12Z, é possível observar em 850hPa um ciclone extratropical sobre o RS, com circulação da Alta Pressão do Oceano Atlântico, magnitude do vento superior a 14m/s, fatores estes que propiciaram a intensificação do evento extremo. Na Figura 10b, com zoom sobre o RS, o ciclone fica mais evidente.

Figura 10 – Campos de Linha de Corrente e Magnitude do Vento em 850hPa (sombreado) e PNMM (contorno amarelo) do dia 10 de março de 2011, na hora 12Z: a) Identificação de ciclone sobre o sul do RS; b) ampliação da imagem, com a seta indicando o centro do ciclone.



O escoamento em altos níveis (Figura 11) mostra a presença de um anticiclone estacionário sobre o leste da Argentina, mais evidente a partir do dia 10 as 00Z (Figura 11a). Ao norte deste anticiclone, nota-se a intensificação de um cavado, constituindo a configuração típica de bloqueio dipolo.

Na Figura 12 observa-se a formação de um vórtice ciclônico de altos níveis corrente acima da região de São Lourenço, o que explica, por meio de advecção de vorticidade ciclônica e da configuração difluente, os intensos valores de movimento ascendente, fundamentais no desenvolvimento da instabilidade.

Figura 11 – Campos de Linha de Corrente e Magnitude do Vento em 250hPa e PNMM: a) dia 09 de março de 2011, na hora 18Z; dia 10, nas horas: b) 00Z; c) 06Z; d) 12Z.

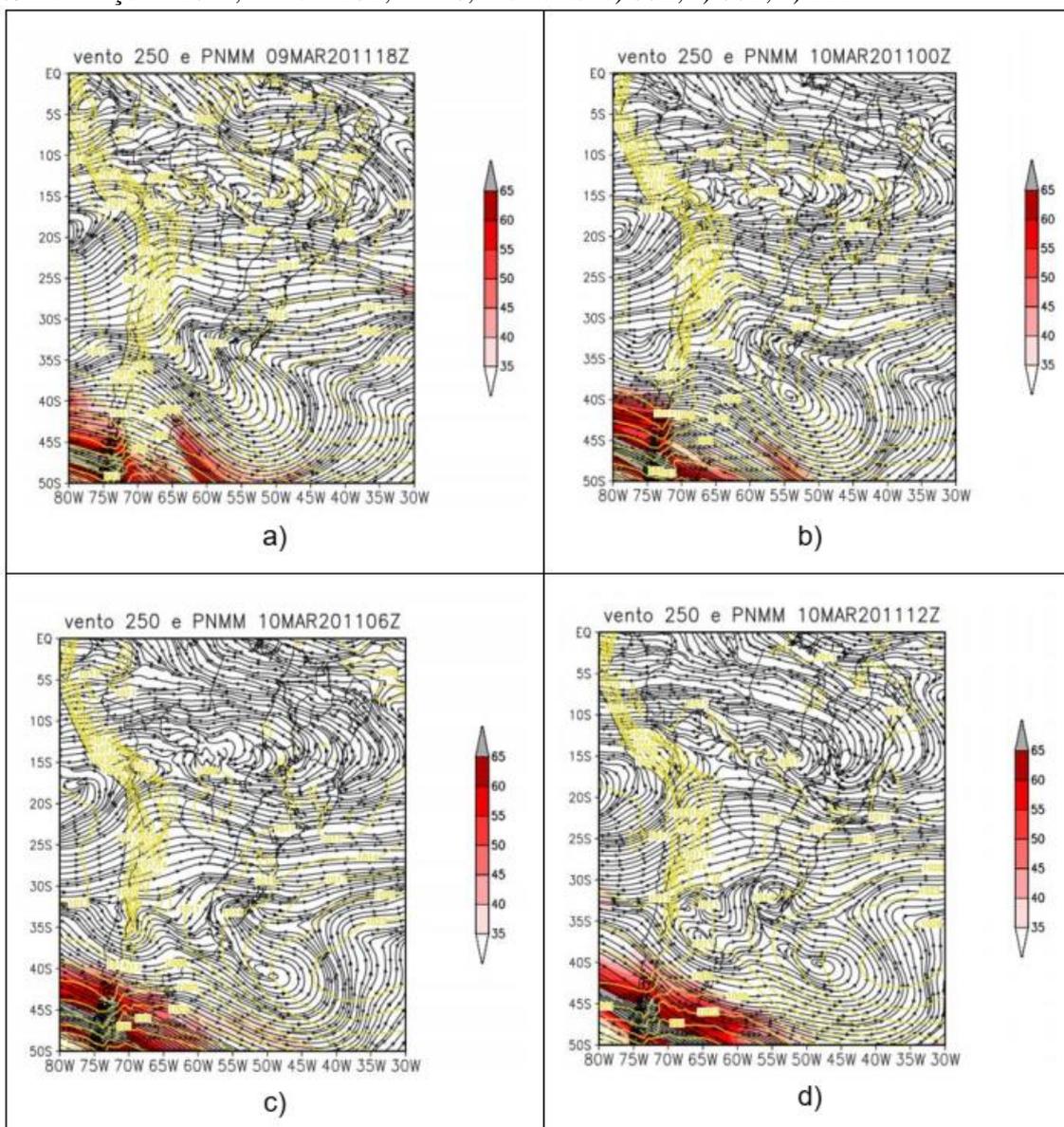
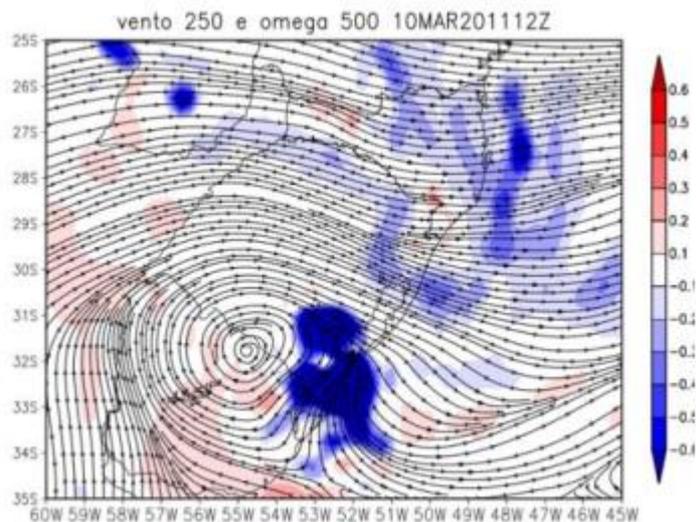
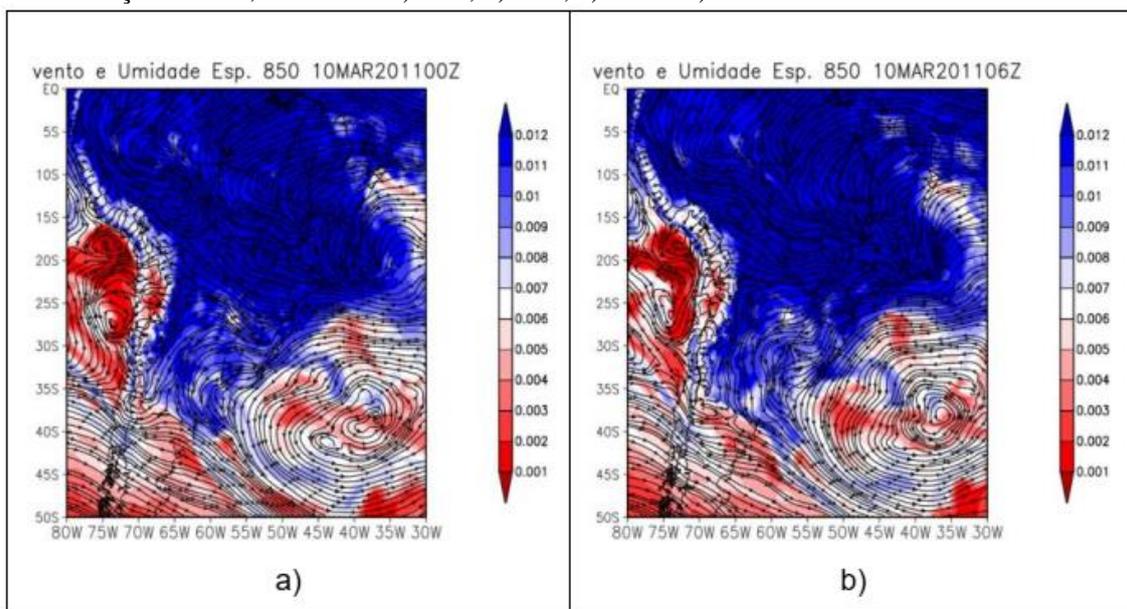


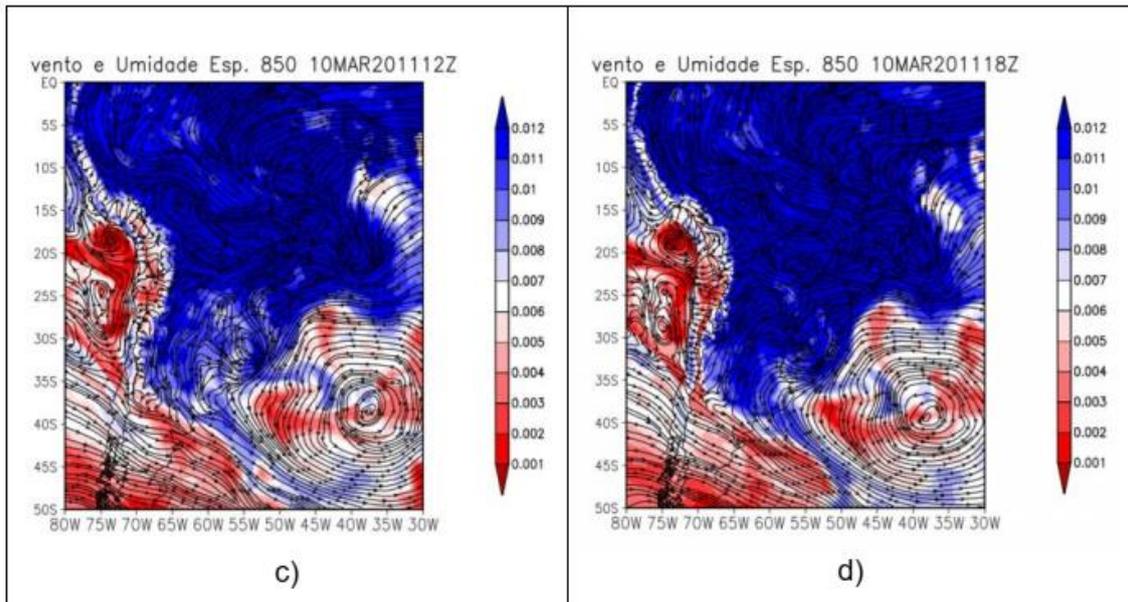
Figura 12 – Campo de Linha de Corrente em 250hPa e Ômega em 500hPa (sombreado), com zoom sobre o RS, do dia 10 de março de 2011 às 12Z.



Os campos de umidade específica e escoamento em baixos níveis mostram que a ação conjunta do sistema de baixa pressão sobre o continente e o grande anticiclone sobre o oceano proporcionaram o transporte constante de vapor d'água para a região de estudo (Figura 13).

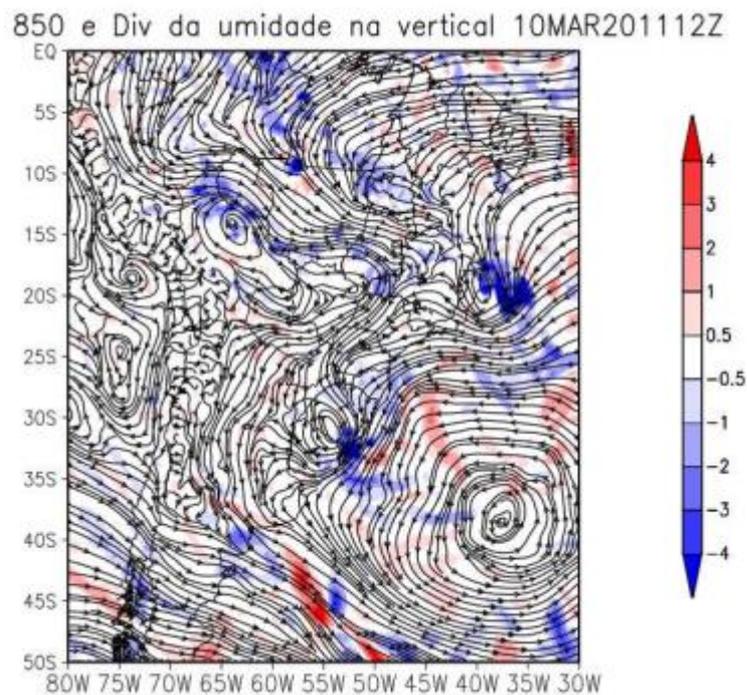
Figura 13 – Campos de Linha de Corrente e Umidade Específica (sombreado) em 850hPa, do dia 10 de março de 2011, nas horas: a) 00Z; b) 06Z; c) 12Z e d) 18Z.





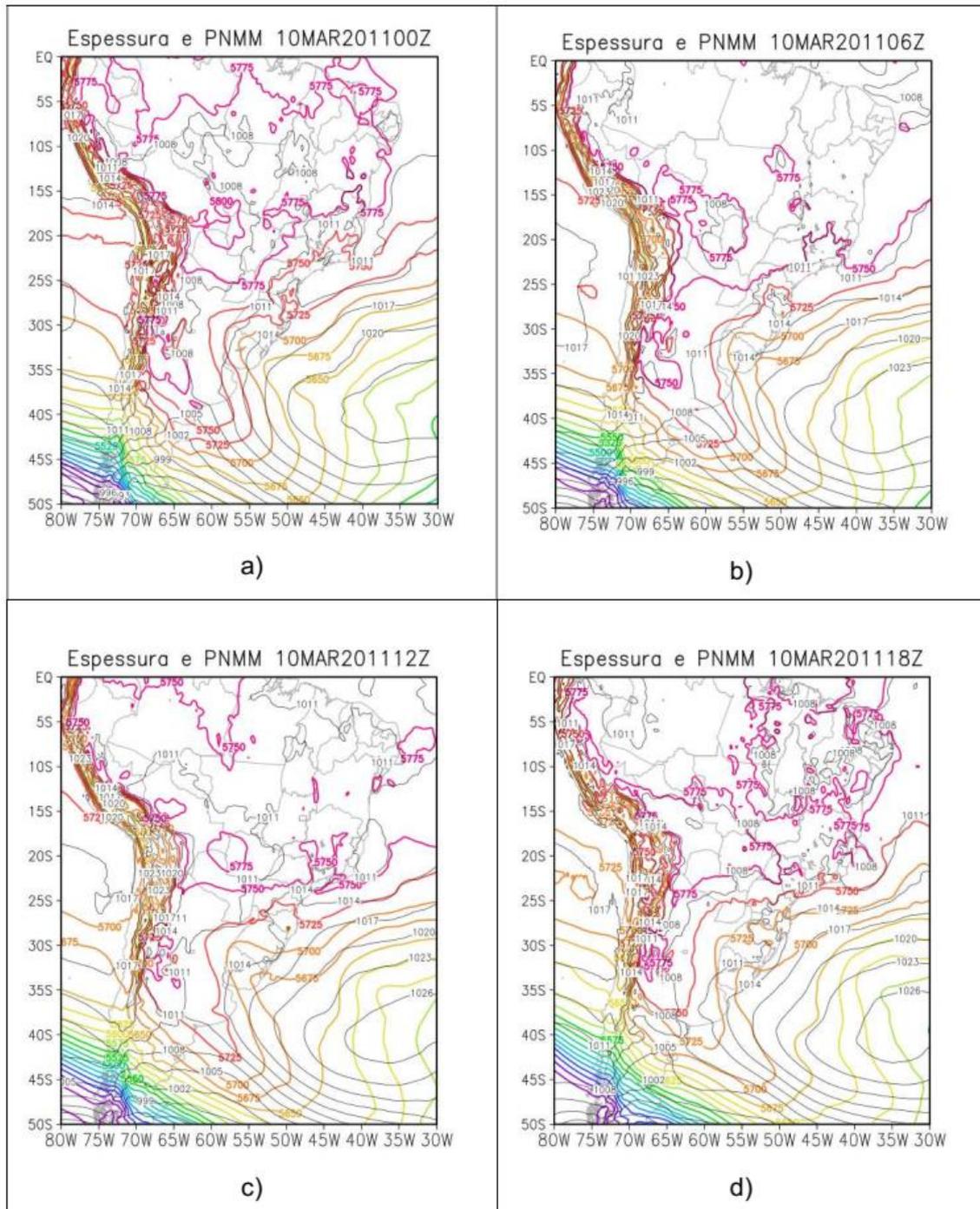
Quanto ao Campo de Divergência de Umidade Integrada na Vertical (vimd), Figura 14, é possível notar a convergência de umidade sobre a região de São Lourenço do Sul, com maior intensidade no dia 10/03, hora 12Z, associada ao escoamento de norte em baixos níveis.

Figura 14 – Campo de Divergência de Umidade na Vertical (sombreado) com a linha de corrente em 850hPa, do dia 10 de março de 2011, na hora 12Z.



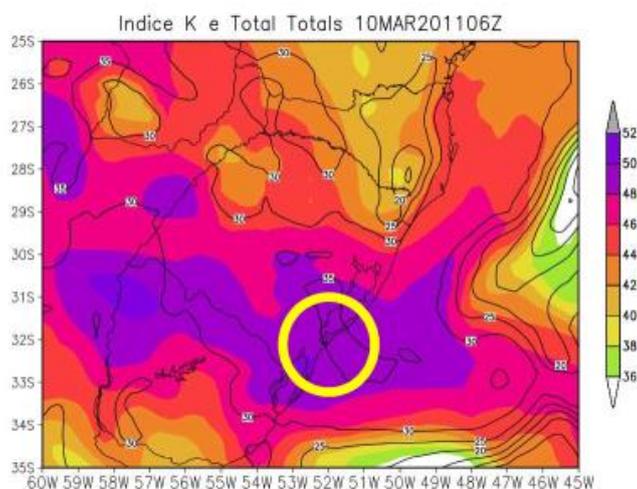
No Campo de Espessura e PNMM (Figura 15) fica mais visível a advecção de temperatura associada à ciclogênese próxima ao RS, com uma pequena língua fria na parte sul e oeste, e a língua quente na parte norte e leste.

Figura 15 – Campos de Espessura (colorido) em mgp e PNMM (em preto) em hPa do dia 10 de março de 2011, nas horas: a) 00Z; b) 06Z; c) 12Z; d) 18Z



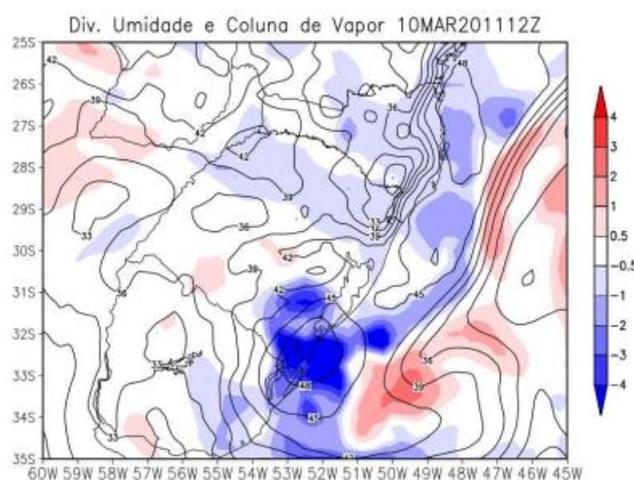
A imagem do Campo de Instabilidade do Índice K e o Total Totals, com zoom sobre São Lourenço do Sul (Figura 16), mostra uma área de maior instabilidade sobre a cidade, com valores de índice K na faixa entre 48 e 50. Da literatura, por exemplo a plataforma MetEd do UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*), tem-se que valores do índice K maiores que 35 e índice Total Totals acima de 44 já exigem atenção devido ao potencial para instabilidade severa.

Figura 16 – Campo de Instabilidade – Índice K (sombreado) e Total Totals (contorno), do dia 10 de março de 2011, às 06Z.



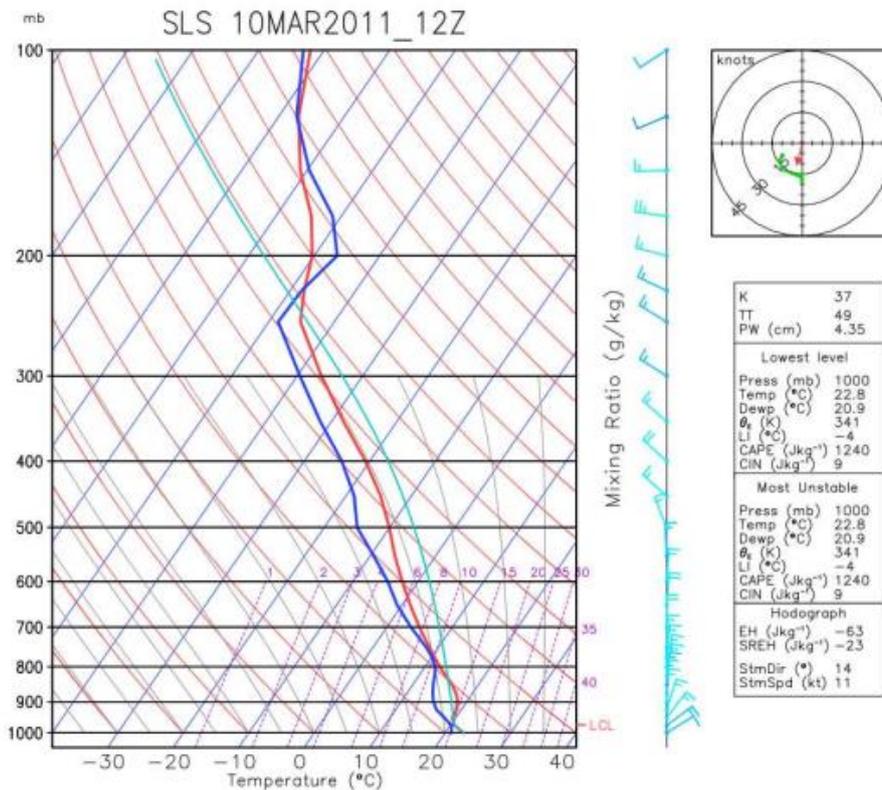
Uma vez gerado o Campo de Coluna de Vapor d'água Integrado na Vertical (tcwv) junto da divergência de umidade (vimd), constatou-se valores maiores sobre São Lourenço do Sul, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Campo de Coluna de Vapor (contorno) junto da divergência de umidade (sombreado), do dia 10 de março de 2011, às 12Z.



A análise mais completa com relação à instabilidade local deve ser realizada por meio de radiossondagens, onde se analisa o potencial convectivo da atmosfera através do seu comportamento térmico na vertical. Na ausência de sondagens disponíveis, nem mesmo perto da região de estudo, uma alternativa é a simulação da radiossondagem por meio dos dados do ERA5. A Figura 18 apresenta a radiossondagem em forma de diagrama termodinâmico sobre a cidade para um horário provável de maior instabilidade. Além dos altos valores dos índices K e TT já apresentados nos campos acima, notou-se o valor de CAPE (energia potencial disponível para convecção) de 1240 J kg^{-1} , valor que a literatura (como a já citada plataforma MetEd) indica como moderadamente instável. Já o valor de LI (*Lifted Index* – índice de levantamento) de 4°C indica moderado potencial para tempestade severa. Além disso, o comportamento do vento na vertical indica um razoável cisalhamento, outra característica associada à potencial para tempestades. Salienta-se que no horário seguinte, 18Z (não mostrado aqui), a CAPE aumentou para 2180 J kg^{-1} e o LI progrediu para -6°C (forte potencial para tempestade severa).

Figura 18 - Radiossondagem sobre a cidade de São Lourenço do Sul para as 12z do dia 10/03, gerada a partir dos dados do ERA5.



CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a investigação dos fenômenos meteorológicos de grande escala associados com as chuvas abundantes sobre o sul do Rio Grande do Sul. Essas chuvas ocorreram, principalmente, entre a noite do dia 09 e a manhã do dia 10, gerando diversos transtornos na cidade de São Lourenço do Sul.

A análise sinótica por meio dos dados de reanálise do ERA5 mostrou a presença de um cavado em altos níveis, que depois evoluiu para um vórtice ciclônico de altos níveis, advectando vortacidade ciclônica sobre a região atingida pelas tempestades. Ou seja, verificou-se, portanto, o papel de uma forçante dinâmica. Em baixos níveis, como consequência da influência do cavado em altos níveis, observou-se a formação de um ciclone sobre o estado do RS, potencializando a instabilidade. A ação conjunta deste ciclone profundo com o anticiclone no oceano intensificou o constante transporte de umidade para a região da cidade, indicando que além da forçante dinâmica, também ocorreu a influência de uma forçante térmica. Por fim, a simulação de radiossondagens sobre a cidade confirmaram que a atmosfera apresentava características físicas típicas de tempestades.

Como trabalhos futuros, sugere-se a simulação deste caso por meio de modelagem empregando diferentes parametrizações físicas, a fim de se obter um *setup* ideal de modelo para prever este tipo de evento severo.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. Séries Históricas das Estações Pluviométricas de São Lourenço do Sul e Boqueirão. **Hidroweb**, v.3.2.3. Disponível em: www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas. Acesso em 10 nov. 2021.
- BLUESTEIN, H.B. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and theory of weather systems. **Oxford University Press**. Oxford, 1993. 594p.
- CABALLERO, C.B., OGASSAWARA, J.F., DORNELES, V.R., NUNES, A.B. A precipitação pluviométrica em Pelotas/RS: tendência, sistemas sinóticos associados e influência da ODP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n.4, p.1429-1441, 2018. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.4.p1429-1441>.
- CARDOSO, C. S.; QUADRO, M. F. L.; BONETTI, C. Persistência e Abrangência dos Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 219-231, 2020. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-7786352031>.
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. **Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)**. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>. Acesso em: 16 set. 2021.
- DORNELES, V. R.; RIQUETTI, N. B.; NUNES, A. B. Forçantes dinâmicas e térmicas associadas a um caso de precipitação intensa sobre o Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia** [online], v. 26, 2020. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.58162>.
- GEHRKE, Tagline; DE LIMA, Lucas T.; DUTRA DA SILVA, Marcelo. A transformação do espaço como agente potencializador de desastres naturais: a inundação de São Lourenço do Sul, RS. **Artigo** apresentado no XXI Congresso de Iniciação Científica, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2012.
- HAYLOCK, M. R., PETERSON, T. C., ALVES, L. M., AMBRIZZI, T., ANUNCIACÃO, Y. M. T., BAEZ, J., BARROS, V. R., BERLATO, M. A., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., GARCIA, V. J., GRIMM, A. M., KAROLY, D., MARENGO, J. A., MARINO, M. B., MONCUNILL, D. F., NECHET, D., QUINTANA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J. L., TREBEJO, I., VINCENT, L. A. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.
- HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, p. 1999–2049, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1002/qj.3803>

INPE – Instituto Nacional de pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Análise do Evento de Inundação Brusca Ocorrido em São Lourenço do Sul, RS, em 10 de Março de 2011 - **Relatório**. São José dos Campos, 2012.

MARENGO, J.A., SOARES, W.R., SAULO, C., NICOLINI, M., 2004. Climatology of the low level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalysis: Characteristics and temporal variability. **Journal of climate** 17, 2261-2280. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2).

MONTINI, T.L., JONES, C., CARVALHO, L.M.V., 2019. The South American Low-Level Jet: a New Climatology, Variability, and Changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** 124, 1200-1218. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD029634>

NUNES, A. B.; DA SILVA, G. C. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina State, Brazil: present and future climate. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n.3, p. 413-425, 2013.

OGASSAWARA, J. F.; NUNES, A. B.; RIQUETTI, N. V. Eventos Extremos de Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Piratini: Relação com ENOS e estudo de caso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.72705>.

PEREIRA, R. S.; NUNES, A. B. Estudo climático dos eventos de precipitação associados a alagamentos urbanos no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física** [online], v. 11, p. 2010-2017, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.6.p2010-2017>.

RAMOS, E.C.P., NUNES, A.B., CASSOL, L.G. M. Study of a mesoscale convective complex associated with the coupling between jets in South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.03, p. 1367-1381, 2021. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1367-1381>.

REBOITA, Michelle S.; IWABE, Clara M.N.; DA ROCHA, Rosmeri P.; AMBRIZZI, Tércio. Análise de um ciclone semi-estacionário na costa sul do Brasil associado a bloqueio atmosférico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.4, p.407-422, dez. 2009.

RIBEIRO, B.Z.; SELUCHI, M.; CHOU, S.C. Synoptic climatology of warm fronts in Southeastern South America. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 644-655, 2016.

RIQUETTI, N.B., DORNELES, V.R., NUNES, A.B., 2018. Estudo do caso de precipitação intensa sobre Foz do Iguaçu-PR em setembro de 2015. **Revista Brasileira de Climatologia** 22, 589-606. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.58304>.

SALIO, P., NICOLINI, M., ZIPSER, E.J., 2007. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review** 135, 1290-1309. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1>.

SANDERS, F., 1993. Upper-Level Geostrophic Difffluence and Deepening of Surface Lows. **Weather and Forecasting** 8, 339-344.

SANTOS, L.C.; LIMA, M.T.V.; NUNES, A.B. Estudo climatológico de anomalia de precipitação de janeiro de 2021 em Pelotas-RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, p. 827-840, 2022.

SCAGLIONI, T.P.; FERNANDES, R.K.U.; NUNES, A.B. Eventos extremos de excesso e déficit de precipitação atuantes na Bacia Hidrográfica do Camaquã no período de 1991-2020. **Conjecturas**, v. 22, p. 672-686, 2022.

STEINMETZ, Alice A.; GUEDES, Hugo A.S.; BESKOW, Samuel; DAMÉ, Rita de Cássia F.; GANDRA, Claudia F.A.T. Influência das Características Morfométricas nas Enchentes Urbanas: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Arroio São Lourenço do Sul. XXI **Simpósio** Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília, 2015.

TEIXEIRA, M.S.; SATYAMURTY, P.. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in Southern Brazil. **Monthly Weather Review** [online], v. 135, p. 598-617. 2007. Disponível: <https://doi.org/10.1175/MWR3302.1>

UCCELLINI, L.W., JOHNSON, D.R., 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. **Monthly Weather Review** 107, 682-703. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<0682:TCOUAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<0682:TCOUAL>2.0.CO;2).

VARGAS, Juliano G.; DAL MOLIN, Adriana; KLUG, André Q.; TESMER, Diego, T.; TESSMAN, Jéssica M.C.; DIAS, Liz C. São Lourenço do Sul, 10 de março de 2011: um breve estudo socioambiental. **Artigo** apresentado no XXI Congresso de Iniciação Científica, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2012.

WOLLMANN, Cássio A. Enchentes do Rio Grande do Sul no Século XXI. **Revista Mercator** – Universidade Federal do Ceará, v.13, n.1, p.79-91, Fortaleza, jan./abr., 2014.

ZANCHIN, Mayara; LEANDRO, Diuliana; QUADRO, Maurizio S.; NADALETI, Willian C. Avaliação das variações espaciais e temporais no Rio São Lourenço em área urbana e a correlação com eventos extremos. **Revista Brasileira de Geomática** - RBGeo, v.6, n.2, p.139-154, abr./jun., 2018.

Recebido em: 03/09/2022

Aprovado em: 05/10/2022

Publicado em: 10/11/2022