

REDE NEURAL DO TIPO SOM (Self Organizing Map) COMO FERRAMENTA PARA IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE CHUVA

Marciel Lohmann⁵; Camila Cunico⁶; Ronaldo Ferreira Maganhotto⁷

Resumo: O presente artigo objetivou utilizar a rede neural do tipo SOM para identificar os padrões de chuva que são os deflagradores de alagamentos em Curitiba, procurando estabelecer a relação entre chuva e alagamentos para o município, utilizando como base a integração de informações hidrometeorológicas. Para a construção do modelo foi utilizado os dados de precipitação estimada a partir da integração das informações provenientes de radar meteorológico, satélite e pluviômetros, utilizando o método de Análise Objetiva Estatística (ANOBES). A partir dos dados de estimativas de precipitação foi calculada a chuva média acumulada de 6 em 6 horas, utilizando-se do método de Thiessen. Os resultados gerados por meio da rede neural SOM (Mapas Auto Organizáveis), definiram quais os principais padrões de chuva responsáveis por deflagrar os alagamentos em Curitiba, sendo identificados 2 padrões principais.

Palavras-Chave: Inteligência Artificial, Redes de Kohonen, Alagamentos;

INTRODUÇÃO

A utilização das técnicas em Inteligência Artificial (IA) é cada vez mais aprimorada na adequação de processos que satisfaçam as necessidades de novos algoritmos no tratamento e reconhecimento de dados meteorológicos.

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) funcionam conceitualmente de forma similar ao cérebro humano, tentando reconhecer regularidades e padrões de dados. As RNAs são capazes de aprender com a experiência e fazer generalizações baseadas no seu conhecimento previamente acumulado. Embora biologicamente inspiradas, as RNAs encontraram aplicações em diferentes áreas científicas.

As redes neurais são provavelmente a mais antiga técnica de inteligência artificial (IA) em uso. Este instrumento foi desenvolvido na década de 40 por Walter Pitts e McCulloch, o primeiro matemático e o segundo neurofisiologista, tendo como ideia principal elaborar uma analogia entre neurônios biológicos e circuitos eletrônicos, capazes de simular conexões pelo uso de resistores variáveis e amplificadores (LUDWIG JR & MONTGOMERY, 2007).

Neste mesmo sentido, Haykin (2001) e Freeman & Skapura (1991), expõem que as redes neurais artificiais são fruto da tentativa de representar matematicamente o funcionamento do cérebro, que possui uma estrutura complexa, não linear e paralela.

No caso da rede SOM (Self Organizing Map ou Mapa Auto-Organizável) de Kohonen, trata-se de uma RNA com duas camadas (Kohonen, 2001) e aprendizado não supervisionado. A camada de

⁵ Professor Adjunto, Universidade Estadual de Londrina, marciel@uel.br

⁶ Professora Adjunta, Universidade Federal da Paraíba, camilacunico@yahoo.com.br

⁷ Professor Adjunto, Universidade Estadual do Centro Oeste, ronaldomaganhotto@gmail.com

entrada I e a de saída U . A entrada da rede corresponde a um vetor no espaço d -dimensional em \mathcal{R}^d , representado por $x_k = [\xi_1, \dots, \xi_d]^T$, $k = 1, \dots, n$, sendo n o número de vetores de entrada. Cada neurônio j da camada de saída possui um vetor de código w_j , também no espaço \mathcal{R}^d , associado ao vetor de entrada x_k , $w_j = [w_{j1}, \dots, w_{jd}]^T$.

A rede SOM foi idealizada a partir da analogia com a região do córtex cerebral humano. Descobriu-se que esta parte do cérebro aloca regiões específicas para atividades específicas e que, para uma determinada ativação cerebral, o grau de ativação dos neurônios diminuía à medida que se aumentava a distância da região de ativação inicial (KOHONEN, 2001).

Desde o seu surgimento, em 1982, o SOM vem sendo aplicado numa ampla variedade de problemas de engenharia, economia, medicina, geografia, entre outras. Destacam-se as potencialidades de visualização de dados multivariados, análise de agrupamentos, mineração de dados, descoberta de conhecimento e compressão de dados (KOHONEN, 2001).

O algoritmo básico de treinamento do SOM consiste de três fases. Na primeira fase, competitiva, os neurônios da camada de saída competem entre si, segundo algum critério, geralmente a distância euclidiana, para encontrar um único vencedor, também chamado de BMU (Best Match Unit). Na segunda fase, cooperativa, é definida a vizinhança deste neurônio. Na última fase, adaptativa, os vetores de código do neurônio vencedor e de sua vizinhança são ajustados.

A relação de vizinhança entre os neurônios é estabelecida segundo alguma função. O principal objetivo da função de vizinhança é controlar o nível de atuação dos neurônios em torno do neurônio vencedor do processo competitivo. Seguindo o modelo neurobiológico tem-se que o nível de atuação dos neurônios vizinhos decai à medida que o mesmo se distancia do BMU.

De acordo com Ludwig Jr & Montgomery (2007), o princípio fundamental do algoritmo utilizado pelo SOM é a aprendizagem competitiva, ou seja, ao se apresentar uma entrada à rede, os neurônios competem entre si e o vencedor tem seus pesos ajustados para responder melhor ao supracitado estímulo. É também simulado um processo de cooperação entre o neurônio vencedor e seus vizinhos topológicos, que também recebem ajustes. Desta forma as características estatísticas intrínsecas contidas em um vetor de sinais de entrada, irão estimular alguma determinada localização espacial na rede. Mais especificamente, aquela que contenha um grupo de neurônios sintonizados àquele estímulo. Sendo assim, pode-se classificar esta rede como um paradigma topológico.

A teoria existente por trás deste algoritmo é de que no cérebro humano, entradas sensoriais diferentes são mapeadas em regiões específicas do córtex cerebral. A isto se pode denominar de distribuição de probabilidade codificada por localização (LUDWIG JR & MONTGOMERY, 2007).

Para este artigo, o objetivo principal foi utilizar a rede neural do tipo SOM para identificar padrões de chuva que são os deflagradores de alagamentos, já que é de suma importância reconhecer padrões de chuva para que se possa nortear políticas públicas de médio e longo prazos de maneira mais eficaz e precisa,

bem como buscar subsídios para a prevenção e o controle dos alagamentos nas cidades por meio de ações de planejamento e gestão ambiental urbana.

Assim, as principais contribuições deste trabalho residem no fato de que o reconhecimento de padrões de chuva é de fundamental importância, principalmente no que tange aos aspectos ligados ao próprio crescimento, ordenação e planejamento da cidade.

Reconhece-se que tal conhecimento deve possibilitar o aprimoramento das ações de proteção por parte da Defesa Civil no sentido de retirar pessoas de áreas de risco, subsidiar medidas em tempo real para ordenação do trânsito, proteção de bens materiais e até mesmo para evitar a perda de vidas. Ainda, vem diretamente ao encontro das diretrizes gerais propostas nos planos diretores, no sentido da prevenção contra alagamentos e inundações no município.

Vislumbra-se também como contribuição a utilização do conhecimento gerado para construção de um sistema de alerta a alagamentos em Curitiba baseado em estratégia probabilística para emissão de alertas, favorecendo o desenvolvimento das ações não só na eminência e no momento da ocorrência do alagamento, mas no pós-ocorrência e no planejamento futuro de médio e longo prazo. Nesse sentido, contribui também como medida não estrutural de controle dos alagamentos.

Como recorte geográfico selecionou-se o município de Curitiba (Figura 1), capital do estado do Paraná e que periodicamente é atingido por chuvas intensas, gerando uma série de problemas entre os quais os alagamentos.

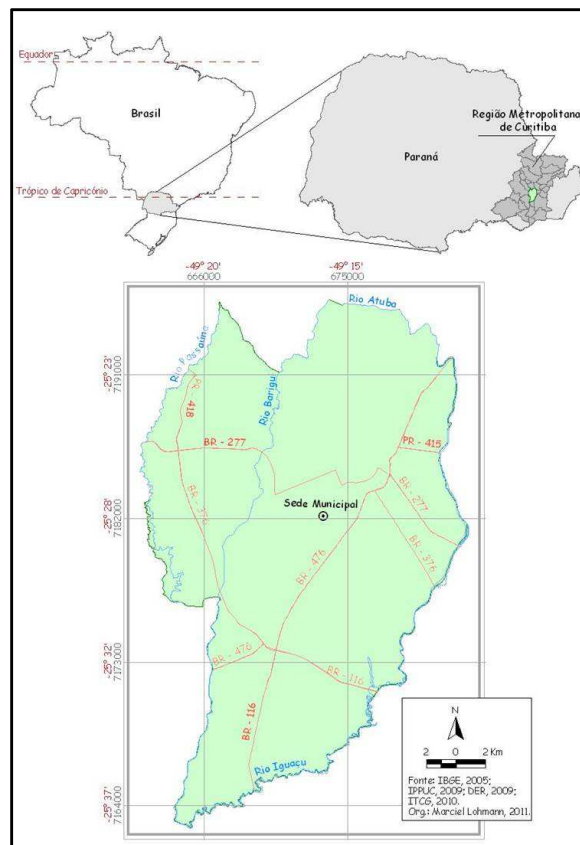


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados de chuva

Neste trabalho optou-se por utilizar como base os dados de chuva estimada a partir da integração das informações provenientes de radar meteorológico, satélite e pluviômetros, utilizando o método de Análise Objetiva Estatística (ANOBES).

De acordo com Calvetti al (2006), Beneti et al (2006) e Pereira Filho (2004) é um dos mais eficientes esquemas de interpolação de dados. Este método foi inicialmente desenvolvido em 1963 e posteriormente recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) em 1970, para interpolação de dados hidrometeorológicos. Este método de interpolação (Daley⁸, 1991 apud Calvetti et al 2006), embora simples e dedutível matematicamente, foi pouco aplicado operacionalmente até recentemente, por causa das limitações de processamento computacional. Com o advento de computadores com grande capacidade de processamento e armazenamento, e a um custo baixo, estas restrições ao uso do método ANOBES foram superadas.

O método ANOBES foi adaptado por Pereira Filho (1996) para ser utilizado com dados da rede de radares dos Estados Unidos. Posteriormente, este método foi aplicado com sucesso na reanálise de chuva acumulada horária da rede NEXRAD sobre uma bacia hidrográfica do Bureau of Reclamation em Oklahoma (Pereira Filho et al., 1998) e atualmente está sendo aplicado e já implementado no SIMEPAR (Beneti et al., 2006, Calvetti et al., 2006).

A equação de Análise Objetiva Estatística (ANOBES) é dada por:

$$P_a(x_r) = P_b(x_r) + \sum_{n=1}^N W_n [P_o(x_n) - P_b(x_n)]$$

onde,

$P_a(x_r)$ é a precipitação analisada;

$P_b(x_r)$ é a precipitação estimada pelo radar (“background”);

$P_o(x_n)$ é a precipitação medida pelo pluviômetro (“observação”);

$P_b(x_n)$ é a precipitação estimada pelo radar no pluviômetro;

W_n é o peso *a posteriori* a ser determinado pela configuração de dados da rede;

N é o número total de pluviômetros;

X_r e x_n são as respectivas posições dos pontos de grade do radar e dos pluviômetros.

Para derivar os pesos, assume-se que os erros de observação e a precipitação estimada pelo radar (“background”) não têm correlação e não tenham viés. A variância esperada do erro da análise, derivada a partir da equação descrita abaixo, é minimizada em relação aos pesos W_n . A precipitação integrada é derivada da soma das estimativas obtidas pela análise objetiva estatística dividida pela somatória do quadrado das diferenças de cada campo analisado.

⁸ DALEY, R. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press. 1991, 457pp.

$$P_{Est}(x_i, y_i) = \frac{P_{Rad}(x_i, y_i) \times E_{Rad}^{-2}(x_i, y_i) + P_{Sat}(x_i, y_i) \times E_{Sat}^{-2}(x_i, y_i)}{E_{Rad}^{-2}(x_i, y_i) + E_{Sat}^{-2}(x_i, y_i)}$$

Onde

$$E_{rad}(x_i, y_i) = (P_{Rad}(x_i, y_i) - P_{Obs}(x_i, y_i))$$

$$E_{Sat}(x_i, y_i) = (P_{Sat}(x_i, y_i) - P_{Obs}(x_i, y_i))$$

Assim a integração é ponderada pelas diferenças entre as estimativas de precipitação por radar e satélite e a precipitação medida na rede de pluviômetros. Desta forma, pretende-se obter o padrão espacial das medições por sensoriamento remoto e ponderá-la pela melhor medição volumétrica da intensidade de chuva obtida pela rede de pluviômetros.

Testes utilizando esta técnica foram feitos por Calvetti et al (2007) e Beneti et al (2006), mostrando que a integração das informações torna-se importante não apenas para a análise de sistemas isolados de precipitação, mas também para sistemas frontais fornecendo estimativas mais apropriadas para estudos hidrológicos em bacias hidrográficas. Calvetti et al (opcit), comenta que janeiro é um mês de muitos eventos rápidos de chuva e de intensidade forte a extrema (acima de 50 mm). Não raras vezes não é possível identificar tais fenômenos devido a variação espacial e temporal das chuvas. Mesmo assim, a integração das informações proporcionou o melhor campo de precipitação utilizando as melhores características dos sistemas de medição.

Para este trabalho, foram compilados os dados de estimativas de precipitação horária de janeiro de 2005 a dezembro de 2010. Tais dados estavam disponíveis em pontos de grade de 4x4km para o estado do Paraná. Foram selecionados apenas os pontos que estavam inseridos nas bacias que drenam para a bacia do rio Iguaçu na RMC (Região Metropolitana de Curitiba). Foi calculada a chuva média utilizando-se o método de Thiessen que considera que cada estação possui um peso proporcional a sua área de influência sobre a bacia. A equação demonstra a formulação matemática deste método, onde P é o valor de precipitação médio, p_i é a precipitação no posto i , e δ_i é seu respectivo peso, e N é o número de postos empregados no cálculo.

$$P = \sum_{i=1}^N \delta_i p_i$$

O somatório dos pesos que exercem influência em uma dada região deve ser sempre igual a 1, e o mesmo é calculado pela fração de sua área de influência sobre a área da região.

Com os dados de chuva calculados para cada bacia e com o intuito de identificar qual a influência de dias anteriores ao que ocorreu o alagamento, convencionou-se utilizar o dia da ocorrência e três dias anteriores a este, por entender que a ocorrência de alagamentos é dinâmica, ou seja, podem ocorrer com chuvas torrenciais ou ainda ter influência de chuvas ocorridas em dias anteriores. Para tanto, foi calculada a chuva acumulada de 6 em 6 horas obtendo-se 16 valores.

Rede neural artificial SOM (Self Organizing Map)

Como todas as redes neurais, as de Kohonen são formadas por um conjunto de elementos simples, chamados neurônios, organizados em estruturas mais complexas, que funcionam em conjunto: a rede.

Cada neurônio é uma unidade de processamento que recebe estímulos (de fora do sistema ou de outros neurônios), e produz uma resposta (para outros neurônios ou para fora do sistema). Tal como os neurônios do cérebro, os das redes neurais são interligados entre si por ramificações através das quais os estímulos são propagados. O processo de aprendizado consiste em reforçar as ligações que levam o sistema a produzir respostas mais eficientes.

Os dados de entrada da rede foram constituídos pelas séries de chuva acumulada de 6 em 6 horas para 4 dias, gerando portanto, 16 valores consecutivos de chuva (16 dimensões de chuva acumulada), sendo que o primeiro valor refere-se a chuva acumulada de 6h no início do 3º dia anterior ao da ocorrência do alagamento e assim sucessivamente até o último valor que refere-se a chuva acumulada das 18 até as 24h do dia da ocorrência do alagamento. A última coluna da tabela possui valor 0 (zero) ou 1 (um). Esta coluna tornou-se necessária em função da rede trabalhar com variáveis binárias comparando a probabilidade de um alagamento ocorrer (1) com a probabilidade de ele não ocorrer (0). A Tabela 1 mostra o exemplo de arquivo construído que serviu de base para entrada no SOM.

Tabela 1 – Exemplo de tabela construída que serviu de base para entrada no SOM

Ano	Mês	Dia	6|3	12|3	18|3	....	6|0	12|0	18|0	24|0	Oc.
2005	1	5	0	0	0	....	0,91	0,01	7,08	1,03	1
2005	1	6	0	0	1,62	....	0	0	6,52	1,5	0
2005	1	7	10,17	1,64	3,96	....	1,25	0	0,57	0,18	1

Data
Chuva Ac. de 6 em 6h
Ocorrência

Para um determinado modelo preditivo, existem basicamente duas fases que devem ser seguidas. A primeira de “Calibração” e a segunda de “Verificação”. A calibração tem por finalidade promover ajustes de alguns parâmetros do modelo para que os resultados simulados tenham comportamento semelhante aos reais ou experimentais. Já a verificação, considerando que modelos são construídos a partir de uma série de pressupostos e simplificações sobre o comportamento do sistema real, consiste em avaliar se esses pressupostos e simplificações foram corretamente implementados no modelo computacional. A partir disso pode-se então, calcular a acurácia do modelo gerado e avaliar seus resultados via determinado método ou teste.

Para a calibração, foram utilizados os dados de 01/01/2005 a 31/12/2009 e para a verificação os dados de 01/01/2010 a 31/12/2010. Tal definição se deu em função da necessidade de se utilizar um

período maior de dados para que o modelo possa ser treinado e, a partir de seu resultado, testado utilizando-se um período menor de dados. Ainda, levou-se em consideração para tal definição, a relação entre o número de ocorrências totais de alagamentos em cada ano e o número de dias com ocorrência para cada ano (Tabela 2). Como o número de dias com ocorrência em cada ano permaneceram muito próximos com exceção do ano de 2007, optou-se então por se utilizar o ano de 2010 para testar o modelo.

Tabela 2 - Relação entre número de ocorrências de alagamentos e de dias com ocorrência de alagamentos

Anos	2010	2009	2008	2007	2006	2005
Número de Ocorrências	297	492	251	514	522	277
Dias com Ocorrências	57	66	47	34	52	47

Org.: Os autores 2018.

Com tais considerações a cerca de quais períodos deveriam ser utilizados para a calibração e verificação do modelo, utilizou-se a rede SOM, tendo como base o sistema operacional Linux bem como todas as funções para inicialização do SOM, treino e mensuração do erro.

Esta rede tem como um dos resultados os chamados “codebooks” que objetiva a formação de padrões que representem as características de certo momento sendo seu uso baseado na comparação entre um elemento do codebook e o arquivo de entrada através de sua distância euclidiana. Os “codebooks” são traduzidos como os padrões de chuva crítica para ocorrência de alagamentos em Curitiba.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como já sabido, o SOM possui como principal característica, ser uma rede que faz o reconhecimento de padrões dentro de uma determinada série de dados. Kohonen (2001) comenta que o reconhecimento de padrões é uma tarefa que aproxima muito as redes neurais dos seres humanos, podendo ser definido como o processo em que um conjunto de entradas ou características (padrão) é atribuído a uma classe entre um conjunto definido de classes. É também chamado de classificação.

A partir da identificação dos padrões de chuva, que são exatamente os ligados a deflagração dos alagamentos em Curitiba, fez-se a associação da probabilidade em que cada padrão ocorre.

Foram analisados os padrões que ocorrem com probabilidades maiores ou iguais a 75% e probabilidades maiores ou iguais a 50%. Tal definição se deu em função de considerar que os padrões com probabilidades abaixo desses limiares possuem chances mais reduzidas de causarem alagamentos, perturbando a análise dos padrões. Para as probabilidades maiores ou iguais a 75% e 50% foram identificados e agrupados dois tipos principais de padrões, os quais se convencionou chamar de “Padrão 1” e “Padrão 2”. A Figura 2 e 5 caracterizam em forma de gráfico tais padrões.

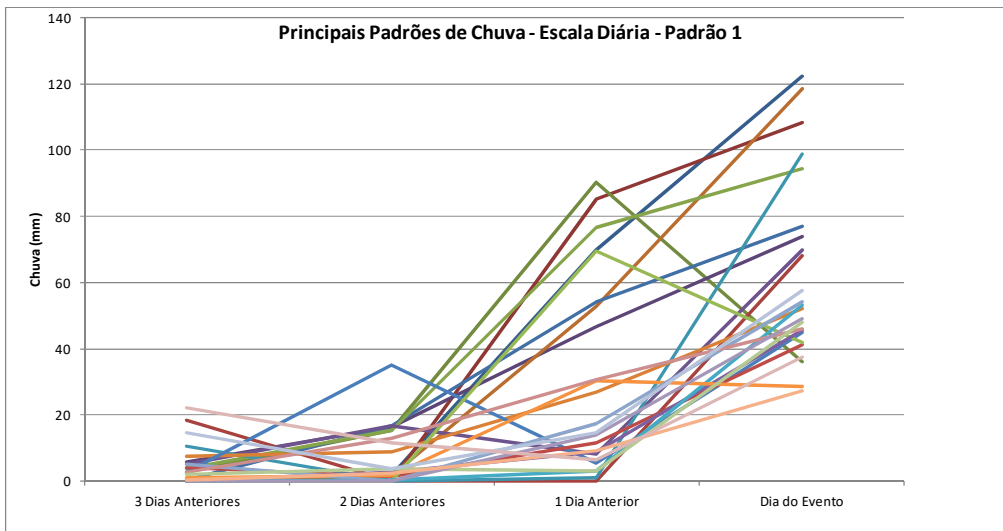


Figura 2 Padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 75%

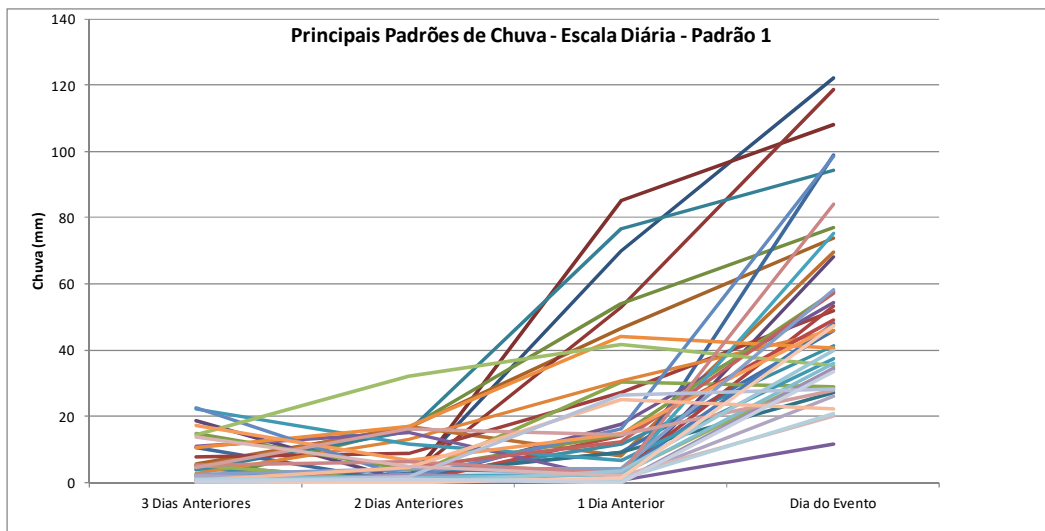


Figura 3 Padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 50%

Saliente-se que para as análises e apresentações dos resultados referentes aos padrões, a chuva foi acumulada em períodos diários.

A partir da análise dos gráficos, nota-se que o padrão 1, tanto para probabilidades maiores ou iguais a 75% como 50%, está ligado muito mais a dinâmica da chuva que ocorre especificamente no dia do evento do que a chuva que ocorre nos dias anteriores, sendo estas últimas de menor importância na deflagração de um alagamento. No entanto, observa-se que, mesmo com menor importância, têm-se chuvas significativas também no primeiro dia anterior ao do evento.

Com relação a quantidade precipitada no dia do evento levando em consideração as probabilidades maiores ou iguais a 75% tem-se valores acima de 20mm podendo chegar até maior de 100mm, com média de 62,2mm. Para 1, 2 e 3 dias anteriores, a média de precipitação é de 30,6 mm, 7 mm e 4,5 mm respectivamente, mostrando novamente a importância da chuva no dia do evento.

Em relação a precipitação que ocorre levando em consideração as probabilidades maiores ou iguais a 50%, a média para o dia do evento é de chuvas em torno de 53,5mm e para o primeiro, segundo e terceiro dias anteriores é de 18,5 mm, 5,7 mm e 5,1 mm respectivamente.

De forma geral, pode-se dizer que o padrão 1 de chuva está intimamente ligado as chuvas convectivas, também chamadas de “chuvas de verão”, que ocorrem devido ao aquecimento de massas de ar úmido que estão em contato direto com a superfície quente, sendo caracterizadas pela grande intensidade, curta duração e concentradas em pequenas áreas.

As Figuras 4 e 5 mostram o padrão 2 de chuvas, também para probabilidade maiores ou iguais a 75 e 50%. Pode-se notar que fica bem caracterizada a grande diferença deste padrão quando comparado com o padrão 1, principalmente em função de no dia do evento a quantidade precipitada ser bem menor ou até nula, como no caso do padrão analisado para probabilidade $\geq 75\%$. Dentre os padrões analisados para probabilidades $\geq 75\%$ foram encontrados apenas quatro com o mesmo comportamento. Para probabilidades $\geq 50\%$ o número já foi bem maior, e também mostrando o mesmo comportamento.

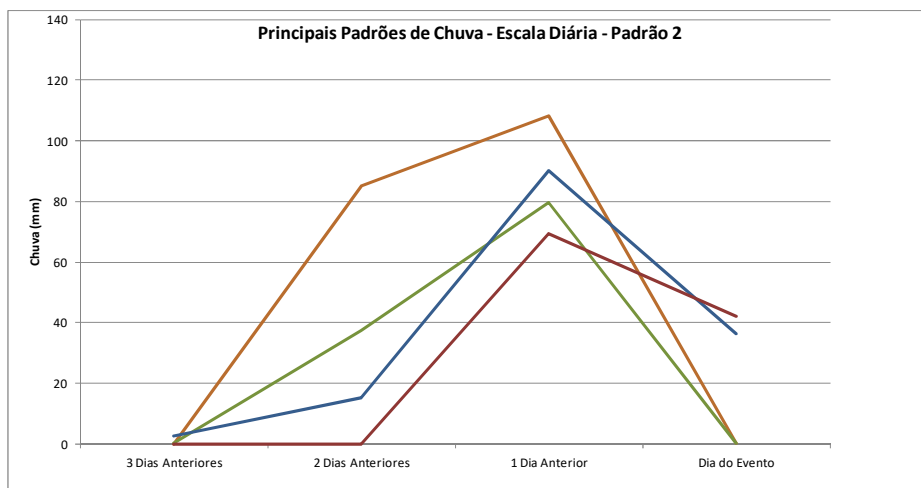


Figura 4 Padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 75%

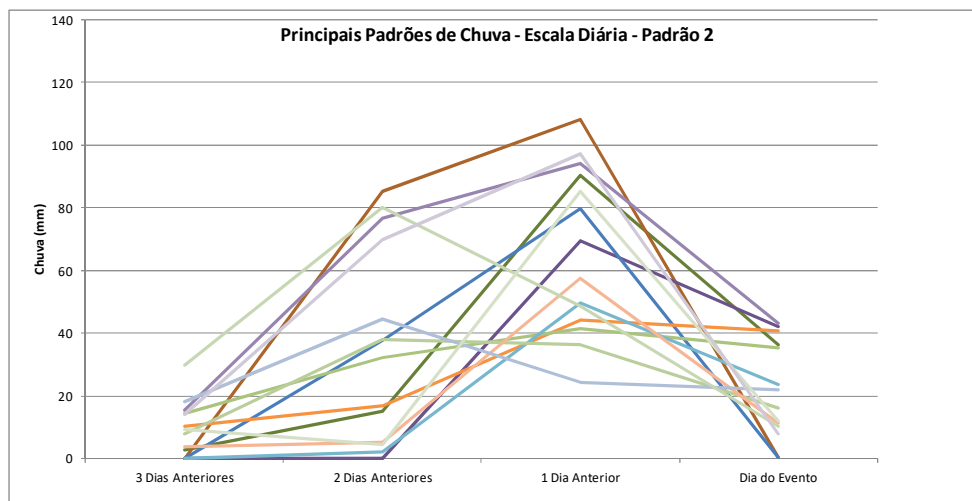


Figura 5 Padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 50%

Como comentado, os gráficos refletem de maneira clara que a chuva de maior intensidade é aquela ocorrida no dia anterior ao do evento ou até 2 dias anteriores, com quantidade precipitada em torno de 80 mm até maior que 100 mm (Figura 4) e que podem variar de maior de 20 mm a maior de 100 mm (Figura 5).

A partir de tais dados, infere-se que para deflagrar um alagamento em um dia posterior, tal quantidade de chuva tenha ocorrido durante a noite do dia anterior ou ainda estar associada a chuvas de intensidade média ao longo de todo o dia anterior. Como para os registros de alagamentos analisados tem-se os dados referente ao horário em que o mesmo ocorreu para os anos de 2009 e 2010, considera-se que tal explicação tenha coerência.

Sob outra perspectiva e interpretação, percebe-se que ao longo do segundo e terceiro dias anteriores ao do evento, mesmo que pequeno, há registros de chuva. Quando associado esse montante ao ocorrido no dia anterior ao do evento, demonstra-se que nesse caso os alagamentos se dão muito mais em função do acumulado de chuva durante o período do que o ocorrido no dia do evento, ao contrário do padrão 1.

Para este padrão, infere-se que a chuva tenha um comportamento mais ligado a dinâmica das frentes frias, que costumam trazer quantidades significativas de precipitação quando atuam sobre Curitiba. Quando há uma frente estacionária atuando sobre Curitiba, por exemplo, a frente fria deixa de se mover. Se existirem ciclones migrando ao longo dessa frente estacionária, há maior possibilidade das precipitações serem em maior quantidade (vezes e mm). Assim, infere-se que o comportamento apresentado pelo padrão 2 esteja ligado a tal dinâmica, ou seja, chuvas regulares ao longo de mais dias.

Comparando em termos de frequência o padrão 1 e 2, verifica-se que o padrão 1 além de ser o mais frequente, também apresentou maiores intensidades máximas de chuva, atingindo índices superiores a 120 mm acumulados em um dia, com diminuição ao longo dos dias anteriores. O padrão 2 ocorre com menor frequência, no entanto, com intensidades de chuva diária podendo superar 100 mm.

Ressalte-se que a ideia de comparar os padrões de chuva do ponto de vista de sua frequência não segue a linha de raciocínio utilizada para dimensionamento de obras de controle de erosão e hidráulicas (vertedores de barragens, sistemas de drenagem, galerias pluviais, dimensionamento de bueiros) ou ainda para identificar chuvas com maior poder erosivo, em que são calculadas equações de intensidade-duração-frequência (IDF) ou então classificadas em padrão avançado, intermediário e atrasado (HORN & JENS, 1941). Neste trabalho, os aspectos ligados a intensidade, duração e frequência são analisados de forma geral, buscando diferenciar e caracterizar os padrões de chuva responsáveis por causar os alagamentos gerados via o SOM.

Ainda com a intenção de caracterizar os padrões de chuva, mas pensando especificamente na frequência em que cada um desses padrões ocorre, foram elaborados gráficos de frequência acumulada, considerando o acumulado diário para os 4 dias e probabilidades $\geq 75\%$, $\geq 50\%$, $\leq 50\%$ e $\leq 25\%$.

A partir da análise dos gráficos de frequência acumulada representados na Figura 6, fica evidente que os padrões associados a altas probabilidades (\geq a 75% e \geq a 50%) são bem diferentes dos padrões associados a baixas probabilidades (\leq a 50% e \leq a 25%) mostrando que a chuva no dia do evento é primordial para ocorrência dos alagamentos

Interpretando os gráficos da Figura 6, pode-se ainda dizer que os padrões associados a altas probabilidades de ocorrência realmente estão relacionados a processos de alagamentos e não de inundações, pois se estivessem ligados a inundações, a importância da chuva acumulada nos 4 dias teria maior relevância, ou seja, nos gráficos “C” e “D”, as curvas deveriam estar mais afastadas entre si e não com tendência de aproximação, mostrando que a chuva acumulada para 4 dias contribui, mas a de maior importância é a ocorrida no dia do evento. Tal fato fica evidente quando observa-se o gráfico “A”, em que as curvas estão afastadas uma da outra, ilustrando a importância da chuva no dia do evento.

No gráfico “A”, observa-se que há alta frequência de chuvas com menos de 20mm e que estão associadas a baixas probabilidade de ocorrência, ou seja, \leq a 50% e \leq a 25%. O contrário também pode ser observado, pois para probabilidades \geq a 75% e \geq a 50% têm-se baixas frequências para chuvas em torno de 20mm e maiores frequências para chuvas entre 30 e 70mm corroborando o que já foi discutido nos gráficos de área sobre a quantidade de chuva necessária para deflagrar os alagamentos.

Ainda sobre o gráfico “A”, verifica-se que as duas curvas ligadas a baixas probabilidades de ocorrência de alagamento estão muito próximas, mostrando que não há diferenças significativas na precipitação que ocorre associada a estas probabilidades, diferentemente das curvas de 50 e 75% que já mostram alguma diferença.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabe-se que os alagamentos se dão em função de um determinado padrão de chuva como já discutido, no entanto, há outros fatores que contribuem para sua ocorrência, como por exemplo, a questão já intrínseca das metrópoles (como Curitiba), referentes às grandes áreas pavimentadas e impermeáveis. Drew (1986) já mostrava que em áreas alteradas pela urbanização a quantidade de chuva anual é 5% maior e, em dias de chuva, a precipitação (quantidade de chuva medida) é 10% superior se comparada com as áreas rurais.

Aliado a esses fatores, tem-se a questão ligada a quantidade de lixo presente na cidade. O lixo acaba entupindo os bueiros e sendo carregado para as galerias pluviais e córregos que atravessam as áreas urbanas. Com isso, é diminuída a capacidade de recebimento e escoamento da água proveniente da cidade e por consequência, aumentada as chances de ocorrência dos alagamentos.

A utilização de inteligência artificial, especificamente a rede SOM, é um método alternativo de modelagem de processos relacionados não só ao ambiente natural, mas também relacionado a outras ciências como a medicina, informática, administração entre outras, tendo como grande vantagem a

possibilidade de modelar processos não-lineares de forma implícita. No entanto, a maior limitação encontra-se no tamanho da amostra utilizada para o treinamento e aprendizagem da rede. Acredita-se que para este estudo, os resultados poderiam ser melhorados com uma amostra maior, ou seja, um maior número de dados de estimativa de chuva e também de alagamentos. No entanto, foram utilizados os dados de 2005 a 2010, disponíveis para o momento.

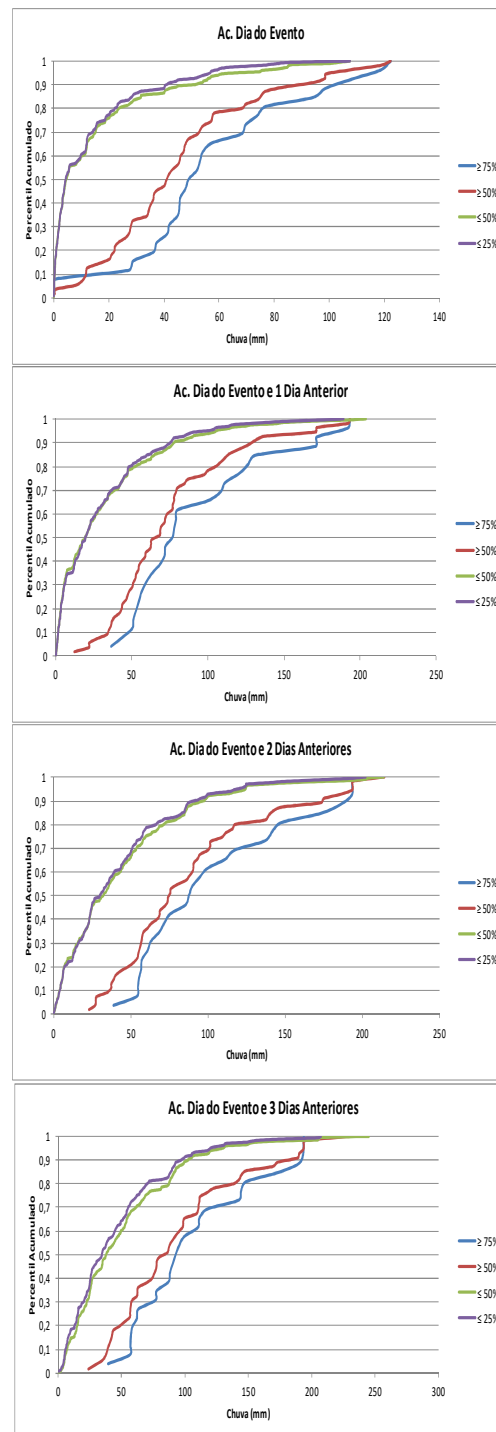


Figura 6 Gráfico de frequência da chuva acumulada no dia do evento, no dia do evento e 1 dia anterior, no dia do evento e 2 dias anteriores e no dia do evento e 3 dias anteriores, para probabilidades $\geq 75\%$, $\geq 50\%$, $\leq 50\%$ e $\leq 25\%$

Outra vantagem da rede SOM é justamente a sua capacidade de identificação de padrões. Neste sentido, este trabalho possui caráter de inovação e pioneirismo. Inovação, pois foram identificados via rede neural os principais padrões de chuva que deflagram os alagamentos em Curitiba e, pioneirismo em função da não identificação na literatura consultada de trabalhos que demonstrem a relação da chuva e ocorrência de alagamentos via rede de Kohonen.

Em relação aos padrões de chuva, foram identificados dois padrões principais que deflagram os alagamentos. A partir dos gráficos de linha e de área elaborados para caracterizar o padrão 1 de chuva, mostrou-se que para a ocorrência de um alagamento deve necessariamente ser registrada chuva no dia do evento, sendo a mesma superior ou igual a 36 mm no dia do evento. Infere-se, portanto que este padrão esteja ligado as chuvas convectivas que ocorrem principalmente no período de verão.

O padrão 2 apresentou características diferentes sendo que o maior índice de precipitação foi identificado para o dia anterior ao do evento mas com valores crescentes de precipitação já a partir do terceiro dia anterior ao do evento. Desta forma, infere-se que tal padrão tenha dinâmica relacionada a entrada de frentes frias, que trazem quantidades significativas de precipitação podendo atuar por diversos dias sobre determinada área.

De forma geral, quando comparados os dois padrões, o padrão 1 apresenta maior frequência e índices pluviométricos podendo ultrapassar os 120 mm acumulados diários. Mesmo com menor frequência, o padrão 2, de acordo com o investigado no trabalho, pode atingir até 100 mm acumulados diários.

REFERÊNCIAS

- BENETI, C. A. A.; CALVETTI, L.; PSCHIEDT, I. PEREIRA FILHO, A.J. Avaliação de estimativas de precipitação por satélite utilizando dados de estações de superfícies e radar meteorológico: verificação preliminar no Paraná. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis-SC, Ago. 2006.
- CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. Integração do radar meteorológico doppler do Simepar e uma rede pluviométrica para a estimativa da precipitação. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 11. 2003, Belo Horizonte. CD-ROM.
- CALVETTI, L.; BENETI, C.; GONÇALVES, J. E.; MOREIRA, I.; DUQUIA, C.; BREDAS, A. e ALVES, T. A. (2006). Definição de Classes de Precipitação para utilização em Previsões por Categoria e Hidrológica. In **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis-SC, Ago. 2006.
- CALVETTI, L.; BENETI, C.; PSCHIEDT, I.; STRINGARI, D. e PEREIRA FILHO, A. J. Integração de Estimativas de Precipitação por Radar, Satélite e Pluviômetros: Análise Espacial para o Paraná. In **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo – SP, Nov. 2007.
- DREW, D. **Processos Interativos Homem-Meio Ambiente**. 4ª ed. São Paulo: Bertrand Brasil, 1998.
- FREEMANN, J. A.; SKAPURA, D. M. **Neural networks, Algorithms, Applications, and Programming Techniques**. New York: Addison Welsley, 1991.

FENDRICH, R. Histórico de acidentes hidrológicos em Curitiba. Bacia Hidrográfica do rio Belém. In: LIMA, R. E. **Uso dos solos e dos rios: conceitos e aplicações para a região de Curitiba**. Curitiba:UFPR – NIMAD. 2000. 149p.

FORTUNATO, R. A. **Subsídios à prevenção e controle das inundações urbanas: bacia hidrográficas do rio Belém, município de Curitiba – PR**. Curitiba, 2006. 237 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e prática**. Trad. Paulo Martins Engel. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

JICA. Japan International Cooperation Agency. The master plan study on the utilization of water resources in Paraná state in the Federative Republic of Brazil. **Volume H – Flood control**. 1995. 99 p.

KOHONEN, T. **Self-Organizing Maps**. 3 ed. Berlim: Springer-Verlag, 2001

LIMA, R.E. Inundações. Aspectos conceituais, consequências e alternativas de enfrentamento. In: LIMA, R.R. **Uso dos solos e dos rios: Conceitos e aplicações para a região de Curitiba**. Curitiba, UFPR – NIMAD. 2000. 194p.

LUDWIG JR O. & MONTGOMERY E. **Redes Neurais. Fundamentos e Aplicações com Programas em C**. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna LTDA, 2007.

PEREIRA FILHO, A. J., K. C. Crawford e Hartzell, C. **Statistical Objective Analysis Scheme (SOAS) for Improving WSR-88D Rainfall Estimates**. Vol.1: Comparative Analysis Between Stage III and the SOAS over WSR-88D Overlapping Areas. Report R-96-08, 58 pp, Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior. 1996:

PEREIRA FILHO, A., NAKAYAMA, P. T. e NEGRI, A. Gauge, radar and satellite areal rainfall estimates. **Sixth International Symposium Hydrological Applications of Weather Radar**. Melbourne, Austrália. 2004: