

Análise de chuva intensa associada ao desastre de origem natural ocorrido em 2010, em Angra dos Reis, RJ, aplicando o modelo BRAMS.

Analysis of extreme rainfall associated with natural disaster occurring in Angra dos Reis - RJ in 2010, applying the BRAMS model

Marina Aires*, José Maria de Castro Junior, Reiner Olíbano Rosas***, Jorge Luiz Fernandes de Oliveira******

*Departamento de Geografia – Universidade Federal Fluminense, email marinageouff@gmail.com

**Departamento de Geografia – Universidade Federal Fluminense, email jmcjunior@id.uff.br

***Professor do Programa de Pós Graduação em Geografia – Universidade Federal Fluminense, email reiner_rosas@id.uff.br

****Professor do Programa de Pós Graduação em Geografia – Universidade Federal Fluminense, email jorgeo@id.uff.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v51i0.77803>

Resumo

Os desastres de origem natural, associados a fenômenos atmosféricos, que ocorrem em áreas urbanas estão diretamente relacionados à influência antrópica. A falta de planejamento urbano corroborada com o crescimento desordenado das cidades e a ocupação de áreas impróprias tornam o ambiente propício a desastres provocados por eventos extremos. A convergência desses fatores deflagrou na virada do ano de 2009 para 2010 um dos piores desastres ocorrido no município de Angra dos Reis, Região Sul do estado do Rio de Janeiro. Um conjunto de movimentos gravitacionais de terra soterrou inúmeras edificações e vias urbanas, provocando danos materiais, sociais, econômicos, ambientais e principalmente humanos. O presente artigo analisa o comportamento atmosférico, associado ao ambiente antrópico, que culminou no referido desastre. Utiliza-se o modelo atmosférico Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) para simular o comportamento da atmosfera local durante o período de 30 de dezembro de 2009 a 01 de janeiro de 2010, além de imagens de satélite, dados de análises sinóticas e da Reanálise 1. Dois experimentos foram realizados; o experimento utilizando os parâmetros padrões de radiação e microfísica de nuvens subestimaram a variável precipitação acumulada. Já o experimento realizado com modificações nas referidas parametrizações apresentou valores mais próximos aos observados pela rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Palavras-chave: Evento extremo, ocupação irregular, modelagem numérica, BRAMS, Reanálise 1.

Abstract

Disasters of natural origin, associated with atmospheric phenomena, that occur in urban areas are directly related to anthropogenic influence. The lack of urban planning supported by the disorderly growth of cities and the occupation of inappropriate areas make the environment prone to disasters caused by extreme events. At the turn of 2009 to 2010, the convergence of these factors triggered one of the worst disasters that occurred in the municipality of Angra dos Reis, in the southern region of the state of Rio de Janeiro. A set of gravitational movements of the earth buried countless buildings and urban roads, causing material, social, economic, environmental and especially human damage. This article analyzes the atmospheric behavior, associated with the anthropic environment, which culminated in the aforementioned disaster. The Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) atmospheric model is used to simulate the behavior of the local atmosphere during the period from December 30, 2009 to January 1, 2010, in addition to satellite images, synoptic analysis and Reanalysis data 1. Two experiments were performed; the experiment using standard radiation parameters and cloud microphysics underestimated the accumulated precipitation variable. The experiment carried out with modifications in the referred parameterizations, on the other hand, presented values closer to those observed by the National Institute of Meteorology (INMET) network.

Keywords: Extreme event, irregular occupation, numerical modeling, BRAMS, Reanalysis 1.

I. INTRODUÇÃO

Os desastres são definidos como resultado de um evento adverso a um ecossistema ou à sociedade, podendo ser causados por fatores naturais ou antrópicos e que provocam danos ambientais, naturais, sociais e econômicos. Denominam-se desastres de origem natural aqueles que são ocasionados por fenômenos atmosféricos, climatológicos, hidrológicos, geomorfológicos, geológicos provocados por perturbações do meio natural, que acontecem independentemente da ação antrópica e que atingem regiões habitadas pelo homem ocasionando danos (AMARAL et al., 2009).

O Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (2010) ressalta que no ano de 2010 foram registrados oficialmente 862 desastres ocorridos em território nacional, tendo as Regiões Nordeste (39%) e Sul (30%) como as mais atingidas. Na Região Sudeste ocorreram eventos ocasionados por inundações, deslizamentos e escorregamentos como as principais causas de mortes e danos (CEPED, 2010). Dentre os estados com mais de 30 ocorrências de desastres naturais, em 2010, o Rio de Janeiro aparece em primeiro lugar, com 18% (CEPED, 2010).

Na Região Sudeste do Brasil, a configuração do relevo, a concentração demográfica aliada à ocupação desordenada em áreas de risco, a falta de planejamento urbano e o clima característico, fazem desta, uma das regiões que mais sofrem com desastres de origem natural no país. De acordo com UFSC (2013) uma das principais ameaças, relacionadas à meteorologia, são as chuvas intensas, vendavais, granizo e outros, que muitas vezes são estopim para ocorrência de um desastre de origem natural.

Dentre os fenômenos meteorológicos que ocorrem na Região Sudeste destaca-se a ocorrência de sistemas transientes, a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Na transição de 2009 para 2010, uma frente fria se deslocava sobre o oceano Atlântico próximo ao estado do Rio de Janeiro. Segundo o INMET foram registrados cerca de 143 mm, entre a noite/madrugada do dia 31 de dezembro de 2009 e a manhã do dia 01 de janeiro de 2010 (JUSTE, 2010).

O município de Angra dos Reis, situado na Região Sul Fluminense, possui características geomorfológicas específicas. A presença de relevo acidentado combinada com o evento de precipitação extrema de 440 mm ocorrido em 36 horas e com a ocupação desordenada do solo sem o devido planejamento urbano contribuiu para a ocorrência do desastre em Angra dos Reis onde 52 pessoas morreram, centenas ficaram desabrigadas, sendo declarado Estado de Calamidade Pública (ANGRA DOS REIS, 2010). Essa informação divulgada pelo Boletim Oficial – 247 de 11 de março de 2010 do município de Angra dos Reis não está de acordo com os dados da rede de observação do INMET.

O objetivo do presente artigo é simular o ambiente sinótico e de mesoescala com o BRAMS para compreender as causas que deflagraram o desastre em Angra dos Reis no réveillon de 2010. Foram utilizados o modelo Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) e o software Grid Analysis and Display System (GRaDS), além de dados oficiais.

Caracterização dos movimentos de massa na área de estudo

Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2012), os movimentos de massa estão categorizados como um subgrupo dos desastres geológicos e podem ser divididos em quatro subgrupos: quedas, deslizamentos, corridas de massa ou subsidência e colapso. Para o desastre de Angra dos Reis, utilizar-se-á o subgrupo movimentos de massa.

Christofolletti (1980) ressalta que “movimentos de massa ou movimentos de regolito são todos os movimentos gravitacionais que promovem a movimentação de partículas ou parte do regolito (massas) pela encosta abaixo”. Castro (2009) denomina movimentos de massa como “todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características.”

Fernandes et al. (2008) destacam que existem vários tipos de movimento de massa, como as quedas de blocos, subsidências, escorregamentos, escorregamentos rotacionais, escorregamentos translacionais, os escoamentos, os rastejos e as corridas de massa.

Gabler et al. (2019) ressaltam que os deslizamentos são fatores de risco, pois ameaçam vidas, economias, ecossistemas e edificações que convivem em regiões com encostas, que apresentam alternância de camadas inclinadas de rochas de diferentes tipos.

De acordo com Augusto Filho (2001) existem alguns fatores antrópicos que contribuem para os movimentos de massa, como a remoção da cobertura vegetal em encostas, vazamentos nas redes de abastecimento de água e esgotos, cortes nos taludes realizados sem estudos prévios e vibrações nas encostas causadas por explosões.

Segundo Silva (2017):

Entre as causas externas para indução de movimentos de massa, destacam-se as alterações da geometria do sistema encosta pelo homem, comumente percebidas no Brasil. As causas intermediárias também têm participação antrópica importante quando, por exemplo, é alterado escoamento superficial das águas.

Na área de estudo, segundo Francisco (2004) há a predominância de áreas com média encosta, e com presença de topos de encosta. Na Figura 1, o mapa da Geomorfologia de Angra dos Reis, proposto por Silva (2017), mostra o predomínio de médias e altas encostas. Essa espacialização foi realizada a partir de um modelo digital de terreno. Segundo Silva (2017), “as declividades existentes na área de estudo são predominantemente de 20° a 35°, mas há muitas áreas com declividades acima de 35°.

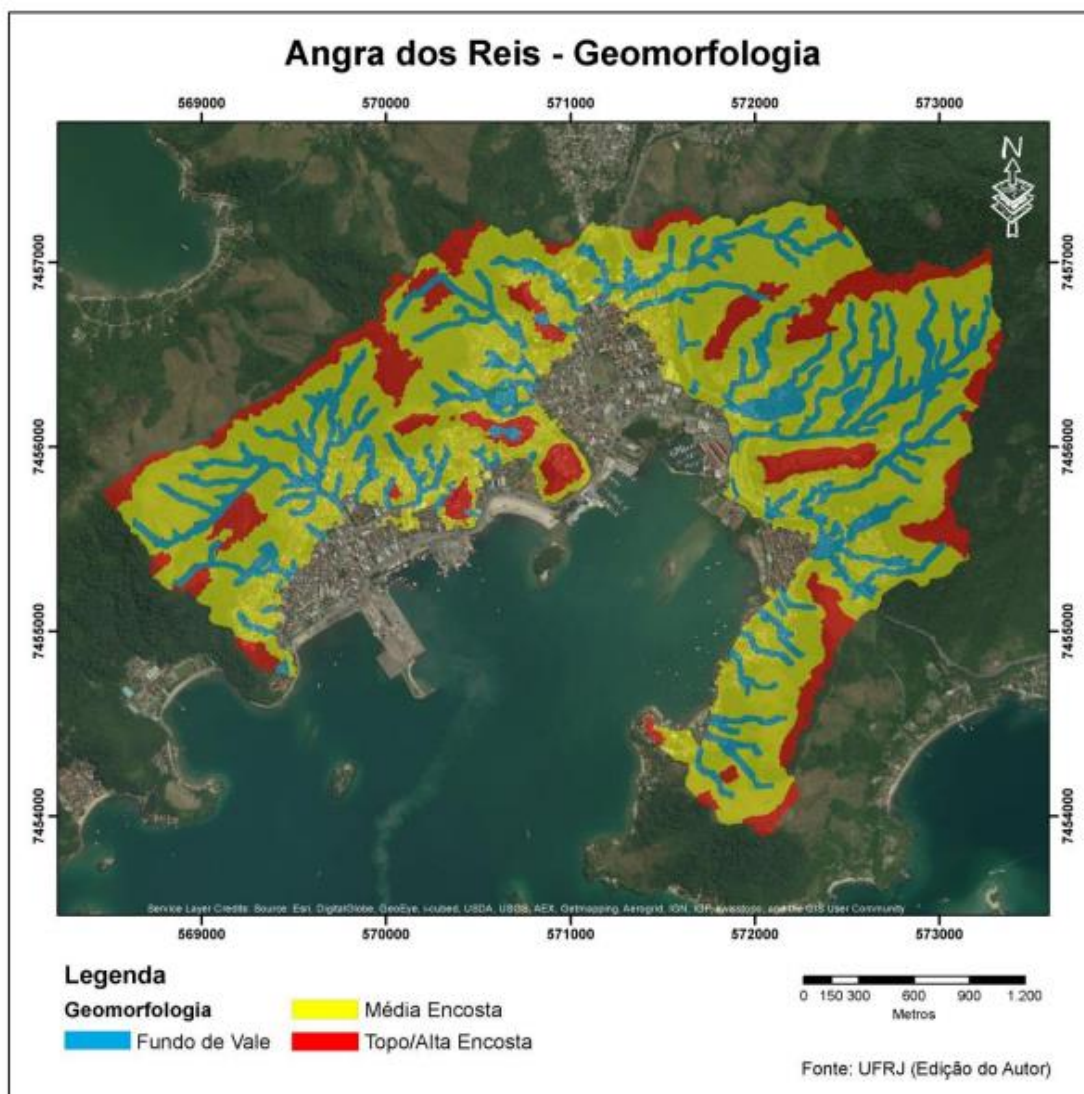


Figura 1 -Geomorfologia da cidade de Angra dos Reis. Fonte: Silva (2017).

O desastre ocorrido no dia 1º de janeiro de 2010 foi marcado pelos escorregamentos de massa que atingiram todo o município. Uma chuva intensa atingiu o Sul Fluminense. Este evento provocou inúmeros deslizamentos no município (Figura 2), destruindo edificações, vias urbanas, interrompendo a transmissão de energia elétrica e de telecomunicações, além de provocar danos materiais, sociais, econômicos, ambientais e principalmente humanos.



Figura 2 - Deslizamentos em Angra dos Reis. Fonte: Dourado e Fernandes (2013).

Os locais mais afetados foram o Morro da Carioca no continente e a Enseada do Bananal na Ilha Grande. Ambos os locais foram atingidos por movimentos de massa gravitacionais do tipo translacional raso, que ocorreram no contato do solo com a rocha em aproximadamente 2 metros de profundidade. Os deslizamentos translacionais ou planares são a forma mais frequente entre os tipos de movimento de massa; eles apresentam superfície de ruptura com forma planar variando de 0.5m a 5.0m de profundidade ligada a presença de descontinuidades no interior do material das encostas, formando o plano de deslizamento. Este tipo de deslizamento é condicionado pela presença de planos de fraqueza nos materiais, como por exemplo, contato de materiais com diferentes permeabilidades, fraturas, foliações e xistosidades em rochas ou pedológicas (Fernandes & Amaral, 2010).

No Morro da Carioca (Figura 3a) os deslizamentos iniciaram às 01 hora do primeiro dia de 2010. Ao menos 10 casas foram atingidas e, em torno de 100 casas foram desapropriadas, sendo demolidas meses depois.

A ocupação da vertente, em sua maioria ocorreu de forma irregular, como na maioria das encostas do município. As construções ocupavam a base da encosta até o limite vertical. No caso da Enseada do Bananal (Figura 3b), o desastre teve início às 03 h 40 minutos do mesmo dia. Uma pousada e mais sete casas foram soterradas após a vertente localizada atrás das construções escorregar. A ocupação do local era nas áreas mais planas, próximas ao nível do mar. As pessoas desalojadas abrigaram-se em escolas públicas da região (DOURADO e FERNANDES, 2013).



(a)



(b)

Figura 3 - (a) Deslizamento no Morro da Carioca; (b) Deslizamento na Enseada do Bananal. Fonte: Picanço (2010).

O desastre de Angra dos Reis foi classificado como nível IV de intensidade. O estado de calamidade pública foi decretado sob o nº 7.319 no dia 06 de janeiro de 2010 e homologado no Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro (2010) sob o decreto nº42.228 em 11 de janeiro de 2010. Criou-se uma força-tarefa entre órgãos municipais e estaduais para reparar os danos sofridos pelo município. Foi calculado um prejuízo de 247 milhões de reais. O Formulário de avaliação de danos da Defesa Civil (ANGRA DOS REIS, 2010) classificou os danos do desastre em:

- Danos humanos: ao menos 2.284 pessoas ficaram desalojadas, 652 desabrigadas, 50 mortas e 121.086 afetadas;
- Danos materiais: 307 residências foram danificadas e 1.207 destruídas. 20 km de estrada foram danificados ou destruídos e 159.300 km de vias urbanas foram danificados;

•Danos ambientais: a erosão do solo e o desmatamento da flora caracterizaram-se por dano muito intenso devido à erosão e aos deslizamentos. Foram destinados aproximadamente R\$ 130.000,00 para a recuperação dessas áreas;

•Danos econômicos: 25 toneladas de commodities agrícolas foram destruídas. 55 mil unidades de produtos pecuários foram perdidas. 9.000 pontos de comércio sofreram impactos do desastre. Os prejuízos econômicos somados aproximam-se de R\$ 500.000,00;

•Danos sociais: 15.100 famílias ficaram sem energia durante 48 horas. 90.500 consumidores ficaram sem abastecimento de água, serviço que demorou meses para ser restabelecido. A rede de distribuição e os mananciais do abastecimento d'água foram afetados. 34.740 metros da rede de distribuição de energia foram danificados. Foram produzidas 468 toneladas de lixo no desastre. Para a normalização dos serviços básicos foram utilizados mais de R\$ 700.000,00.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O município de Angra dos Reis (Figura 4) se localiza na mesorregião Sul Fluminense pertencente ao estado do Rio de Janeiro, localizado no Sudeste brasileiro. Suas coordenadas geográficas são 23° 00' 24" S e 44° 19' 05" W. Possui uma extensão territorial de 825.082 km² e uma população total de 169.511. Localizado no extremo Sul do estado interliga, através da BR-101, a Rodovia Rio-Santos, as metrópoles de São Paulo e Rio de Janeiro. Faz fronteira com os Municípios de Mangaratiba (RJ), Paraty (RJ) e Bananal (SP) e é banhado pela Baía da Ilha Grande (Oceano Atlântico). Angra possui mais de 360 ilhas, sendo a maior delas a Ilha Grande.

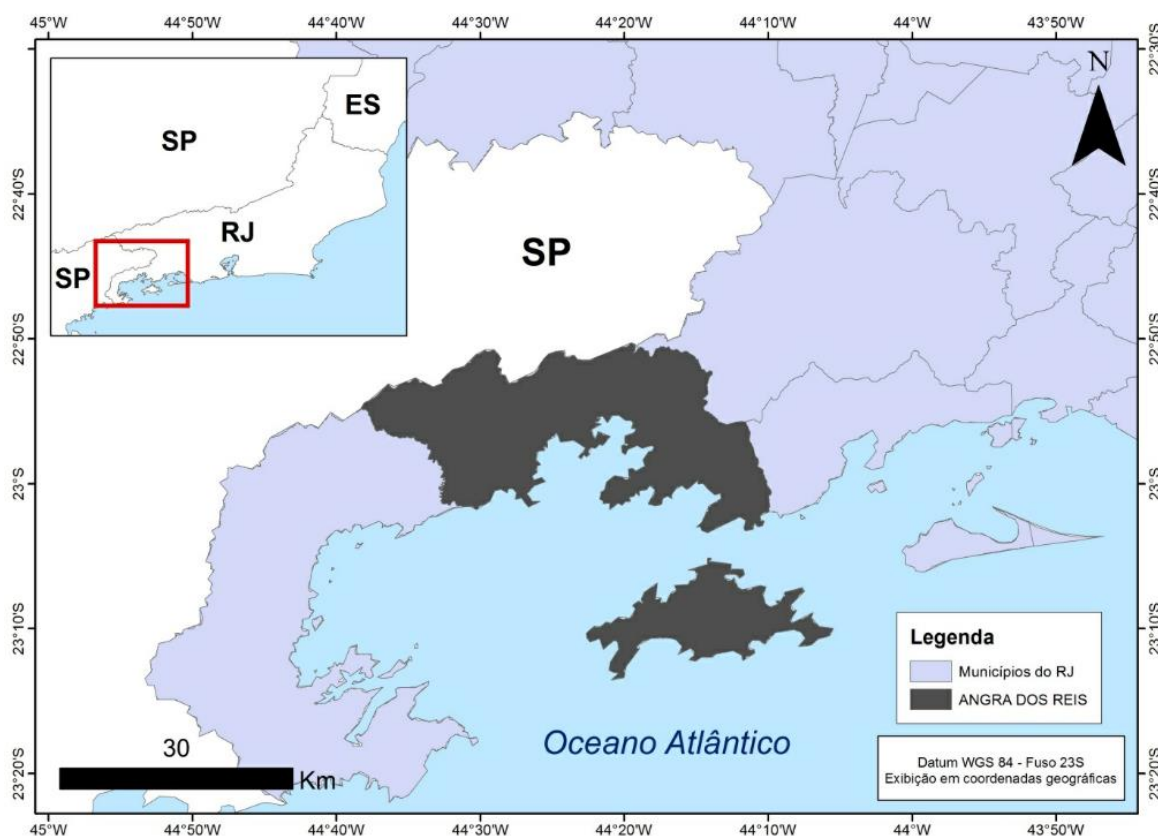


Figura 4 - Mapa de Angra dos Reis.

Segundo Coelho Netto et al. (2014), o município de Angra dos Reis foi alvo de altos investimentos ao longo de sua história. A aplicação do capital privado com a instalação do Terminal Petrolífero da Baía de Ilha Grande em 1979, a construção da rodovia federal Rio-Santos, a BR-101, a instalação da usina nuclear Angra I durante a década de 80 e Angra 2 durante o início dos anos 2000, geraram trabalho e especulação imobiliária levando a um crescimento demográfico repentino na região. De acordo com Soares (2006), entre 1970 e os anos 2000, Angra dos Reis foi o segundo município com as maiores taxas de crescimento populacional e, a partir dos anos 2000, passa a liderar esse ranking.

A urbanização e as infraestruturas públicas não acompanharam o crescimento demográfico. Por Angra possuir relevo irregular, devido à presença da Serra da Bocaina (nome local da Serra do Mar), muitas habitações foram construídas em encostas que se caracterizam por áreas de risco. As construções de habitações ultrapassaram a permissão para construção de edificações nas cotas de 40 a 60 metros definida no Plano Diretor

da cidade, aprovado em 2008 (EHRlich, 2010). Este fator explica parte da recorrência de desastres naturais com danos na região.

O relevo do município de Angra dos Reis segundo Dantas (2001) é constituído por duas grandes unidades morfoestruturais: a Faixa de Dobramentos Remobilizados e os Depósitos Sedimentares. A Faixa de Dobramentos Remobilizados compreende diversos tipos de modelados onde a formação remonta aos ciclos orogênicos responsáveis por dobramentos e falhamentos de grande amplitude no Arqueozóico e Proterozóico e aos eventos tectônicos ocorridos no Terciário. Esta unidade é constituída pelas Escarpas da Serra do Mar que representam uma forma de relevo extremamente acidentado, onde predominam os solos rasos e afloramentos rochosos, contrastando com a presença de depósitos de colúvio e de tálus.

A cobertura pedológica do município de Angra dos Reis é composta por Cambissolos, Latossolos e Neossolos Litólicos, associados a afloramentos de rocha que são encontrados nas áreas com relevo acidentado. Nas áreas de baixada ocorrem Neossolos Flúvicos, nos vales fluviais e Neossolos Quatzarênicos e Espodossolos formados a partir de sedimentos arenosos de origem marinha.

No verão não há déficit hídrico, pois a precipitação é maior que a evaporação. No inverno, o quadro é o mesmo, ainda ocorre excedente hídrico (BASTOS E NAPOLEÃO, 2011). A latitude e a proximidade com o oceano facilitam a incidência de radiação solar, além do fornecimento de umidade e núcleos de condensação ao continente. A Serra do Mar funciona como labirinto orográfico, retendo em suas reentrâncias não somente as massas úmidas marítimas, mas também, em alguns casos frentes frias provocando chuvas intensas. (GUERRA et al., 2013).

Procedimentos metodológicos

Para entender o comportamento da atmosfera em mesoescala no período de 31 de dezembro de 2009 a 01 de janeiro de 2010, utiliza-se o BRAMS para simular as condições atmosféricas no período citado. O BRAMS foi inicializado com as reanálises baixadas do National Center of Environmental Prediction (NCEP) e do National Center for Atmospheric Research (NCAR) (KALNAY et al., 1996), dos dias 31 de dezembro de 2009 e 01 de janeiro de 2010. Os dados estão disponíveis gratuitamente em <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/>, e as informações estão disponíveis em quatro horários diários (00, 06, 12 e 18Z), médias diárias e mensais. Para o presente trabalho, utilizou-se os 4 horários.

Utilizou-se como método de assimilação de dados a relaxação Newtoniana, com taxa de stretch de 1.2. Optou-se pela utilização de 3 grades aninhadas, com resoluções de 40 x 40 km (Grade 1), 10 x 10 km (Grade 2) e 2.5 x 2.5 km (Grade 3), centradas nas coordenadas -23.00 S e -44.31 W, da cidade de Angra dos Reis. E, o tempo de integração do modelo foi de 96 horas.

Foram utilizadas cartas sinóticas, disponibilizadas pelo CPTEC/INPE e as imagens do satélite GOES-12, setorizadas para a Região Sudeste e no canal temperatura de brilho de nuvem realçada, disponibilizadas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais DSA/INPE.

O BRAMS resolve numericamente as equações governantes da atmosfera, como a Conservação de Momentum ou a Segunda Lei de Newton, Conservação da Energia Térmica ou Primeira Lei da Termodinâmica, Conservação de Umidade e Conservação de Massa ou Equação da Continuidade (VILHENA, 2010). O modelo foi desenvolvido para simular circulações atmosféricas em múltiplas escalas, resolvendo equações não hidrostáticas e compressíveis (TRIPOLI e COTTON, 1982; FREITAS et al., 2009).

Freitas et al. (2009) ressaltam que o BRAMS possui um esquema de aninhamento de grades que permite que as equações sejam calculadas simultaneamente em qualquer “malha de interação bidimensional”. O BRAMS é classificado como um modelo do tipo two – way interaction, o que permite ao usuário utilizar o aninhamento múltiplo de grades, onde as equações são resolvidas de forma simultânea utilizando diferentes resoluções espaciais. Estas interações ocorrem a partir de um sistema de “mão dupla”, onde os processos que ocorrem em uma grade podem acontecer em outra grade e vice-versa (WALKO e TREMBACK, 2001).

As parametrizações utilizadas pelo BRAMS são para uma atmosfera não hidrostática, descritas por Tripoli e Cotton (1980;1982) e Pielke (1984), que permitem uma descrição dos processos físicos, nos quais a velocidade vertical na atmosfera é intensa. Já os processos de superfície estão numericamente representados e associados aos processos de difusão turbulenta, radiação solar, formação de nuvens, tipos de precipitação (líquido, gelo), convecção de cúmulos, trocas de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera, incluindo o importante papel da vegetação e o transporte de calor no solo (VILHENA, 2010).

As parametrizações utilizadas são descritas a seguir: radiativa, que indica os efeitos produzidos na atmosfera e na superfície, a partir da interação da radiação solar e terrestre, assim como a interação destas com os constituintes da atmosfera, como os gases que a constituem. Para este experimento utilizou-se a parametrização radiativa proposta por Chen e Cotton (1983), pois englobam a quantidade de material

condensado presente na simulação atmosférica, além de ser uma solução pertinente para a equação de transferência radiativa, pois utiliza uma aproximação de emissividade.

Com relação à parametrização convectiva, por ser um problema complexo em modelagem de mesoescala, escala global e escala sinótica, os esquemas utilizados simulam os efeitos da condensação do vapor de água e as interações produzidas pelas correntes verticais convectivas (KELNER e TEICHRIEB, 2008). A parametrização mais utilizada é o esquema Tipo Kuo, descrito por Molinari (1982), que se baseia no equilíbrio da atmosfera, na qual a convecção atua para eliminar a instabilidade convectiva em escala global. Neste artigo, o fechamento utilizado é o esquema de Grell, descrito por ARAKAWA e SCHUBERT (1974), que foram utilizados para determinar o fluxo de massa na nuvem, com o objetivo de determinar a localização e o início da convecção.

A microfísica de nuvens utilizada foi a descrita por Walko et al. (1995). Aplica-se a qualquer tipo de hidrometeoros, como chuva, gotas, granizo, vapor. São considerados os diferentes processos microfísicos para a formação destes, tais como a colisão, a nucleação, a sedimentação, a coalescência e a conversão.

O BRAMS apresenta 4 tipos de parametrização dos coeficientes de difusão turbulenta, que são divididas em 2 classes, em função da distribuição do espaçamento das grades horizontal ou vertical. O esquema utilizado para a determinação do coeficiente de mistura turbulento foi o de Mellor e Yamada (1974), pois a distribuição do espaçamento horizontal da grade é maior em comparação ao espaçamento vertical.

Para a parametrização de vegetação e solo, utilizou-se o Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model (LEAF-3), descrito por Walko e Tremback (2000). Este modelo permite analisar a interação entre a atmosfera-vegetação-solo, pois realiza o transporte da água na vertical e ainda é possível realizar outros acoplamentos com modelos.

Para o presente artigo são realizados dois experimentos. O primeiro experimento é realizado com todos os parâmetros padrões de radiação e microfísica de nuvens do BRAMS. Todavia, como o experimento subestima a variável precipitação acumulada, os resultados não são apresentados neste artigo. O segundo experimento é realizado a partir de alterações nas parametrizações de microfísica de nuvens e radiação, apresentando valores mais próximos dos observados, pois houve alterações na distribuição dos núcleos de condensação (hidrometeoros), considerando os núcleos maiores, típicos de ambientes marinhos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação do campo de Umidade Relativa e Vento com o BRAMS

As simulações com as parametrizações modificadas dos campos de umidade relativa e vento, para 18Z do dia 31 de dezembro de 2009 até às 00Z do dia 01 de janeiro de 2010 (Figuras 5a, b, c, d), corroboram a evolução dos índices de umidade e vento no território do Rio de Janeiro.

Na simulação para às 18Z do dia 31 de dezembro (Figura 5a), observa-se o índice de umidade da área estudada em aproximadamente 70%. Nas Figuras 5a e 5b, notam-se a presença de uma área com grande disponibilidade de umidade situada no litoral do estado do Rio de Janeiro. Os ventos sopram no sentido SW, facilitando o transporte da umidade. É possível observar no estado uma área de convergência dos ventos.

Às 06Z do dia primeiro de janeiro (Figura 5c), momento do desastre, a umidade atinge valores superiores a 84%. Na Figura 5d a oferta de umidade decai juntamente com a umidade relativa de Angra dos Reis.

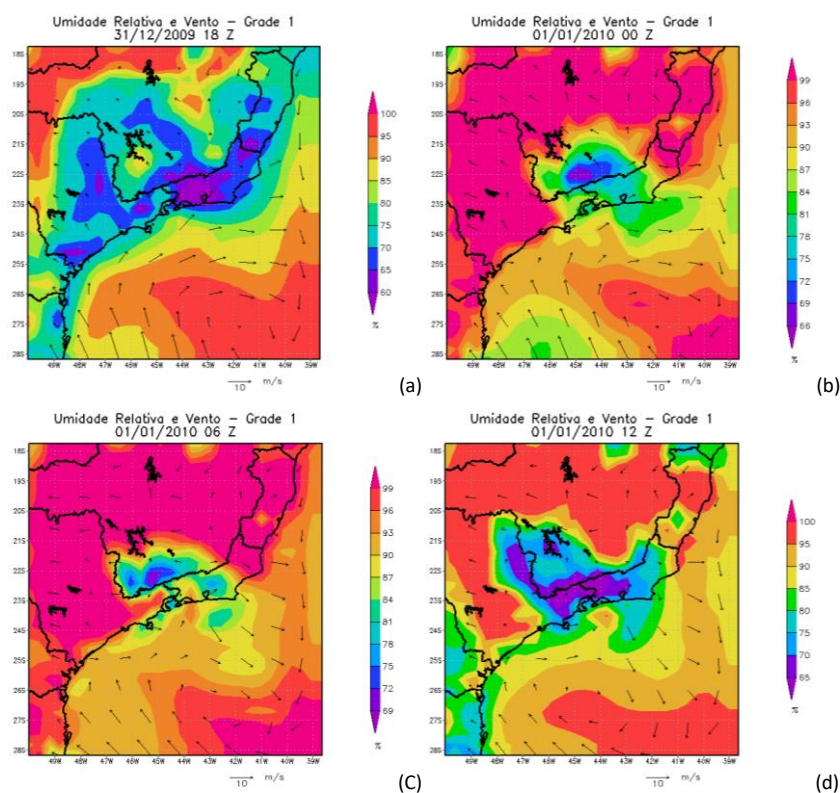


Figura 5 - Campos de Umidade Relativa e Vento para: (a) 18Z de 31/12/2009, (b) 00Z de 01/01/2010, (c) 06Z de 01/01/2010, (d) 12Z de 01/01/2010.

Simulação do campo de Precipitação Acumulada com o BRAMS

As simulações para o campo de precipitação acumulada em 96 horas foram realizadas entre os dias 30 e 31 de dezembro de 2009 e 01 e 02 de janeiro de 2010. A simulação da Grade 1 mostra o acumulado de precipitação de aproximadamente 70 mm para a área estudada (Figura 6a). Entretanto, ao aumentar a escala de análise para a Grade 3 (Figura 6b), verifica-se um acumulado de 110 mm, valor próximo aos 143 mm informado pelo INMET (2009-2010).

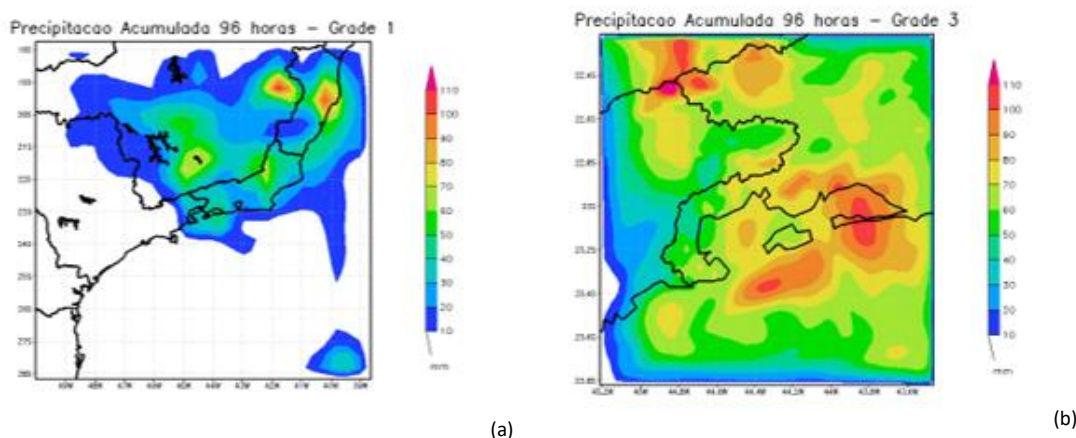


Figura 6 - Campo de Precipitação Acumulada para 96 horas, entre os dias 30 e 31 de dezembro de 2009: (a) Grade1 e (b) Grade 3.

Análises Sinóticas

Na análise da carta sinótica de superfície da 00Z do dia 30/12/2009 (Figura 7a), observa-se um sistema de baixa pressão no Centro-Sul e Oeste do Brasil, além da Bolívia, Paraguai, Norte da Argentina e Uruguai. Há o deslocamento de sistemas frontais a Leste do Uruguai e da Argentina. A nordeste desse sistema há dois cavados no oceano próximo ao litoral das regiões Sul e Sudeste do Brasil. A atuação da área de baixa pressão no Sudeste brasileiro auxilia a convergência de umidade entre o Norte e Sudeste do Brasil, mantendo a instabilidade a Leste da Região Sudeste.

Na análise da carta sinótica de superfície de 00Z do dia 31/12/2009 (Figura 7b), verifica-se a permanência do sistema de baixa pressão entre a Bolívia, Paraguai, Sul do estado de Mato Grosso do Sul e Oeste do Paraná. No oceano Atlântico atuam dois sistemas frontais ao Sul de 30°S com uma alta pós-frontal associada, atuando na Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul. A Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) mantém-se centrada a Leste do meridiano 100 W. A Leste do Sudeste brasileiro a instabilidade é reforçada pela intensificação de um ciclone, com uma frente fria estacionária associada. O núcleo de uma baixa pressão de 1006 hPa atua sobre o estado do Rio de Janeiro.

Na análise da carta sinótica de superfície de 00Z do dia 01/01/2010 (Figura 7c), percebe-se uma frente fria estacionária a Leste do estado de Santa Catarina com um cavado associado. O cento da baixa pressão se mantém no litoral do estado do Rio de Janeiro com 1006 hPa. Ao Sul deste sistema atua um sistema de alta pressão. Uma ampla área de baixa pressão permanece atuando no Centro-Norte do Brasil. A ASAS mantém-se centrada. O sistema de baixa pressão que atua a leste da Região Sudeste provoca muita chuva no sul do estado do Rio de Janeiro.

Na análise da carta sinótica de superfície da 00Z do dia 02/01/2010 (Figura 7d), verifica-se um centro de baixa pressão a leste dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Sobre o oceano, um cavado estende-se para leste, mantendo-se entre o litoral sul e a leste do estado do Paraná.

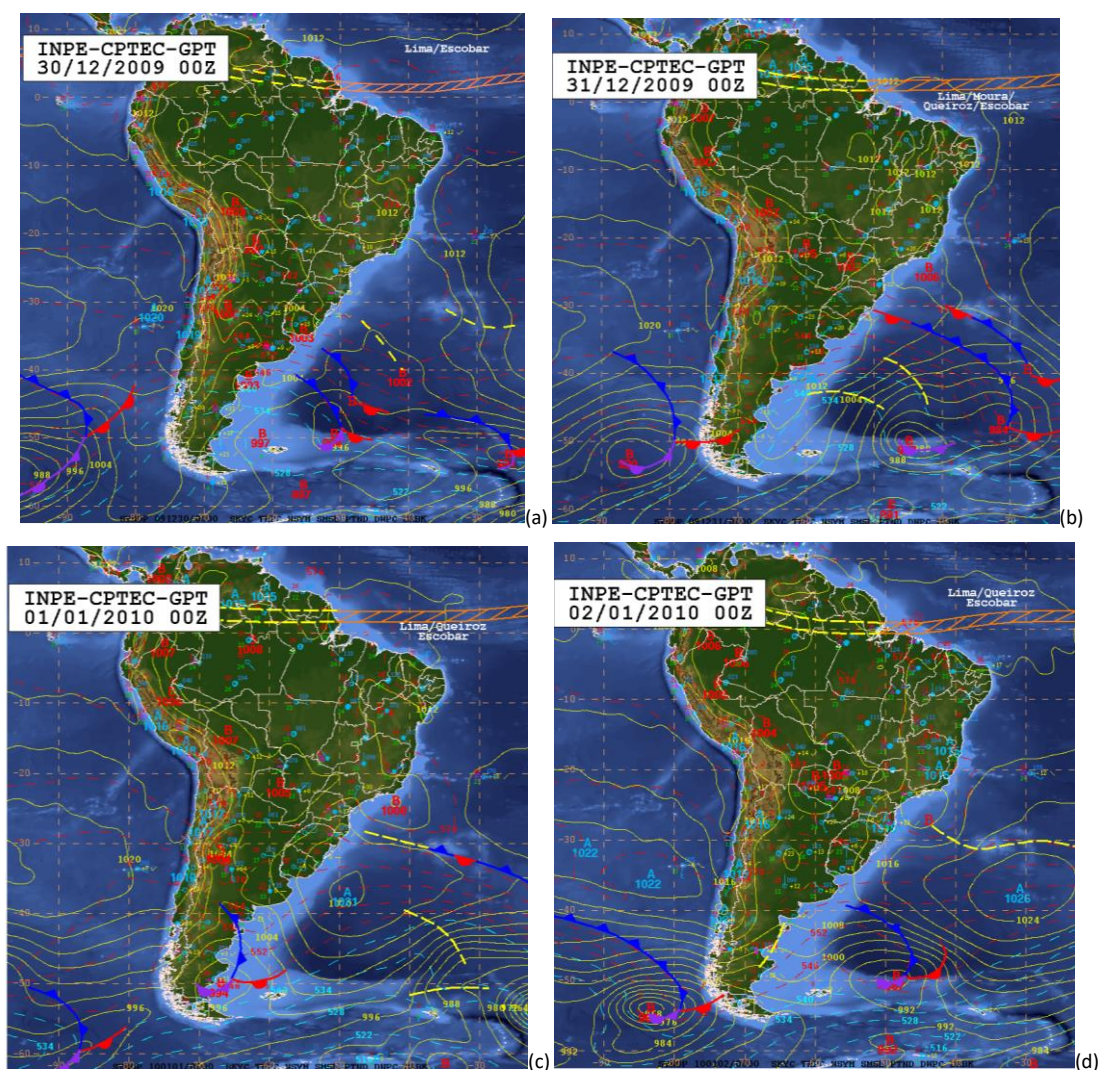


Figura 7 - Cartas de Superfície para: (a) 00Z de 30/12/2009, (b) 00Z de 31/12/2009, (c) 00Z de 01/01/2010, (d) 00Z de 02/01/2010.
Fonte: CPTEC (2010).

Imagens do Satélite GOES – 12

As imagens do satélite GOES – 12 (Figuras 8a, 8b, 8c, 8d e 8e) corroboram para identificação da zona de instabilidade presente no Sudeste brasileiro, ocasionada pela presença da baixa pressão atuante no litoral da região, provocando nebulosidade e precipitação no estado do Rio de Janeiro. Confirma-se um núcleo de instabilidade, às 06Z em 01/01/2010 (Fig. 8e), horário aproximado do evento extremo. Acima da Região Sul Fluminense a temperatura realçada varia de -50oC a -80oC, evidenciando o potencial pluviométrico, típico de nuvens de grande desenvolvimento vertical.

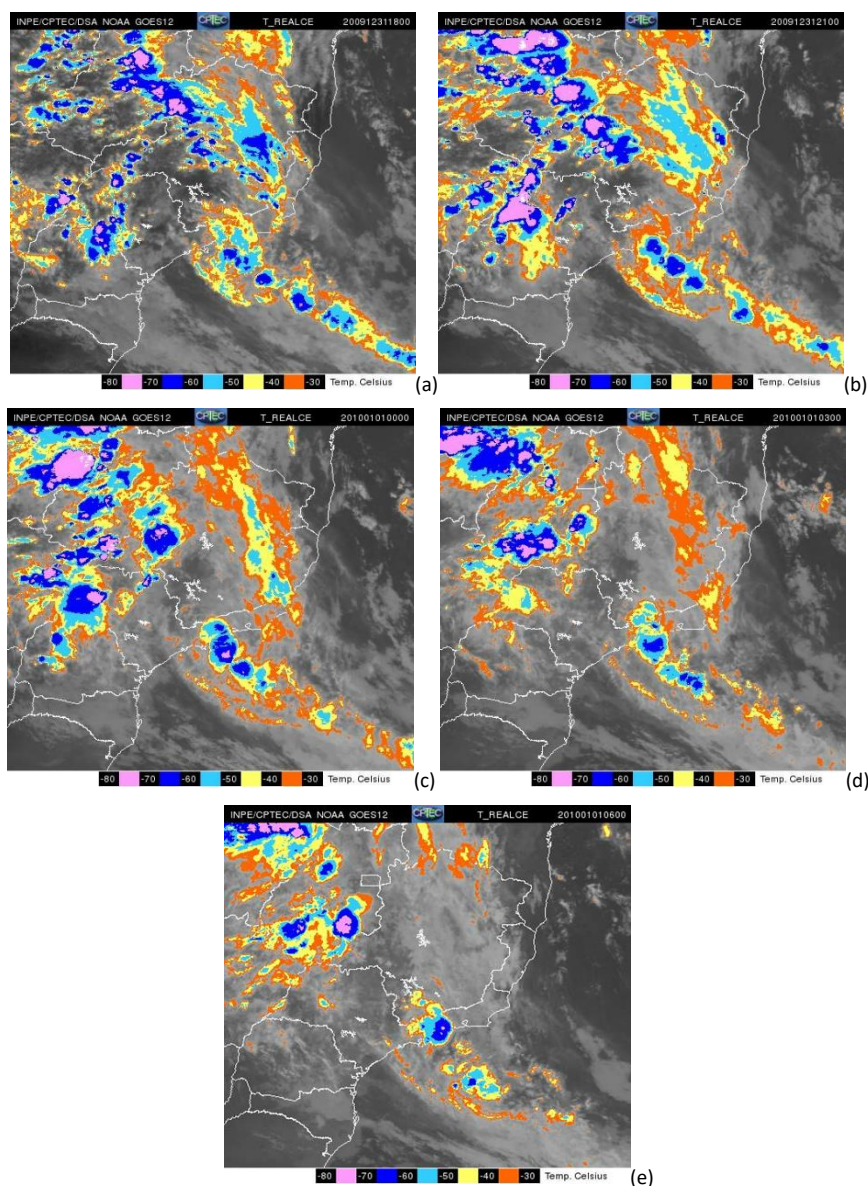


Figura 8 - Imagens do Satélite GOES – 12 setorizada para: (a) 18Z de 31/12/2009, (b) 21Z de 31/12/2009, (c) 00Z de 01/01/2010, (d) 03Z de 01/01/2010, (e) 06Z de 01/01/2010. Fonte: CPTEC (2009 - 2010).

Campos de Pressão utilizando a R1

As análises dos campos de pressões referentes ao período de 31 de dezembro de 2009 a 01 de janeiro de 2010 ratificam as informações das cartas de superfície do CPTEC. Na simulação das 12Z do dia 31 de dezembro de 2009 (Figura 9a), observa-se um sistema de baixa pressão de 1010 hPa, atuando em parte das regiões do Sudeste, Centro-Oeste e do estado do Paraná. Às 18Z do dia 31 de dezembro de 2009 (Figura 9b), observa-se a expansão do sistema de Baixa Pressão encobrindo grande parte do território brasileiro e se estendendo até o oceano Atlântico.

Na Figura 9c das 00Z do dia primeiro de janeiro de 2010, observa-se o deslocamento do sistema de baixa pressão para Leste do Brasil, encobrindo parte do Norte, Centro Sul e dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Observa-se um núcleo de baixa pressão de 1010 hPa no litoral do estado do Rio de Janeiro.

No dia 01 de janeiro de 2010 às 06Z (Figura 9d) nota-se a presença de quatro núcleos de baixa pressão no território brasileiro: O primeiro localiza-se entre os estados do Maranhão e Piauí; o segundo entre os estados do Amazonas e Roraima; o terceiro e maior, encobrindo parte do Norte, Centro-Oeste e Sudeste, se expandindo até o oceano Atlântico; E, por fim, um núcleo de 1005 hPa entre o estado de Mato Grosso do Sul e o Paraguai.

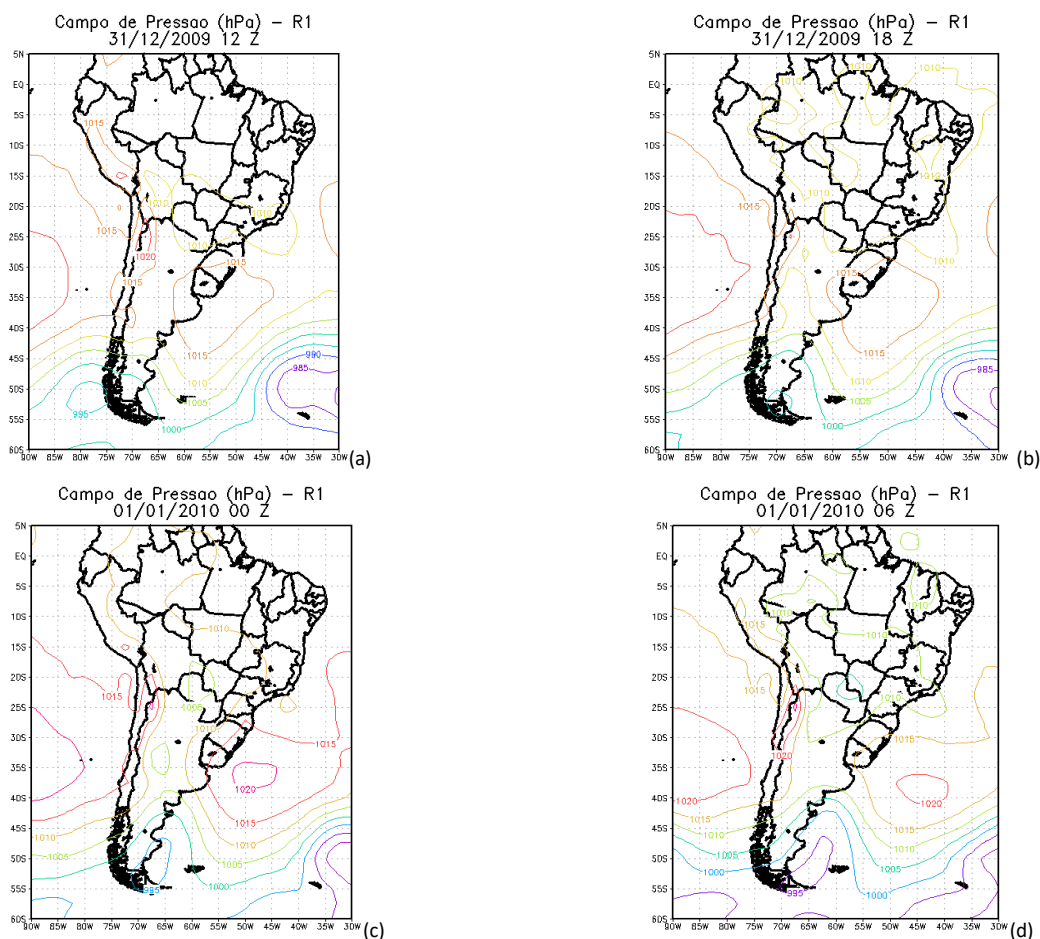


Figura 9 - Campos de Pressão a partir da R1 para: (a) 12Z de 31/12/2009, (b) 18Z de 31/12/2009, (c) 00Z de 01/01/2010 e (d) 06Z de 01/01/2010.

Campos de Escoamento utilizando a R1

Os Campos de Escoamento dos dias 31 de dezembro de 2009 e 01 de janeiro de 2010, simulados a partir da R1, mostram a circulação de ventos para a baixa pressão, responsável pelo evento extremo que atingiu o estado do Rio de Janeiro. Nas simulações referentes aos horários das 12Z (Figura 10a) e 18Z (Figura 10b) do dia 31 de dezembro de 2009, nota-se o escoamento no continente, desde a Amazônia até a Região Sudeste, em direção ao sistema de baixa pressão, situado no litoral do estado do Rio de Janeiro.

No horário das 00Z do dia 01 de janeiro de 2010 (Figura 10c), o escoamento da Amazônia alimenta os sistemas de baixa pressão localizados no interior do continente. O sistema litorâneo é alimentado pelos ventos provenientes do oceano. E, no horário das 06Z do dia 01 de janeiro de 2010 (Figura 10d), o escoamento ocorre em direção ao sistema de baixa pressão que se localiza na Região Centro-Oeste do país e no Paraguai.

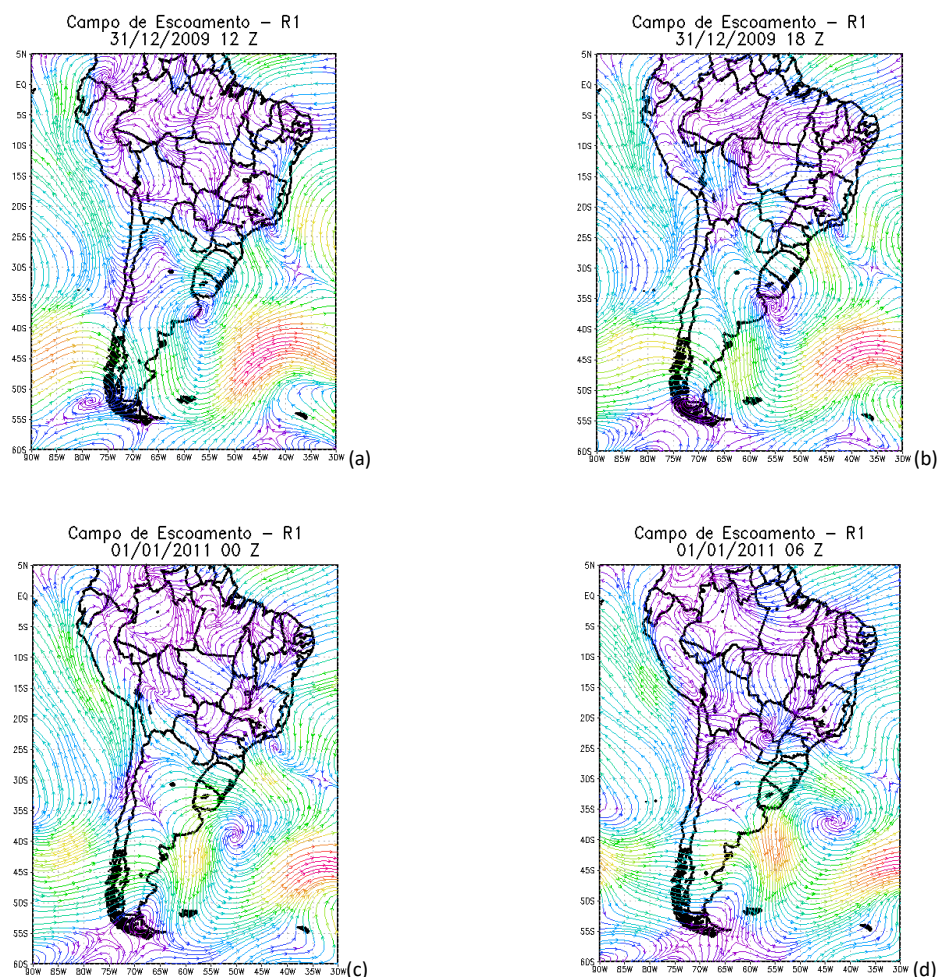


Figura 10 - Campos de Escoamento para: (a) 12Z de 31/12/2009, (b) 18Z de 31/12/2009, (c) 00Z de 01/01/2010 e (d) 06Z de 01/01/2010.

A partir das comparações entre os dados observados e os simulados verifica-se que o BRAMS captura os aspectos das circulações de caráter local, que são influenciadas pelo relevo acidentado e aliadas ao escoamento sinótico, mostrando-se relevante na análise do comportamento do evento extremo.

O BRAMS por ser um modelo two-way (troca informações entre grades) gera ruídos nas bordas das grades, comprometendo os resultados. Nessa pesquisa são consideradas as simulações calculadas pelo modelo foram consideradas satisfatórias, quando comparadas aos valores observados.

IV. CONCLUSÃO

A geomorfologia peculiar e acidentada de Angra dos Reis devido à presença da Serra do Mar, a ocupação de áreas irregulares nas vertentes escarpadas, a falta de planejamento urbano para o município e a presença de uma frente fria associada a um sistema de baixa pressão, que ocasionou valores de precipitação de 143 mm em 24 horas, contribuíram para o desastre de origem natural no réveillon de 2010. A combinação desses fatores agravou a instabilidade do solo, gerando vários movimentos de massa.

As simulações do comportamento da atmosfera com o BRAMS, para o referido período mostram o escoamento de sul advectando ar úmido próximo à costa do Estado do Rio de Janeiro em direção ao sistema de baixa pressão fornecendo quantidade elevada de umidade para as precipitações intensas sobre o município de Angra dos Reis.

O experimento realizado a partir de alterações nas parametrizações de microfísica de nuvens e radiação apresenta resultados mais próximos aos observados pelo INMET, utilizando as parametrizações com núcleos higroscópicos marinhos advectados para o continente pelos ventos de quadrante sul. A precipitação acumulada aumentou de 20 mm, no experimento com as parametrizações padrões (não apresentados neste trabalho), para valores superiores a 100 mm, com o experimento com as parametrizações de radiação e microfísica de nuvens modificadas.

As cartas sinóticas de superfície, as imagens realçadas do satélite GOES-12 e os campos de pressão e vento das reanálises mostram a atuação de um sistema de baixa pressão associada a um sistema frontal presente nas proximidades do estado do Rio de Janeiro durante o período de 30 de dezembro 2009 a 01 de janeiro de 2010, corroborando as simulações do BRAMS.

V. REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. O Domínio Dos Mares de Morros no Brasil. In: Geomorfologia, IGEOG/USP, São Paulo, v.2, 1966.
- ALVES, S. C. – Avaliação do modelo de Kuo para a previsão de chuvas e tempestades na Região Sul do Brasil: Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Pelotas: UFPel. 2006.
- ANGRA DOS REIS. Boletim Oficial do Município de Angra dos Reis. Edição 247. Ano V. Prefeitura de Angra dos Reis, 2010. Available in: <<http://angra.rj.gov.br/downloads/bo/BO-247em11-03-2010.pdf>>. Accessed: June, 01, 2020.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with a large-scale environment. Part I. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 31, n.3, p.674-701, 1974. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2)

AUGUSTO FILHO, O. Carta de Risco de Escorregamentos Quantificada em Ambiente de SIG como Subsídio para Planos de Seguro em Áreas Urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP). Dissertação (Mestrado em Geociências). Rio Claro: UNESP, 2001.

BASTOS, J. E. NAPOLEÃO, P. (orgs). Caracterização do Rio de Janeiro. In: O estado do ambiente: indicadores ambientais do Rio de Janeiro. Secretaria Estadual do Ambiente; Rio de Janeiro: INEA, 2011.

CASTRO, A. Glossário de Defesa Civil: estudos de riscos e medicina de desastres. 2ª edição. Brasília: Ministério do planejamento e orçamento/ Departamento de Defesa Civil. 1998. 133p.

CEPED – Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Anuário Brasileiro de Desastres. Florianópolis: UFSC, 2010. Available in <<https://www.ceped.ufsc.br/wpcontent/uploads/2014/09/Anu%C3%A1rio-Brasileiro-de-Desastres-Promo%C3%A7%C3%A3o-da-Cultura-de-Riscos-de-Desastres.pdf>>. Accessed: June, 01, 2020.

CHEN, C.; COTTON, W. R. A one-dimensional simulation of stratocumulus-capped mixed layer. Boundary Layer Meteorology., v. 25, p.289-321, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF00119541> COBRADE. Classificação e codificação brasileira de desastres. 2012. Available in: <<https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Publicacoes/Simbologia%20dos%20Desastres.pdf>>. Accessed: June, 02, 2020.

COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S.; SATO, A. M.; FERNANDES, M. C.; OLIVEIRA, R. R. ; COSTA, R. V. C. ; BARBOSA, L. S.; LIMA, P. H. M. ; LACERDA, W. A. Landslides Susceptibility and Risk Zoning at Angra Dos Reis, Rio de Janeiro State, SE-Brazil: a quali-quantitative approach at 1: 5,000 scale. In: Extreme Rainfall Induced Landslides: an international perspective. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 262-296, 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo, Edgard Blucher, 2ª edição, 1980

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A. I. M.; SILVA, C. R.; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J. F.; CALDERANO, S. B. & CARVALHO FILHO, A. Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro, Brasília/CPRM. Mapa. CD-ROM. (Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro). 2001.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil e UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Geologia da Folha Angra dos Reis SF.23-Z-C-II. Sistema de Informações Geográficas – SIG. Programa Geologia do Brasil – Levantamentos Geológicos Básicos, 2007. Available in: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/pgb/rel_angra.pdf>. Accessed: June, 01, 2020.

DOTY, R (1995). Grid Analysis and Display System Grads. V.1.5.1.1.12.

DOURADO, F.; FERNANDES, N. Os Escorregamentos da Enseada do Bananal e do Morro da Carioca em Angra dos Reis na Baía da Ilha Grande. In: Interação Homem – Meio nas Zonas Costeiras Brasil/Portugal. 1º Ed. Cap. 7, 2013. p 137-146, 2013.

EHRlich, M. Estudo avisou sobre tragédia em Angra. O Eco, 2010. Available in <<https://www.oeco.org.br/reportagens/23228-estudo-avisou-sobre-tragedia-em-angra/>> Accessed: May, 17, 2020.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. da (UFRS) Geomorfologia e Meio Ambiente. 3. ed. Rio de Janeiro, 2000. p. 123-194.

FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; JÚNIOR, O. A. C. Movimentos de Massa. In: Florenzano,

- T. G. (org.) Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos, São Paulo, 2008.
- FRANCISCO, C. Subsídios à gestão sustentável dos recursos hídricos em Angra dos Reis, RJ. 179f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências. Niterói, UFF. 2004.
- FREITAS, S. et al. The Coupled Aerosol and Tracer Transport Model to the Brazilian Development on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. In: Atmospheric Chemistry Physics, v.9, p.2843-2861, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2843-2009>
- GABLER, R. E.; PETERSEN, J. F.; SACK, D. Fundamentos de Geografia Física. Cengage Learning, 2019.
- GRELL, G. A. Prognostic Evaluation of Assumptions used by cumulus parametrization. Monthly Weather Review, v.121, p.764-787, 1993. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2)
- GRELL, G. A., DEVENYI, D. A generalized approach to parametrizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophysical Research Letters, v.29, n. 14, 2002. <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>
- GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; FULLEN, M. The Geomorphology of Angra Dos Reis and Paraty Municipalities, Southern Rio de Janeiro State Rio de Janeiro: RevistaGeonorte, v.8, 2013.
- GUHA-SAPIR D.; HOYOIS, P.; BELOWR, R. Annual Disaster Statistical Review 2015: The Numbers and Trends. Brussels: CRED. 2016. 59 p.
- INMET. Precipitação acumulada mensal e anual (mm). Instituto Nacional de Meteorologia. 1961-1990. Available in: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Accessed August, 12, 2018.
- INMET. Estação Meteorológica. Instituto Nacional de Meteorologia, 2009-2010. Available in: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf> Accessed August, 12, 2018.
- JUSTE, M. Chuva em Angra na Virada foi a Maior dos Últimos 10 anos, dizem os Meteorologistas, 2010. Available in: <http://g1.globo.com/Noticias/Rio/0,,MUL1440290-5606,00-CHUVA+EM+ANGRA+NA+VIRADA+FOI+A+MAIOR+DOS+ULTIMOS+ANOS+DIZEM+METEOROLOGISTAS.html>. Accessed October, 29, 2020.
- KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society, v.77, p. 437-472, 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- KELNER, J.; TEICHRIEB, V. - Técnicas de Interação para Ambientes de Realidade Virtual e Aumentada. Realidade Virtual e Aumentada: Uma Abordagem tecnológica. Anais do X Symposium on Virtual and Augmented Reality. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), p. 46-65, 2008.
- KÖPPEN, W. Climatologia: conunestudio de los climas de latierra. Fondo de Cultura Econômica. México, 1948.
- LYNCH, P. The origins of computer weather prediction and climate modeling. Journal Computational Physics, v. 227, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.02.034>
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. A. A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 31, n. 7, p. 1791 – 1806, 1974. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)

PICANÇO, J. Movimentos Gravitacionais de Massa. Chuvas terrenos em áreas de ocupação indevida, associadas a outros processos de desequilíbrio ambiental levam a acidentes que podem ser evitados na maior parte dos casos, mas ainda produzem mortes e prejuízos materiais. Scientific American. Revista Duetto, ed. 94, 2010. Available in:

<http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/movimentos_gravitacionais_de_massa_tragedias_de_verao.html>Acessed August, 01, 2018.

PIELKE, R. E. A Mesoscale meteorological modeling. Orlando: Academic Press, 612 p., 1984.

RAMS – Regional Atmospheric Modeling System. An Introduction. Available in: <<http://rams.atmos.colostate.edu/rams-description.html>>Acessed August, 01, 2018.

RIO DE JANEIRO (Estado). Decreto nº42.228, de 11 de janeiro de 2010. Homologa Estado de Calamidade Pública no Município e Angra os Reis e dá Outras Providências. Diário Oficial do Estado de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

SILVA, D. R. Análise de risco associado a movimentos de massa utilizando indicadores socioambientais para área central do município de Angra dos Reis – RJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Rio de Janeiro: UFRJ, 2017.

SOARES, E. Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

SOUZA, E. P. Estudo Teórico Numérico da Relação entre a Convecção e Superfícies Heterogêneas na Região Amazônica. Tese (Doutorado em Meteorologia). São Paulo: USP, 1999.

TOBIN, G.; MONTZ, B. Natural hazards: explanation and integration. New York: The Guilford Press. 1997. 388p.

TRÍPOLI, G. J., COTTON, W. R. - A numerical investigation of several factors

contributing to the observed variable intensity of deep convection over south Florida. Journal of Applied Meteorology, v. 19, 1980. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1980\)019<1037:ANIOSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019<1037:ANIOSF>2.0.CO;2)

TRÍPOLI, G. J.; COTTON, W. R. The Colorado University Three- Dimensional Cloud/Mesoscale Model Part I: General Theoretical Framework and Sensitivity Experiments. Journal of Research Atmospheric, v. 16, p. 185 – 220, 1982.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC. 2013, 126p.

UN-ISDR – UN Office for Disaster Risk Reduction. Terminology on Disaster Risk Reduction In: United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland, May 2009.

VILHENA, J. E. S. - INFLUÊNCIAS DE FRIAGENS NA ESTRUTURA VERTICAL DA ATMOSFERA DA REGIÃO AMAZÔNICA: UM ESTUDO NUMÉRICO E OBSERVACIONAL. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Campina Grande: UFCG, 2010.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M.P.; HARRINGTON, J.Y. – New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: the single – moment scheme. Atmospheric Research, v. 38, p. 29 – 62, 1995. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00087-T](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00087-T)

WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. – Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) version 4.3/4.4 – Model

InputNamelist Parameters, 2000. Available in: <http://www.atmet.com>. Accessed August, 01,2018.
