

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/4, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais: 621-633
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

PADRÕES METEOROLÓGICOS E MORFOLÓGICOS ASSOCIADOS ÀS EVENTOS DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO RIO URUGUAI: ESTUDO DE CASO PARA O MUNICÍPIO DE URUGUAIANA-RS

*Meteorological and Morphological Patterns Related with Flood Events on the
Uruguay River Basin: Study Case for Uruguaiana*

**Diego Oliveira de Souza, João Félix de Luca Lino, Tiago Bernardes, Enos
Nobuo Sato & Mosefran Barbosa Macedo Firmino**

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)

Coordenação Geral de Operação e Modelagem

Estrada Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo, CEP:12.247-016, São José dos Campos/SP, Brazil
{diego.souza, joao.lino, tiago.bernardes, enos.sato, mosefran.firmino}@cemaden.gov.br

Recebido em 18 de Novembro, 2015/Aceito em 25 de Janeiro, 2017

Received on November 18, 2015/Accepted on January 25, 2017

RESUMO

No Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são estiagens, inundações (bruscas e graduais), escorregamentos de solos e/ou rochas, e tempestades. Estes fenômenos ocorrem normalmente associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados, ou ao déficit de precipitação. A cidade de Uruguaiana está localizada às margens do rio Uruguai, segundo maior tributário da bacia do rio da Prata e de grande importância econômica para a região Oeste do estado do Rio Grande do Sul; este rio drena uma área de 250.000 km² e faz fronteira com a Argentina. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo identificar possíveis padrões morfológicos e meteorológicos relacionados com processos de inundação no município de Uruguaiana, cuja população é afetada com frequência pelo impacto destes eventos hidrológicos. Para cumprir com o objetivo proposto foram utilizadas informações do modelo digital do terreno para a área de estudo, além de dados hidrográficos e de estimativas de precipitação por satélite, analisando assim eventos pretéritos de inundação. A partir dos resultados do trabalho foi possível concluir que eventos de inundação na cidade de Uruguaiana estão diretamente relacionados com altos volumes de precipitação, geralmente superiores em 200 mm da normal meteorológica, sobre a bacia de drenagem. Destaca-se também que quando a precipitação está concentrada em relevo acidentado da bacia, são suficientes baixos volumes de precipitação, concentrados em curto intervalo de tempo, para deflagrar eventos de inundação em Uruguaiana. Por outro lado, nas sub-bacias de relevo mais suavizado, a precipitação tende a causar menos danos por inundação. No contexto de monitoramento se observa, ainda que de forma qualitativa, que a distribuição da precipitação nas sub-bacias de relevo mais íngreme está relacionada com maiores chances de ocorrência de inundação nesses locais, o que significa que estas sub-bacias requerem redobrada atenção, em comparação com aquelas de relevo mais plano.

Palavras chaves: Inundação, Rio Uruguai, Desastres Naturais.

ABSTRACT

The main phenomena related to natural disasters in Brazil are drought, flood, landslides and storms. These phenomena occur normally associated to heavy and longstanding pluviometric events, or lack of them. The city of Uruguaiana is located along the margin of Uruguay River, which is the second biggest affluent flowing into the Silver River basin. It

drains a wide area of about 250,000 km² onto the border of Argentina and is economically important to the West region of the Rio Grande do Sul state. Taking into account the recurrent flooding events and its impacts to the population, this study aims to assess flooding processes on the municipality of Uruguaiana and identify possible morphological and meteorological related patterns. In order to comply with the proposed objective, information from the digital elevation model was used for the study area, as well as hydrographic data and satellite precipitation estimates, thus analyzing past flood events. We found that flooding events on the city are straight related to high amount of rain over the basin, usually higher than 200 mm above the climatological normals. In addition, sub-basins where terrain is steep sloped, even lower amount of rain can trigger flood events. On the other hand, on the plain and gentle sloped sub-basins, heavy rains do not cause big damage due to flooding. In the context of monitoring, although qualitatively, distribution of rain over the steep slope sub-basins demands more attention since the chances of flooding is higher.

Keywords: Flood, Uruguay River, Natural Hazards.

1. INTRODUÇÃO

Quando os fenômenos naturais atingem áreas ou regiões habitadas pelo homem, causando-lhe danos, passam a se chamar desastres naturais; estes podem ser provocados por diversos fenômenos tais como, inundações, escorregamentos, erosão, terremotos, tornados, furacões, tempestades, estiagem, entre outros (TOMINAGA *et al.* 2009).

No Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como, inundações (bruscas e graduais), escorregamentos de solos e/ou rochas, e tempestades. Estes fenômenos ocorrem normalmente associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados. De acordo com o *Emergency Events Database EM-DAT*, o Brasil encontra-se entre os países do mundo mais atingidos por inundações e enchentes, com 5.720 mortes e mais de 15 milhões de pessoas afetadas (desabrigados/desalojados) entre o período de 1960 a 2008.

Os dados apresentados no Atlas de Desastres Naturais no Brasil (CEPED, 2012) mostram um aumento no número de registros de desastres na década de 2000, sendo observadas 8.671 ocorrências na década de 90 e 23.238 ocorrências na década de 2000. Nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, por exemplo, nos últimos 20 anos analisados (1991-2010), eventos de inundações bruscas e graduais (2781 registros) foram o segundo evento que mais apresentou ocorrências em praticamente todas as mesorregiões, superado apenas por eventos de estiagem e seca (CEPED, 2012).

Segundo Tucci *et al.* (2013), os problemas resultantes da inundações dependem do grau

de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações. As condições hidrológicas que produzem a inundações podem ser naturais (por exemplo, relevo, tipo de precipitação, cobertura vegetal, solo, forma da bacia hidrográfica, capacidade de drenagem) ou artificiais (por exemplo, alteração no uso e cobertura do solo, modificações artificiais nos rios e canais).

Os rios drenam nas suas cabeceiras áreas com grande declividade produzindo escoamento de alta velocidade e em alguns casos uma variação de nível de vários metros em poucas horas. Quando o relevo é acidentado as áreas mais propícias à ocupação são as planas e mais baixas, justamente as que apresentam alto risco de inundações. A várzea de inundações de um rio cresce significativamente nos seus cursos médio e baixo, onde a declividade se reduz e aumenta a incidência de áreas planas (TUCCI *et al.*, 2013).

Segundo os mesmos autores, em pequenas bacias hidrográficas o escoamento superficial ocorre predominantemente sobre a superfície do solo, em drenos com perdas hidráulicas maiores, mas com maior declividade. Já em bacias hidrográficas de grande porte, o processo predominante é o deslocamento da onda de cheia por um canal definido, de menor declividade, mas com perda de carga menor.

Segundo Tominaga *et al.* (2009), inundações e enchentes são eventos naturais que ocorrem com periodicidade nos cursos d'água, frequentemente deflagrados por chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração. Inundações bruscas e graduais estão diretamente associadas à elevação do volume de precipitação sobre a bacia de drenagem, onde a primeira é geralmente provocada por chuva mais intensa

e concentrada em locais de relevo acentuado, sendo caracterizadas pela rápida elevação do nível e vazão do rio (CEPED, 2012). A inundação gradual, por sua vez, está diretamente associada à precipitação bem distribuída sobre bacias de drenagem maiores, caracterizando um processo mais lento que atinge a planície de inundação quando o nível do rio ultrapassa certa cota de referência. A magnitude e frequência das inundações ocorrem em função da intensidade, duração e distribuição da precipitação, da taxa de infiltração de água no solo, da capacidade de retenção de água devido ao uso e cobertura do terreno, do grau de saturação do solo e das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem. Algumas destas condicionantes podem variar de acordo com a estação do ano, padrões atmosféricos sazonais, além da influência das mudanças climáticas globais.

O rio Uruguai é o segundo maior tributário da bacia do rio da Prata, com comprimento aproximado de 1600 km, que cobre uma área de aproximadamente 250.320 km² (Figura 1). O trecho da sua nascente se localiza no Brasil, na Serra Geral, onde é conhecido como rio Pelotas, a uma altitude de aproximadamente 1800 m. Toda porção alta da bacia do rio Uruguai está localizada no Brasil, e na porção baixa este rio faz fronteira com a Argentina, mas os principais tributários estão localizados na porção leste da bacia. A bacia do rio Uruguai abrange 384 municípios brasileiros, e tem uma grande importância econômica principalmente como fonte de água para atividade agrícola dessa região.

Segundo dados do CEPED (2012), no estado do Rio Grande do Sul foram registrados oficialmente 413 inundações, com destaque para o oeste do estado. A cidade de Uruguaiana está localizada na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, fazendo divisa com a Argentina pelo rio Uruguai. O município é ocupado por aproximadamente 125.507 habitantes (IBGE, 2010), possui um dos maiores portos secos do país, e intensa produção agrícola e agropecuária.

Dada a importância econômica dessa região, e em vista de que perdas decorrentes de processos de inundação criam grande impacto sobre a economia dessa região, o presente trabalho tem como objetivo analisar os processos

de inundação do rio Uruguai no município de Uruguaiana identificando possíveis padrões morfológicos e meteorológicos relacionados, como uma contribuição ao desenho de estratégias de mitigação de risco de desastres nessa localidade.

2. DADOS E METODOLOGIA

Para o estudo proposto foram utilizados dados fluviométricos da estação Uruguaiana (código 77150000) da Agência Nacional de Águas (ANA) localizada no município de Uruguaiana, estimativas de precipitação do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), dados do modelo digital de terreno SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID). As informações obtidas da SRTM consistem de dados de altimetria estereoscópica obtidas por um radar remoto (FARR *et al.*, 2007).

A delimitação da bacia e sub-bacias do rio Uruguai a montante do município de Uruguaiana foi obtida a partir do modelo digital de elevação (MDE) SRTM, disponibilizado em resolução espacial de 1 arco de segundo ou 30 metros pelo *United States Geological Survey* (USGS). Foram demarcados os pontos exutórios das sub-bacias padrão correspondentes ao agrupamento de bacias de ordem menor conforme estrutura da ANA. Na delimitação destas bacias foram desconsiderados limites administrativos internacionais, por tanto estas refletem seu formato real o qual inclui território brasileiro e argentino (Figura 1); uma vez delimitadas, foram agrupadas como se apresenta na Tabela 1.

Posteriormente, com base no MDE os dados de altitude foram derivados em uma grade regular de declividade (em porcentagem), a qual foi agrupada em classes associadas às fases de relevo conforme determinadas na classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2006) (Tabela 2). Para cada sub-bacia foi obtida a distribuição percentual das classes de relevo como subsídio à análise do potencial de infiltração/escoamento superficial da água no solo, o que interfere consideravelmente no potencial das chuvas em causar inundações nas sub-bacias (Figura 2).

A escolha dos eventos de inundação no município de Uruguaiana foi baseada em informações catalogadas do Sistema Integrado

de Informações sobre Desastres (S2ID) do Ministério da Integração Nacional. Considerando o período do conjunto de dados de precipitação

disponível, foram selecionados eventos entre os anos de 2002 e 2014, totalizando 6 eventos.

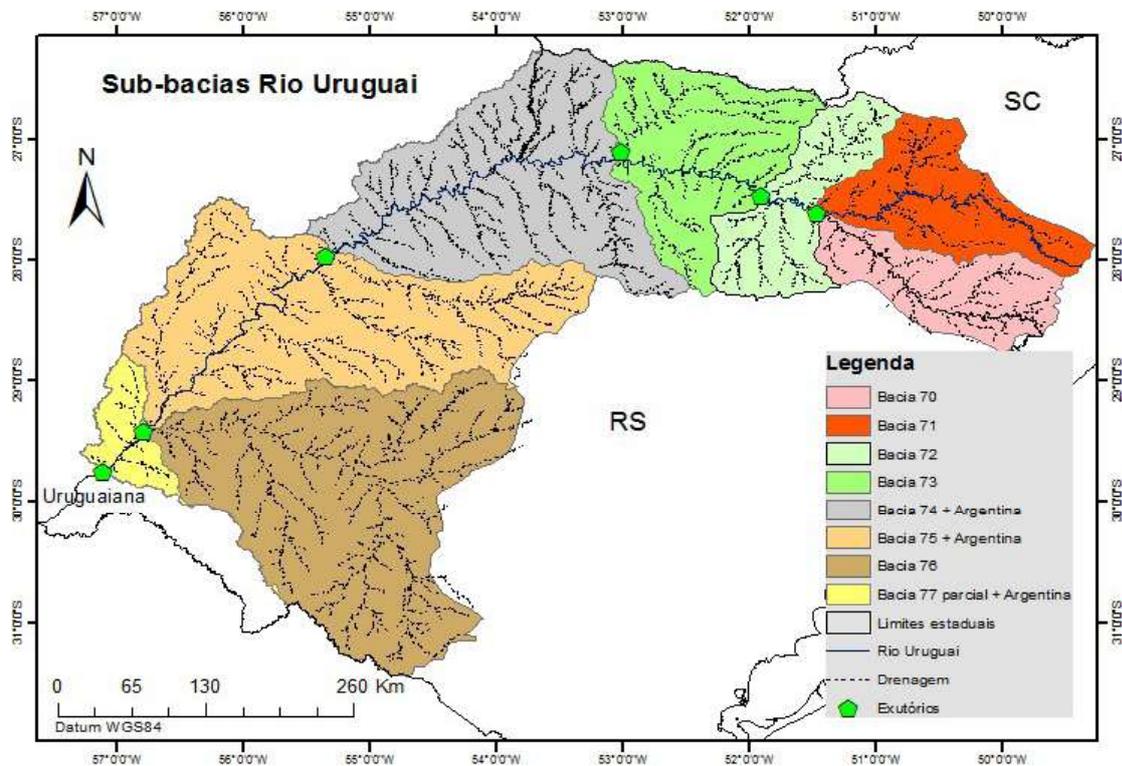


Fig. 1 – Agrupamento das sub-bacias do rio Uruguai, a montante do município de Uruguaiana, conforme estrutura adotada pela ANA – As sub-bacias 74, 75 e 77 abrangem território brasileiro e argentino.

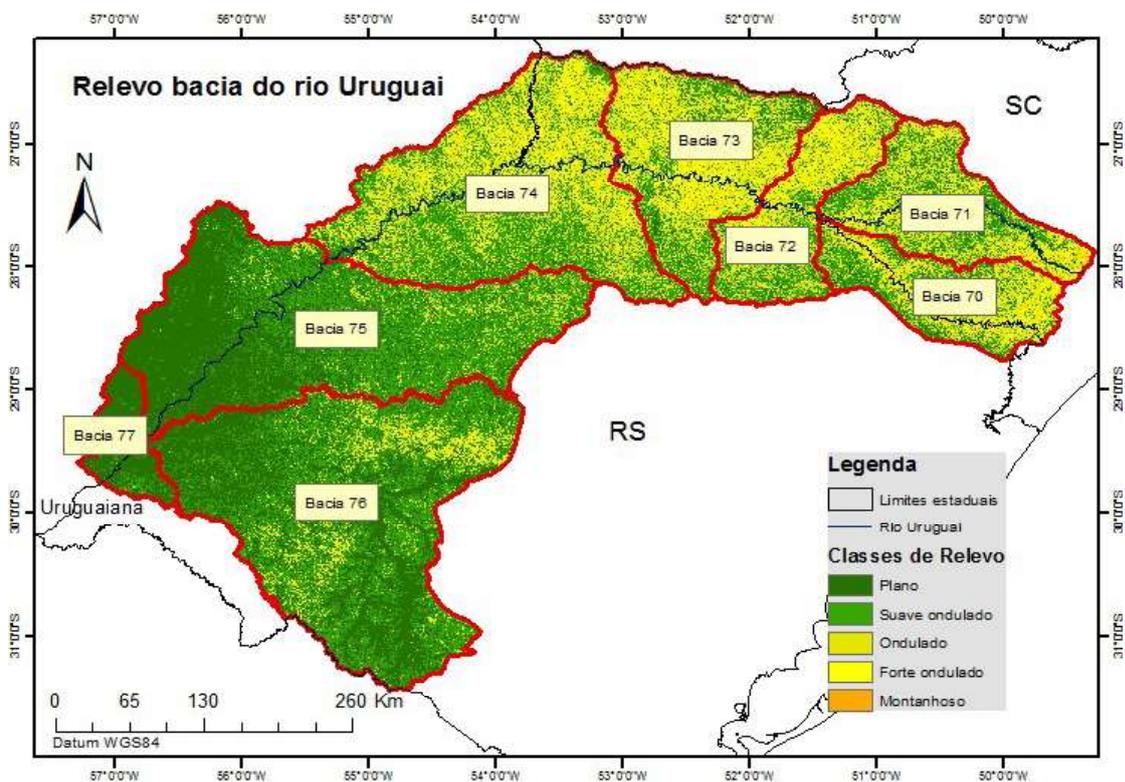


Fig. 2 – Distribuição espacial das classes de relevo na bacia e sub-bacias do rio Uruguai, a montante do município de Uruguaiana.

Tabela 1: Sub-bacias a montante do município de Uruguaiana conforme estrutura da ANA

Bacia	Rios	Área (km ²)
70	Rio Pelotas	15806
71	Rio Canoas	18475
72	Rios Uruguai, Inhanduva, Peixe e outros	15842
73	Rios Uruguai, Chapecó, Passo Fundo e outros	25670
74	Rios Uruguai, Varzea, Turvo e outros (incluindo território argentino)	45797
75	Rios Uruguai, Ijuí, Piratinin e outros (incluindo território argentino)	52452
76	Rio Ibicuí	59818
77	Rios Uruguai e outros (incluindo território argentino)	6186

Tabela 2: Faixas de declividade na bacia do rio Uruguai, segundo classificação EMBRAPA (2006)

Classe	Descrição
Plano	Declividades variáveis entre 0 e 3%
Suave ondulado	Declives suaves variáveis de 3 a 8%
Ondulado	Declives moderados variáveis de 8 a 20%
Forte ondulado	Declives fortes variáveis de 20 a 45%
Montanhoso	Declives fortes e muito fortes variáveis de 45 a 75%
Escarpado	Declives muito fortes acima de 75%

Os dados de estimativas de precipitação do satélite TRMM são derivados do algoritmo 3B42 a partir de medidas de radiância através do canal infravermelho de satélites geoestacionários, porém utilizando dados na faixa do espectro do microondas passivo e dados obtidos do satélite TRMM para calibração. De forma reduzida, as estimativas produzidas pelo algoritmo 3B42 seguem 4 passos: (1) Calibração e combinação de estimativas de precipitação, (2) Criação de estimativas de precipitação por infravermelho (microondas calibrada), (3) Combinação das estimativas de microondas e infravermelho, e (4) Adaptação para os dados mensais. Maiores informações sobre as estimativas de precipitação do TRMM podem ser obtidas em Simpson *et al.* (1996) e Kummerow *et al.* (2000).

As estimativas de precipitação são feitas em pontos de grade de 0,25° x 0,25° de resolução espacial na área entre as latitudes 50° N e 50° S, que cobrem praticamente todo o globo. Este conjunto de dados compreendem médias diárias de precipitação para o período de 1998 a 2014. Para o estudo proposto foram utilizados dados diários de precipitação para o período apresentado na Tabela 3. Para cada caso foram calculados a precipitação média, máxima e o desvio padrão diário para toda bacia do rio Uruguai assim como para suas sub-bacias.

Os dados fluviométricos disponibilizados pela ANA compreendem hidrogramas históricos de nível na estação de Uruguaiana, onde os dados de nível do rio Uruguai no referido município foram separados para cada evento histórico de inundação entre o período de 2002 à 2014. Assim, o tempo de ascensão pode ser calculado visualmente a partir do histograma da precipitação média na bacia do rio Uruguai e do hidrograma de nível da estação. Esse parâmetro hidrológico é um importante indicador do tempo máximo de resposta a um possível evento de inundação.

3. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta as datas dos eventos de inundação selecionados para esta discussão. Destaca-se que, em todos os eventos, o nível do rio Uruguai no município de Uruguaiana ultrapassou a cota de inundação que, segundo a Defesa Civil municipal, é de 8,10 m (Tabela 4).

Tabela 3: Eventos de inundação em Uruguaiana

Evento	Data da máxima cota	Período estudado
1	26/09/2002	31/08/2002 – 11/10/2002
2	27/12/2003	27/11/2003 – 11/01/2004
3	01/12/2009	20/10/2009 – 16/12/2009
4	03/05/2010	04/04/2010 – 18/05/2010
5	06/07/2014	26/05/2014 – 21/07/2014
6	08/10/2014	15/09/2014 – 23/10/2014

Segundo dados do S2ID o primeiro evento de inundação gerou um total de 324 pessoas desalojadas, 121 pessoas desabrigadas e 15 pessoas enfermas. Neste evento, a cota do rio Uruguai na cidade de Uruguaiana atingiu o valor de 10,26 m (Figura 3a), com precipitação média em toda bacia de 77,28 mm no período de 16 dias entre o mínimo e máximo valor de elevação do rio (Tabela 4).

Observa-se na Figura 3a que houveram aproximadamente 8 dias consecutivos de precipitação sobre a bacia. A anomalia de precipitação para o evento 1 (Figura 5a) supera os 400 mm em relação à precipitação normal para o período (Tabela 3), com os maiores valores distribuídos na porção sudoeste da bacia.

Segundo o Boletim Climanálise (CPTEC/INPE) durante o período estudado houve a atuação de pelo menos sete sistemas frontais sobre o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o que gerou altos volumes acumulados de precipitação.

Tabela 4: Eventos de inundação (Ev), Precipitação média na bacia do rio Uruguai, tempo de ascensão (tm), desnível (Des.) e níveis mínimo e máximo do rio Uruguai em Uruguaiana

Ev.	Prec. Média (mm)	tm (d)	Des. (m)	Nível Mín. (m)	Nível Máx. (m)
1	77,28	16	5,76	4,50	10,26
2	135,20	20	6,99	3,42	10,42
3	185,99	28	7,28	3,92	11,20
4	84,36	15	6,88	2,00	8,88
5	111,95	15	6,54	5,33	11,87
6	76,97	11	6,59	4,21	10,80

Destaca-se que, neste evento, as sub-bacias que apresentaram maior valor médio acumulado de precipitação superior ao valor para toda a bacia foram a 73 (82,91 mm), 74 (116,26 mm), 75 (85,01 mm) e 76 (130,48) (Figura 3c). A Figura 4 ilustra a proporção das principais classes de relevo em cada sub-bacia do rio Uruguai (Figura 3a). Observa-se que no caso 1 os máximos médios de precipitação ocorreram sobre regiões com relevo mais heterogêneo, variando de plano a ondulado, com destaque para a bacia 74.

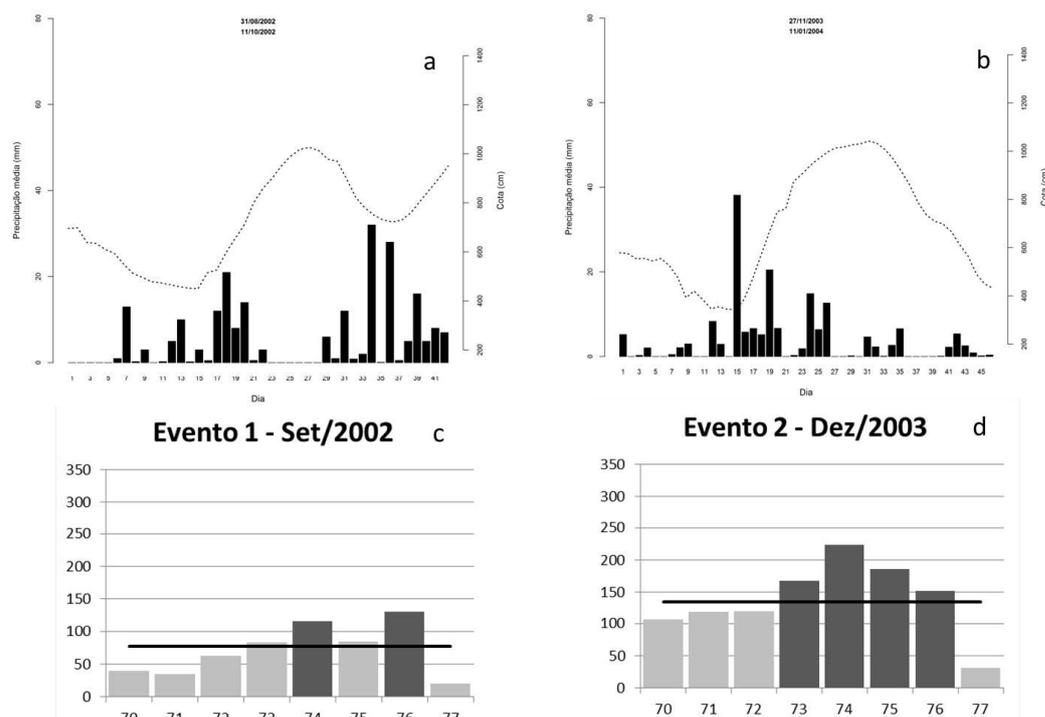


Fig. 3 – Hietograma de precipitação e hidrograma do rio Uruguai em Uruguaiana para EV1a, EV2b, e precipitação média observada sobre as sub-bacias para EV1c e EV2d.

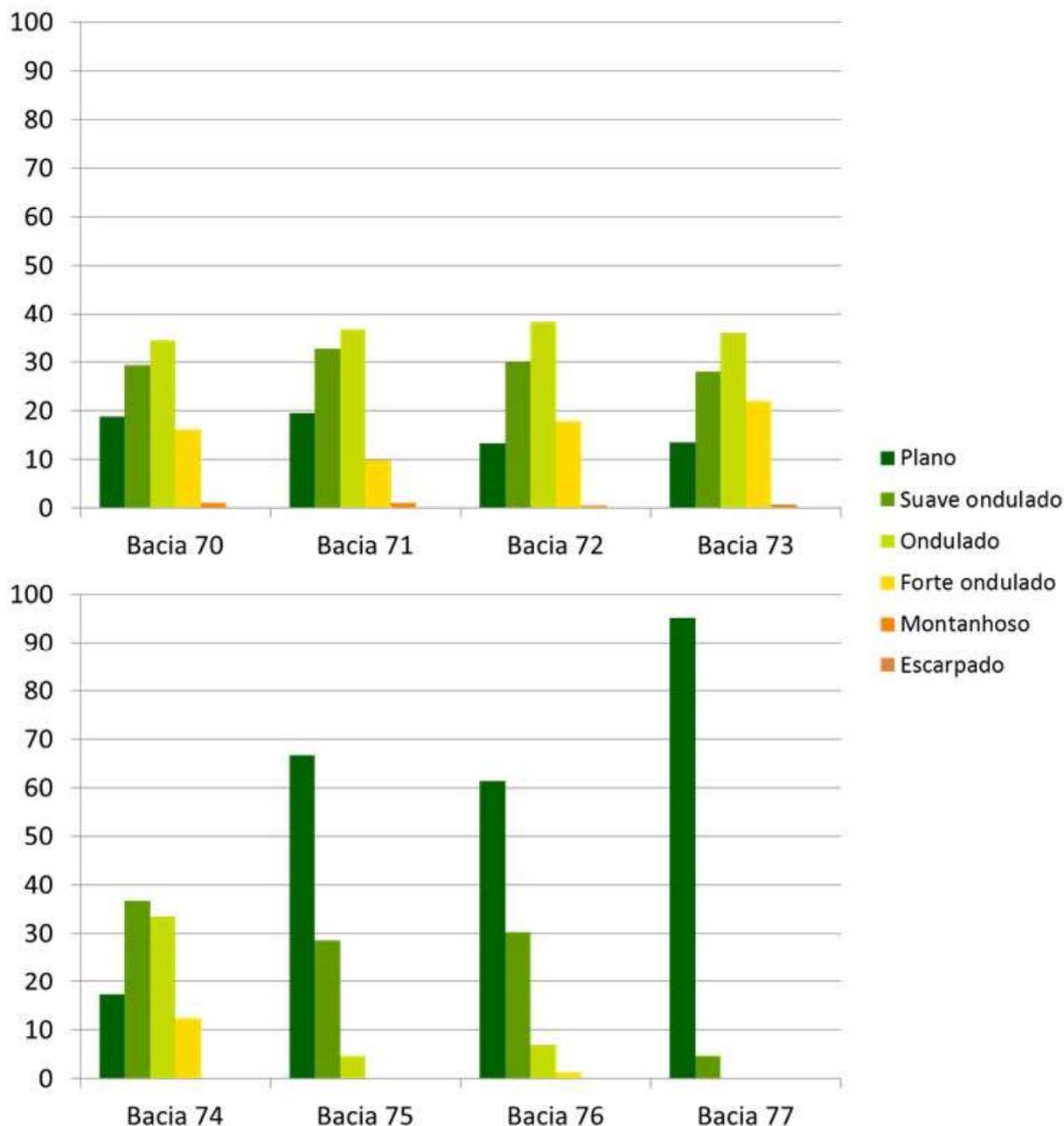


Fig. 4 – Percentual de classes de relevo para cada bacia em relação à área total da bacia do Rio Uruguai.

A inundação do rio Uruguai em Uruguiana em dezembro de 2003 (Tabela 3) acarretou em um número de mais de 400 pessoas desalojadas, quando o nível do rio atingiu 10,42 m (Tabela 4), 2 m acima da cota de inundação. Na Figura 3b também fica claro que houve mais de 10 dias consecutivos de precipitação sobre a bacia do rio Uruguai, com precipitação média de 135,20 mm (Tabela 4). Analisando cada sub-bacia, as maiores médias de precipitação foram observadas nas bacias 73 (168,30 mm), 74 (223,13 mm), 75 (186,59 mm) e 76 (152,60 mm) (Figura 3d).

A anomalia de precipitação observada sobre a bacia do rio Uruguai indica valores superiores a 400 mm em relação a normal, principalmente na porção norte/noroeste (Figura 5b), resultando em elevada precipitação média sobre a sub-bacia 74. Observa-se também que a precipitação neste evento é melhor distribuída sobre toda bacia, acarretando em um tempo de ascensão de 20 dias e um desnível de quase 7 m em Uruguiana. A passagem e atuação de sistemas frontais (4 casos) foi o principal sistema meteorológico responsável pelos altos valores acumulados de precipitação sobre a bacia em estudo.

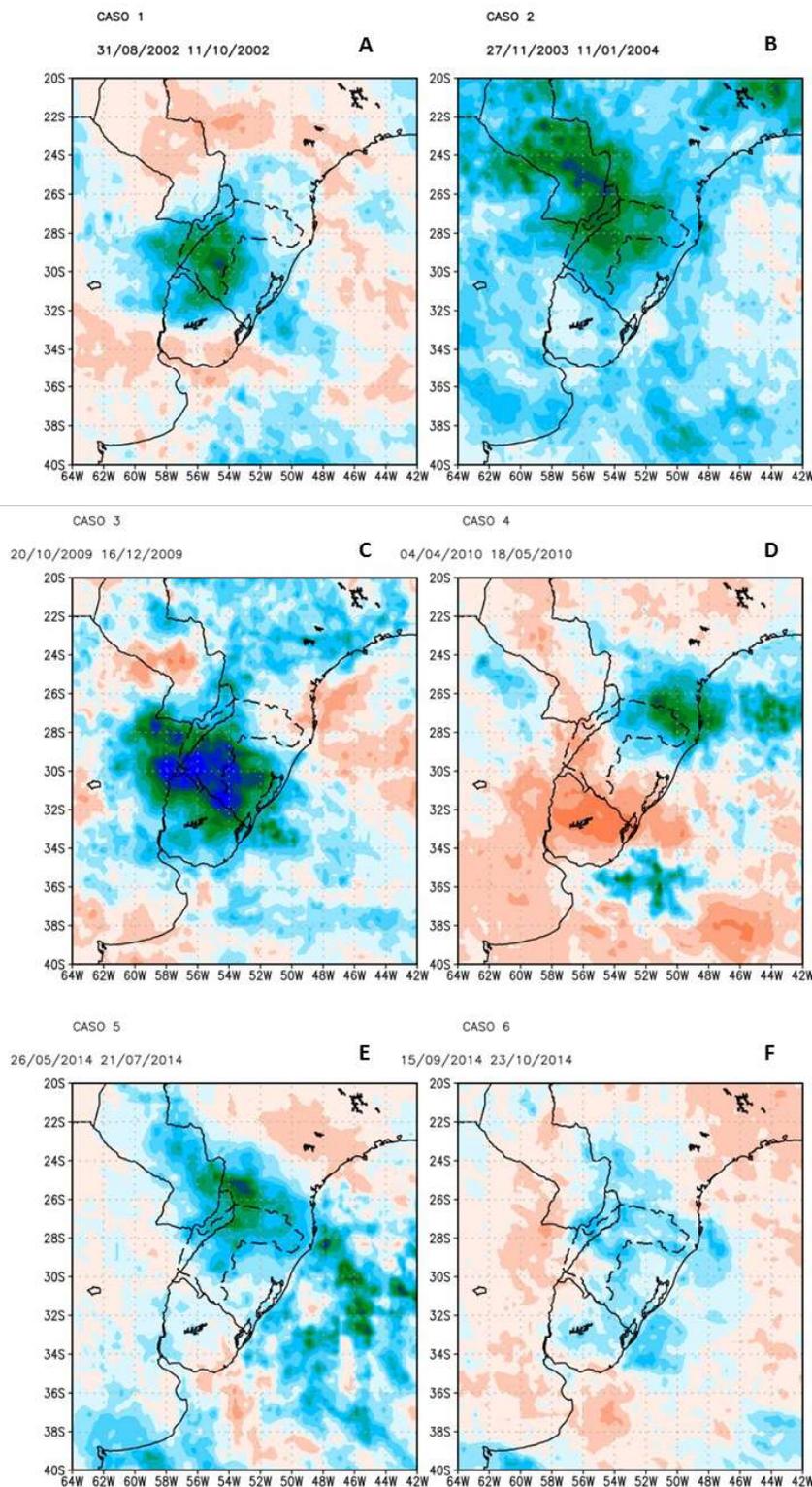


Fig. 5 – Anomalia de precipitação referente ao período de 1998 a 2014 para o (a) evento 1, (b) evento 2, (c) evento 3, (d) evento 4, (e) evento 5 e (f) evento 6 de inundação do rio Uruguai no município de Uruguaiana.

Após os dois eventos analisados, o próximo evento de inundação em Uruguaiana ocorreu em dezembro de 2009, quando a cota atingiu 11,20 m (Tabela 4), deixando mais de 1300 pessoas desalojadas, 600 pessoas desabrigadas, afetando um total de mais de 3000 pessoas no município.

Analisando a variação de nível (Figura 6(a) e Tabela 4) é possível observar que este ano foi o que apresentou a maior variação de nível, com valor superior a 7,28 m. A precipitação média observada sobre a bacia do rio Uruguai foi superior a 180 mm durante o período analisado.

Este evento de inundação esteve diretamente relacionado com grande anomalia positiva de precipitação observada principalmente sobre a porção sul da bacia do rio Uruguai (Figura 5c). No período analisado deste evento são observados valores superiores a 400 mm acima da normal, gerando precipitação média acima de 200 mm nas bacias 74 (231,82 mm), 75 (285,43 mm) e 76 (336,20 mm) (Figura 6c). Nota-se também que este evento foi o que apresentou o maior tempo de ascensão (Tabela 4) e no qual a precipitação sobre a bacia superou o período de 15 dias (Figura 6a). Destaca-se também que os maiores valores de precipitação média nas sub-bacias ocorreu em regiões com relevo mais plano (Figura 4), principalmente sobre a porção sul, o que pode ter direta relação com o tempo de ascensão.

O evento de inundação ocorrido no mês de maio de 2010 foi o que apresentou a menor cota (Tabela 4), com precipitação média sobre toda a bacia de 88 mm. Destaca-se o período também pequeno de apenas oito dias consecutivos

de precipitação sobre a bacia antes do pico de inundação (Figura 6b). Analisando a precipitação sobre as sub-bacias, observa-se que esta esteve melhor distribuída na cabeceira da bacia, principalmente sobre as bacias 71 (138,46 mm), 72 (127,81 mm), 73 (151,74 mm) e 74 (149,70 mm) (Figura 6d). Mesmo considerando um curto período de precipitação sobre a bacia hidrográfica do rio Uruguai, e que a precipitação foi concentrada na cabeceira da mesma, este evento foi um dos que apresentou o menor tempo de ascensão (Tabela 4), possivelmente relacionado com a precipitação sobre áreas de relevo mais íngreme (Figura 4). A distribuição de anomalia de precipitação também mostra (Figura 5d) anomalias positivas sobre a cabeceira da bacia, principalmente sobre a região de divisa dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Segundo o Boletim Climanálise durante o período analisado 3 sistemas frontais atuaram sobre a região de estudo, o que esteve diretamente relacionado com as anomalias positivas de precipitação observadas (Figura 5d).

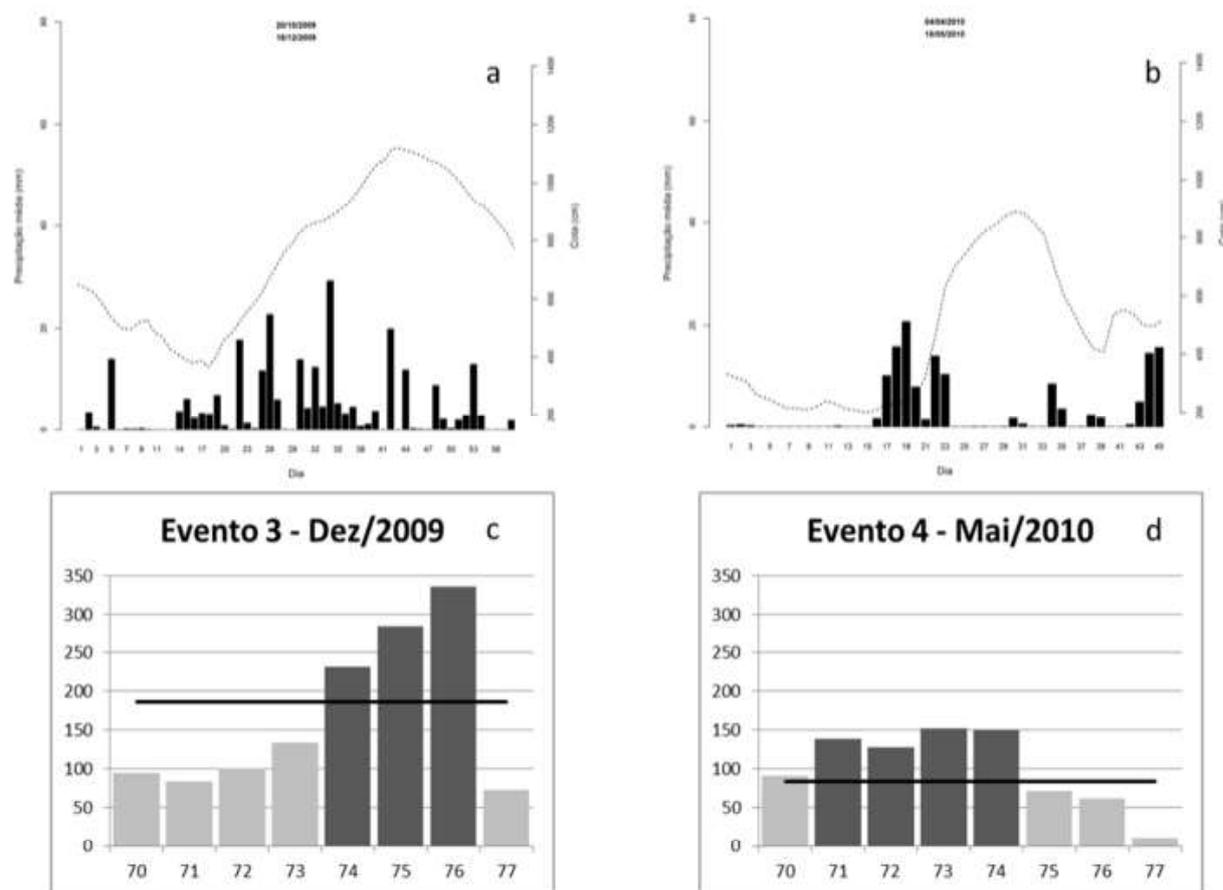


Fig. 6 - Hietograma de precipitação e hidrograma do rio Uruguai em Uruguaiana para o (a) evento 3, (b) evento 4, e precipitação média observada sobre as sub-bacias nos eventos (c) 3 e (d) 4.

O quinto evento analisado ocorreu em julho de 2014, quando a precipitação sobre a bacia do rio Uruguai provocou a elevação de sua cota na cidade de Uruguaiana, atingindo a maior cota: 11,87 m (Tabela 4). Neste evento, segundo dados de Defesa Civil municipal, o processo de inundação provocou a remoção de 6112 pessoas, interrupção de estradas e prejuízos públicos de mais de R\$ 35.000.000,00.

A elevação da cota ao nível de 11,87 m (Figura 7a) foi causada por intensa precipitação sobre praticamente toda a bacia de drenagem, com valor médio de 111,95 mm, distribuídos principalmente sobre a porção central e na cabeceira da bacia. Destacam-se os valores de precipitação superiores a média da bacia nas sub-bacias 72 (141,68 mm), 73 (189,03 mm) e 74 (197,39) (Figura 7c).

Pode-se observar também que foram aproximadamente 8 dias consecutivos de precipitação sobre a área de estudo antes do maior valor de elevação do rio (Figura 7a), causados principalmente pela atuação de 4 sistemas frontais. Observa-se na Figura 5e que a anomalia de precipitação está localizada mais sobre a porção norte da bacia, com valores que atingem 300 mm acima da média. Destaca-se também que entre o início da precipitação no período de cota mínima até o nível máximo levaram 15 dias. Este curto período de ascensão pode estar relacionado com o maior volume de precipitação sobre as sub-bacias com relevo mais acidentado (Figura 4).

O último evento analisado ocorreu em outubro de 2014, quando o município de Uruguaiana sofreu as consequências da elevação do rio Uruguai, quando este atingiu a cota de 10,80 m (Tabela 4). Em ocasião do processo de inundação, de acordo com informações da Defesa Civil do município, foram afetadas um total de 1410 pessoas em diversas localidades. Destaca-se que o desnível do rio Uruguai de 6,59 m foi observado em um curto período de apenas 11 dias (Tabela 4), o menor tempo de ascensão dos casos analisados.

Analisando os dados de precipitação sobre a bacia de drenagem, observa-se um acumulado médio de 76,97 mm (Tabela 4), com anomalias positivas de precipitação superiores a 200 mm principalmente sobre a porção central da bacia (Figura 5f), diretamente influenciado pela atuação de 4 sistemas frontais. Destaca-se que, diferentemente

dos outros casos analisados, não foram observados vários dias consecutivos de precipitação antes do pico de cheia, mas sim dias intercalados com altos volumes de chuva. Também é possível observar na Figura 7d que as sub-bacias que apresentaram os maiores valores de precipitação foram a 73 (111,02 mm), 74 (161,30 mm) e 75 (124,13 mm), sendo as duas primeiras com grandes proporções de relevo ondulado e forte ondulado.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Para reduzir o risco de desastre e alertar a população sobre a iminência de um evento natural em magnitude tal que lhe pode causar dano, torna-se necessário o melhor conhecimento das características relacionadas com a tipologia desses eventos. Neste sentido, procurou-se identificar possíveis padrões comuns a eventos de inundação no município de Uruguaiana. Comparando as figuras 3, 5, 6 e 7, observou-se que houve diferença espacial, temporal e volumétrica da precipitação entre os 6 casos estudados, confirmando o proposto por Tucci *et al.* (2013), mesmo considerando que todos os casos estejam associados ao mesmo tipo de sistema meteorológico (frentes),.

Entre os anos de 2002 e 2014 foram analisados 6 eventos de inundação no município, quando o nível do rio Uruguai ultrapassou a cota de referência para inundação de 8,1 m. Os resultados apresentados corroboram com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2012), o qual destaca a região Oeste do Rio Grande do Sul como uma das mais afetadas por processos de inundação gradual. Como citado anteriormente, o município de Uruguaiana possui grande importância econômica para a região e eventos de inundações podem causar, além de prejuízos à população como, por exemplo, desabrigados e desalojados, grandes prejuízos na produção agrícola e agropecuária.

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que o nível do rio Uruguai em Uruguaiana, em 5 dos 6 eventos analisados, esteve 2 m acima da cota de inundação indicada pela Defesa Civil municipal. Destaca-se também que a variação entre o nível mínimo e máximo antes do evento de inundação em todos os casos foi sempre superior a 5,5 m, e algumas vezes superando os 7 m. Esta grande variação do nível do rio ocorreu em períodos superiores a 10 dias e inferiores a 30 dias.

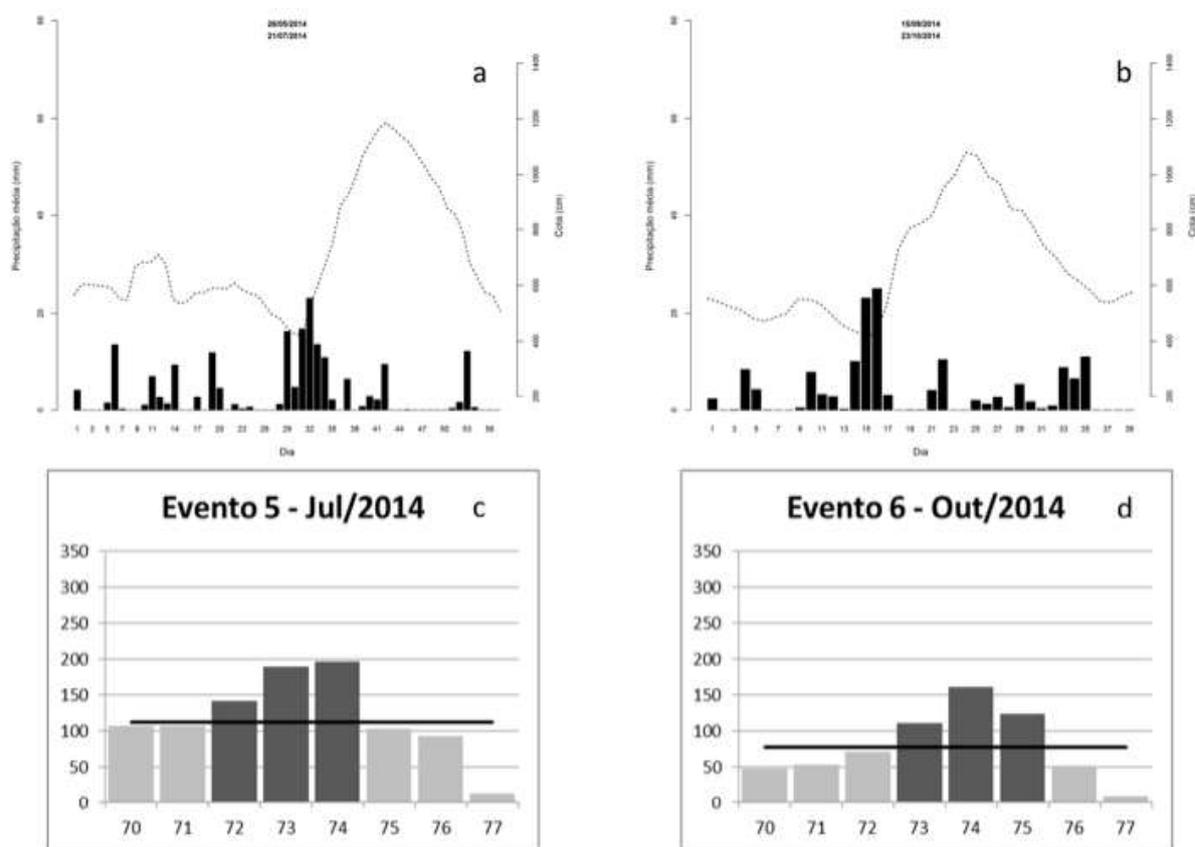


Fig. 7 - Hietograma de precipitação e hidrograma do rio Uruguai em Uruguaiana para o (a) evento 5, (b) evento 6, e precipitação média observada sobre as sub-bacias nos eventos (c) 5 e (d) 6.

Todos os eventos analisados apresentaram anomalias positivas de precipitação sobre praticamente toda a bacia de drenagem, superando a média em 200 mm e em alguns casos até 400 mm. Estes grandes volumes de precipitação sobre a bacia foram o principal agente deflagrador dos eventos de inundação estudados. Os resultados apresentados concordam com a afirmação de Tucci *et al.* (2013) de que a variação do nível ou da vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica, sendo que as distribuições temporal e espacial da precipitação são as principais condições climatológicas. Destaca-se que os altos índices pluviométricos observados foram provocados por atuação de sistemas frontais sobre a área de estudo.

Os sistemas frontais são regiões de encontro de massas de ar de propriedades diferentes, classificados usualmente como frentes frias, quentes, oclusa ou estacionária. Em todos os eventos analisados a precipitação observada sobre a área de estudo foi gerada por frentes frias. Segundo Cavalcanti *et al.*

(2009) estes sistemas atuam sobre a região de estudo durante todo o ano e possuem uma frequência que varia de 40 a 30 sistemas por ano, sendo mais frequentes entre maio e setembro. Algumas vezes, juntamente com a atuação de sistemas frontais, há a formação dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), que também são responsáveis por grandes volumes de precipitação e possuem grande frequência de formação sobre a área de estudo e estão associados à um grande número de desastres naturais registrados (CAVALCANTI *et al.*, 2009; VIANA *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 1998). Vale ressaltar também que durante o período de estudo foram observados 3 eventos de El Niño, fenômeno o qual, segundo Fedorova e Carvalho (2000), pode aumentar o número de sistemas frontais sobre a área de estudo.

O conhecimento prévio das características meteorológicas, hidrológicas e morfológicas da área de estudo, como apresentado neste trabalho, poderá auxiliar a emissão de alertas de risco com antecedência, reduzindo prejuízos humanos e materiais. Segundo Sorensen (2000),

um sistema de alerta, independente do tipo de desastre, fornece informações sobre o risco para a população exposta e a torna capaz de tomar decisões e ações. Sendo assim, de acordo com Guasselli *et al.* (2013) um sistema eficaz de monitoramento e alerta deverá integrar subsistemas de detecção de eventos extremos, gerenciando informações sobre o desastre e as ações de resposta.,

A análise dos eventos de inundação em Uruguaiana, descritos anteriormente, os quais estão diretamente relacionados com altos volumes pluviométricos sobre a bacia de drenagem do rio Uruguai, também mostraram relação com o tipo de relevo da sub-bacia e sua influência sobre o escoamento, concordando com estudos apresentados por Tucci *et al.* (2013).

Dos resultados obtidos foi possível verificar que, quando observados elevados volumes de precipitação sobre sub-bacias com relevo mais íngreme, a ascensão do hidrograma é maior. Já em eventos onde a precipitação está mais concentrada em sub-bacias de relevo mais plano, a ascensão do hidrograma foi menor. Também é possível concluir que eventos de inundação na cidade de Uruguaiana estão diretamente relacionados com altos volumes de precipitação, geralmente superiores em 200 mm da normal climatológica sobre a bacia de drenagem.

Considerando o relevo de cada uma das sub-bacias analisadas, quando a precipitação é mais concentrada sobre a região central e na cabeceira, mesmo que por um curto período de tempo, o rio apresenta uma rápida elevação de sua cota em Uruguaiana. Destaca-se também que quando a precipitação ocorre nas regiões de relevo mais íngreme não são necessários altos volumes para que se observe a elevação do rio e consequente inundação em Uruguaiana, visto que há maior produção de escoamento superficial de alta velocidade nestas regiões.

Em contrapartida, para que sejam observados processos de inundação em Uruguaiana em eventos com de precipitação sobre a porção mais plana e sul da bacia do rio Uruguai, são necessários altos volumes de precipitação por longos períodos de tempo, visto que o escoamento nessas regiões é mais lento devido ao relevo e a declividade dos canais.

No contexto de monitoramento do rio Uruguai, na altura do município de Uruguaiana,

ainda que de forma qualitativa, torna-se necessário avaliar a distribuição da precipitação nas sub-bacias de relevo mais íngreme, a qual pode indicar maiores chances de ocorrência de inundação. Por outro lado a ocorrência de chuvas nas sub-bacias de relevo mais suave indicam menores chances de inundação no município. Sendo assim, considerando as principais características associadas a processos de inundação em Uruguaiana, os resultados apresentados poderão servir como ferramenta de análise e tomada de decisão para os órgãos responsáveis de monitoramento e alerta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Ref. No 400065/2014-2 e Ref. No 455990/2014-0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, J.F., JUSTI DA SILVA, M.G.A, SILVA DIAS, M.A.F. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo. Oficina de textos, 2009. 463 p.

CEPED (Centro Universitário sobre Estudos e Pesquisas sobre Desastres/Universidade Federal de Santa Catarina). 2012. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2010**. Volume Rio Grande do Sul. 185 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. Ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 286 p.

FARR, T. G., ROSEN, P. A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., SEAL, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, v. 45, n 2, p 1-33, 2007.

FEDOROVA, N., CARVALHO, M.H. Processos sinóticos em anos de La nina e de El nino. Parte 11: Zonas frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n.2, p. 57-72, 2000.

GUASSELLI, L. A.; OLIVEIRA, G. G. de; ALVES, R. de C. M. (Org.). **Eventos extremos no Rio Grande do Sul : inundações e movimentos de massa**. 1ed. Porto Alegre: Evangraf, 2013. sp

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER,

- E.; NAKAMURA, K. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.
- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L. and WALKER, A. W. Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 1630–1654, 1998.
- SIMPSON, J.; KUMMEROW, C.; TAO, W. K. and ADLER, R. F. On the tropical rainfall measuring mission (TRMM). **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 60, n. 1-3, p. 19-36, 1996.
- SORENSEN, J. H. Hazard warning systems: review of 20 years of progress. **Natural Hazards Review**, v. 1, n. 2, p. 119-125, 2000.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. 196 p. 2009.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, CEPED/UFSC. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: Volume Brasil. Florianópolis. 94 p. 2012.
- TUCCI, C. E. M.; DA SILVEIRA, A. L. L.; BERTONI, J. C.; LANNA, A. E.; CAICEDO, N. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L.; CHEVALLIER, P.; CLARKE, R. T.; PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; BENETTI, A.; BIDONE, F.; PESSOA, M. L.; BORDAS, M. P.; SEMMELMAN, F. R. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013. 943 p.
- VIANA, D. R.; AQUINO, F. E. ; MUNOZ, V. A. **Avaliação de desastres no Rio Grande do Sul associados a complexos convectivos de mesoescala**. Sociedade & Natureza (UFU. Online), v. 21, p. 91-105, 2009.