Limiares de chuva deflagradores de inundações bruscas: metodologia, aplicação e avaliação em ambiente operacional

Rainfall thresholds for flash floods: methodology, application and operational evaluation

• **Data de entrada:**
08/09/2017

• **Data de aprovação:**
14/06/2018

Luiz Carlos Salgueiro Donato Bacelar^{1*} | Aliana Maciel¹ | Carlos Frederico de Angelis¹ | Javier Tomasella¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.007>

ORCID ID

Bacelar L.C.S.D. <https://orcid.org/0000-0001-8389-8028>
Maciel, A.P.R. <https://orcid.org/0000-0002-1704-4152>

Angelis, C.F. <https://orcid.org/0000-0003-0232-8280>
Tomasella J. <https://orcid.org/0000-0003-2597-8833>

Resumo

O presente artigo refere-se à apresentação da metodologia, aplicação e avaliação da primeira ferramenta computacional para diagnóstico e prognóstico para inundações bruscas, baseada em limiares de chuva, que foi implementada na plataforma do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden). A partir de séries históricas de níveis dos rios e dados pluviométricos, um procedimento foi elaborado para construir relações que indicam a quantidade de chuva necessária para aumento da probabilidade de ocorrência de inundações bruscas em até vinte e quatro horas. Os dados de precipitação provenientes de pluviômetros, radares meteorológicos, satélites e modelagem atmosférica por conjunto são utilizados para acompanhamento em tempo real dos níveis críticos de chuva pré-estabelecidos, integrados ao monitoramento e operação. Foram analisados três casos de alertas de risco às inundações bruscas, enviados após a implementação da ferramenta, que demonstrou um bom desempenho na antecipação de situações de perigo devido às inundações bruscas.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Desastre natural. Enchente. Cheia. Meteorologia. Perigo.

Abstract

The present technical article refers to the methodology, application and evaluation of the first computational tool for diagnosis and prognosis of flash floods, based on rain thresholds, which was implemented in the platform of the National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden). From historical series of river levels and rainfall data, a procedure was developed to construct relationships that indicate the amount of rain necessary to increase the probability of flash floods occurring in up to twentyfour hours. Rainfall data from rain gauges, weather radars, satellites and atmospheric modeling are used for real-time monitoring of the pre-established critical rainfall thresholds, integrated into the monitoring and operation. Three cases of flash flood risk warnings sent after the implementation of the tool were analyzed, which demonstrated a good performance in the anticipation of flash floods hazard situations.

Keywords: Hydrological modelling. Natural disaster. Flood. Meteorology. Hazard. Susceptibility.

¹ Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação. CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres. São José dos Campos (SP), Brasil.

* **Autor correspondente:** luizcarlosbacelar90@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A adaptação é a principal estratégia para uma gestão efetiva de riscos relacionados aos desastres naturais. Isto é o que revela o boletim especial do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2012), que enfatiza os desafios mundiais associados à incerteza da previsibilidade dos impactos socioeconômicos deflagrados por eventos climáticos e meteorológicos extremos. O foco para adaptação seria uma redução drástica da exposição e da vulnerabilidade, com um aumento considerável da resiliência, mesmo sabendo que os riscos não podem ser completamente eliminados. Uma saída viável adotada por muitos países é apostar cada vez mais em políticas públicas que englobem e integrem os diferentes níveis hierárquicos da gestão de riscos com seus atores. No caso do Brasil, a estrutura que visa ao melhor controle das ações diretamente ligadas à diminuição de catástrofes naturais está em fase de reformulação e crescimento (JORNAL ESTADO ONLINE, 2012; CEPED, 2012).

De acordo com a lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, fica instituída a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, que viabiliza a criação do sistema de informações e monitoramento de desastres, visando o oferecimento de informações atualizadas para prevenção, resposta e mitigação em todo território nacional. As atribuições federais, estaduais e municipais são descritas no documento, o que torna as diretrizes e os objetivos mais unificados. Essa evolução gradual das políticas a favor da redução do risco a desastres depende de sinergia, colaboração, coordenação e desenvolvimento multidisciplinar e multi-institucional, o que são vistos internacionalmente como atributos positivos para garantir a implementação da gestão de riscos em um contexto de desenvolvimento sustentável (LAVELL e FRANCO, 1996; RAMÍREZ e CARDONA, 1996; WISNER et al., 2006). Fazem parte da prevenção as entidades que de alguma forma eliminam, evitam ou

diminuem as causas e condicionantes que sustentam as catástrofes, como por exemplo, os centros de monitoramento e alerta. A resposta é dada primeiramente pelas agências locais de Defesa Civil, e a mitigação ou recuperação é realizada pelos órgãos públicos que adequam os planos de reabilitação, como as obras de infraestrutura pós-desastres. Esse ciclo e sua retroalimentação trabalham voltados para a percepção de risco da sociedade, o que ajuda na interpretação de suas experiências em diferentes situações de ameaça.

O Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) tem como competência prover alertas de risco hidrológico e geológico em municípios monitorados para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (Cenad), que por sua vez os segmentam e direcionam para as Defesas Cíveis locais. Os dados necessários para a elaboração dos alertas estão ligados à plataforma de monitoramento SALVAR (Sistema de Alerta e Visualização de Áreas de Risco), utilizada pelo Cemaden, que integra e compila dados meteorológicos, hidrológicos, geológicos e socioeconômicos de todo o território nacional. Todos os alertas são, portanto, baseados em critérios técnicos pré-estabelecidos pelos operadores do centro. Por se tratar de mais de 957 municípios monitorados em todo o Brasil, em muitos casos com alertas simultâneos, a capacidade operacional do centro e da própria plataforma necessita de um direcionamento automático de situações de perigo, baseado em níveis críticos de variáveis deflagradoras para cada tipo de processo ou ameaça a ser alertado.

Alguns sistemas de alerta ou planos de contingência regionais trabalham com limiares críticos de precipitação para processos deflagrados por chuvas intensas (UCAR, 2010; HOEDJES et al., 2014). O Plano de Prevenção a Desastres do Estado de São Paulo (PPDC), por exemplo, utiliza limiares de chuvas críticos extraídos de pluviometria para alertas de movimentos de massa (TA-

TIZANA, 1987a; TATIZANA, 1987b), elaborados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). O Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ) também constitui e atualiza as suas relações empíricas continuamente após a ocorrência de novos eventos em território fluminense (DRM, 2013). Nesses locais que contam com um estudo prévio dos eventos de movimentos de massa, os acumulados de chuva medidos são acompanhados visualmente pelos órgãos de monitoramento e comparados com as curvas de limiões críticos pré-estabelecidos para cada região específica. Esses valores indicam empiricamente quais regiões podem ter maior propensão à ocorrência de movimentos de massa, uma vez que relacionam a precipitação incidente na superfície com o grau de saturação do solo e o potencial de estabilização da encosta.

Assim como desastres de caráter geológico, países que sofrem com impactos relacionados a extremos hidrológicos já aplicaram ferramentas operacionais (em tempo real) com base em limiões deflagradores, como o *Flash Flood Guidance System* (SWEENEY, 1992; UCAR, 2010; GOURLEY et al., 2012), elaborado pelo *Weather National Service* dos Estados Unidos para diagnóstico e prognóstico de inundações bruscas e utilizado operacionalmente desde 1992 (SWEENEY e BAUMGARDNER, 1999). A inundação em si é caracterizada pelo extravasamento do rio de sua calha natural (UCAR, 2010), e de acordo com a Organização Meteorológica Mundial, das tipologias, as mais preocupantes são as bruscas, consideradas a forma mais letal de ameaça natural (baseado nos números entre a razão de óbitos por pessoas afetadas), pois causam milhões de dólares em prejuízos todos os anos (WMO, 2007). Apesar da severidade desse fenômeno, poucos países já implementaram políticas específicas para gestão de inundações bruscas (UCAR, 2010), devido à complexidade da sua previsão e antecipação em tempo hábil para ações de respostas eficazes. Definidas pela *U.S. National Wea-*

ther Service como uma inundação que aumenta progressivamente de forma rápida em poucas horas ou minutos, as inundações bruscas necessitam de condicionantes atmosféricas e de superfície específicas para sua ocorrência (UCAR, 2010). Com o extravasamento do rio sob escoamento com alto poder de arraste, as estruturas localizadas às margens são danificadas quase que instantaneamente. Na maioria dos eventos, as inundações bruscas ocorrem devido a tempestades convectivas: nuvens de crescimento vertical elevado, concentrando grande quantidade de água líquida disponível para precipitação, que chegam à superfície em alta intensidade (GRUNTFEST e HANDMER, 1999). A dificuldade de calibração de modelos fisicamente baseados de chuva-vazão, com complexa implementação em ambiente operacional, sugere a aplicação de metodologias mais simplificados como de chuva-ocorrência nos casos das inundações bruscas (GRUNTFEST e HANDMER, 1999; UCAR, 2010).

Como grande parte dos desastres naturais são deflagrados a partir de uma alta taxa de precipitação, muitas pesquisas avaliam a capacidade das previsões dos acumulados de chuva, tanto a partir de modelagem atmosférica por conjunto como por radares meteorológicos e satélites (CLUCKIE e OWENS, 1987; NORMAN et al., 2010; PIERCE et al., 2011). Recentes algoritmos de modelagens computacionais, elaborados a partir de estimativas de precipitação por sensores remotos e redes avançadas de comunicação, trazem, portanto, novas abordagens para caracterização de situações críticas de chuva que servem também como principais referências em regiões onde não há uma rede pluviométrica consolidada (VILA et al., 2009). O Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC-INPE) avança com novas diretrizes para o modelo atmosférico regional ETA (CHOU, 1996), buscando melhores resoluções espaciais da precipitação e acumulados mais precisos. O desafio não atende somente à busca pelo campo de chuva mais

realístico, mas compreende também como essa informação pode ser útil e viável a ferramentas subsequentes que detectam os processos de superfície susceptíveis.

O que instigou os Estados Unidos a elaborar e investir em tecnologias para as primeiras ferramentas hidrológicas foi um evento de inundação brusca ocorrido em 1969 na cidade de Ohio, que vitimou quase mil pessoas (SCHMIDT et al., 2007). No Brasil, as inundações bruscas também são fatais. De acordo com o Atlas Brasileiros de Desastres Naturais (CEPED, 2012), as inundações bruscas são o segundo desastre natural mais notificado pelas defesas civis, perdendo apenas para as secas e estiagens. Analisando também outras tipologias de desastres (como movimentos de massas e inundações graduais), as inundações bruscas lideram o ranking em número de óbitos em todas as macrorregiões do país, com quase 1000 óbitos somente na região sudeste, no período de 1992 a 2010. O exemplo mais catastrófico da proporção de um desastre hidrológico e geodinâmico em território nacional se caracterizou no dia 12 de janeiro de 2011, na região serrana no Estado do Rio de Janeiro, onde mais de 900 pessoas foram contabilizadas oficialmente como vítimas fatais no maior desastre natural já visto no país. Um motivo para preocupação da comunidade científica brasileira, e dos órgãos de monitoramento, se deve ao fato de que muitas regiões brasileiras podem estar predispostas ao mesmo cenário catastrófico, levando em consideração tanto os aspectos geomorfológicos como os impactos sociais. Esse problema tende a ser agravado quando ainda existe uma política de expansão urbana desorganizada e desenfreada: uma maior quantidade da população é classificada com alto grau de vulnerabilidade e mais cidades se desequilibrarão diante de ameaças naturais. O mesmo estudo elaborado pela CEPED (2012) revela que pelo menos um município por estado já decretou situação de emergência com relação ao processo de inundação brusca. Por si

só, essa informação já demonstra a relevância do fenômeno tanto pelo caráter científico e acadêmico como pelo político na percepção do risco pela sociedade diretamente afetada.

Por isso, expõe-se neste artigo técnico a primeira ferramenta para diagnóstico e prognóstico de inundações bruscas aplicada em tempo real na plataforma de monitoramento SALVAR, do Cemaden. A metodologia se baseia no estudo de limiares de chuva deflagradores de inundações bruscas, com base em histórico de eventos ocorridos nas bacias. A avaliação da ferramenta foi feita considerando a validação das curvas de limites críticos de chuva e sua aplicabilidade nos dados meteorológicos disponíveis para monitoramento no Cemaden: rede pluviométrica automática, estimativa por sensores remotos e previsão meteorológica por conjunto. Serão descritos os dados utilizados e as metodologias, justificados tecnicamente quanto ao uso de cada componente para a elaboração da ferramenta. Portanto, o trabalho segue uma avaliação criteriosa sobre o ganho de sistemas automáticos, que de fato contribuam para salas de crise ou monitoramento pelo país.

2 DADOS E METODOLOGIA

Muitas regiões estão predispostas a desastres seguidos de inundações bruscas, mas poucas detêm instrumentação e dados em uma escala compatível ao processo a ser retroanalisado ou monitorado continuamente. Alguns órgãos regionais de monitoramento hidrológico já investiram na aquisição de dados por estações hidrometeorológicas e hidrométricas, como no caso do Sistema de Alerta de Cheias do Instituto Estadual do Meio Ambiente do Rio de Janeiro (INEA), que provém informações das cotas d'água de alguns rios e córregos, transmitidos a cada quinze minutos. Além dos dados armazenados continuamente, a informação exata da ocorrência da inundação também

é necessária para retroanalisar eventos já ocorridos. Esse controle pode ser adquirido facilmente fixando-se um nível crítico de cota d'água em cada estação de monitoramento, o que torna possível saber em qual horário a cota de transbordamento foi superada. Com o conhecimento dos horários em que o nível do rio ultrapassou a cota de transbordamento, é possível contabilizar a chuva antecedente a esse horário, bem como o total do acumulado durante todo o evento chuvoso. Para considerar a espacialização da precipitação dentro da área de contribuição do posto fluviométrico estudado, algumas técnicas de geoprocessamento utilizando dados de superfície foram aplicadas nesse estudo.

É comum, em hidrologia, separar as áreas superficiais de interesse em bacias hidrográficas, que são a área de contribuição a montante de um ponto em um determinado rio. Portanto, todo posto fluviométrico instalado tem uma superfície de contribuição da drenagem à montante, e se a precipitação ocorrer sobre essa área, por escoamento irá influenciar o aumento da cota do rio naquele ponto. Para delimitar a área de cada posto, os softwares de geoprocessamento, fazendo uso de um Modelo Numérico de Terreno (MNT), que representa em grade regular a altitude em relação ao nível do mar em cada pixel. Para discriminação das bacias, neste artigo foi utilizado o MNT do projeto TopoData do INPE, e para os processamentos, utilizamos o software Terra Hidro (ROSIM et al., 2008). Com o MNT de resolução espacial de 30 metros importado para o software, é possível então obter as direções de fluxo preferenciais dos pixels e a área de contribuição (em km²) dos mesmos. Ao todo, o INEA possui 52 postos de monitoramento contínuo nos rios do Estado, e foi possível delimitar 52 bacias a montante das estações hidrométricas. A série de dados disponíveis varia de acordo com a instalação e o começo operacional de cada estação, sendo que a rede foi consolidada como está atualmente no final de 2012.

Para elaborar as curvas de limiares de chuva, é necessária uma retroanálise dos eventos considerados mais críticos nos postos fluviométricos. Ao delimitar as bacias, é possível contabilizar a rede pluviométrica disponível dentro de cada região hidrográfica (bacias). Os pluviômetros inseridos nessa etapa foram considerados para constituir os acumulados de chuvas antecedentes de cada evento de crítico. Os eventos críticos foram classificados em “com transbordamento”, quando o nível do rio ultrapassa a cota de transbordamento, e “sem transbordamento”, quando o nível do rio atinge pelo menos 50% da cota de transbordamento. A chuva acumulada referente a cada evento crítico foi determinada considerando os valores do pluviômetro mais expressivo de cada bacia, ou seja, nesse caso foi suposto que a chuva que deflagrou o evento crítico foi proveniente do pluviômetro com maior valor acumulado dentro da bacia. Nesse caso, considera-se que, em bacias pequenas, uma grande quantidade de chuva em pontos isolados seja a potencial deflagradora dos processos de inundações bruscas (UCAR, 2010).

Outro dado importante nesse diagnóstico é o tempo de ocorrência do evento de chuva. É notório que a duração do evento de chuva influencia o escoamento em contato com a superfície, pela própria característica da origem da precipitação: convectiva ou estratiforme (STEINER et al., 1995; BIGGERSTAFF e LISTEMAA, 2000). Por isso, as curvas de limiares de chuva devem ser provenientes dos dois tipos de processo, as com maiores intensidades e curta duração e menores intensidades em maior duração. As Fig. 2 e 3 mostram a diferença desses dois processos na estação Coronel Veiga no município de Petrópolis. O posto fluviométrico possui uma área de drenagem de 6,86 km². O acumulado de precipitação na Fig. 1 é referente ao evento ocorrido no dia 17/03/2014, com total de 85 mm em 8 horas e 30 minutos. Ou seja, a inundação brusca (passagem do nível da estação pela cota de transbordamento) ocorreu em 8 horas e 30 minutos após

o início da chuva deflagradora. Para a mesma estação, também foi observada uma inundação

que ocorreu em 29/11/2013, após 52.3 mm de chuva em 5 horas e 45 minutos (Fig. 2).

Figura 1: Dados de nível e taxa de precipitação da estação Coronel Veiga no dia 17/03/2014.

Figura 2: Dados de nível e taxa de precipitação da estação Coronel Veiga no dia 29/11/2013.

Em vista aos dados analisados das 52 estações, algumas não chegam a apresentar em sua série histórica níveis acima de 50% da cota de transbordamento. Uma solução para aplicar a metodologia em todas as bacias foi regionalizar os estudos dos eventos de retroanálise e elaborar os limiars para grupos de estações e/ou bacias, que contemplem regiões específicas. Não há registros de informações das bacias relativas a outras características fisiográficas que pudessem ser utilizadas para uma análise mais pormenorizada. Os postos foram agrupados, considerando a área da bacia e a proximidade com outras estações. A área da bacia pode estar diretamente ligada ao tempo de concentração em formulas conceituais para seu cálculo (SILVEIRA, 2005; TUCCI, 2005) ou tempo da

onda de cheia, buscando então agrupar estações com tempo de respostas semelhantes. A localização e proximidade também exercem influência no tempo de resposta das bacias, por esse motivo as estações também foram agrupadas considerando regiões de solo, uso e cobertura com características semelhantes. A Fig. 3 mostra a disposição das estações sobre o Estado do Rio de Janeiro e a classificação nos três grupos na aplicação. O tempo de dados para extração dos eventos varia para cada estação hidrológica, porém as inundações bruscas analisadas em sua totalidade ocorreram entre 2008 e 2014. Na Tabela 1 é apresentado o número de eventos, com e sem transbordamento, para elaboração das curvas regionalizadas, bem como um resumo das características das bacias.

Tabela 1: Especificações dos grupos de bacias regionalizadas para curva de limiars de inundações bruscas.

Grupo	Nº eventos com transbordamento	Nº eventos sem transbordamento	Tempo de Concentração (minutos)	Área das bacias
1	23	10	14 - 86	2,07 - 70,20
2	23	52	12 - 76	2,18 - 169,00
3	4	20	56 - 860	88,00 - 6855,55

Figura 3: Bacias a montante das estações fluviométricas do INEA e sua classificação nos grupos de limiars de chuva.

Os limiares são representados por ajuste de curvas de acumulado (A) versus duração da precipitação deflagradora (D). O objetivo é estabelecer a quantidade de chuva que pode ser considerada deflagradora de uma inundação em cada duração horária, ou seja, os eventos em que de fato ocorreu transbordamento devem se posicionar na maioria acima da curva ajustada. A Curva 1 (Fig. 4) representa os limiares agrupados, considerando as estações da Região Metropolitana do Rio de Janeiro e Baixada Fluminense, centro e leste fluminense, representados pelo Grupo 1. Os pontos representam eventos com transbordamento e sem transbordamento, com suas respectivas durações no eixo horizontal e o valor de chuva acumulada no eixo vertical. No caso específico dessa curva, foram contabilizados 30

eventos críticos, sendo 23 com transbordamento e sete sem transbordamento. As bacias dessa região possuem entre 2,07 e 70,20 km² de área, com tempos de concentração variando entre 14 e 86 minutos, calculados utilizando a fórmula de Kirpich (1940). Os solos da costa do Rio de Janeiro são na maioria siltosos e arenosos, que em caso de chuva extrema têm alto poder para geração de escoamento quando saturados. A alta concentração urbana e os canais retificados também aumentam a propensão ao fenômeno das cheias repentinas. Os principais rios monitorados são o Rio Capivari, Rio Sarapuí, Rio Meriti e Rio Colubandê, responsáveis pelas cheias dos municípios de Duque de Caxias, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro e São Gonçalo, respectivamente.

Figura 4: Curva de limiares ajustada com base nos eventos críticos ocorridos nas estações pertencentes ao Grupo 1.

A Curva 2 (Fig. 5) foi regionalizada baseada nos eventos críticos ocorridos nas estações pertencentes às regiões serranas do Estado do RJ. As áreas a montante das estações variam entre 2,18 km² e 169,00 km², com tempo de concentração variando entre 12 e 76 minutos. Apesar de as estações do Grupo 2 apresentarem o intervalo de tempo de concentração maior que

as estações do Grupo 1, as cheias foram mais recorrentes nos postos de monitoramento. Foram considerados 75 eventos críticos, 52 sem transbordamento e 23 com transbordamento. Os principais rios monitorados do Grupo 2 são o Rio Piabanha, Rio Paquequer e Rio Bengalas, que transcorrem pelas cidades de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo.

Figura 5: Curva de limiars ajustada com base nos eventos críticos ocorridos nas estações pertencentes ao Grupo II.

Para a Curva 3 (Fig. 6), foram contabilizados os eventos críticos ocorridos na região noroeste e nordeste do Rio de Janeiro, onde as cheias são mais lentas, pelo tempo de concentração das bacias. As áreas a montante das estações variam entre 88 km² e 6855,55 km², com o tempo de concentração variando entre 56 e 860 minutos (Kirpich, 1940). Vale ressaltar que a limitação da metodologia aumenta com o valor

de área da bacia, pois outros processos hidrológicos podem interferir para ocorrência ou não da inundação brusca. Para construção da curva, foram considerados 24 eventos críticos, sendo 20 sem transbordamento e quatro com transbordamento. As estações localizadas nos rios Macaé, Muriaé e Carangola permitem o monitoramento nos principais municípios do Grupo 3: Macaé, Itaperuna e Natividade.

Figura 6: Curva de limiars ajustada com base nos eventos críticos ocorridos nas estações pertencentes ao Grupo III.

É notável nas três curvas que alguns pontos com ocorrência de transbordamento se encontram abaixo da curva proposta como limiar deflagrador dos processos. Isso ocorre se considerarmos que o pluviômetro não foi capaz de contabilizar a chuva mais expressiva para o determinado aumento do nível do rio. Alguns autores, como Caseri et al. (2016) e Vila et al. (2009) demonstraram a dificuldade de obter dados de precipitação com representatividade, principalmente nas bacias com menor área de contribuição, bacias de cabeceira. Portanto, além do próprio dado de ocorrência ou não de inundação, o dado de pluviometria consistente influencia a melhor calibração das curvas de inundação. A dependência dos dados de chuva ocorre tanto em modelos empíricos de correlação como em modelos fisicamente baseados ou hidrodinâmicos (Gupta, 2008). Essa grande dependência espacial e representativa da chuva sugere que a meteorologia aqui descrita seja aplicada em regiões com monitoramento subdiário, tanto hidrológico como meteorológico, e em bacias de resposta rápida. Outro fator importante é a umidade antecedente do solo, que pode alterar as condições para deflagração das inundações bruscas, alterando a permeabilização do solo. Em condições de saturação, uma menor quantidade de chuva pode ser responsável por resultar em um evento de inundação brusca.

3 APLICAÇÃO OPERACIONAL

Com todos os valores pré-estabelecidos dos acumulados de chuva que aumentam a probabilidade de deflagração de inundações bruscas, é possível o acompanhamento e o monitoramen-

to da precipitação em tempo real que excede ou possa exceder os limiares críticos. Originalmente os limiares de chuva foram constituídos a partir de dados pluviométricos, porém no ambiente operacional da plataforma de monitoramento existem outras fontes de dados integradas que estimam a precipitação, como os radares meteorológicos, satélites e modelos atmosféricos. Os scripts operacionais consistem então em comparar a excedência ou não dos pixels de diferentes campos de chuva dentro da área de interesse de cada bacia, delimitado pelas máscaras. Para utilização dos dados pluviométricos é feita uma interpolação com o método *Universal Kriging* para considerarmos todos os pluviômetros dentro e em torno da máscara de cada bacia (resolução espacial de 1 km). Os acumulados são gerados de uma a 24 horas antes do horário corrente. No Estado do Rio de Janeiro são utilizados 281 pluviômetros, provenientes da rede do INEA, INMET e Cemaden. Os dados de refletividade do radar meteorológico Pico do Couto são processados e convertidos para taxa de chuva, utilizando relações Z-R (refletividade e chuva) para precipitações de origem estratiforme ou convectiva, em uma resolução espacial de aproximadamente 1 km. Os parâmetros de correção são aplicados previamente no banco de dados do Cemaden e posteriormente armazenados para elaboração dos acumulados de chuva. De fato, alguns estudos apontam as dificuldades de obter dados precisos de estimativa por radares meteorológicos, porém é importante ressaltar que em comparação com a interpolação de pluviômetros o dado dos radares representa melhor a espacialização da chuva, destacando as regiões onde a precipitação pode ser mais intensa, sem

a presença de pluviômetros. O mesmo pode ser adquirido pela estimativa da precipitação a partir de satélites, como o canal 4 do GOES. O campo de chuva por satélite é enviado à plataforma de monitoramento pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do INPE, que aplica a técnica de hidroestimação (Vicente et al. 1998) para inferir a precipitação instantânea, em uma resolução espacial de 4 km. Os campos de chuva a partir da rede pluviométrica, radar meteorológico e satélite apontam o diagnóstico no tempo presente das bacias em monitoramento, pois cruzam os acumulados anteriores, até vinte e quatro horas, com a chuva crítica que possibilita a ocorrência de inundação.

Sob o ponto de vista prognóstico, são aplicadas as saídas por conjunto de precipitação do modelo atmosférico ETA (Black, 1994; Chou, 1996), também cedidos por Acordo de Cooperação Técnica entre o Cemaden e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O ETA ensemble – 5 km disponibiliza cinco previsões a partir de rodadas do modelo com parametrizações de chuva distintas, combinando os esquemas de convecção de Betts-Miller-Janjić (Janjić, 1994), Kain-Fritsch (Kain, 2004) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (Kain, 2004); com os esquemas de microfísica de Zhao (Zhao e Carr, 1997) e Ferrier (Ferrier et al., 2002). Com os diferen-

tes campos de chuva é possível extrair o valor de chuva máxima e média dentro de cada bacia. O script que compara os valores dos acumulados horários de uma a 24 horas, antecedentes ou posteriores, com os pré-estabelecidos como críticos da curva de limiões são feitos com os dados do pixel de chuva máxima da bacia. O campo de chuva média da bacia é importante para comparação entre os dados meteorológicos: o operador pode distinguir os valores de precipitação elaborados pela interpolação do pluviômetro ou estimado por sensores e modelagem atmosférica. Se o valor de chuva máxima estiver próximo ao de chuva média, a precipitação pode estar generalizada em toda a bacia. No caso de diferirem, a chuva máxima pode estar ocorrendo em algum ponto isolado.

Para visualizar os alertas, os operadores da sala de situação devem abrir na aba Hidrologia - > Bacia Posto-INEA, o *shapefile* das bacias onde a metodologia está aplicada. Com o botão direito em cima de uma das bacias abrirá na opção “visualizar alerta para bacias” uma aba como a Fig. 7. Os acumulados que apresentam valores acima da chuva crítica apresentam a situação de alerta em vermelho; se a chuva ainda não atingiu o limiar, o acumulado é indicado pela cor verde.

Figura 7: Visualização dos limiares automáticos na plataforma SALVAR

4 AVALIAÇÃO OPERACIONAL

A fim de validar as curvas de limiares de precipitação, bem como avaliar o desempenho da ferramenta em detectar eventos de inundações bruscas, foram considerados nesta análise preliminar 3 alertas do Cemaden enviados pela sala de situação. Na Fig. 9 é apresentada a linha do tempo do alerta de risco de inundação brusca, número 909, enviado para o Município de São João de Meriti às 14:45, hora local do dia 29/03/2016. Nesse caso, a ferramenta de limiares apontou que a partir da estimativa de chuva pelo radar,

na bacia a montante do posto hidrológico de Cet. Meriti, houve uma excedência do limiar ajustado para 1 hora de duração (19 mm), com 42 mm de chuva em 1 hora. Às 15:00, hora local, esse limiar foi ultrapassado também pela rede pluviométrica, com quase 30 mm de acumulado em 1 hora, ou seja, foi detectado por um pluviômetro dentro da bacia, uma chuva próxima aos 30 mm de acumulado horário entre as 14:00 e 15:00, hora local. Às 18:00, um dos pixels de estimativa de chuva proveniente do radar também detectou um acumulado superior à curva de limiar, porém

para a duração de 4 horas. Ou seja, o acumulado de 4 horas atrás, às 18:00, indicava que poderia haver condições mínimas para ocorrência do

processo de inundação brusca. O alerta de risco moderado a inundação brusca foi Cessado às 22:25, hora local, do mesmo dia.

Figura 8: Linha do tempo - Alerta moderado de risco de inundação brusca enviado pelo Cemaden para São João de Meriti – RJ, às 14:45, hora local, do dia 29/03/2016.

No alerta enviado no dia 15/01/2016, às 15:45 os operadores da sala de situação identificam um risco moderado a inundações bruscas no Município de Petrópolis-RJ. Quase uma hora antes (15:00, hora local), a ferramenta de diagnóstico de limiars apontou uma chuva superior ao limiar de 1 hora (40mm), com 45 mm na bacia a montante do posto fluviométrico Cel. Veiga, pela estimativa do radar meteorológico. Às 18:00, essa chuva foi percebida também pela rede pluviométrica, porém com um acumulado de chuva superior a 55

mm em 6 horas de duração. A chuva neste evento perdurou, e um novo limiar foi atingido na bacia a montante da estação de Bingen, às 22 horas. O alerta de risco de inundação brusca foi então elevado para alto no município às 00:50 do dia 16/01/2016. O limiar também foi ultrapassado mais tarde a partir da chuva estimada pelo satélite (hidroestimador), na bacia a montante da estação hidrológica de Correias. O alerta de risco alto foi cessado às 07:45, hora local, do dia 18/01/2016 pela equipe de operação.

Figura 9: Linha do tempo - Alerta moderado de risco de inundação brusca enviado pelo Cemaden para Petrópolis – RJ, às 15:45, hora local, do dia 15/01/2016.

O terceiro caso exposto neste artigo técnico é o do alerta de risco moderado enviado às 15:25, hora local, do dia 01/04/2016, para o Município de Petrópolis - RJ. Às 15:00h, a ferramenta de limiares apontou um quase cruzamento com o limiar de 1 hora, porém a chuva máxima na bacia da estação Centro não superou os 40 mm necessários. Porém às 16:00, hora local, um dos pluviô-

metros da bacia a montante da estação Itaipava se mostrou acima do limiar estabelecido para 3 horas de duração. Ou seja, a chuva se tornou um potencial deflagrador quando acumulada das 13:00h às 16:00h em um dos pluviômetros da bacia de Itaipava. O alerta de risco moderado foi então cessado às 07:45 do dia seguinte, 02/04/2016.

Figura 10: Linha do tempo - Alerta moderado de risco de inundação brusca enviado pelo Cemaden para Petrópolis – RJ, às 15:45, hora local, do dia 01/04/2016.

Em dois dos três eventos analisados (15/01/2016 e 29/03/2016), pelo menos uma das estimativas de chuva ultrapassou o limiar da chuva deflagradora antes dos envios dos alertas de risco pela sala de situação do Cemaden. Em um deles (01/04/2016), a chuva percebida antes do envio dos alertas foi abaixo do limiar pré-estabelecido para a região, por isso a ferramenta não apontou que poderia haver perigo de ocorrência do processo. Em nenhum dos eventos analisados os prognósticos de chuva pelo modelo meteorológico indicaram a superação dos níveis de limiares de precipitação, o que pode estar associado à dificuldade da previsibilidade dos acumulados de chuva pelo modelo atmosférico ETA na escala das inundações bruscas. Vale ressaltar também a diferença entre os alertas de risco enviados pelo Cemaden e os alertas dos limiares para os operadores da sala de situação. A ferramenta de diagnóstico dos limiares ajuda os operadores a tomar a decisão sobre o envio ou não dos alertas de risco, pois a ferramenta está analisando somente a suscetibilidade ao fenômeno das inundações bruscas. O limiar representa as condições mínimas necessárias para ocorrência do processo, que pode ser que não ocorra. O alerta de risco enviado pelo Cemaden à Defesa Civil também analisa o componente da vulnerabilidade e grau de impacto das inundações bruscas, assim como a probabilidade de ocorrência do perigo (suscetibilidade) em si. Um alerta de risco moderado indica que existem condições mínimas necessárias para a ocorrência de uma inundação brusca com impacto moderado na população do município alertado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De fato, esse primeiro produto para diagnóstico e prognóstico de inundações bruscas na plataforma SALVAR pode contribuir para melhorias nos alertas de risco enviados pelo Cemaden. Em uma mesma ferramenta é possível uma análise

da ameaça hidrológica, baseada na chuva instantânea e acumulada anterior, com uma previsão de possíveis deflagradores de inundações bruscas. O produto também fornece um comparativo entre diferentes estimativas de chuva nas bacias monitoradas (pluviômetros, radar meteorológico, satélite e modelagem atmosférica). Nos três casos de alertas enviados, a ferramenta demonstrou um bom desempenho em se antecipar às situações de perigo às inundações bruscas. A previsão é que a ferramenta seja estendida para todo o território brasileiro, integrando dados contínuos de outras instituições que já implementaram sistemas de alertas locais, como o INEA no Rio de Janeiro, SAISP em São Paulo, CPRM em Minas Gerais e também da ANA em todo território nacional. Posteriormente, nas diferentes regiões hidrológicas, também serão avaliados os índices de acerto ou falso alarme das ferramentas e outras contribuições para a sala de situação.

6 REFERÊNCIAS

- BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 265–278, 1994.
- CASERI, A.; JAVELLE, P.; RAMOS, M. H.; LEBLOIS, E. Generating precipitation ensembles for flood alert and risk management. **Journal of Flood Risk Management**, v. 9, n. 4, p. 402–415, 2016. ISSN 1753318X
- CEPED, 2012. Acesso dia em 15/10/2014 em <<http://www.ceped.ufsc.br/noticias/governo-federal-investe-188-bilhoes-em-plano-articulado-de-prevencao-e-resposta-desastres-n>>
- CHOU, S. C. Modelo regional Eta. **Climanálise**, v. Edição Esp, p. 203–207, 1996. ISSN: 0103-0019.
- CLUCKIE, I.; OWENS, M. D. Real-time rainfall-runoff models and use of weatherradar information. In: **Weather Radar and Flood Forecasting**, V. Collinge C. Kirby, p. 171–190, 1987.
- DRM, 2013. **Análise e diagnóstico dos escorregamentos registrados no evento pluviométrico de 02-04 de janeiro**. Relatório Técnico. Governo do Estado do Rio de Janeiro - SEDEIS Departamento de Recursos Minerais – DRM-RJ. 2013.

FERRIER, B. S. et al. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: Conference On Weather Analysis And Forecasting, 19., 2002, San Antonio. **Anais...** Boston: MAS, 2002

GRUNTFEST, E.; HANDMER, J., 1999. Coping with Flash Floods. **NATO Science Series**, vol. 77.

GUPTA, R. **Hydrology and Hydraulic Systems**. Waveland Press, 2008. ISBN 9781577664550. Available from: <https://books.google.com.br/books?id=1ns_SgAACAAJ>.

HOEDJES, J., KOOIMAN, A., MAATHUIS, B., SAID, M., BECHT, R., LIMO, A., ... SU, B. (2014). Conceptual Flash Flood Early Warning System for Africa, Based on Terrestrial Microwave Links and Flash Flood Guidance. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 3(2), 584–598. <https://doi.org/10.3390/ijgi3020584>

JANJIĆ, Z. I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 927–945, 1994.

Jornal Estadão Online, 2012. Acesso dia 15/10/2014 em <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,governo-investira-r-18-8-bi-em-prevencao-de-desastres,913263>>

KAIN, J. S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. **Journal of Applied Meteorology**, p. 170–181, 2004.

KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **J. of Civ. Eng.**, v.10, n.6, p. 362, 1940

LAVELL A. E FRANCO, E., 1996. **Estado, Sociedad e Gestión de los Desastres em América Latina**. Red de Estudios Sociales em Prevención de Desastres em América Latina, la RED, Tercer Mundo Editores. Bogotá, Colombia.

RAMIREZ F. E CORDONA O. D., 1996. Sistema nacional para la prevención y atención de desastres de Colombia. In: **Estado, sociedad y gestión de los desastres em America Latina. Red de estudios sociales em prevención de desastres em America Latina**. Tercer Mundo Editores, Bogotá, Colombia.

ROSIM, S.; MONTEIRO, A. M. V.; O, C. D. R.; OLIVEIRA, J. Uma ferramenta open source que unifica representações de fluxo local para apoio à gestão de recursos hídricos no Brasil. **Informática Pública**, v. 47, p. 29–49, 2008.

SCHMIDT, J., A.J. ANDERSON, AND J.H. PAUL, 2007. Spatially-Variable, Physically-Derived Flash Flood Guidance. Conference on Hydrology, American Meteorological Society, San Antonio, 6B.2. **Anais...**

SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 10, pp. 5 – 23, 2005

STEINER, M.; JR., R. A. H.; YUTER, S. E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, n. 9, p. 1978–2007, 1995. Available from: <[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<1978:CCOTDS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<1978:CCOTDS>2.0.CO;2)>

SWEENEY, T., 1992: **Modernized areal flash flood guidance**. NOAA Tech. Rep. NWS HYDRO 44, NOAA/NWS/Hydrologic Research Laboratory, Silver Spring, MD, 21 pp. 1 an appendix.

SWEENEY, AND T. BAUMGARDNER, 1999: **Modernized flash flood guidance**. Rep. to NWS Hydrology Laboratory, 11 pp. [Available online at <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/ffg/modflash.htm>.]

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. e ROCHA, M.C.M., 1987a, Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos – Serra do Mar – Município de Cubatão In: 5º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, v. 2 , pp. 225–236, São Paulo, Out. **Anais...**

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. e ROCHA, M.C.M., 1987b, Modelamento Numérico da Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos aplicados à Encosta da Serra do Mar. In: 5º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, v. 2 , pp. 237–248 São Paulo, Out. **Anais...**

TUCCI, C., 2005. **Modelos Hidrológicos**. 2. Ed. Porto Alegre, UFRGS, 678 p.

UCAR, 2010. **Flash Flood Early Warning System Reference Guide**. University Corporation for Atmospheric Research. Disponível em <http://www.meted.ucar.edu/hazwarnsys/haz_fflood.php>

VICENTE, G. A., R. A. SCOFIELD , AND W. P. MENZEL, 1998: The operational GOES infrared rainfall estimation technique. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 79, 1883–1898.

VILA, D. A.; GONCALVES, L. G. G. de; TOLL, D. L.; ROZANTE, J. R. Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n. 2, p. 533–543, 2009. ISSN 1525-755X.

WISNER, B., 2006: Self-assessment of coping capacity: Participatory, proactive, and qualitative engagement of communities in their own risk management. In: **Measuring Vulnerability to Natural Hazards – Towards Disaster Resilient Societies** [Birkmann, J. (ed.)]. United Nations University Press, Tokyo, Japan, pp. 316–328.

WMO (2007): Prospectus for the Implementation of a Flash Flood Guidance System with Global Coverage. A joint proposal by CHy and CBS in collaboration with Hydrologic Research Center, U.S. National Weather Service, U.S. Agency for International Development/Office of Foreign Disaster Assistance. In: XV World Meteorological Congress, Geneva, Switzerland, 7–25 May 2007. **Anais...**

ZHAO, Q.; CARR, F. H. A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 1931–1953, 1997.