



Estudos dos Processos Sinóticos e Microfísicos Associados a um Sistema Frontal que Atingiu o Extremo Sul do Brasil (Rio Grande do Sul) e Uruguai
Studies of Synoptic and Microphysical Processes Associated with a Frontal System that Hit the Extreme South of Brazil (Rio Grande do Sul) and Uruguay

Leonardo Abreu Jorge Justo & José Ricardo de Almeida França

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Meteorologia. 21.941-916. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
E-mails: leonardo_ajj@hotmail.com; jricardo@igeo.ufrj.br
Recebido em: 11/08/2011 Aprovado em: 05/12/2011*

Resumo

O presente trabalho apresenta uma análise dos processos Sinóticos e Microfísicos da tempestade que ocorreu no dia 4 de maio de 2007, associada a um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) embebido em um Sistema Frontal (SF), atingindo o extremo sul do Rio Grande do Sul e Uruguai. Este trabalho se direciona a entender os mecanismos dinâmicos, termodinâmicos e microfísicos, responsáveis pela ocorrência do evento e quais foram os precursores em grande escala que foram determinante na estrutura microfísica encontrada na tempestade. A análise microfísica da tempestade foi realizada utilizando dados do satélite CloudSat, que possui a bordo o Cloud Profiling Radar (CPR), um radar de alta precisão que faz o escaneamento vertical da nuvem, possibilitando uma visão tridimensional da tempestade em estudo. Os resultados mostraram que a região com maior taxa de precipitação apresentou valores elevados de conteúdo de gelo e grandes cristais de gelo próximo ao topo da nuvem. Foi verificado também, que o CCM observado foi composto principalmente por cristais de gelo e que sua estrutura microfísica foi fortemente influenciada pelos processos de grande escala.

Palavras-chave: microfísica de nuvens; Complexo Convectivo de Mesoescala; CloudSat

Abstract

The present paper analyses the microphysical and synoptic processes of a storm that hit the extreme south of Rio Grande do Sul and Uruguay in order to understand the dynamic, thermodynamic and microphysical mechanisms responsible for its occurrence and also to verify the large scale precursors that were determinant for the microphysical structure found in the storm. The microphysics analysis was performed using vertical profiles of different microphysics parameters derived from the high-precision radar on board CloudSat satellite. The results show that the storm region presenting the higher precipitation rate was associated with high content of ice and large ice crystals near to cloud top. This study has also verified that the observed Mesoscale Convective Complex (MCC) was mainly composed of ice crystals and its microphysics structure was highly influenced by large scale processes.

Keywords: cloud microphysics; Mesoscale Convective Complex ; CloudSat

1 Introdução

O Uruguai e a região Sul do Brasil são frequentemente atingidas por sistemas frontais (SF), estes sistemas algumas vezes podem interagir com o ar úmido e quente tropical, produzindo forte movimento convectivo gerando nuvens de grande desenvolvimento vertical, causando elevadas taxas de precipitação. As fortes chuvas associadas a estes eventos são causadoras de diversos tipos de transtornos a sociedade, tais como enchentes, quedas de árvores, problemas de transmissão de energia elétrica e prejuízos materiais e humanos. De acordo com Teixeira (2005), esses sistemas estão relacionados a dois tipos de sistemas meteorológicos: Ondas de latitudes médias de escala sinótica (associadas a frentes frias) e aos Complexos Convectivos de Mesoescala CCMs.

Segundo Maddox (1980), os CCMs são definidos como sistemas que possuem uma espessa cobertura de nuvens frias constituída basicamente pelos topos e bigornas dos *Cumulonimbus* (Cb) que os constituem, forma aproximadamente circular e tempo de vida de no mínimo 6 horas. Maddox (1983) sugere que os CCMs que aparecem sobre a parte central dos Estados Unidos (EUA) estão associados com uma convergência na média troposfera, aparentemente forçada primariamente por um Jato de Baixos Níveis (JBN) e uma advecção quente e úmida.

Em uma visão mais detalhada destes sistemas, a convecção é essencialmente um processo em múltiplas escalas. Num extremo, a circulação de larga-escala desestabiliza o meio em que a convecção se desenvolve, em escalas de tempo de semanas ou meses. Em oposição a este extremo, processos microfísicos ocorrem em escalas espaciais de micra e pequenas escalas de tempo, menores que o segundo (Santos, 2001). O conteúdo de água líquida (CAL) dentro da nuvem depende fundamentalmente das condições de grande escala, especialmente da temperatura da base da nuvem, movimento vertical e o perfil vertical da temperatura.

A representação acurada dos processos de nuvens dentro dos modelos atmosféricos ainda representa um grande desafio, entretanto, com os avanços computacionais recentes, os modelos de previsão têm conseguido maior precisão na representação do comportamento de nuvens. Matematicamente, seus efeitos estão inseridos nos termos das interações radiativas da equação

do balanço de energia e nos fluxos de calor latente e sensível. A dificuldade está em fazer esta quantificação, devido à grande variedade de formas em que uma nuvem pode existir. Cada tipo de nuvem interage com a radiação solar e terrestre de maneira particular, dependendo do seu tamanho, forma, constituição física e altura em que se encontra em relação à superfície (Rudorff *et al.*, 2007).

De acordo com Willis *et al.* (1994) e Johnson *et al.* (1994), entender as nuvens, saber como elas se formam e sua constituição interna, bem como a sua dinâmica é extremamente importante para melhorar os modelos de previsão numérica. Portanto, torna-se fundamental para o avanço no campo da Meteorologia, obter uma maior compreensão da relação entre mecanismos de grande escala e a escala de microfísica de nuvens, entendendo como as forçantes dinâmicas, termodinâmica e a convergência de grande escala influenciam diretamente nos processos microfísicos de nuvens convectivas, melhorando assim nosso entendimento nos processos que envolvem a precipitação.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise dos processos Sinóticos e Microfísicos da tempestade que atingiu o extremo sul do Rio Grande do Sul e Uruguai, ocorrido no dia 4 de maio de 2007, entendo os mecanismos dinâmicos, termodinâmicos e microfísicos, responsáveis pela ocorrência do evento e quais foram os precursores em grande escala que foram determinante na estrutura microfísica encontrada na tempestade.

2 Metodologia e Dados

Para a elaboração deste trabalho, foi utilizado dados do satélite de órbita heliossíncrona Cloudsat (Stephens *et al.*, 2002), que utiliza um radar para estudar a estrutura vertical das nuvens e precipitação a partir do espaço. O CloudSat faz o primeiro estudo abrangente tridimensional das nuvens a partir do espaço. Reúne dados sobre a sua estrutura, frequência e volume, e vai ajudar a melhorar nosso entendimento de como elas influenciam o clima. O principal instrumento a bordo do CloudSat é o Cloud Profiling Radar (CPR), que opera em uma frequência de 94-GHz com ângulo de visada a nadir, medindo a energia retroespalhada pelas nuvens. O CloudSat possui uma resolução vertical de 240 m entre a superfície e a altitude de 30 km.

Foram utilizados também dados do sensor AMSR-E a bordo do satélite AQUA, onde foi obtida a taxa de precipitação ao longo da trajetória do satélite CloudSat. Para o estudo do quadro sinótico da tempestade, utilizou-se dados da reanálise do NCEP/NCAR, imagens do satélite GOES-10 e cartas sinóticas de superfície do Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha (DHN/Marinha).

Nas figuras geradas com os dados do satélite CloudSat que serão mostradas neste artigo, estão apresentadas apenas o sistema de tempestades que atingiu o Rio Grande do Sul e o Uruguai. Portanto, os dados com informações das propriedades microfísicas de nuvens sobre o oceano Atlântico foram devidamente filtrados, com o objetivo de se ater a tempestade que efetivamente atingiu o Rio Grande do Sul e o Uruguai.

3 Resultados

3.1 Análise Microfísica

Na Figura 1 é apresentada no lado esquerdo a imagem do satélite GOES-10 no canal do infravermelho IR (realçada), onde se identifica a presença do CCM que atingiu o extremo sul do Rio Grande do Sul e Uruguai, com temperaturas de brilho inferiores a -70 °C (mostrada na barra de cores) no topo da nuvem, indicando grande atividade convectiva. A linha em vermelha que intercepta a imagem, corresponde à trajetória feita pelo satélite

Cloudsat de onde foram extraídos os perfis verticais que serão apresentados neste trabalho.

Na Figura 2a é apresentado o campo de conteúdo de água líquida (CAL) presente no CCM responsável pelo evento. Este parâmetro indica a quantidade de água líquida (g) por unidade de volume (m^3) presente na nuvem. Pode ser notada através da análise das isoterms (linhas tracejadas) a presença de gotas superesfriadas na nuvem (gotas líquidas que estão abaixo da temperatura de 0 °C), apresentando uma distribuição bem homogênea. É importante ressaltar, que os algoritmos utilizados na obtenção dos dados de saída do CloudSat, ainda não são capazes de estimar em quais níveis de altura há o aparecimento de gelo e até quais níveis no interior da nuvem não há mais a presença de gotas superesfriadas. Os algoritmos utilizados na obtenção dos dados, considera que acima da temperatura de 0 °C, a coluna na nuvem contem apenas água líquida e abaixo da temperatura de -20 °C contem apenas gelo, com pode se visto pela figura 2 (a) e (b). Embora a figura indique que não há a presença de gotas superesfriadas abaixo da temperatura de -20 °C devido à limitação dos algoritmos, a imagem indica apenas que existem gotas superesfriadas acima da temperatura de -20 °C e não que este é o limite de temperatura onde foi encontrada gotas superesfriadas. Logo não se pode concluir que não existe gotas superesfriadas abaixo da temperatura de -20 °C, também não se pode tirar a conclusão de que não existe gelo acima de 0 °C, que são devidas as correntes descendentes no interior da nuvem, transportando-as para baixo desta temperatura. Na atmosfera, gotas super-resfriadas

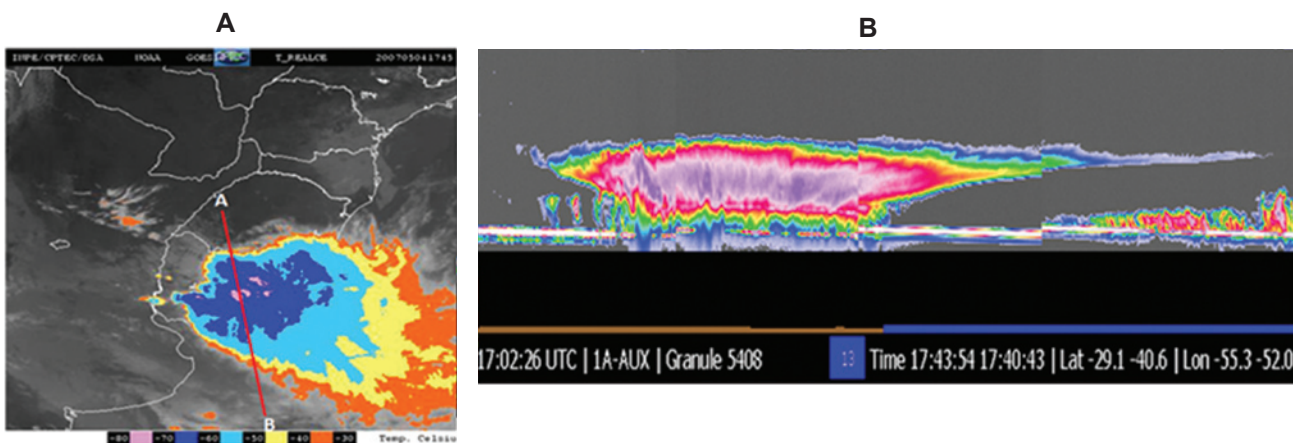


Figura 1A. Imagem do satélite GOES-10 (realçada) para o dia 04/05/2007 às 17:45Z destacando-se o CCM responsável pelo evento. Fonte: http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes_antiores.jsp. B. Imagem do satélite CloudSat (medida de refletância do radar) do perfil vertical do CCM. Fonte: <http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/dpcstatusQL.php>.

podem ocorrer até abaixo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ na ausência de núcleos de formação de gelo. Ainda na Figura 2a, pode ser notado valores altos de CAL em pequenas células convectivas isoladas (no canto direito da imagem), que chegaram a alcançar $0,48\text{ g/m}^3$. Este alto valor de CAL pode estar associado a pouca extensão vertical da nuvem, que possui a sua base em aproximadamente 2 km de altura e o topo por volta de 5 km. Como já mencionado neste trabalho, nuvens com esta extensão vertical não possuem gotas coletoras suficientes para iniciar o processo de precipitação, que é o principal mecanismo responsável pela diminuição de CAL dentro de uma nuvem.

Na Figura 2b é apresentado o conteúdo de gelo (CGE) presente no CCM, nota-se que a temperatura no topo do aglomerado convectivo atingiu temperaturas abaixo de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, que para latitude onde se desenvolveu a tempestade, indica forte desenvolvimento convectivo, típico de sistemas associado à nebulosidade convectiva profunda. Os maiores valores de CGE são encontrados na parte

mais interna da nuvem, diminuindo em direção as bordas da nuvem, bem como na parte constituída de nuvens Cirrus (canto esquerdo da imagem) e no topo. Pode ser visto também pela imagem, que a região de máximo CGE coincide com a região de máxima precipitação (Figura 2c) ocorrida próxima a latitude de $32\text{ }^{\circ}\text{S}$.

No campo de raio efetivo da gota (REG) (Figura 3a), nota-se que as gotas menores se encontram mais próximos da base da nuvem com valores da ordem de $2,7\text{ }\mu\text{m}$ de raio, em seguida aumentando com a altura, resultado do aumento da saturação na nuvem. As maiores gotas existentes no CCM foram da ordem $12\text{ }\mu\text{m}$ de raio, o que evidência que o principal mecanismo responsável pela precipitação dentro da nuvem, não foi o de colisão e coalescência (interação entre gotas). Nuvens que precipitam por processo de colisão e coalescência são nuvens com número considerável de gotículas que são maiores que $18\text{ }\mu\text{m}$ de raio. Desta forma, é esperado que nuvens que possuam um número desprezível de gotas com raio maior que $18\text{ }\mu\text{m}$ sejam estáveis demais em

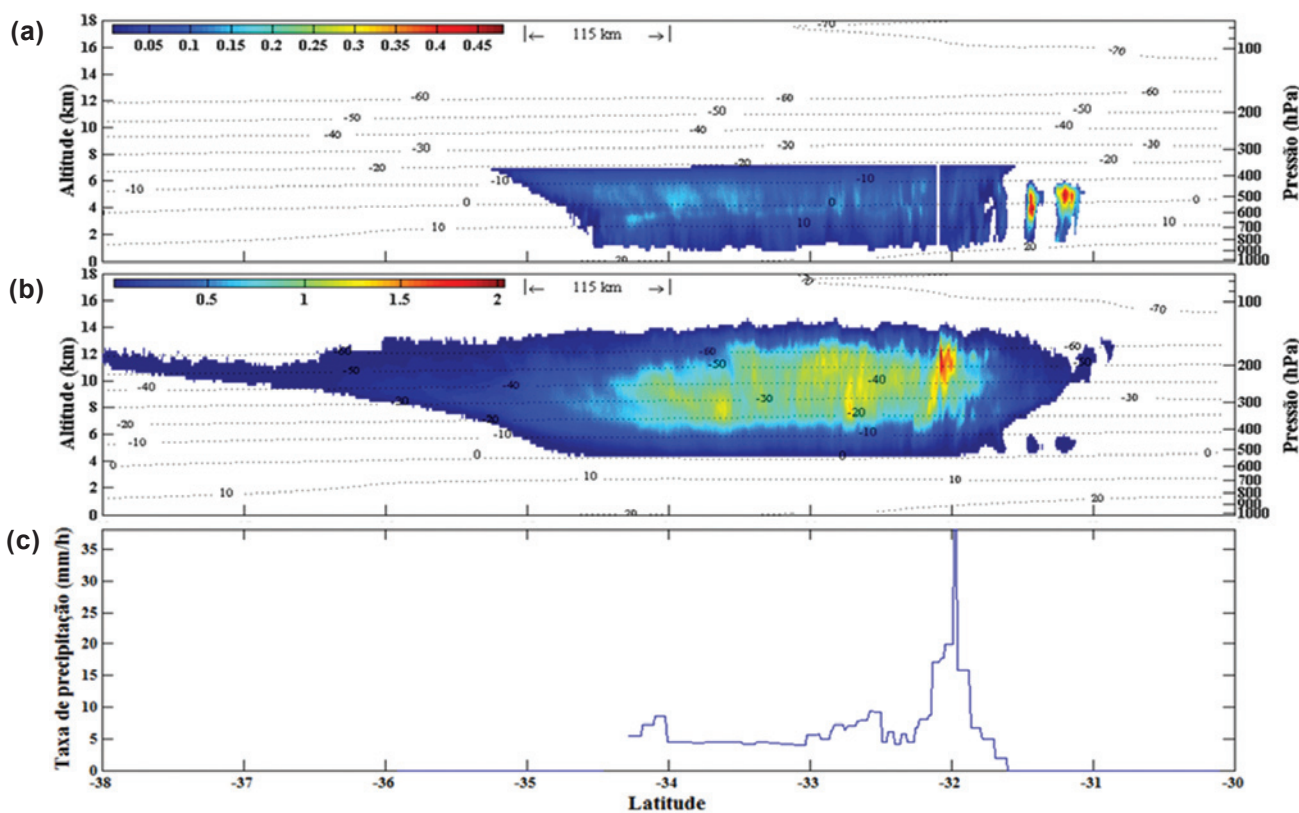


Figura 2. Perfis verticais com os dados obtidos pelo satélite CloudSat, para o dia 04/05/2007, entre 17:41:25 a 17:43:45Z e isotermas ($^{\circ}\text{C}$) (linhas tracejadas) para o: conteúdo (g/m^3) (a) de água líquida; (b) de gelo; (c) Taxa de precipitação (mm/h) estimada pelo sensor AMSR-E abordo do satélite Aqua entre 17:39:25 a 17:41:45Z para o mesmo dia.

relação ao crescimento por colisão/coalescência. De fato, o efeito do processo de colisão e coalescência em produzir precipitação é mais efetivo em *nuvens quentes* (nuvens com temperatura acima de 0 °C).

Os maiores cristais de gelo (Figura 3b) como no CGE, são encontrados no interior da nuvem, entretanto, a imagem mostra que os maiores cristais de gelo se encontram logo no início de sua formação (logo acima da isoterma de 0 °C) com valores que chegaram próximos a 153 µm de raio, diminuindo em direção as bordas da nuvem semelhante ao comportamento do CGE. A

Regiões dentro de uma nuvem que estão associadas à forte precipitação requerem correntes ascendentes fortes, isto pode explicar a presença de grandes cristais de gelo próximo ao topo da nuvem, que teriam sido transportados para níveis mais altos por estas correntes. A hipótese que se pode tirar até o presente momento é que como o processo de colisão e coalescência não foi o responsável pela precipitação registrada e diante da grande quantidade de gelo observada na nuvem, é possível inferir, que os mecanismos responsáveis pela precipitação foram os de interação entre os cristais de gelo e as gotículas superesfriadas (processo chamado de *acreção*), onde a colisão pode levar a formação de granizo e principalmente interação entre cristais de gelo (chamado de *agregação*), cuja colisão pode resultar em flocos de neve caso haja a colagem. O mecanismo que envolve colisões e colagem dentro de uma nuvem com movimento convectivo é o principal mecanismo responsável pela precipitação, justificando a alta taxa de precipitação observada na figura 2c.

A nuvem em estudo apresenta dois tipos de comportamento entre o CGE e o raio efetivo do cristal de gelo (RECG). O primeiro é relacionado com baixo CGE encontrado nas bordas da nuvem, que é um resultado direto de cristais de gelo menores nestas regiões. O segundo comportamento está associado com a região de maiores cristais de gelo como mencionado acima, que quando comparado com o CGE, a mesma região apresenta baixo conteúdo deste parâmetro (aproximadamente entre 4 e 6 km), comportamento inverso ao primeiro caso. Isto se explica devido à baixa concentração de cristais de gelo (CCG) encontrada nesta região, como mostrado na Figura 3d, contribuindo para a diminuição do CGE na região mencionada.

A concentração de gotas (CG) apresentou valores mais altos nos níveis mais baixos da nuvem, com valores superiores a 82 cm⁻³, sofrendo um rápido decréscimo com a altura (Figura 3c). É interessante notar, que este rápido decréscimo na CG, se iniciou logo após o nível de congelamento da água (isoterma de 0 °C), variando em cerca 70 cm⁻³ a menos que 10 cm⁻³ em pouco mais de 2 km. Nesta região há a coexistência de gotículas superesfriadas com cristais de gelo, logo um dos processos que pode explicar tal comportamento é o fato de que a pressão de vapor de saturação sobre cristais de gelo é muito menor que sobre gotículas de água superesfriada, consequentemente quando o ar está saturado (UR=100%) em relação às gotículas líquidas, ele está supersaturado em relação aos cristais de gelo. O resultado é a deposição contínua de vapor d água das gotículas superesfriadas indo em direção aos cristais de gelo. A deposição remove vapor d água da nuvem e por isso diminui a umidade relativa abaixo de 100%, logo as gotículas se evaporam e isto diminui significativamente a CG dentro da nuvem, que é reduzida tanto pela perda de moléculas de água que constitui a gotículas superesfriada para os cristais de gelo, quanto por remoção de vapor d água da nuvem que deixa o ambiente subsaturado em relação à água e as pequenas gotas evaporam para compensar isto. A CCG se mostrou maior próximo ao topo da nuvem na parte convectiva e intermediária (Figura 3d), decrescendo em direção a níveis mais baixos e nas bordas, assim como um espectro mais estreito em relação à CG, apresentando um aspecto mais homogêneo. O aumento na CCG em direção ao topo da nuvem pode ser explicado devido ao aumento na concentração de núcleos de congelamento à medida que a temperatura diminui principalmente na parte mais ativamente convectiva da nuvem. Outro aspecto que chama a atenção é a grande diferença entre o espectro da CG se comparado com a CCG, o primeiro possui um espectro significativamente mais largo com valores que chegaram a mais que 80 cm⁻³ se considerarmos as nuvens isoladas, já o segundo, o espectro foi consideravelmente mais estreito não chegando 1 cm⁻³, ou seja, menos que um cristal de gelo por centímetro cúbico. Isto se explica devido o fato de os núcleos que formam gotículas de água (núcleos de condensação) serem muito mais abundantes na atmosfera do que os núcleos que formam cristais de gelo (núcleos de congelamento). De fato, um só cristal de gelo pode estar rodeado por centenas de milhares de gotículas de água superesfriadas, o que explica a grande diferença entre CG e CCG.

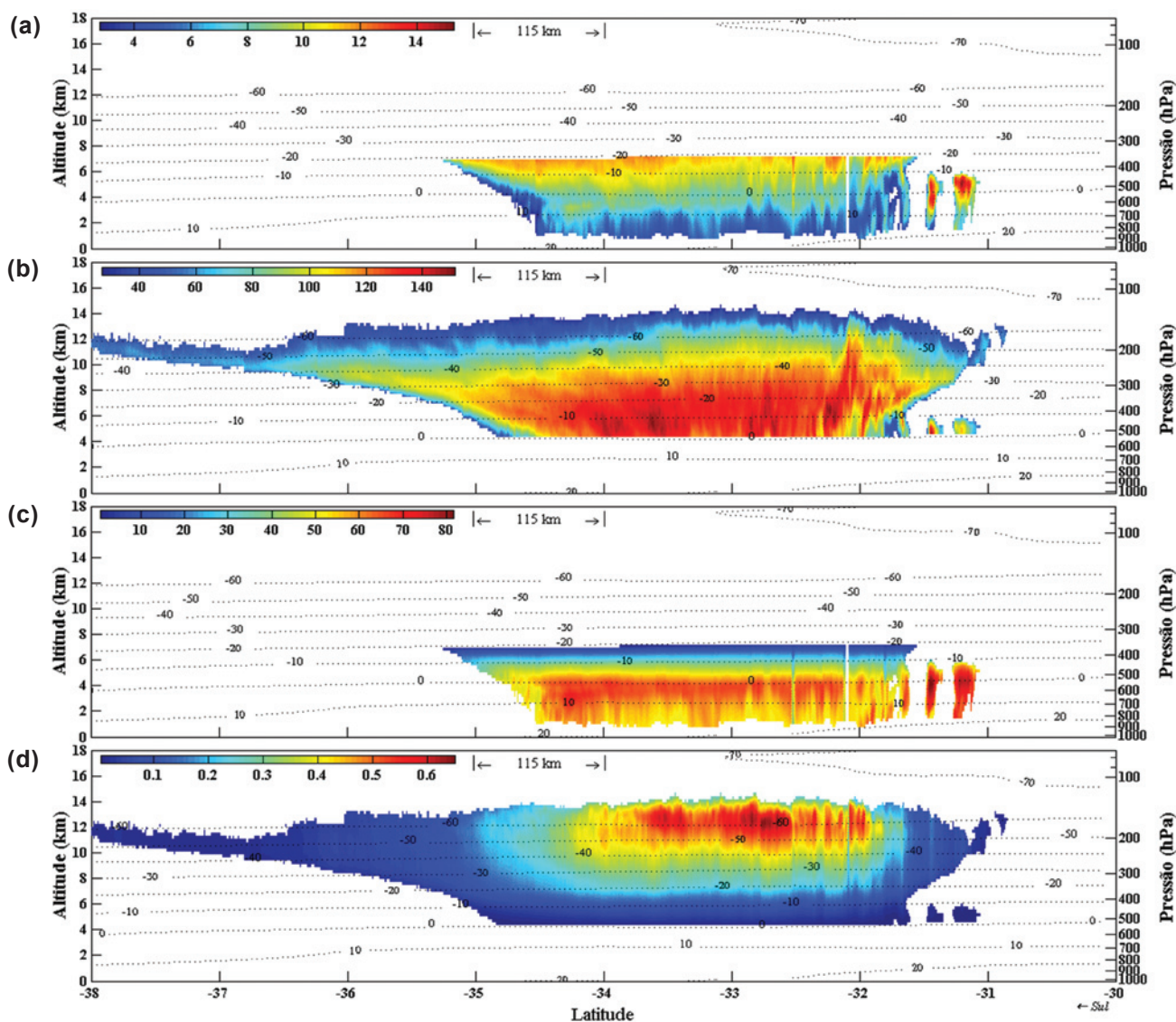


Figura 3 Perfis verticais com os dados obtidos pelo satélite CloudSat, para o dia 04/05/2007, entre 17:41:25 a 17:43:45Z e isotermas ($^{\circ}\text{C}$) (isolinhas) para o: raio efetivo (μm) (a) da gota; (b) do cristal de gelo; concentração (cm^{-3}) (c) de gotas e (d) de cristais de gelo presente na nuvem.

A análise conjunta da Figura 3 (a), (b), (c) e (d), mostra que a região constituída de nuvens Cirrus apresentou baixos valores de concentração associados a cristais de gelo menores. As imagens mostram que há uma relação inversa entre o tamanho e a concentração dos hidrometeoros na região intermediária e convectiva da nuvem. As regiões que apresentaram gotas e cristais de gelo maiores estavam associadas às regiões com baixos valores de concentração. Tais resultados podem ser explicados por meio dos dois principais mecanismos responsáveis pela precipitação que são (1) acreção e agregação, (2) e os processos

de colisão e coalescência. Como já mencionado anteriormente, o primeiro mecanismo foi o principal agente responsável pela precipitação que atingiu o país vizinho e o extremo sul do Rio Grande do Sul. Estes dois mecanismos podem atuar em conjunto ou separadamente. Ambos os mecanismos, favorecem o crescimento da gota e/ou cristal de gelo a custa de gotas d' água e outros cristais de gelo, fazendo com que haja uma diminuição na concentração.

Na Figura 4 é apresentado o conteúdo de água líquida integrado (CALI) na coluna e gelo (CGI), no qual pode ser visto que o CCM foi composto

principalmente por gelo, com valores que alcançaram 8647 g/m² de CGI coincidindo com a região de máxima precipitação. O máximo para o CALI foi de apenas 1120 g/m², para a nuvem isolada.

Cerca de 63% dos dados gerados, eram referentes a medidas de gelo (considerando que não há gelo acima de 0 °C) e 37% dos dados de água líquida (considerando que não há gotas superesfriadas abaixo de -20 °C). Cerca de 19% dos dados gerados, estava contido em um região mista, contendo gotas superesfriadas e gelo (entre 4 a 7 km aproximadamente na imagem).

A Figura 4 mostra ainda que próximo a região onde se encontrou o máximo de precipitação há uma grande diferença entre CGI e CALI. O primeiro atingiu 8647 g/m², enquanto que o segundo para a mesma região atingiu pouco mais 300 g/m². Assim sendo, os resultados confirmam que no interior do CCM a precipitação foi formada por colisões entre cristais de gelo e gotículas superesfriadas, mas principalmente entre cristais de gelo devido o grande conteúdo de gelo presente na nuvem. Portanto, os resultados indicam que o tipo de precipitação formada no CCM, se deu na forma de granizo e neve, mas em sua maior parte a precipitação caiu na forma de neve. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia, em diversas localidades do extremo sul gaúcho os volumes de chuva foram extremamente elevados, registrando acumulados de até 150 milímetros no acumulado de 36 horas na cidade de Jaguarão, entretanto, não foi notificada a presença de granizo no extremo sul gaúcho. Houve registros de granizo em apenas algumas partes da Província de Buenos Aires ocorridas na noite do dia 03, portanto não fazendo parte do período de estudo. A ocorrência de chuvas de granizo depende

de uma série de fatores como: fortes correntes ascendentes no interior da nuvem, grande CAL e altura do nível de derretimento. De fato, as nuvens que estão associadas a registros de granizo possuem a altura do nível de derretimento aproximadamente a 3,4 km. Como pôde ser observada pelas imagens apresentadas no presente trabalho, à altura do nível de derretimento na nuvem estava acima de 4 km. A altura do nível de derretimento é importante, pois define o tempo em que o granizo entra em estado de derretimento até então atingir a superfície. Registros de neve é ainda um caso mais extremo, estes geralmente são observados em situações onde pelo menos a temperatura na superfície é de 4 °C. Como poderá ser observada na análise sinótica (figura 7f), a temperatura estava acima dos 22 °C no Uruguai e Rio Grande do Sul, portanto, não possibilitando a ocorrência de neve na região de estudo como era de se esperar para época do ano.

3.2 Análise Sinótica

Na Figura 5a são apresentadas as cartas de pressão ao nível médio do mar para o dia 04 de maio de 2007, às 12Z (Figura 5a), e para o dia 05 de maio às 00Z (Figura 5b). Na primeira carta (Figura 5a), pode ser notado um sistema de baixa pressão com núcleo de 1006 hPa, localizado sobre a região de Buenos Aires, no qual se estende um pequeno cavado em direção ao oceano Atlântico como pode ser visto pela linha tracejada na figura. Também pode ser observado a presença de um cavado menos intenso em direção ao Rio Grande do Sul, trazendo instabilidade para esta região. Mais ao sul situado sobre o Golfo de San Matias, se encontra um sistema de baixa pressão com núcleo de 992 hPa, já em fase de oclusão associado a um SF que se estendendo até o extremo sul de Buenos Aires. Este SF associado à

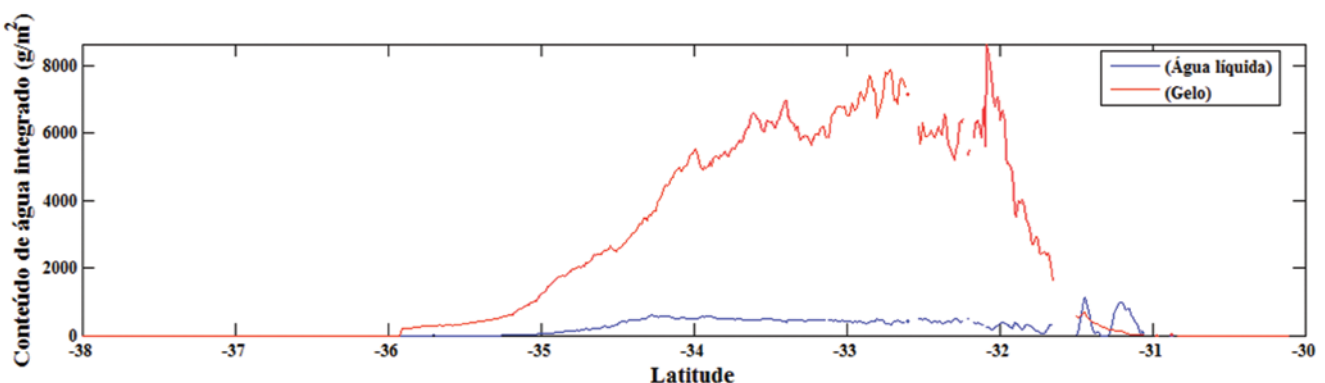


Figura 4 Perfil vertical do Conteúdo de água líquida integrado (CALI) na coluna e gelo (CGI) para o dia 04/05/2007, entre 17:41:25 a 17:43:45Z.

presença de uma massa de ar polar que avançava em direção ao Uruguai atuou como uma rampa frontal dando início ao CCM responsável pelo evento de chuva intensa. Na carta de superfície para o dia 05 de maio, às 00Z (Figura 5b), nota-se que este SF se acoplou ao centro de baixa pressão posicionado sobre a costa do Uruguai, que se encontrava sobre Buenos Aires, já havendo atingido o Uruguai. Maior parte das fortes chuvas ocorridas na cidade de Pelotas (RS) localizada na parte sudeste do Rio Grande do Sul, se concentrou neste período de doze horas. De acordo com Estação Agroclimatológica de Pelotas, os pluviogramas indicaram que a precipitação iniciou por volta das 21Z (18 horas local) do dia 04, e seguiu até aproximadamente às 03Z (00 hora local) do dia 05, ou seja, as fortes chuvas ocorreram antes da passagem do SF, em um ambiente pré-frontal.

Na Figura 6 são apresentados o campo de pressão ao Nível Médio do Mar e divergência de umidade em 1000 hPa (sombreado), (a), (b) e (c) e o movimento vertical do ar e altura geopotencial

em 500 hPa, (d), (e) e (f), para o dia 04/05/2007, às 06Z, 12Z e às 18Z, respectivamente. Nota-se a presença de um extenso canal de convergência de umidade (Figura 6a) desde o sul da Amazônia até o sul do oceano Atlântico, acoplando-se ao sistema de baixa pressão sobre o Golfo de San Matias. Sobre o nordeste da Argentina, verifica-se que há grande convergência de umidade para esta região, com valores que chegaram a ordem de -30×10^{-6} (g/kg)/dia. Esta extensa região de convergência de umidade foi intensificada devido à presença de uma Alta Migratória posicionada sobre o Atlântico Sul, com núcleo de 1024 hPa centrado em 37°S/42°W e ao SF que avançava em direção ao Uruguai formando uma região de convergência sobre a rampa frontal, típica nestas situações meteorológicas. Entretanto na Figura 6d, em contrapartida a intensa convergência de umidade sobre o nordeste da Argentina, pode ser visto um forte movimento convectivo sobre a costa leste de Buenos Aires, com valores que chegaram a ordem de $-0,6$ Pa/s, dando suporte ao desenvolvimento do CCM.

(a)

(b)

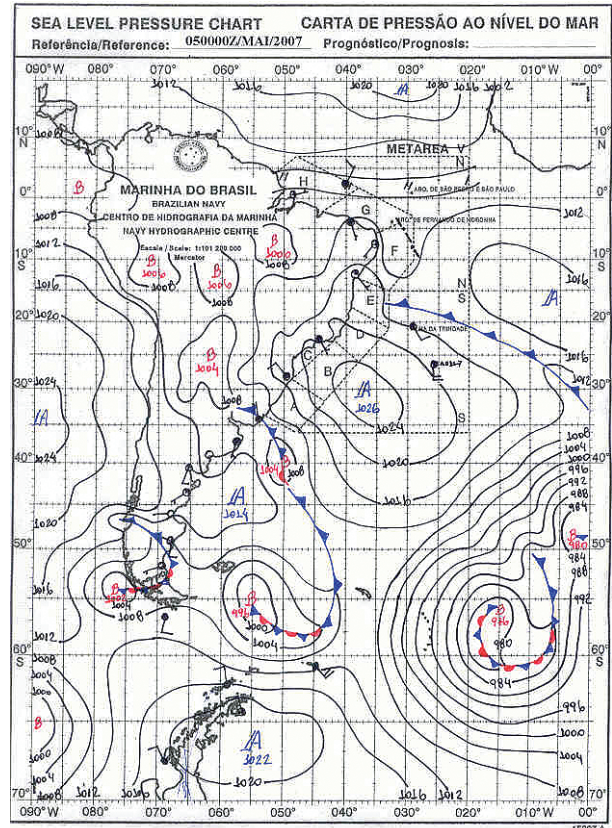
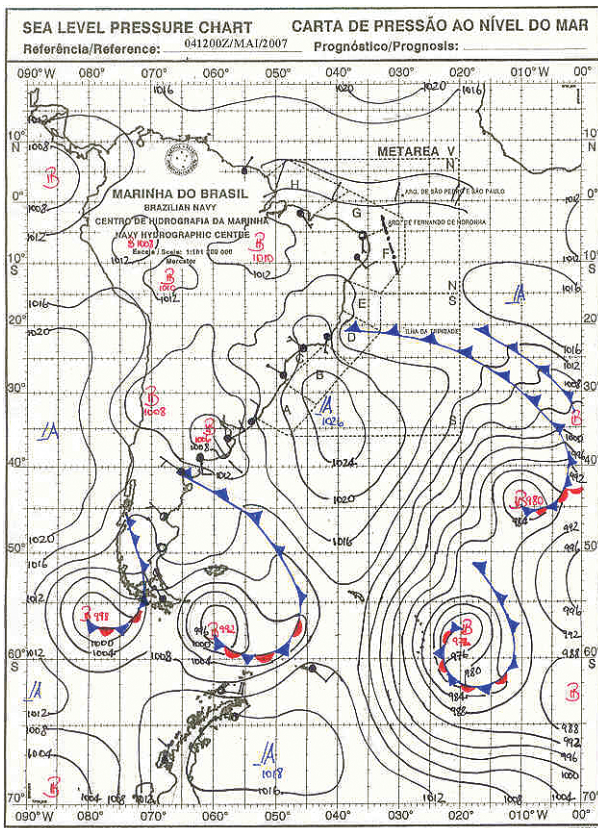


Figura 5 Cartas sinóticas de superfície em maio de 2007 (a) para o dia 04 às 12Z e (b) para o dia 05 às 00Z. Fonte: Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha (DHN/Marinha), disponíveis na página <http://mar.mil.br/dhn/meteorol/>.

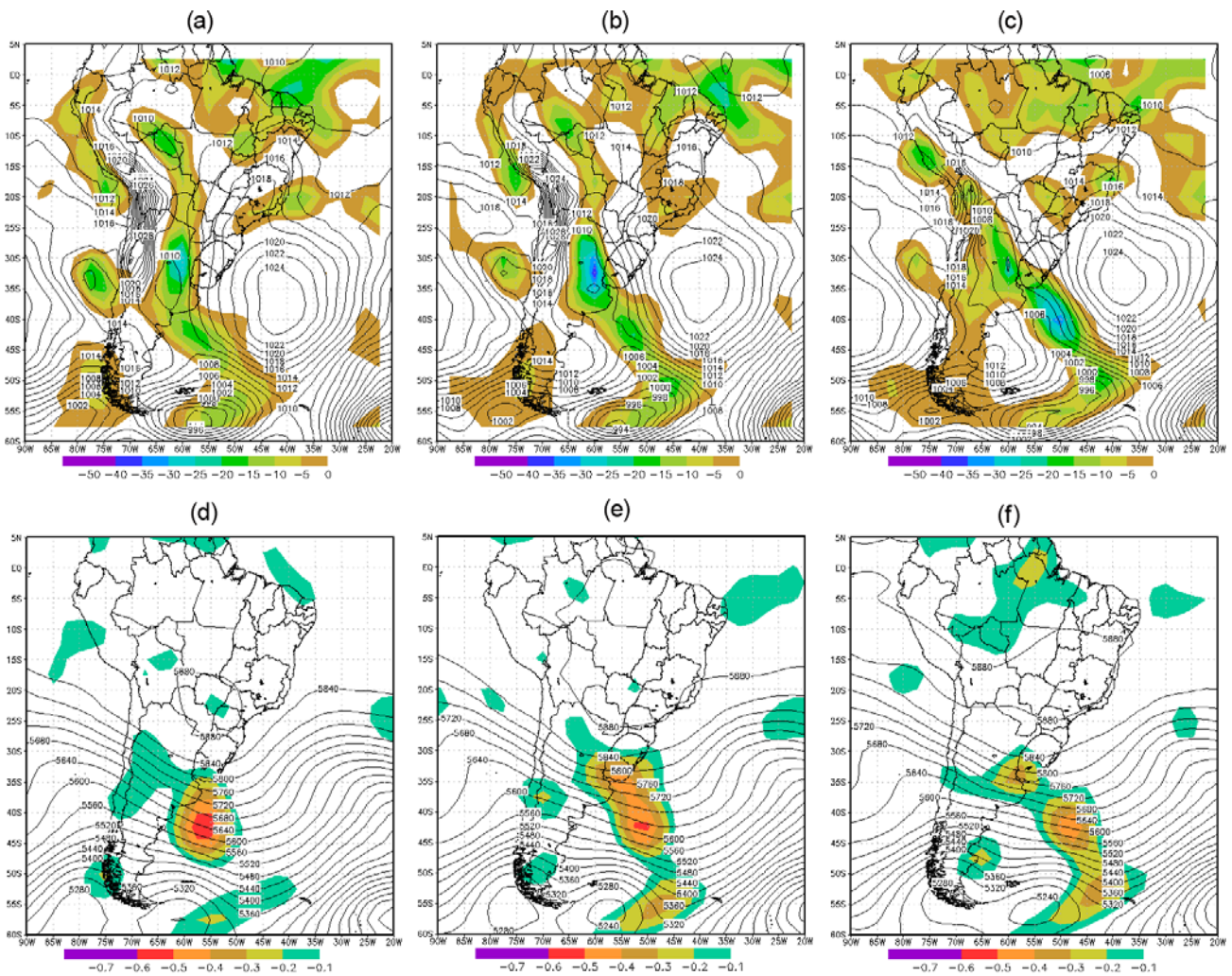


Figura 6 CPNM (hPa) e divergência de umidade ($\times 10^{-6}$) a superfície ($(g/kg)/dia$) (sombreado) para o dia 04/05/2007, (a) às 06Z; (b) às 12Z; (c) às 18Z e Movimento Vertical do ar (Pa/s) em 500 hPa, para o dia 04/05/2007, (d) às 06Z; (e) às 12Z e (f) às 18Z.

Na Figura 6b nota-se que houve sobre o nordeste da Argentina uma intensificação da convergência de umidade, migrando em direção ao sul do Uruguai com valores que chegaram a alcançar a ordem -40×10^{-6} ($g/kg)/dia$, aumentando ainda mais a instabilidade convectiva sobre esta região. Este aumento na convergência de umidade é devido à intensificação do centro de baixa pressão sobre o nordeste da Argentina, com núcleo de 1008 hPa (isóbara fechada sobre o norte de Buenos Aires), como pode ser visto na figura. A Figura 6e, mostra que a região de forte movimento ascendente posiciona-se agora sobre o Uruguai e o extremo sul do Rio Grande do Sul, que combinado com a grande oferta de umidade trazida pela convergência nesta região, intensificou ainda mais o Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) que iria posteriormente se configurar como um CCM.

Na Figura 6c observa-se que houve uma diminuição do núcleo de convergência de umidade sobre o nordeste da Argentina seguido de um enfraquecimento do movimento convectivo sobre o Uruguai (Figura 6f). Entretanto, a região de convergência agora cobre todo o Uruguai atingindo também o extremo sul do Rio Grande do Sul, levando instabilidade para estas regiões, que posteriormente iria ocasionar acumulados significativos de precipitação para o extremo sul do Rio Grande do Sul, como registrado pela Estação Agroclimatológica de Pelotas.

Na Figura 7 é apresentado a campo de umidade específica (sombreado) e temperatura em 1000 hPa, em maio de 2007, para os dias (a) 03 às 18Z; (b) 04 às 06Z e (c) 04 às 18Z e a imagem do satélite GOES-10, para os dias (d) 03 às 20:45Z; (e) 04 às

06Z e (f) 04 às 18Z, destacando-se a evolução do CCM responsável pelo evento. Pode se notar, através da Figura 7 (a), (b) e (c), novamente a presença do canal de umidade proveniente da Região Amazônica associado à convergência de umidade nestes níveis, se estendendo até o Uruguai e o estado do Rio Grande do Sul, fornecendo assim condições propícias à formação e à evolução do CCM caracterizados pela nebulosidade profunda. A formação das primeiras células de nuvem teve início por volta das 19Z (16 horas local), onde posteriormente devido ao avanço do SF e a grande oferta de umidade antecedendo a sua entrada, o sistema de tempestade evoluiu até adquirir características de um CCM, como pode ser verificado por meio das imagens do satélite na Figura 7 (d), (e) e (f).

Na Figura 8 é apresentado o campo de água precipitável referente ao dia (a) 04 maio de 2007

às 18Z e (b) 05 de maio às 00Z, no qual é possível observar que os valores deste parâmetro eram altos na região de estudo, indicando grande possibilidade de chuva forte como pode ser visto pela figura 8a, que apresentou valores entre 35 e 45 kg/m² sobre o Uruguai e sobre a região Sul do estado do Rio Grande do Sul, antecedendo a entrada do SF. Estes valores elevados indicam novamente que a tempestade de chuva intensa ocorreu em um ambiente pré-frontal. Na parte oeste do Uruguai (Figura 8b), os valores alcançaram 55 Kg/m². Embora o conteúdo de água precipitável existente na atmosfera não seja uma medida direta da quantidade de precipitação, este indica a quantidade de vapor disponível na atmosfera para se converter em precipitação, além disso, valores altos deste parâmetro estão associados à grande instabilidade na região, que foi devida à presença dos sistemas de baixa pressão sobre o norte da Argentina e oceano adjacente, como pode ser melhor observado pelas carta sinótica (Figura 5b).

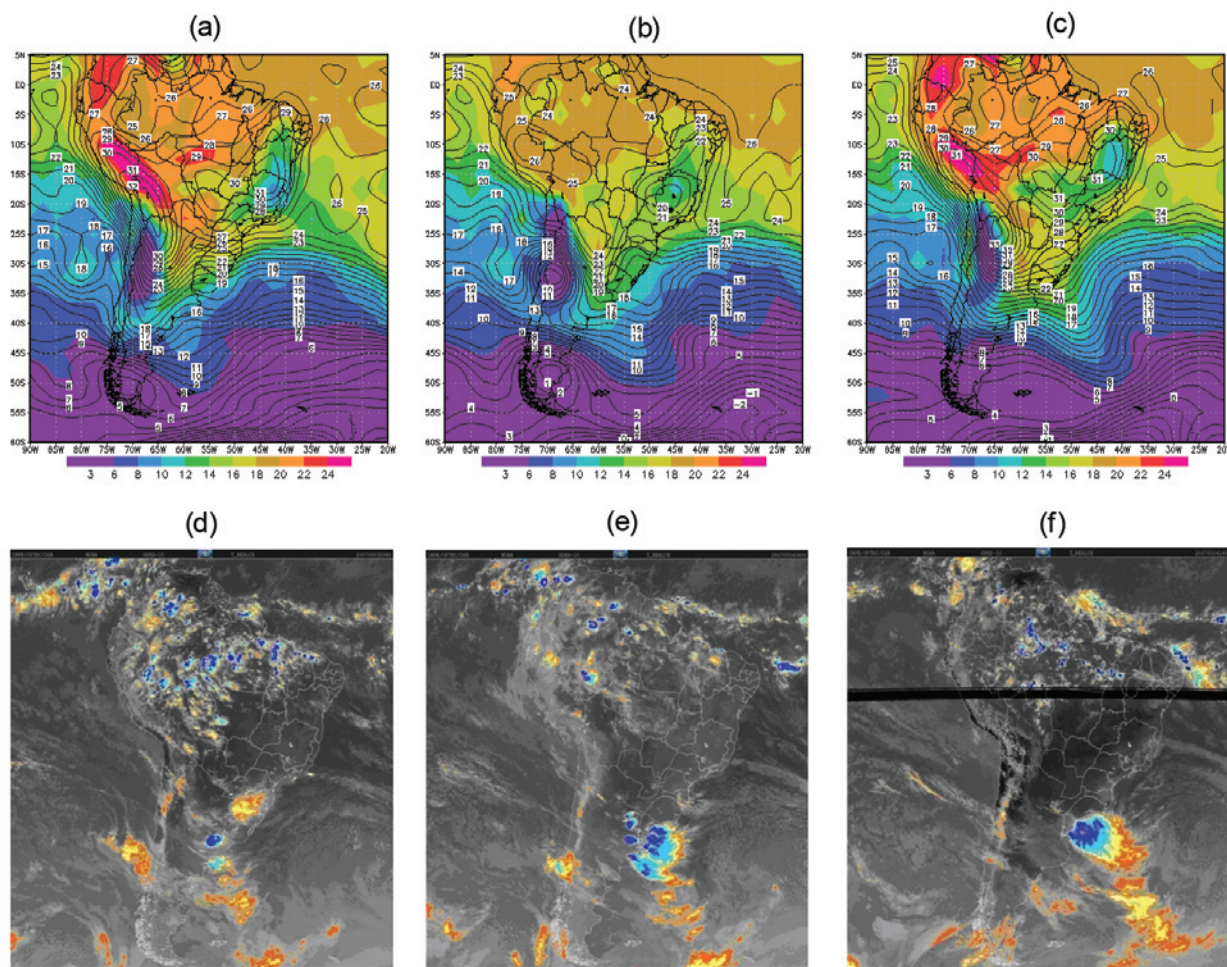


Figura 7 Temperatura (°C) e umidade específica (g/kg) (sombreado) em 1000 hPa, em maio de 2007, para o dia (a) 03 às 18Z; (b) 04 às 06Z; (c) 04 às 18Z e Imagem do satélite GOES-10, para o dia (d) 03 às 20:45Z; (e) 04 às 06Z; (f) 04 às 18Z, destacando-se a evolução do CCM responsável pelo evento.

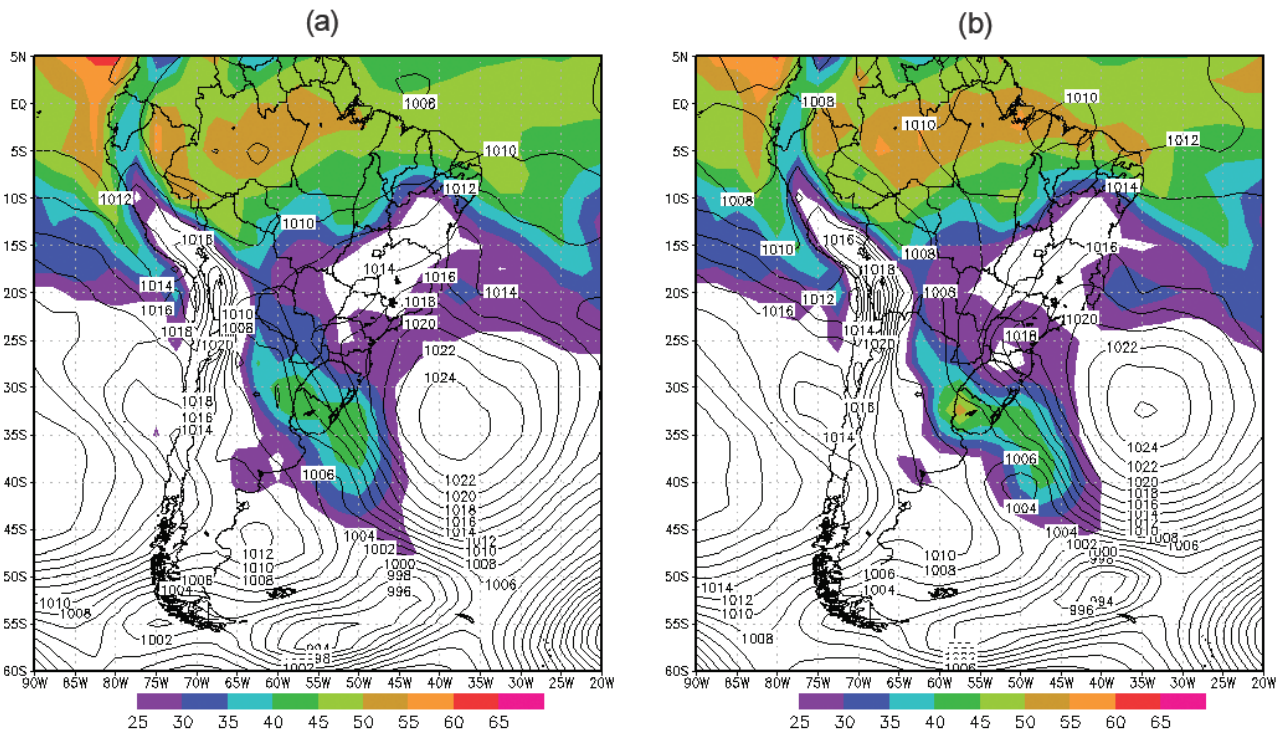


Figura 8 Água precipitável (kg/m^2) e CPNM em maio de 2007, para o dia (a) 04 às 18Z e (b) 05 às 00Z.

Além do intenso movimento ascendente observado no Uruguai e sudeste do estado do Rio Grande do Sul, o Jato de Baixos Níveis (JBN) associado à circulação da alta migratória posicionado sobre o oceano Atlântico (Figura 9), favoreceu o aporte de advecção de umidade e calor provenientes da região Amazônica e oceano adjacente, confluindo para a região onde se desenvolveu o evento. Nota-se através da análise das Figuras 9 (a), (b) e (c), que o JBN teve um papel fundamental no transporte de umidade e calor

para região do Uruguai e sul do estado do Rio Grande do Sul, que seria desestabilizado pela chegada da frente fria ocasionando fortes movimentos convectivos na região. O JBN atuou fundamentalmente como a principal componente mecânica para o abastecimento de umidade para o CCM, transportando umidade e calor para a região da tempestade, ingredientes essenciais para formação e manutenção de sistemas de tempestades como estes. As primeiras células convectivas associadas à tempestade que traria sérios

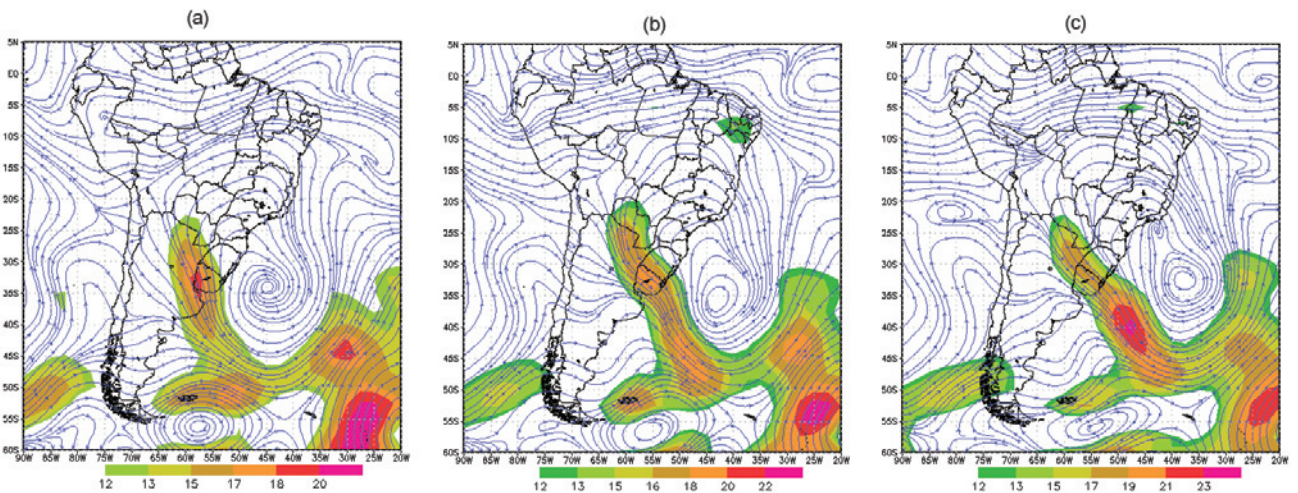


Figura 9 Linhas de corrente e jato (m/s) (sombreado) em 850 hPa, em maio de 2007, para o dia 04 (a) às 06Z; (b) às 12Z e (c) às 18Z.

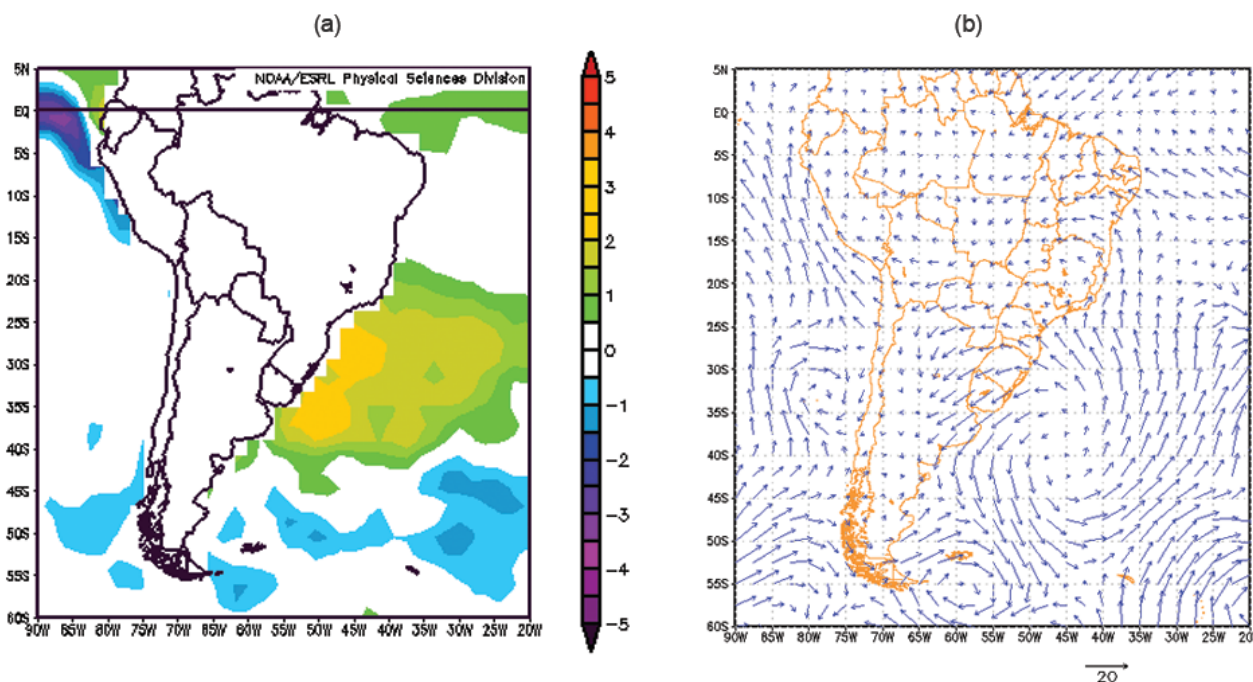


Figura 10 (a) Anomalia de Temperatura da Superfície do Mar ($^{\circ}\text{C}$), para o dia 04/05/2007; (b) Campo de Vento a 10 metros da superfície, para o dia 04/05/2010 às 00Z .

transtornos ao Uruguai e ao sul do estado do Rio Grande do Sul, teve seu início por volta das 19Z do dia 03 de maio, se prolongando até às 18Z do dia 06 de maio de 2007, onde foi observado os últimos aglomerados de nuvens sobre a região de estudo. Este período tão prolongado de atividade convectiva sobre a região foi principalmente devido à atuação constante do JBN associado ao giro anticiclônico da Alta Migratória, que posteriormente se configuraria como uma Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

Além de grande quantidade de umidade e calor vinda da região Amazônica e atuação dos JBN agindo como uma componente mecânica ao transporte de umidade e calor para a região onde se desenvolveu a tempestade, o campo de anomalia de temperatura da superfície do mar (Figura 10a), para o dia 04/05/2007, mostrou que sobre a costa do Uruguai e do estado do Rio Grande do Sul, predominavam temperaturas até 3°C acima da média, favorecendo a uma maior quantidade de evaporação sobre a superfície do mar devido ao aquecimento. Na Figura 10b, é apresentado o campo de vento a 10 metros da superfície, para o dia 04/05/2007 às 00Z, pode ser visto que devido ao giro anticiclônico associado à Alta Migratória sobre o oceano Atlântico, há também um transporte de umidade vinda do oceano

Atlântico em direção ao norte da Argentina, Uruguai e do estado do Rio Grande do Sul antecedendo a entrada do SF. A temperatura da superfície do mar mais aquecida, ocasionando maior quantidade de evaporação confluindo para a região onde se desenvolveu a tempestade, teve um papel importante na manutenção do CCM, pois contribuiu para uma maior quantidade de umidade para a tempestade, em adição à já proveniente da região Amazônica.

4 Conclusões

Os resultados mostraram que para a tempestade em estudo, foi possível obter uma relação direta entre os parâmetros da microfísica das nuvens com a taxa de precipitação, indicando que a análise da constituição em termos das propriedades microfísicas como a distribuição do espectro de gotas e cristais de gelo e do conteúdo dentro de uma nuvem, é uma importante ferramenta no avanço de estudos em previsão de tempestades. Os resultados mostraram que a região com maior taxa de precipitação estava associada aos valores elevados de conteúdo de gelo em contraste com baixo valor de conteúdo de água líquida. A partir destes resultados é possível inferir que a forte precipitação registrada se formou a partir

de neve no interior da nuvem, o que é uma condição importante, pois pode definir a intensidade da chuva que chegará superfície, já que a neve precisaria de mais quantidade de energia para iniciar seu processo de condensação e posteriormente evaporação durante o tempo que permanece em queda livre sobre temperaturas acima do nível de derretimento. Também foi possível verificar que os maiores valores de conteúdo de gelo são encontrados na parte mais interna da nuvem, diminuindo em direção as bordas da nuvem, bem como a parte constituída de nuvens Cirrus e no topo. Assim como no conteúdo de gelo, os maiores cristais de gelo foram encontrados no interior da nuvem, entretanto, observou-se também que os maiores cristais de gelo se encontram logo no início de sua formação (nível de 0°C).

Um ponto interessante que pode ser observado através dos resultados é o aspecto homogêneo e esparso da região constituída de nuvens Cirrus no Complexo Convectivo de Mesoescala, que se mostrou ser uma região formada por pequenos cristais de gelo, baixa concentração e conseqüentemente com baixo conteúdo de gelo. Os resultados apontaram também para a existência de uma relação inversa entre o tamanho e a concentração dos hidrometeoros na parte convectiva e intermediária da nuvem. As regiões que apresentaram gotas e cristais de gelo maiores estavam associadas a regiões com baixos valores de concentração.

É importante lembrar que os resultados referentes à análise microfísica apresentados neste trabalho, foram gerados a partir de um satélite de órbita heliossíncrona, o que por sua vez, limita a sua utilização em um centro operacional de previsão de tempo para fins de previsão e alerta de chuva. No entanto, os dados gerados a partir do satélite Cloudsat, podem ajudar no melhor entendimento dos mecanismos que ocorrem em escala de microfísica das nuvens e no aperfeiçoamento de modelos numéricos de previsão de tempo. Segundo Costa & Pauliquevis (2009), a utilização de dados de microfísica de nuvens pode permitir aferir, validar e calibrar modelos de nuvens, cruciais para o desenvolvimento de parametrizações físicas dos processos envolvendo nuvens para modelos de escala global (que, por sua limitada resolução espacial, são incapazes de representar tais processos explicitamente).

No quadro sinótico, verificou-se a presença de um canal de umidade intensificado pela presença do jato de baixos níveis e valores elevados de

temperatura assim como anomalias positivas da temperatura da superfície do mar precedendo a entrada da frente fria, garantiram grande conteúdo de vapor disponível. Devido ao grande conteúdo de vapor e calor disponível e fortes movimentos ascendentes sobre o Uruguai e o extremo sul do Rio Grande do sul, o Complexo Convectivo de Mesoescala observado foi composto principalmente por cristais de gelo, evidenciando que sua estrutura em escala de microfísica, foi fortemente influenciada pelos processos de grande escala. Portanto a importância de mais estudos nestes tipos de eventos envolvendo não apenas os processos de grande escala, mas também a microfísica das nuvens, torna-se fundamental para o melhor entendimento dos mecanismos envolvidos na precipitação e com isso o aperfeiçoamento dos modelos numéricos de previsão do tempo.

5 Referências

- Boletim Agroclimatológico da Estação Agroclimatológica de Pelotas. Disponível em <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet>> Acessado 08/10/2010.
- Costa, A.A. & Pauliquevis, T. 2009. Aerossóis, nuvens e clima: resultados do experimento Iba para o estudo de aerossóis e microfísica de nuvens. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24: 234-253.
- DSA (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais)/CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos)/INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Disponível em <<http://satellite.cptec.inpe.br/home/>>. Acessado em 05/11/2010.
- Johnson, D.E.; Wang, P.K. & Straka, J.M. 1994. A study of microphysical processes in the 2 August 1981 CCOPE supercell storm. *Atmos. Res.*, 33: 93-123.
- Maddox, R.A. 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, Mesoscale Convective Complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 1475-1493.
- Maddox, R.A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer. Meteor. Soc.*, 61: 1374-1387.
- Rudorff, B.F.T.; Shimabukuro, Y.E. & Ceballos, J.C. 2007. *O sensor MODIS e suas aplicações Ambientais no Brasil*. São José dos Campos. Parêntese, 428p.
- Santos, A.C.S. 2001. *Estudo de caso da variabilidade de parâmetros microfísicos em nuvens da*

- Amazônia*. Programa de Pós-graduação em Física, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 101p.
- Stephens, G.L.; Deborah, G. V.; Ronald, J. B.; Gerald, G.M.; Kenneth, S.; Zhien, W.; Anthony, J. I.; Ewan, J.O.; William, B.R.; Stephen, L.D.; Steven, D.M.; Richard, T.A.; Angela, B.; Cristian, M. & the cloudsat science team. 2002. The CLOUDSAT Mission and the A-Train. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 83: 1771-1790.
- Teixeira, M.S. 2005. *Atividade de Ondas Sinópticas relacionada a episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, 121p.
- Willis, P.T.; Hallett, J.; Black, R.A. & Hendricks, W. 1994. An aircraft study of rapid precipitation development and electrification in a growing convective cloud. *Atmos. Res.*, 33: 1-24.