



Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de Março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Analysis of the Thermodynamic Structure Associated with the Development of the Storm Between 17 and 18 March 2013 in the State of Rio de Janeiro, Brazil

Frank Bruno Baima de Sousa & Hugo Abi Karam

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Meteorologia Av. Athos da Silveira Ramos, 274 CCMN,
21910-200 Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

E-mails: frankbaima@yahoo.com.br; hugo@igeo.ufrj.br

Recebido em: 20/08/2013 Aprovado: 20/01/2014

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_1_17_26

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise termodinâmica da estrutura vertical das variáveis conservativas, temperatura potencial, temperatura potencial equivalente e temperatura potencial equivalente de saturação associadas à tempestade ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro (RJ), Brasil. Argumenta-se que o acoplamento entre uma frente fria sobre o Oceano Atlântico e um canal de umidade estabelecido sobre o centro-oeste brasileiro resultou na formação de precipitações elevadas na parte norte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e também na Região Serrana do RJ. Entre as consequências provocadas por este evento tem-se: deslizamentos de encosta e enchentes urbanas, 34 mortes e vultosos prejuízos. Dados de radiossondagens indicaram forte instabilidade condicional no dia 17/Mar/2013, associada intensa advecção de ar úmido e forte cisalhamento do vento de sul na Camada Limite Superficial (CLS) sobre a RMRJ. As condições termodinâmicas favoreceram a organização e manutenção de convecção forçada associada ao desenvolvimento vertical de uma tempestade na noite de 17 para 18/Mar/2013, sobre a Região Serrana.

Palavras-chave: Instabilidade condicional; advecção de ar quente; Jatos de Altos Níveis

Abstract

This paper presents an analysis of the thermodynamic structure of the atmosphere with the processes related to a thunderstorm occurred on 17 and 18 March 2013 in the State of Rio de Janeiro. The coupling of a stationary cold front in the Atlantic Ocean with a moisture channel over western central Brazil, resulted in elevated precipitation in the northern part of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro (MARJ) and of the surroundings areas (northward highlands). Among the consequences caused by this event are: landslides and urban floods, 34 deaths and material damage. The result was obtained from analysis of radiosonde data, which indicated strong conditional instability, presence of strong advection hot air and wet associate with wind shear in the surface boundary layer, as registered in the International Airport Tom Jobim in late afternoon of March, 17th 2013. The thermodynamic conditions was plenty favorable to the organization and maintenance of deep forced convection, which provided alarming values of precipitation.

Keywords: Conditional instability; advection of warm air; wind shear and upper level jet

1 Introdução

No Brasil, uma grande porcentagem dos desastres naturais são provocados pela dinâmica atmosférica. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, INPE, os desastres naturais mais frequentes no Brasil estão associados aos eventos de precipitações extremas. Segundo Paolucci (2012), a frequência de riscos hidrometeorológicos nas metrópoles brasileiras são influenciados pela expansão urbana e adensamento das vilas e favelas, que por consequência provocam aumento de ocorrências dramáticas em virtude da acumulação d'água nos córregos e dos movimentos de massa durante os eventos pluviométricos intensos e prolongados. Riscos naturais ligados a eventos hidrometeorológicos severos, tais como: enchentes e deslizamentos de terra, favorecem proliferação de doenças como leptospirose, dengue, malária, entre outras.

Este trabalho analisa a estrutura termodinâmica e as condições atmosféricas reinantes durante o evento de precipitação extrema entre os dias 17 e 18 de março de 2013 no RJ, com consequências catastróficas sobre a Região Serrana (principalmente, na área de Petrópolis), resultando em 34 mortes e grandes prejuízos patrimoniais e financeiros.

2 Dados e Metodologia

A RMRJ localiza-se aproximadamente entre as latitudes 22°32'14"S e 22°54'10"S e longitude de 42°42'51"W e 43°42'32"W, apresenta uma topografia complexa, sendo composta por maciços rochosos no meio de extensa conurbação, sob terreno parcialmente vegetado, compreendendo ainda áreas de influência das baías de Guanabara (BG) e Sepetiba, das escarpas da Serra do Mar ao norte e do litoral Atlântico ao sul. Segundo Dereczynski *et al.* (2009), o relevo acidentado e diversificado da RMRJ contribui para a grande variabilidade espacial da precipitação observada na área.

Durante o verão, chuvas intensas são frequentes, as quais têm provocado muitos desastres na RMRJ e vizinhança serrana. De acordo com Liebmann *et al.* (1999), nessa estação, o RJ apresenta clima ensolarado, úmido e chuvoso, com grande amplitude térmica diária. Este clima está associado frequentemente ao estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Jourdan *et al.* (2006), ao analisarem a influência da brisa marítima oriunda do Atlântico e

da brisa estuarina das baías de Guanabara e Sepetiba sobre a distribuição do vento na RMRJ, verificaram que durante o horário de menor aquecimento da superfície (noite) o quadrante predominante de vento é de Norte (sentido continente-oceano), enquanto que horários em que a superfície se encontra mais aquecida (dia) o quadrante predominante é de sul (sentido oceano-continente). Cardoso (2010) mostrou que além do vento predominante do quadrante sul à tarde, também ocorre um padrão diurno e sazonal de oscilação do vento, associado às circulações de brisa-terrestre e vale-montanha, que juntas formam uma célula meridional mais intensa no plano (y, z), responsáveis por convergência do escoamento sobre a RMRJ (W da BG) durante o dia.

A circulação resultante na RMRJ tem sido explicada como resultado do acoplamento das células de brisa, pelo efeito das heterogeneidades superficiais sobre a estrutura da CLP (via distribuição do fluxo do calor sensível) e pelos efeitos térmico e mecânico da topografia.

Entre os dias 8 e 22 de março de 2013 ocorreu à primeira campanha observacional do experimento micrometeorológico MCITY-RJ, com o objetivo de coletar dados da CLP via lançamento de radiossondagem, na estação chuvosa da RMRJ. O experimento teve participação efetiva de observadores do Destacamento de Controle Espaço Aéreo (DTCEA-RJ) na base de lançamento do Aeroporto Internacional Tom Jobim, RJ. O intervalo de tempo entre sondagens foi de 3 horas.

Neste trabalho, foram calculadas variáveis termodinâmicas derivadas, associadas a processos adiabáticos e pseudo-adiabáticos, a partir das variáveis medidas diretamente pelas sondas, usando as formulações indicadas por Bolton (1980). Para tal, os dados foram reformatados e interpolados linearmente, em níveis regulares de 25 m, entre a superfície e 25 km. Para análise do perfil vertical da estrutura termodinâmica aplicou-se o critério de instabilidade condicional e o cálculo de índices termodinâmicos para caracterizar a instabilidade atmosférica, por exemplo, os índices Energia Potencial Atmosférica Convectiva (CAPE) e Energia de Inibição de Convecção (CINE), de acordo com a metodologia indicada por Rogers & Yau (1989) e Cotton *et al.* (2011). Modos de convecção foram caracterizados a partir da proposta de Aspliden (1976), a qual emprega a temperatura potencial equivalente (Θ_e), de modo que o grau de convecção aumenta proporcionalmente com Θ_e (Tabela 1).

Os sistemas atmosféricos que atuaram durante o experimento foram identificados nas imagens do

satélite GOES-12, usando o canal do vapor de água, disponibilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do INPE. Também foram usados dados da reanálise do NCEP/NCAR/NOAA. Empregou-se também dados diários de taxa de precipitação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ).

Modos	Descrição
Modo 1	Convecção extremante inibida, sem chuva e Θ_e mínimos entre níveis de 800 e 700 hPa
Modo 2	Convecção moderadamente inibida, sem chuva e Θ_e mínimos entre níveis de 750 e 650 hPa
Modo 3	Convecção levemente inibida, taxa de precipitação menor que 0,1 mm por hora e Θ_e mínimos entre níveis de 700 e 600 hPa
Modo 4	Convecção levemente desenvolvida, com pequenos Cbs, pancadas de chuva, taxa de precipitação < 1 mm por hora e Θ_e mínimos entre níveis de 700-500 hPa
Modo 5	Convecção moderada, com cúmulos <i>congustus</i> e vários Cbs, chuva moderada e Θ_e mínimo entre 330 e 335 K
Modo 6	Convecção severa desenvolvida, com chuvas fortes, maioria dos valores de Θ_e acima de 335 K

Tabela 1 Classificação dos modos de convecção de sondagens proposta por Aspliden (1976).

3 Resultados

3.1 Análise Sinótica

Nas imagens do satélite GOES-12 foi possível identificar o padrão Y na distribuição da nebulosidade sobre a AS, nos dias 17 e 18 de março de 2013 (Figuras 1A e 1B), associada à presença de uma frente fria, da Zona de Convergência Intertropical, da Alta da Bolívia (AB) e do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN). A imagem referente às 11:00 h (UTC) do dia 18/Mar/2013 mostra que o sistema frontal organizou a convecção sobre o Brasil.

A partir da análise do ciclo diurno observado nas imagens do satélite, notou-se que o acoplamento do canal de umidade, do sistema frontal e do Jato de Altos Níveis (JAN), em posição de saída à

leste do cavado baroclínico, foram componentes determinantes na definição das condições que resultaram em taxas de precipitação muito elevadas sobre a Zona Serrana do RJ.

Notou-se que a estimativa de precipitação por satélite do INPE, não indicou resultados de mesma magnitude aos observados no dia 18/Mar/2013 sobre a Região Serrana. Salienta-se que a liberação de calor latente associada aos altos valores de precipitação podem explicar em primeira aproximação as temperaturas relativamente elevadas observadas pelo satélite (Garstang & Fitzarrald, 1999). Nota-se também que não foi possível visualizar com nitidez os agrupamentos convectivos na imagem de satélite no dia 18/Mar/2013 sobre o RJ, provavelmente porque tratava-se de nuvens com pouco contraste no canal infravermelho termal devido aos topos serem relativamente quentes.

3.2 Análise de Dados de Reanálise do NCEP

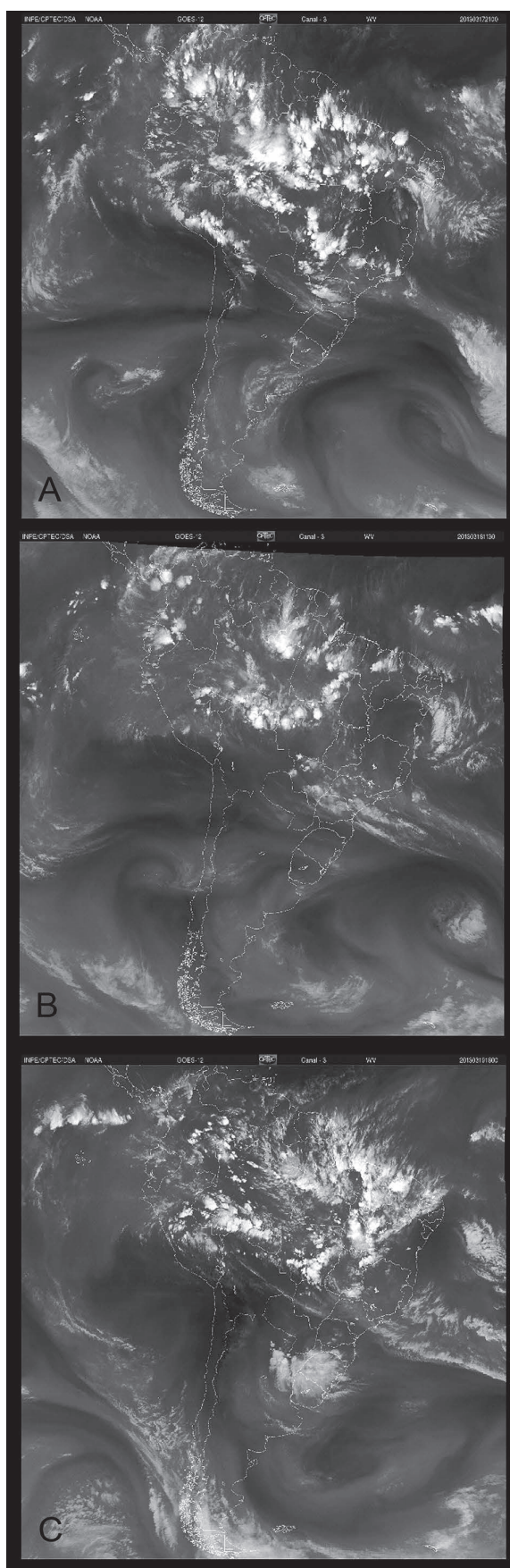
Analisando-se o padrão médio diário do escoamento do vento em 200 hPa em 17/Mar/2013, nota-se uma ampla área de circulação anticiclônica associada a AB que progressivamente se torna ciclônica, gerando o VCAN (Figura 2A). Ressalta-se que para o período de interesse, a posição da AB (aproximadamente, 17°S e 70°W) encontra-se praticamente em sua posição climatológica. A presença de um VCAN, com centro em 12°S e 40°W, sobre boa parte do estado da Bahia e ao norte de Minas Gerais favoreceu a subsidência de ar (com divergência de massa superficial) (Figura 3A) e assim convergência em sua borda. A configuração do VCAN se manteve no dia 18 e enfraqueceu no dia 19/Mar/2013.

Durante o evento, um Jato de Altos Níveis (JAN) também encontrava-se na orientação NW-SE a leste do eixo do cavado, mas já sobre o oceano, e com sua área de entrada estendendo-se do Oceano até o RJ. O escoamento em altos níveis aliado com a estrutura termodinâmica favorável e as condições de superfície influenciaram a convecção no início da noite do dia 17/Mar/2013 e madrugada do dia 18/Mar/2013. A localização do JAN favoreceu o suporte de altos níveis para a convecção observada (Figura 2).

No dia 17Mar/2013, predominava ao longo dos litorais das regiões S e SE, em 850 hPa, um escoamento do quadrante sul, associado à circulação anticiclônica pós-frontal. Essas condições definiram

**Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de
Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de Março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil**

Frank Bruno Baima de Sousa & Hugo Abi Karam



o escoamento de sul de moderado a intenso à superfície no litoral do RJ ao longo do dia 17/Mar/2013. Áreas de baixa pressão sobre o MS também induziam convergência de umidade na região CO do Brasil.

Observou-se presença de convergência de massa em 850 hPa entre SP, PR e MS (Figura 3). O alinhamento do sistema frontal com o canal de umidade proporcionou forte convergência sobre o RJ (Figura 3B). A intensidade de convergência de massa diminuiu após o deslocamento da frente fria em direção ao oceano (Figura 3C).

O padrão de instabilidade decorrente do acoplamento do canal de umidade com a frente fria, proporcionou acumulados de precipitação superior à 100 mm por dia, em algumas cidades do RJ (Tabela 2). As estações automáticas do INMET registraram precipitação inferior à climatologia do mês em Petrópolis (63%) e superior em Teresópolis (153%). Apesar do acumulado de Teresópolis ser maior, o município da Região Serrana que mais sofreu com as consequências da chuva foi Petrópolis, com registro pluviométrico pelo INEA de 260,75 mm no dia 17/Mar e 248 mm em 18/Mar/2013 para o bairro de Quitandinha no centro de Petrópolis; valor estes que são quase dobro da média mensal esperada para março. E apesar da estação automática do INMET não ter registrado precipitação elevada em sua localização no Rio de Janeiro, sua estação convencional registrou 64 mm por dia no dia 18/Mar/2013, após o evento em Petrópolis.

Estações	Dia 17	Dia 18	Dia 19	Acumulado dos 3 dias	Climatologia de março
Rio de Janeiro	2,2	2,0	10,2	14,6	103,3
Petrópolis	2,4	182,0	7,4	191,8	287,8
Xerém	6,8	196,2	6,0	209	287,8
Teresópolis	4,0	318,8	25,6	348,4	226,4
N. Friburgo	77,8	96,2	3,0	177	151,0
Vila Militar	24,6	43,2	1,4	69,2	-

Tabela 2 Acumulados de precipitação diária de seis estações automáticas do INMET nas cidades mais atingidas do RJ entre 17 e 18/Mar/2013. Fonte: INMET.

Figura 1 Imagens do canal do vapor de água do satélite GOES-12/NOAA/USA feitas às 21:00 h (UTC) de 17/Mar/2013 (A), às 11:00 h (UTC) de 18 /Mar/2013 (B) e às 18:00 h (UTC) de 19/Mar/2013 (C). Imagens disponibilizadas pelo CPTEC/INPE.

Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de
Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de Março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil
Frank Bruno Baima de Sousa & Hugo Abi Karam

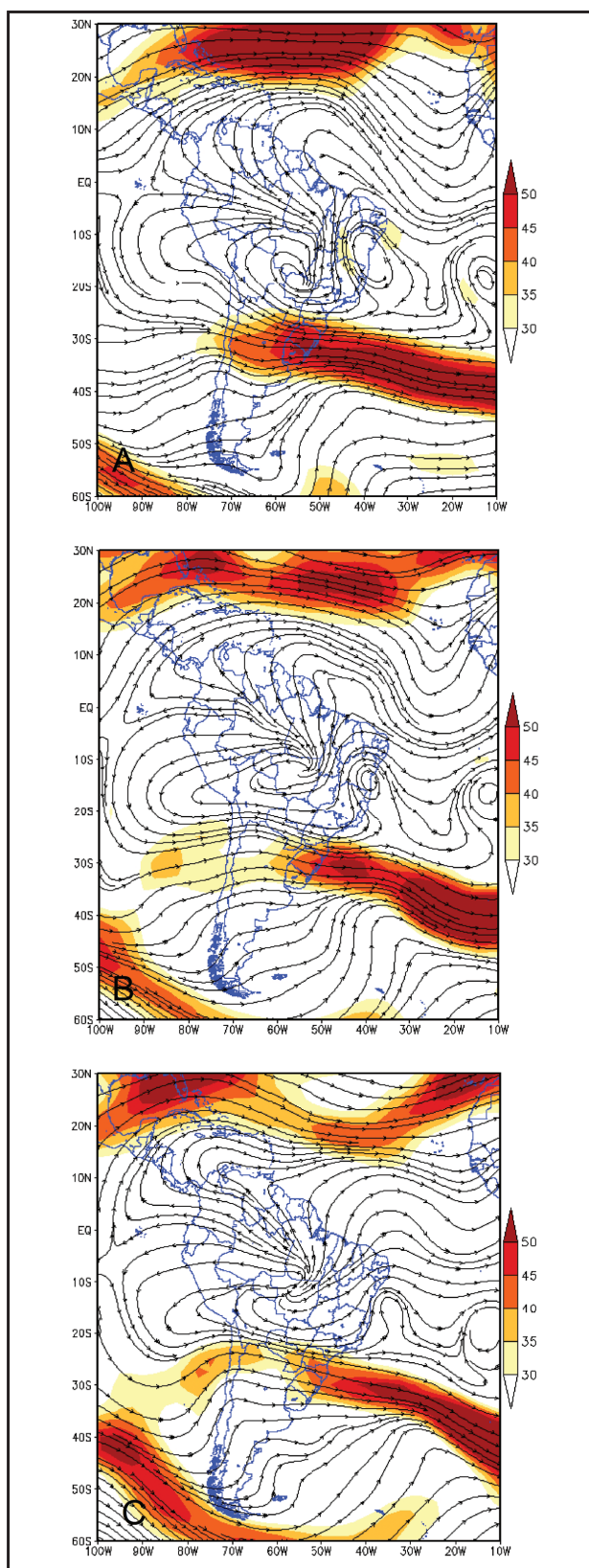


Figura 2 Linhas de corrente médias diárias do escoamento em 200 hPa para os dias 17 (A), 18 (B) e 19 (C) de março de 2013. A escala de cores indica a magnitude do vento horizontal em unidades de $m s^{-1}$.

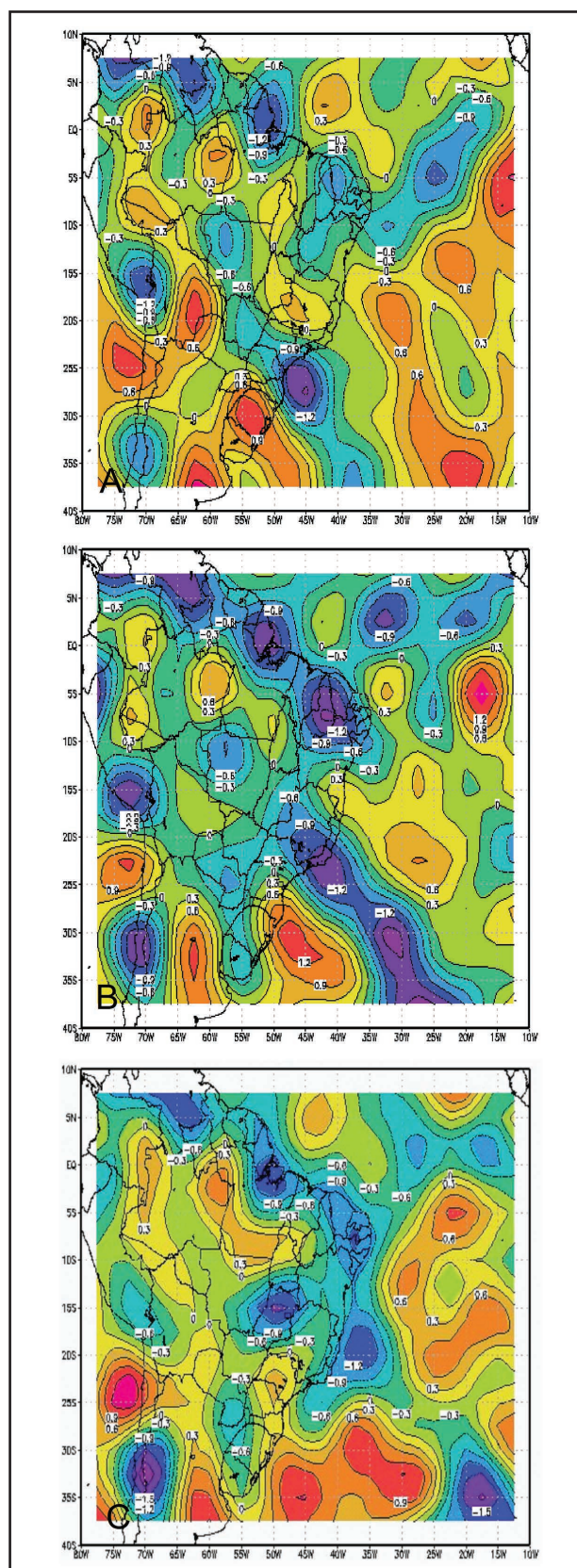


Figura 3 Divergência do escoamento horizontal (média diária) em 850 hPa para os dias 17 (A), 18 (B) e 19 (C) de março de 2013.

3.3 Análise Termodinâmica

Os perfis termodinâmicos das sondagens atmosféricas dos dias analisados indicou presença de forte instabilidade condicional sobre a RMRJ no dia 17/Mar/2013, até às 24:00 h (UTC). A Figura 4 mostra os perfis verticais das variáveis de temperatura potencial (Θ), temperatura potencial equivalente (Θ_e) e temperatura potencial equivalente saturada (Θ_{es}), para o dia 18/Mar/2013. No período entre 00:00 e 09:00 h (UTC), observou-se que em toda a coluna troposférica havia predominância de ar úmido em condições próximas à saturação, favorecendo instabilidade potencial. Nota-se que subsidência transporta propriedades conservativas dos níveis superiores aos inferiores da troposfera, o que pode resultar em condições consideradas desfavoráveis a persistência da nuvem convectiva. Entretanto, se o perfil troposférico encontra-se próximo da saturação, o efeito pode ser positivo em associação a uma retroalimentação de ar úmido na nuvem (Emanuel, 2005). Nas sondagens lançadas às 00:00 e 03:00 h (UTC), as bases das nuvens encontravam-se em torno de 975 hPa, sendo que a umidade atmosférica próxima à superfície era aproximadamente 89%. Esta quantidade elevada de vapor de água na CLP pode ter contribuído para um maior desenvolvimento vertical da tempestade. Note-se que na CLP predominava condições de instabilidade estática e instabilidade potencial, com Θ_e diminuído com altura, durante todo o período diurno.

Em níveis médios, no dia 18/Mar/2013 observou-se uma redução da umidade específica do vapor de água, provavelmente devido à precipitação, no período entre 06:00 h (UTC) e 21:00 h (UTC). Os valores de Θ_e se aproximaram dos valores de Θ entre 540 e 660 hPa, provavelmente em associação a mudança de fase do vapor para água líquida. Na sondagem das 21:00 h (UTC) observou-se ligeira redução da umidade específica na CLA. Entre os horários das sondagens de 00:00 e 12:00 h (UTC), o perfil vertical de Θ_e encontra-se mais quente em relação aos horários posteriores. Essas sondagens podem ser classificadas no Modo VI de Aspliden (1976), convecção severamente desenvolvida. Enquanto as demais sondagens, o perfil vertical de Θ_e referiu-se a convecção moderadamente desenvolvida (i.e., modo V).

De acordo com Machado & Silva Dias (1990), uma situação termodinâmica que propicia condições mais favoráveis para tempestades severas mostra alto valores de umidade na CLA e uma inversão

de subsidência em 500 hPa. Esse tipo de sondagem corresponde aproximadamente ao tipo I de Miller (Bluestein, 1993). Neste trabalho as sondagens do dia 18/Mar/2013 são próximas do tipo II de Miller, típicas dos trópicos. Os perfis de Θ_e e Θ_{es} mostram uma ligeira secagem entre 660 e 560 hPa, enquanto que acima de 540 hPa o perfil do ambiente voltou a ficar próximo à saturação (Figura 4). Praticamente todo o perfil troposférico encontrava-se bastante úmido em condições favoráveis à precipitação associada a convecção forçada.

Através de dados processados pela antena de GPS conectada à radiossonda, verificou-se que houve uma predominância de ventos do quadrante sul, principalmente na baixa troposfera, no dia 18/Mar/2013 (Figura 5). Esse dia foi marcado pela presença e intensificação do JAN com velocidade em torno de 25 ms^{-1} e máximo entre 300 e 500 hPa. A presença desse JAN pode ser devida à baroclinia associada ao contraste térmico oceano-continente. Notou-se ainda um cisalhamento direcional médio do vento entre 940 e 300 hPa (horário), associado à advecção quente.

Entre os dias 17 e 19 de março observou-se um resfriamento progressivo na camada entre a superfície e 2500 metros (Figura 6 A). Notou-se ainda, através das variações das temperaturas potenciais que essa camada apresentava instabilidade condicional (absolutamente instável) (Figura 6A e 6B). O aquecimento da superfície no dia 17/Mar, combinado com a presença de umidade em baixos e médios níveis nos dias 17 e 18/Mar (Figura 6C), favoreceram a formação de tempestades de maior extensão vertical sobre a região de interesse. Estima-se que o nível de perda de empuxo da tempestade estava em torno de 380 hPa pela análise da Figura 4A, entretanto o topo da nuvem pode ter alcançado a tropopausa, próximo a 200 hPa, devido as condições de convecção forçada, com suporte em baixos e altos níveis.

As diferenças entre os perfis de Θ , Θ_e e Θ_{es} , às 12:00 h (UTC) entre os dias 17 e 19 de março (Figura 7) indicam resfriamento e secamento da camada entre a superfície e 2500 m. Nos níveis médios a liberação de calor latente pela precipitação resultou ligeira variação de Θ . A predominância de valores negativos das diferenças de Θ_e e Θ_{es} na média troposfera associado ao aumento da umidade específica entre 3000 e 5700 m pode ser resultado do transporte das correntes ascendentes da tempestade (Figuras 7 e 8).

Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de
 Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de Março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil
 Frank Bruno Baima de Sousa & Hugo Abi Karam

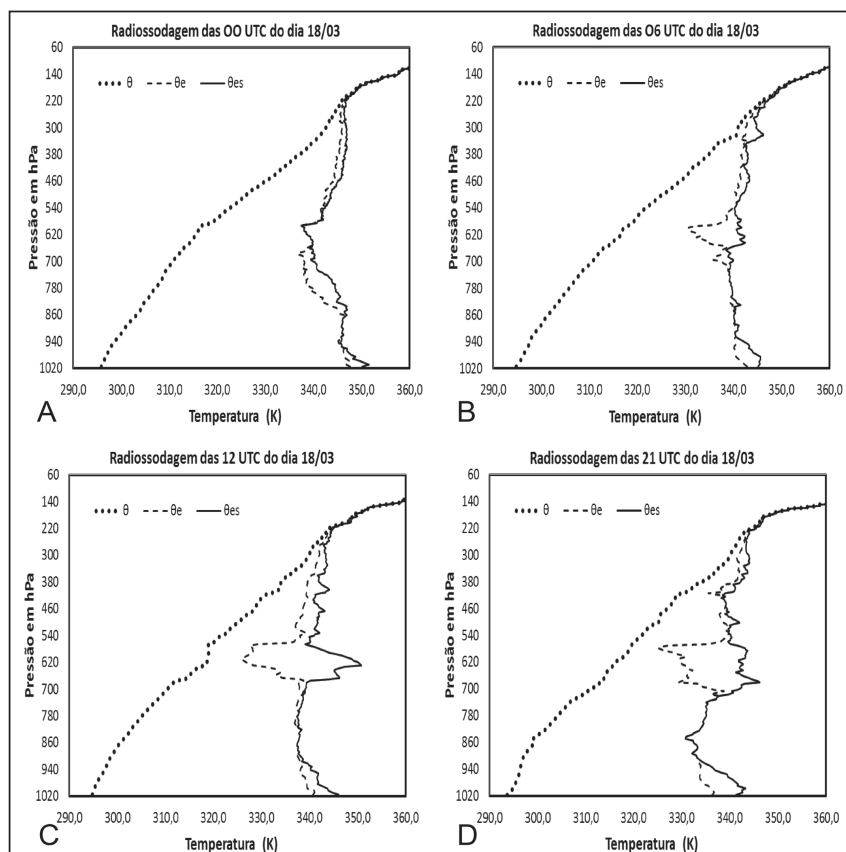


Figura 4 Perfis atmosféricos das temperaturas potenciais do dia 18/Mar/2013 referentes aos lançamentos das 00:00, 06:00; 12:00 e 21:00 h (UTC) no aeroporto Tom Jobim, bairro do Galeão, Rio de Janeiro, RJ.

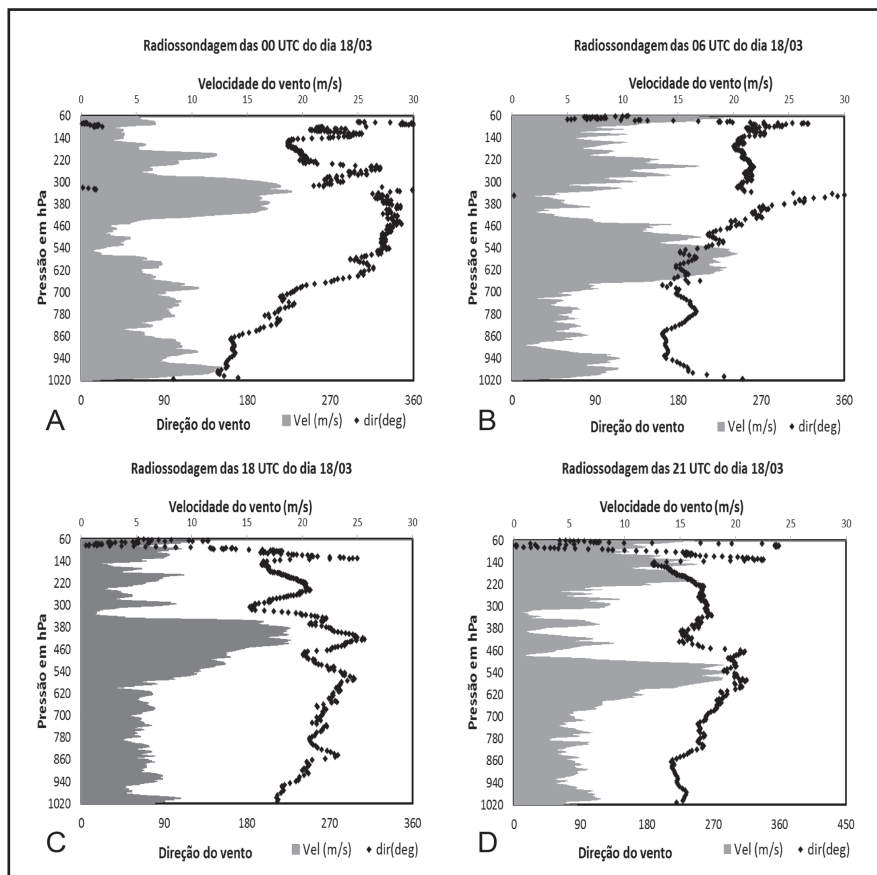


Figura 5 Perfis atmosféricos de direção e velocidade do vento do dia 18/Mar/2013 referentes aos lançamentos das 00:00, 06:00; 18:00 e 21:00 h (UTC) no aeroporto Tom Jobim, bairro do Galeão, Rio de Janeiro, RJ.

Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de
Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de Março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Frank Bruno Baima de Sousa & Hugo Abi Karam

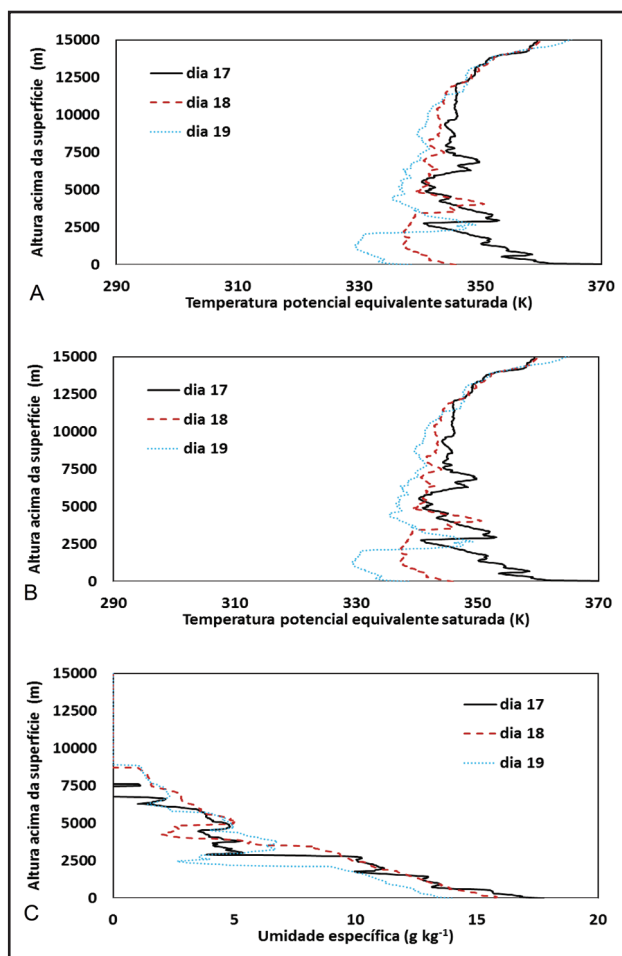


Figura 6 Perfil vertical de temperatura potencial (A), temperatura potencial equivalente saturada (B) e umidade específica (C), para os dias 17 a 19/Mar/2013.

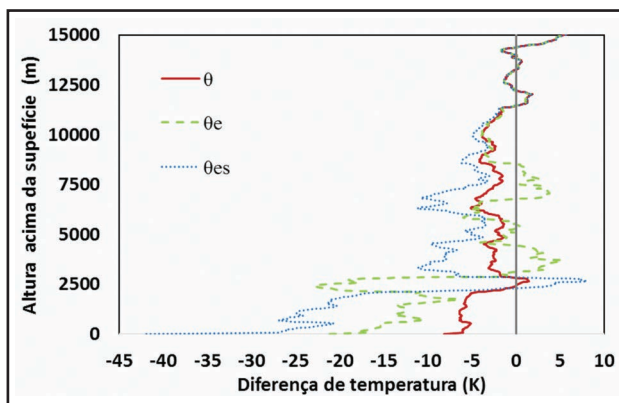


Figura 7 Diferenças de temperaturas potenciais referente as sondagens lançadas às 12 horas (UTC) dos dias 17 e 18/Mar/2013. O cálculo para a obtenção dos seguintes perfis, foi feito pela subtração dos perfis do dia 19/Mar menos dia 17/Mar/2013.

Para complementar a análise dos perfis de temperatura potencial calculou-se a CAPE e CINE do conjunto de sondagens. A CAPE presente na tarde

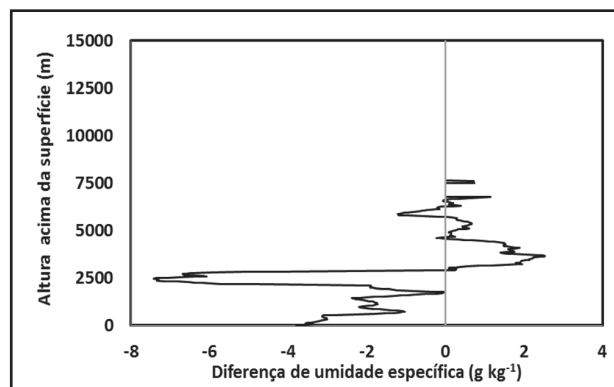


Figura 8 Diferenças de umidade específica (q) referente as sondagens lançadas às 12:00 horas (UTC) dos dias 17 e 18 de março de 2013. O cálculo para a obtenção dos seguintes perfis, foi feito pela subtração dos perfis do dia 19/Mar menos dia 17/Mar/2013.

do dia 17/Mar/2013 alcançou valor ligeiramente acima de 1000 J kg^{-1} , favorável à convecção profunda, enquanto que valor de CINE não superou 230 J kg^{-1} durante todo o evento (Figura 9). Note-se que a presença de CINE pode ter um efeito de atrasar a liberação convectiva (Emanuel, 1994), que pode ocorrer devido convecção forçada ou por aquecimento acentuado da superfície (Iribarne & Godson, 1981). Após as 00:00 h (UTC) do dia 18 os valores da CAPE se tornaram inferiores aos valores de CINE inibindo a convecção profunda. Como indicado anteriormente, houve ocorrência de precipitação fraca em alguns pontos da área mesmo após a tempestade, provavelmente em associação à presença de nuvens Nimbo-estrato e condições favoráveis às chuvas orográficas.

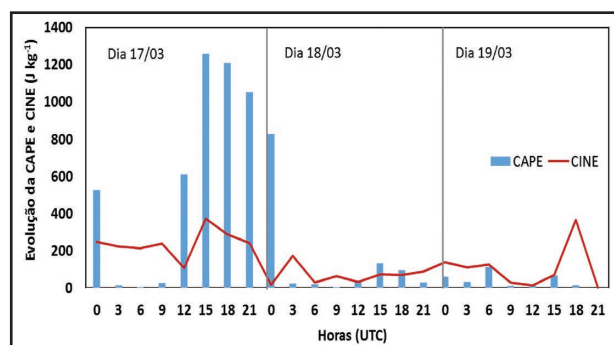


Figura 9 Comportamento diurno dos índices CAPE e CINE no intervalo de 17 a 19 de março de 2013.

Para confirmar a hipótese de que a atmosfera livre apresentava condições estaticamente estáveis antes da tempestade efetuou-se o cálculo do gradiente vertical da temperatura do dia 17/Mar/2013 às 12:00 h (UTC) ao longo da sondagem. Encontrou-se um valor mediano de $-0,0074 \text{ K m}^{-1}$, com quartil

superior igual a $-0,0088\text{K m}^{-1}$, e quartil inferior igual $-0,005\text{K m}^{-1}$ (Figura 10). Apesar da maioria dos pontos da sondagem apresentar gradiente negativo indicando estabilidade, existem valores positivos indicando presença de instabilidade, sobretudo junto à superfície. Daí deduz-se a importância dos processos convectivos.

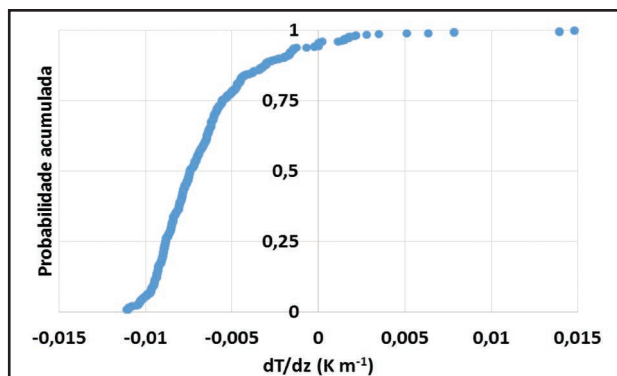


Figura 10 Função acumulada de probabilidade do gradiente vertical de temperatura correspondente a sondagem de 17/Mar/2013 às 12:00 h (UTC).

4 Conclusões

O evento ocorrido entre os dias 17 e 18 de março de 2013, acarretou inúmeros prejuízos para a RMRJ e seu entorno (região serrana), principalmente para as cidades de Petrópolis e Teresópolis, que registraram chuvas acima do esperado para o referido mês. Este evento de precipitação, devido a deslizamentos de terra em Petrópolis, resultou em grandes prejuízos para a cidade, com 1466 pessoas desalojadas e 34 fatalidades. De acordo com Amaral *et al.* (2013), o episódio ocorrido nos dias 17 e 18/Mar/2013 acarretaram em mais de 200 deslizamentos na Região Serrana do RJ. Os autores relatam que 75% dos deslizamentos se concentraram no distrito de Petrópolis, principalmente nos bairros Quitandinha e Independência.

A análise das radiossondagens permitiu caracterizar a estrutura vertical média da troposfera e as condições de instabilidade termodinâmica ao longo da coluna.

A incursão do ramo frio e úmido da frente estacionária do Atlântico na região sudeste e o acoplamento da mesma com o canal de umidade sobre o centro-oeste foi determinante para a formação de nuvens convectivas. O ar úmido deslocado para a RMRJ através da circulação na CLP de sul favoreceu a liberação da instabilidade termodinâmica associada à convecção forçada.

Uma série de fatores favoreceram para ocorrência de precipitação intensa: i) presença de instabilidade condicional no início do evento; ii) suporte de ar superior (entrada de jato); iii) organização de áreas de baixa pressão no continente devido a passagem de uma frente fria no litoral; iv) escoamento pós-frontal caracterizado por forte advecção de ar marítimo de sul convergindo com a topografia das escarpas da Serra do Mar ao norte da RMRJ; v) cisalhamento do vento entre a baixa e alta troposfera e vi) condições de umidade próximo à saturação ao longo da baixa e média troposférica.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Edson Pereira Marques Filho do IGEO-UFRJ e ao Prof. Dr. Amauri Pereira de Oliveira do IAG-USP pela disponibilização de dados de sondagens atmosféricas realizadas durante a primeira campanha observacional do Projeto MCITY na RMRJ (processos FAPERJ E26/111.620/2011 e FAPESP N. 2011/50178-5) e também ao Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Rio de Janeiro (DTCEA/FAB).

6 Referências

- Amaral, C.; Correa, R.; Salles, O.R. & David, F. 2013. Desastre associado a escorregamentos no mês de março de 2013 em Petrópolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14, Rio de Janeiro, 2013, *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Rio de Janeiro, 1 CD-ROON.
- Alonso, F.M & Saraiva, B.M.J. 2007. Estudo numérico do papel dos esquemas de convecção na simulação de um evento severo nos extratropicais do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25: 237-235.
- Aspliden, C.I. 1976. A classification of the structure of the tropical atmosphere and related energy fluxes. *Journal of Applied Meteorology*, 15: 692-697.
- Barry, R.G. & Chorley, R.J. 1998. *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge, London, 409 p.
- Betts, A.K. 1974. Thermodynamic classification of tropical convective soundings. *Monthly Weather Review*, 102: 760-764.
- Betts, A.K. 1978. Convection in the Tropics. RS/RMS/AMS/DMG Conf. on 'Meteorology over the Tropical Oceans'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104: 105-132.
- Bluestein, H.B. 1997. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes*, Oxford University Press, v. 2, 594 p.
- Bolton, D. 1980. The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, *EUA*, 108: 1046-1053.
- Cardoso, M.M.R. 2010. *Contribuição do balanço de energia*

Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de
Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de Março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Frank Bruno Baima de Sousa & Hugo Abi Karam

- sobre superfícies urbanas no desenvolvimento de tempestades na região metropolitana do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, COC-COPPE-UFRJ, 96 p.
- Cotton, W.R.; Bryan, G. H. & Van Den Heever, S.C. 2011. *Storm and Cloud Dynamics*. 2nd Ed. Academic Press, International Geophysics Series, vol. 99, 883p.
- Deardorff, J.W. 2006. On the entrainment rate of a stratocumulus topped mixed layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102: 563-582.
- Dereczynski, C.P.; Oliveira, J.S. & Machado, C.O. 2009. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24 (1): 24- 38.
- Emanuel, A. 1994. *Amospheric Convection*. Orford University Press. 580 p.
- Garstang, M. & Fitzaralld, D.R. 1999. *Observations of surfasse to atmosphere interections in the tropics*. Orford University Press, 404 p.
- Iribarne, J.V. & Godson, W.L. 1981. *Atmospheric thermodynamics*. Kluwer Academic Publ., vol. 2, 259 p.
- Jourdan, P.; Marton, E. & Pimentel, L.C. 2006. Caracterização do regime de vento próximo à superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro no período 2002-2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, Florianópolis, 2006. Disponível <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-303a0b9ec889455e51dc2ef518378f17.pdf>> Acesso em: 02 abr. 2013.
- Liebmann, B.; Kiladis, G.N.; Marengo, J.A. & Ambrizzi, T. 1999. Submonthly Convective Variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, 12: 1877-1891.
- Machado, L.A.T. & Silva Dias, M.A.F. 1990. Análise de uma Tempestade severa sobre a cidade de São Paulo: Um exemplo de interações entre diferentes escalas de movimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 6, Salvador, 1990, Disponível em <<http://www.cbmet.com/cbm-files/16-0298ab0f2914fe2a5d5fec77ec8a4cd6.pdf>> Acesso em: 15 mai. 2013.
- Marques Filho, E.P.M; Karam, H.A.; Miranda, A.G. & França, J.R.A. 2009. Rio de Janeiro's Tropical Urban Climate. *Quarterly News Letter of the International Association for Urban Climate (IAUC)*, p. 5-9.
- Mota, M.A.S. & Nobre, C. 2006. Relação da variabilidade da energia potencial convectiva disponível (CAPE) com a precipitação e a alta da Bolívia durante a c a m p a n h a Wet-AMC/LBA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21: 344-355.
- Paolucci, O.C. 2012. *Risco hidrometeorológico no município de Belo Horizonte: eficiências e deficiências desde os anos 1990 na sua gestão*. Dissertação de mestrado em Geografia, UFMG, 96 p.
- Pereira Filho, A.J.; Barros, M.T.L.; Hallak, R. & Gandú, A.W. 2004. Enchentes na região metropolitana de São Paulo: aspectos de mesoescala e avaliação de impactos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza, 2004, Disponível em < http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=5&totalRows_Recordset_busca=694&cgid=22> Acesso em: 20 jun. 2013.
- Rogers, R.R. & Yau, M.K. 1989. *A short course in cloud physics*. 3ª Ed., U.K.: Pergamon Press, p. 81-95.