

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

AVALIAÇÃO DE INTERPOLADORES PARA ESTIMAR CHUVA MÉDIA COM USO DA VALIDAÇÃO CRUZADA E NA RESPOSTA DO MODELO CHUVA VAZÃO

Isabelle Domingues Mondini, Faculdade Dom Bosco, belledmondini@gmail.com
Danubia Santos da Silveira, Faculdade Dom Bosco, danubiass96@gmail.com
Anderson Kwiatkowski Lopes, Faculdade Dom Bosco, anderson.lopes@hotmail.com
Melissa Candido Fischer, Faculdade Dom Bosco, candidofischer@gmail.com
Vitor Souza Viana Silva, Faculdade Dom Bosco, silvav@faculdadedombosco.edu.br

Resumo

Neste estudo, foram avaliados diferentes métodos de interpolação para a reprodução de chuvas médias em um modelo chuva-vazão concentrado. Os métodos incluíram Inverso do Quadrado da Distância (IQD), Triangulação Linear (TL), Vizinho Natural (VN) e Vizinho Mais Próximo. Realizou-se validação cruzada e avaliação estatística dos interpoladores para bacias hidrográficas com escalas entre 563 e 9.423 km². Na análise do modelo chuva-vazão, aplicaram-se índices estatísticos durante os processos de calibração e verificação. Os resultados da validação cruzada indicaram que o Vizinho Natural obteve o melhor desempenho, seguido pelo Inverso do Quadrado das Distâncias, Triangulação Linear e Vizinho Mais Próximo. Elegeu-se o melhor interpolador, e sua eficácia foi confirmada ao utilizar a série histórica no modelo chuva-vazão IPH II, versão WIN IPH2. As vazões diárias calculadas pelo modelo com o interpolador Vizinho Natural apresentaram índices estatísticos satisfatórios, com $NS > 0,78$ na calibração e $NS > 0,55$ na verificação para bacias de 653 km². Para áreas de drenagem acima de 5.414 km², o modelo teve um bom desempenho, com $NS > 0,89$ na calibração e $NS > 0,88$ na verificação.

Palavras-chave: Interpolação, Validação Cruzada, Modelo Chuva-Vazão

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

1. Introdução

A determinação da estimativa adequada da precipitação média em uma área, representativa do volume precipitado sobre a superfície, pode ser obtida com base nas informações de uma rede suficientemente densa de pluviômetros (medidas pontuais) ou por estimativas resultantes do uso de radar e de satélite (Haberlandt e Kite, 1998; Goovaerts, 2000). A avaliação do campo de precipitação, gerado através dos procedimentos citados acima, esbarra no problema do desconhecimento do campo real de precipitação para a comparação, uma vez que o conhecimento exato deste campo é uma meta impossível de ser alcançada.

A interpolação preenche espaços entre pontos conhecidos, estimando valores ausentes com base na suposição de que pontos próximos são mais semelhantes (Souza, et al., Filho, et al., Moreira, 2019). A chuva média com base nos nós de uma grade regular após o processo de interpolação de medidas pontuais apresenta-se como uma boa alternativa para situações com pluviômetros no interior de bacias, cujas séries resultantes apresentam falhas. Acredita-se que a qualidade da chuva média depende da escolha do tipo de método de interpolação. A avaliação do método pode ser feita pelo uso da técnica da validação cruzada, que consiste na retirada de um registro do conjunto de dados, cujo valor obtido através da interpolação das observações das amostras vizinhas é comparado com este. Segundo Davis (1997) e Olea (1999) essa técnica surgiu como uma adaptação da técnica estatística não paramétrica de avaliação cruzada de um conjunto de dados. O desempenho da precipitação média pode também ser avaliado mediante a comparação das vazões calculadas por um modelo chuva-vazão com esta precipitação como entrada, com os valores de vazão observados.

Os efeitos da distribuição espacial da precipitação, bem como da imprecisão do conhecimento desta distribuição, sobre o desempenho de modelos chuva-vazão, foram avaliados por diversos autores (Andréssian et al., 2001; Trambly et al., 2011). Estes trabalhos, porém, tinham como foco o efeito da variação dos parâmetros no desempenho dos modelos chuva-vazão e não a verificação da eficiência do modelo com as diferentes formas de se obter a chuva média.

Neste trabalho, foi feita uma avaliação indireta da qualidade da estimativa da precipitação média, pois a resposta de um modelo chuva-vazão serviu de indicador para a avaliação comparativa das chuvas médias obtidas a partir de dados de uma rede de pluviômetros. Portanto, foram consideradas as médias dos valores interpolados nos nós de uma rede de grades regulares, e as médias aritméticas calculadas diretamente a partir dos valores acumulados em cada pluviômetro. A hipótese implícita é que a chuva média calculada através do campo de precipitação mais próximo do “real” proporciona resultados de simulação de melhor desempenho, no que diz respeito à reprodução das séries de vazões. Os resultados das precipitações médias diárias são, portanto, utilizados como dados de entrada do modelo chuva-vazão, aplicado em três bacias hidrográficas em diferentes escalas.

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

2. A Área de estudo e os dados utilizados

Este trabalho foi desenvolvido com dados de precipitação e de vazão de três bacias com áreas de drenagem entre 563 e 9.426 km² (Figura 1).

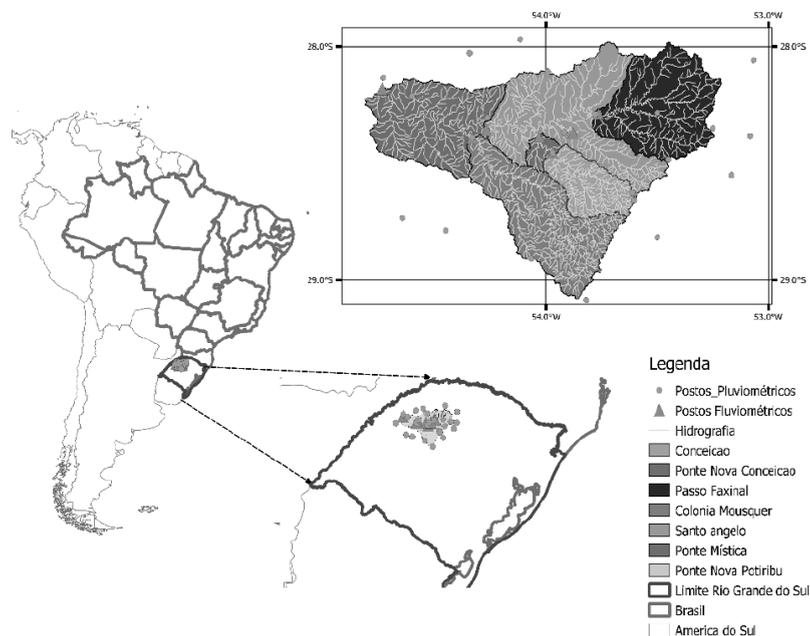


Figura 1. Localização da bacia do rio Ijuí, suas sub-bacias, e postos pluviais e fluviométricos (Marques et al. 2018).

Estas bacias da figura são a do Potiribu (563 km²), Santo Ângelo (5.414 km²) e Ijuí, com seção em Ponte Mística (9.426 km²), as quais apresentam dados disponíveis no sistema nacional da Agência Nacional de Águas (ANA). Todas estas bacias são embutidas uma dentro da outra. Foram utilizados dados diários de postos pluviômetros e fluviométricos disponibilizados ao público pelo sistema da ANA, todos eles localizados na bacia do rio Ijuí para o período 20/08/1989 a 18/12/2008. A localização dos postos, latitude e longitude, e o período inicial e final das séries. Tanto para os dados pluviométricos como para os fluviométricos, quando houve falhas, estas não foram preenchidas. No caso da chuva, a média foi calculada sem considerar o valor que estava com falha. No caso da vazão, foram escolhidos períodos sem falhas para a calibração e a verificação. Os dados estão descritos em Silva (2011).

A série de evaporações também foi utilizada como dado de entrada para o modelo hidrológico chuva-vazão e foi obtida pelos registros diários do evaporímetro de Piché

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

retirados do banco de dados da estação climatológica Cruz Alta do INMET, localizada na longitude 53° 36' 00" e na latitude 28° 38' 00", para o período de 1978 a 2010. Aplicou-se um coeficiente corretivo na evaporação através do comparativo do balanço hidrológico entre a chuva total anual e a vazão anual nas bacias analisadas.

2.1. Estatísticas de Desempenho

As diversas etapas deste trabalho requerem avaliações de desempenho, podendo-se individualizar: seleção do método de interpolação mais adequado pelo método da validação cruzada; as avaliações de desempenho do modelo chuva-vazão, com as séries de precipitações médias como entrada, resultantes do melhor interpolador.

As estatísticas recomendadas por Willmot (1981) para a comparação do desempenho dos procedimentos de interpolação, pelo método da validação cruzada, são a correlação linear de Pearson (R), e a raiz do erro médio quadrático ($REM Q$), como mostram as Equações 1 e 2.

$$R = \frac{\sum_i^N (p_{o_i} - \bar{p}_o)(p_{c_i} - \bar{p}_c)}{\sqrt{\sum_i^N (p_{o_i} - \bar{p}_o)^2 \sum_i^N (p_{c_i} - \bar{p}_c)^2}} \quad (1)$$

$$REM Q = \sqrt{\frac{\sum_i^N (p_{o_i} - \bar{p}_o)^2}{N}} \quad (2)$$

Onde R é o coeficiente de correlação linear de Pearson, $REM Q$ é a raiz do erro médio quadrático, p_{o_i} e p_{c_i} são os valores das precipitações observadas e calculadas no dia i , e N é o número total de dias analisados.

A raiz do erro médio quadrático é uma medida objetiva das diferenças entre os valores calculados pelos métodos de interpolação e os valores observados, porém pondera mais fortemente os maiores erros, além de não identificar erros sistemáticos, uma vez que cada erro quadrático é sempre um número positivo. O coeficiente de correlação linear de Pearson, por sua vez, mede apenas a tendência de variação conjunta entre os valores calculados e observados, independentemente da sua maior ou menor coincidência. Neste trabalho, considerou-se como melhor alternativa aquela que foi capaz de se revelar mais favorável segundo os dois índices utilizados.

As avaliações de desempenho do modelo chuva-vazão, em diferentes etapas do trabalho, consistem na comparação entre valores calculados e observados das vazões. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) é uma medida de associação entre as vazões

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS 2023
WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

previstas e as observadas, e o seu valor varia no intervalo de $-\infty$ a 1. Se o valor do coeficiente for igual a um, evidencia que existe melhor concordância entre as descargas observadas (Q_o) e calculadas (Q_c), sendo (Q_o) a vazão média. O valor de NS também indica o quanto os valores calculados são mais representativos do que a média observada. Esta equação é descrita conforme a Equação 3.

$$NS = 1 - \frac{\sum_i^N (Q_{c_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_i^N (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

Onde: NS é o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, Q_{c_i} é a vazão calculada, Q_{o_i} é a vazão observada e \bar{Q}_o é a vazão média, observadas e calculadas no dia i , e N é o número total de dias analisados.

Uma vez que este coeficiente possui a tendência de valorizar as maiores vazões, por ser baseado no desvio quadrático, utilizou-se, também, o índice de comparação de volumes totais (ΔV) segundo a Equação 4.

$$\Delta V = 1 - \frac{\sum_i^N Q_{c_i} - \sum_i^N Q_{o_i}}{\sum_i^N Q_{o_i}} \quad (4)$$

Onde: ΔV é o índice de volumes totais, Q_{c_i} é a vazão calculada e Q_{o_i} é a vazão observada, observadas e calculadas no dia i , e N é o número total de dias analisados.

A avaliação de desempenho das estatísticas aplicadas nos resultados das vazões na saída do modelo hidrológico, mediante as diferentes entradas de chuva média, pode ser possível com base nas recomendações de Moriasi et al. (2007). Os autores fizeram uma classificação para uma faixa de valores de NS e ΔV , como mostra a Tabela 1. $0,75 < NS < 1,0$ e $\Delta V < 10$ (Muito Bom), $0,65 < NS < 0,75$ e $10 \leq \Delta V < 25$ (Bom), $0,50 < NS < 0,65$ e $15 \leq \Delta V < 25$ (Satisfatório) e $0,50 \leq NS$ e $\Delta V \geq 25$ (Insatisfatório).

3. Os Métodos de Interpolação

O objetivo dos métodos de interpolação é a estimativa dos valores de uma dada grandeza no espaço entre as amostras ou observações a partir de uma combinação, geralmente linear, destas. Os métodos testados neste trabalho estão entre os mais utilizados, para a interpolação de precipitações e que levam em consideração proximidades geométricas e ponderações com as distâncias entre as medidas pontuais de chuva por pluviômetro e os nós de uma grade regular. A hipótese intrínseca é a da existência de uma região de influência de medidas pluviométricas sobre os nós da malha que formam o campo de precipitação. Os

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

interpoladores utilizados na pesquisa foram: o inverso do quadrado das distâncias (IQD), o vizinho natural (VN), o vizinho mais próximo (VP) e a triangulação linear (TL). Estes são classificados como métodos determinísticos de efeitos locais, mas podem representar a variabilidade espacial em função da escala da bacia.

3.1. Método com Base em Média Ponderada

3.4.1 Ponderação com o inverso do quadrado da distância (IQD)

Neste método, todos os pontos amostrados que estejam próximos a um ponto a ser estimado contribuem com pesos inversamente proporcionais à sua distância (Soares, 2000). Com base na Figura 2, os pontos amostrais mais próximos ao ponto que se deseja estimar são calculados pelo inverso da distância.

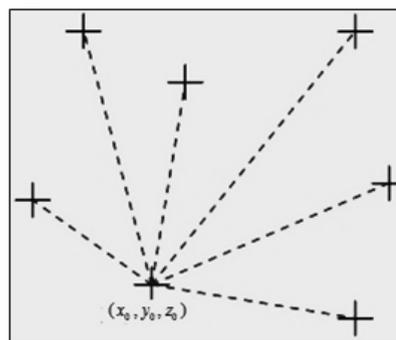


Figura 2. Método do inverso do quadrado da distância (Soares, 2000).

O peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação ao outro diminui conforme aumenta a distância ao ponto a estimar. Os pontos amostrados próximos ao ponto estimado recebem peso maior que os pontos amostrados mais distantes. A soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos deve ser igual a 1 (Equação 5).

$$Z(x, y) = \sum_i^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta} \left(\sum_i^n \frac{1}{h_{ij}^\beta} \right)^{-1} \quad (5)$$

Onde Z é o valor interpolado para o nó da grade regular (Grid), Z_i é o valor do ponto amostrado vizinho ao nó, h_{ij} é a distância entre o nó da grade de Z_i , β é o expoente de ponderação, n é o número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó. O expoente igual a dois corresponde ao método do inverso do quadrado da distância (IQD).

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

3.5 Método de Proximidade Geométrica

3.5.1 Vizinho Natural (VN)

O Vizinho Natural é um método que cria pesos para cada uma das amostras pontuais com base em sua "área de influência" ao ponto a ser interpolado. Neste método primeiramente deve-se gerar uma triangulação de Delaunay, formado por segmentos de retas onde os vértices são todas as amostras distribuídas no plano, obtendo-se assim os polígonos de Voronoi, que são formados a partir do encontro de retas formadas por mediatrizes destes triângulos, como mostram as Figuras 3 e 4 (Smith *et al.*, 2009).

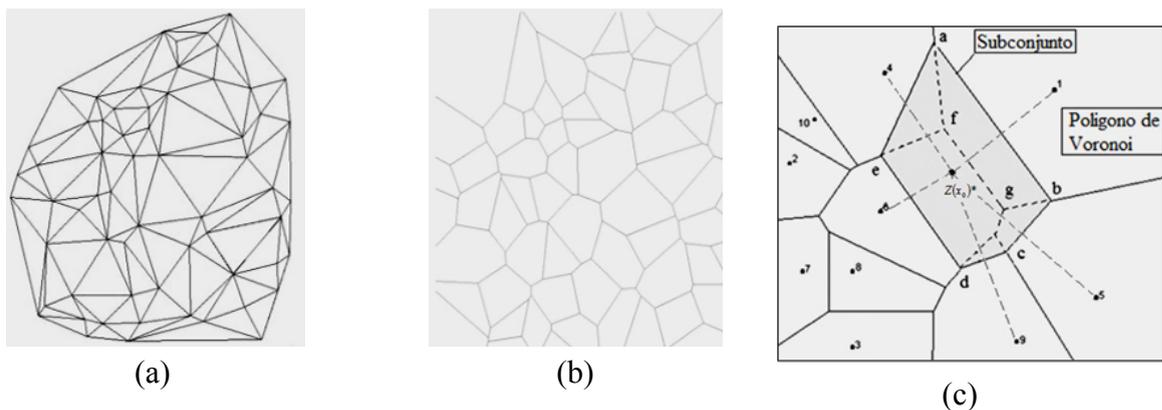


Figura 3. Triangulação de Delaunay (a), Polígonos de Voronoi (b), (c) Áreas de influência formadas pelo novo processo de triangulação de Delaunay e geração de polígonos de Voronoi (Smith *et al.*, 2009).

No método VN são repetidos os processos de triangulação de Delaunay, resultando os polígonos de Voronoi, que estabelecem as áreas de influência, a partir das amostras vizinhas ao ponto a ser interpolado (Figura 3).

Os pesos do VN são calculados mediante a relação do valor das áreas de influência formadas por 1, 4, 5, 6 e 9 com o valor da área do subconjunto. O peso do ponto 1 ao ponto a ser interpolado é representado pela relação entre áreas $w_1 = \frac{A_{abfg}}{A_{abcde}}$, e assim sucessivamente, para a obtenção dos pesos com base nos valores das áreas de influência dos demais pontos 4, 5, 6 e 9, ao ponto $Z(x, y)$, admitindo-se a condição de $\sum_i^n w_i = 1$ e $0 \leq w_i \leq 1$.

Após a obtenção dos pesos, a Equação 6 é utilizada para a interpolação do VN no ponto $Z(x, y)$.

$$Z(x, y) = \sum_i^n w_i Z_i \quad (6)$$

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

Onde $Z(x, y)$ é o valor interpolado no ponto, e Z_i é o valor da precipitação dos pontos vizinhos.

3.5.2 Vizinho Mais Próximo (VP)

Neste método, simplesmente atribui-se o valor do ponto amostral mais próximo, ao ponto a ser estimado. O resultado deste método, quando aplicado em grades regulares, resulta em diversos polígonos com o ponto amostral no interior (Figura 4). O mapa resultante do método do VP assemelha-se ao método dos polígonos de Voronoi (Smith *et al.*, 2009).

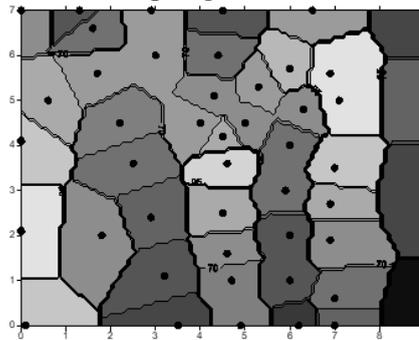


Figura 4. Visualização do Método do Vizinho mais Próximo.

Segundo Smith *et al.*, (2009), o método do VP pode ser utilizado quando existe uma necessidade de preenchimento de valores ausentes em um determinado ponto. O valor atribuído ao ponto a ser estimado será correspondente ao ponto da amostra mais próximo ou com maior influência.

3.5.3 Triangulação Linear (TL)

A triangulação linear constitui-se em um método que divide a superfície formada pelas amostras em triângulos contíguos não sobrepostos, tendo por vértices as amostras. Cada valor da medida de precipitação é guardado em cada vértice do triângulo, podendo acomodar conjuntos de dados distribuídos irregularmente ou de forma seletiva. O valor do ponto a ser interpolado é estimado por uma média ponderada dos 3 vértices do triângulo onde o mesmo está inserido (Figura 5). Os ponderadores são calculados de acordo com a proximidade do ponto aos vértices, tendo-se por base a equação do plano definido pelos valores das amostras/vértices (Soares, 2000).

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

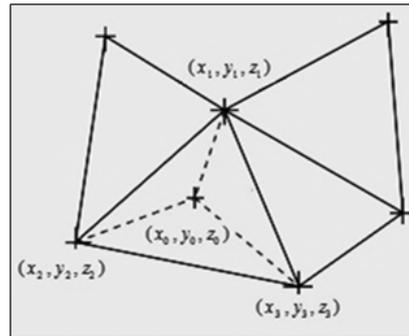


Figura 5. Método de triangulação (Soares, 2000).

O ponto (x_0) de coordenadas (x_0, y_0, z_0) contido no triângulo é definido pelos pontos (x_0, y_0, z_0) , (x_1, y_1, z_1) e (x_3, y_3, z_3) , é calculado pela Equação 7.

$$Z(x, y) = Z_0 = ax + by + c \quad (7)$$

Os coeficientes a , b , c são obtidos pelo sistema de equações do plano que contém x_0 como mostra o sistema abaixo, representada pelas equações. Os valores de Z_1 , Z_2 e Z_3 , podem ser representados por medidas pluviométricas, e valor de Z_0 é um ponto no espaço a ser estimado.

$$ax_1 + by_1 + c = Z_1 \quad (8)$$

$$ax_2 + by_2 + c = Z_2 \quad (9)$$

$$ax_3 + by_3 + c = Z_3 \quad (10)$$

3.6 A Técnica da Validação Cruzada

A validação cruzada é um método utilizado para a avaliação da qualidade de um interpolador, a qual consiste na retirada de um registro do conjunto de dados, cujo valor é então obtido através da interpolação das observações das amostras vizinhas. O valor calculado pelo interpolador é confrontado com o valor observado e, após a aplicação do procedimento com a exclusão sucessiva de todos os registros, um por vez, a avaliação do desempenho resulta da aplicação de estatísticas de erro. A aplicação da validação cruzada para a análise comparativa do desempenho dos interpoladores é importante porque os métodos de interpolação mais adequados a cada caso dependem da variabilidade espacial de cada região (Viola *et al.*, 2010).

No SURFER 8.0, o processo da validação cruzada é iniciado através da remoção da



primeira medida pontual do conjunto de dados. Com o uso dos dados restantes e de um algoritmo selecionado, é realizada a interpolação de valor no local dessa medida. A seguir, o erro de interpolação é calculado como erro = valor interpolado - valor observado (Caruso e Quarta, 1998; Haberlandt e Kite, 1998; Olea, 1999; Falivene et al., 2010).

Na sequência, a primeira observação é colocada de volta para o conjunto de dados e a segunda observação é removida. Usando os dados restantes (incluindo a primeira observação), o algoritmo especificado é usado para interpolar o valor no local da segunda observação. Usando o valor da observação conhecido neste local, o erro de interpolação é calculado como explicado anteriormente. A segunda observação é colocada de volta para o conjunto de dados e o processo é continuado desta forma para a terceira, quarta, quinta observações, etc., ou seja, todo o caminho até incluir a observação N. Este processo gera um conjunto de N erros de interpolação.

O processo da validação cruzada foi automatizado mediante a criação de uma sub-rotina no Scripter, que é um programa externo do SURFER 8.0, para realizar as seguintes etapas: selecionar um método de interpolação, juntamente com todos os parâmetros de definição; para cada local das medidas pontuais, interpolar o valor usando os dados vizinhos, mas não a própria observação; calcular os erros de interpolação resultante; avaliar a qualidade do método de interpolação selecionado com uso da estatística de desempenho, como o coeficiente de correlação linear de Pearson e a raiz do erro médio quadrático.

Foram utilizados para a aplicação desta técnica dados de 14 postos pluviométricos, selecionados entre os postos da ANA e os do IPH (ver Figura 1), no período de 27/06/1990 a 31/05/1993. A aplicação desta técnica de validação cruzada visa selecionar o melhor método de interpolação dos dados de chuva.

3.7 A Precipitação Média na Bacia por Grade Regular

O método para estimar a precipitação média na bacia, ilustrado na Figura 5, é realizado pelo quociente entre o somatório dos valores das chuvas nos nós pelo total de nós distribuídos no interior dos limites da bacia, após o processo de interpolação espacial de medições pluviométricas.

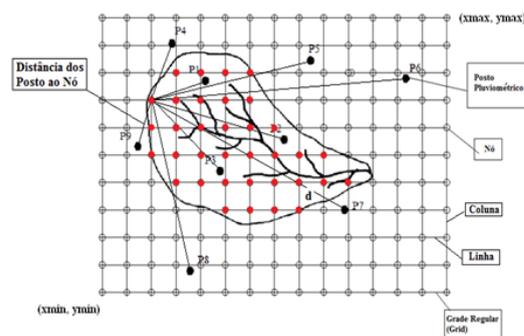


Figura 5. Cálculo da precipitação média com base nos valores nodais no interior dos limites da bacia (Silva,

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

2011).

O SURFER 8.0 foi o aplicativo utilizado nesta pesquisa para determinar a precipitação média na bacia, nas diferentes escalas, após a interpolação dos dados pluviométricos para os nós da grade regular. As operações neste software podem ser controladas automaticamente por “*scripts*” que são escritos em uma linguagem de programação que é compatível com o Visual Basic for Applications. O objetivo do uso do script, neste caso, é o de automatizar tarefas repetitivas, como ocorre na geração de campos de precipitação diária para longos períodos.

Os *scripts* permitem integrar os recursos de vários programas, como abrir o arquivo de dados das precipitações em extensões xls ou ascii, e transferir este arquivo para o SURFER 8.0. Nesta pesquisa, utilizou-se a sub-rotina elaborada por Silva (2011), para utilizar as ferramentas do SURFER 8.0 com o intuito de gerar campos de precipitação para o posterior cálculo da chuva média para diferentes escalas das bacias hidrográficas aqui analisadas. Cada uma destas escalas possui uma geometria definida, ou seja, valores mínimos e máximos das coordenadas, de grade regular, sendo que estas geometrias influenciam no número de nós para a geração de campos de chuva.

4. Resultados

4.1 Seleção do melhor método de interpolação

A aplicação do método da validação cruzada consistiu na retirada da série de precipitações diárias de um pluviômetro por vez, e os valores da série dos pluviômetros analisados foram então obtidos através da interpolação com base no registro das amostras vizinhas. No eixo das ordenadas das Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados estatísticos da raiz do erro médio quadrático (REMQ), e do coeficiente de correlação linear de Pearson (R), obtidos mediante a comparação entre os resultados medidos e os calculados pelos interpoladores, e o eixo das abscissas, corresponde aos 14 pluviômetros analisados. Os períodos das séries dos pluviômetros foram no intervalo entre 27/06/1990 a 31/05/1993, e as suas localizações presentes no interior dos limites da bacia do rio Ijuí. Os métodos avaliados foram o IQD, o VN, o VP e a TL.

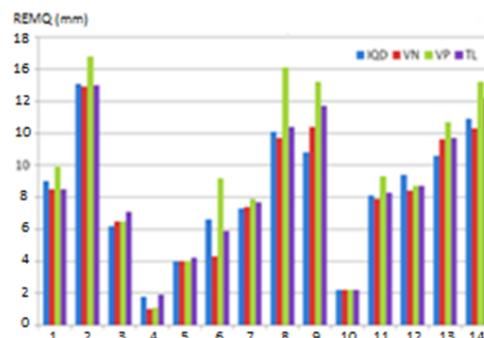




Figura 6. Histograma dos valores da REMQ (mm) dos valores das precipitações medidas e calculadas pelos interpoladores.

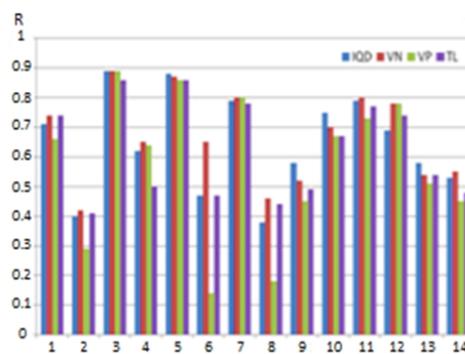


Figura 7. Histograma dos valores do R dos valores das precipitações medidas e calculadas pelos interpoladores.

Calculando-se a média das estatísticas R e REMQ para os 14 postos, obtém-se: VN (R=0,68, REMQ=7,75), IQD (R=0,66, REMQ=7,94), TL (R=0,64, REMQ=8,25) e VP (R=0,58, REMQ=9,20). Analisando-os individualmente, o VN apresentou melhores resultados em nove dos 14 pluviômetros com base nas estatísticas de desempenho utilizados na técnica da validação cruzada.

4.2 Cálculo das séries de médias diárias de precipitação

A Figura 8 mostra as isolinhas e o campo de precipitação diária gerado mediante os valores nodais de uma grade regular por interpolação da chuva medida por postos pluviométricos no interior e fora dos limites da bacia do Ijuí em Ponte Mística. A precipitação média resulta do somatório dos valores nodais após o processo de interpolação pelo número total de nós (ver Figura 8).

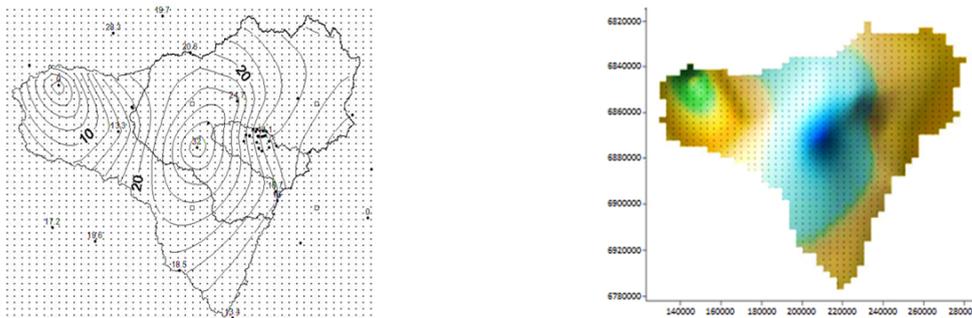


Figura 8. Grade Regular para o dia 22/08/1989.

A análise de sensibilidade proporcionou respostas para a escolha da resolução da malha,

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

uma vez que uma resolução mais detalhada implica necessariamente em maior tempo de processamento, enquanto que a menos detalhada resulta em menor precisão. Conforme Silva (2011), observou-se que, para um aumento da quantidade de pontos da malha, a precipitação média tendeu para valores pouco divergentes. Por exemplo, o valor da precipitação média com uso do interpolador vizinho natural resultou em 4,62 mm e 4,59 mm, respectivamente, para as resoluções de 50 linhas por 50 colunas, e de 100 linhas por 100 colunas. Ou seja, o uso da resolução menos detalhada implica em pequena diferença no resultado, reduzindo-se, porém, de 10.000 para 2.500 os nós a serem processados.

4.3 Simulação do processo chuva-vazão com o modelo concentrado

Através da testagem das séries de precipitações médias quantificadas através dos campos gerados com a grade regular utilizando os diferentes métodos de interpolação, avaliados na validação cruzada, houve o fornecimento de representação de chuva média como entrada para o modelo chuva-vazão WIN IPH 2. Além da avaliação destes procedimentos no desempenho relativo das vazões resultantes, para cada uma das cinco escalas de bacias estudadas. A descrição do modelo pode ser vista em Marques et al. 2018 e Silva (2021).

Os parâmetros resultantes da calibração com o uso das estatísticas pontuais a partir de dez execuções são apresentados na Tabela 1. Este número de execuções foi baseado nos estudos de Collischonn & Tucci (2003) para avaliar se o algoritmo SCE-UA encontrou o ótimo global, no qual foi constatado que a variação dos parâmetros do modelo IPH 2 é reduzida com a realização deste número de execuções. A Figura 9 mostra o processo de calibração em Ponte Mística (a), Santo Angelo (b) e Ponte Nova do Potiribu (c) no processo de calibração no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

Bacias	Io (mm h ⁻¹)	Ib (mm h ⁻¹)	h (adm.)	Ks (h)	Ksub (h)	Rmax (h)	Alfa (%)
Ponte Mística (9.426 km ²)	121,2363	0,9961	0,7207	5,8695	20,4232	6,8397	5,1509
Santo Ângelo (5.414 km ²)	63,6264	2,5844	0,58449	3,5439	30,4652	8,0078	1,1129
Potiribu (629 km ²)	97,5088	2,5971	0,8164	4,7317	10,0004	9	0,9416

Tabela 1. parâmetros calibrados do modelo IPH II, versão WIN IPH2 com uso do vizinho Natural.

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 evento
23/11 100% online
24/11 e gratuito

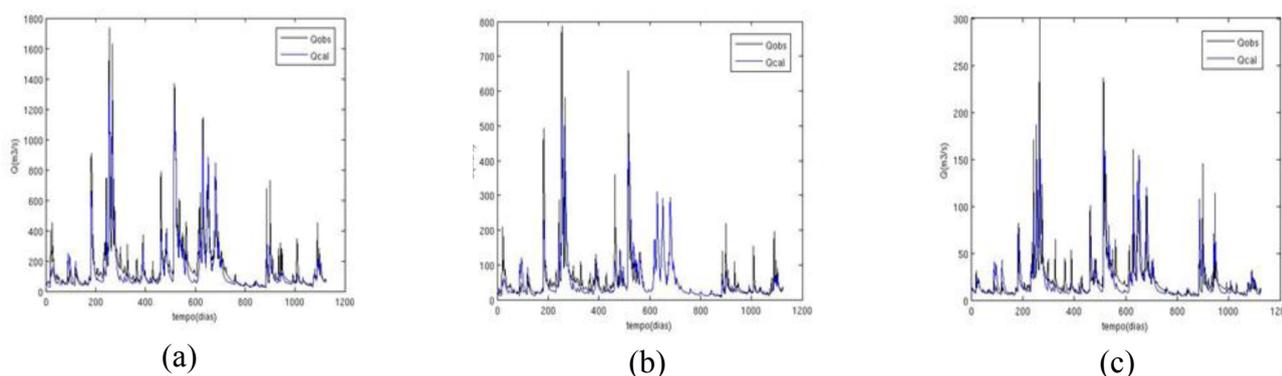


Figura 9. Séries de vazões calculadas e observadas em Ponte Mística (a), Santo Angelo (b) e Ponte Nova do Potiribu no processo de calibração no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

Os índices estatísticos de desempenho podem ser vistos na Tabela 2 nos processos de calibração e verificação do modelo. Já as séries de vazões na calibração podem ser vistos na Figura 9 em Ponte Mística, Santo Ângelo e Potiribu.

Bacias	Inter p.	Calibração		Verificação	
		NS	ΔV	NS	ΔV
Ponte Mística (9.426 km ²)	VN	0,88	-1,69	0,88	16,4
Santo Ângelo (5.414 km ²)	VN	0,89	-1,89	0,88	1,12
Potiribu (629 km ²)	VN	0,78	3,86	0,55	12,53

Tabela 2. Índices estatísticos nas séries de vazões no processo de calibração e verificação do modelo IPH II, versão WIN IPH2 com uso do vizinho Natural.

Os resultados dos parâmetros do modelo foram satisfatórios, pois estes apresentaram intervalos $0,65 \leq NS \leq 0,84$ e $-8,83 \% \leq \Delta V \leq 9,64 \%$, estando de acordo com os critérios de Moriasi et al. (2007) e uma perda de eficiência do modelo com a aplicação da técnica em função da redução da escala das sub-bacias analisadas. Mostrando que o vizinho natural é um interpolador que produziu chuvas médias levando a um bom desempenho do modelo chuva vazão nos processos de calibração e verificação para bacias maiores que 5.414 Km².

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023
WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

5. Conclusões

A análise da validação cruzada permitiu concluir que, tanto pela média dos índices de correlação linear de Pearson (R), como pela média dos índices do Erro Médio Quadrático (REMQ), os interpoladores que apresentaram melhor desempenho para os 14 postos de chuva utilizados foram, em ordem decrescente: Vizinho Natural (R=0,68, REMQ=7,75), Inverso do Quadrado das Distâncias (R=0,66, REMQ=7,94), Triangulação Linear (R=0,64, REMQ=8,25) e Vizinho mais Próximo (R=0,58, REMQ=9,20). Estes resultados sugerem que a seleção do melhor interpolador, realizada pelo método da validação cruzada, indicou realmente o melhor resultado para o interpolador Vizinho Natural, visto que este foi confirmado quando aplicou-se a chuva média no modelo chuva-vazão, e os índice estatístico foram de $NS > 0,78$ na calibração do modelo e $NS > 0,55$ na verificação, para bacias de 563 km² apresentando resultados satisfatórios, e apresentou bom desempenho para áreas de drenagem acima de 5.414 km², com $NS > 0,89$ na calibração do modelo e $NS > 0,88$ no processo de verificação dos parâmetros do modelo.

7. Referências bibliográficas

ANDRÉASSIAN, V. ; PERRIN, C. ; MICHEL, C.; UART-SANHEZ, I.; LAVABRE, J. *Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. Journal of Hydrology*, Netherland: n.206, p. 206-223. 2001.

CARUSO, C.; QUARTA, F., *Interpolation Methods Comparison. Computers Mathematical application*. v.35, p. 109-126. 1998.

COLLISHONN, W; TUCI, C. E. M.. *Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, Belo Horizonte: v. 8, n. 3, p.27-39. 2003.

DAVIS, S. B.. Use and abuses of Cross Validation. *Mathematical Geology*, Netherlands: v. 19, nº. 3, p 249-258. 1997.

DE SOUZA¹, Vinicius Alexandre Sikora; FILHO, Otto Corrêa Rotunno; MOREIRA, Daniel Medeiros. AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL APLICADOS À ESTIMATIVA DE CHUVA EM REGIÃO AMAZÔNICA: BACIA DO RIO MADEIRA. *Revista de Geografia (Recife)*, v. 37, n. 2, 2020.

FALIVENE, O.; CABRERA, L.; TOLOSANA-DELGADO R.; SAEZ, A.. *Interpolation algorithm ranking using cross-validation and the role of smoothing effect: Acoazzone example. Computers & Geosciences*, United States: n.36, 512-519. 2010.

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

SUSTENTARE & WIPIS2023
WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento
23/11 | 100% online
24/11 | e gratuito

GOOVAERTS, P. *Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall*. **Journal of Hydrology**, Netherlands: n. 228, 113-129. 2000.

HABERLANDT, U.; KITE, G. W. *Estimation of daily space-time precipitation series for macro-scale watershed modeling*. **Hydrology. Process**, Canada: 12, 1419-1432. 1998.

MARQUES, Thaís G.; CELARO, Tiago Francisco; GIACOMELLI, Lucas V. Z.; RIBEIRO, Álvaro P.; SILVA, Vitor S. V. *Regionalização de Parâmetros de um Modelo de Chuva-Vazão entre Escalas Progressivas de Sub-bacias*. In: **XXVIII Congresso Latino-Americano de Hidráulica**, Argentina: 2018.

OLEA, R.. *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. **Kluwer Academic Publishers**, Boston: p.303. 1999.

SOARES, A.. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: IST Press. 2000.

SMITH, M. J.; GOODCHIL, M. F.; LONGLEY, A. P. A.. **Geospatial Analysis: comprehensive guide to principles, techniques and software tools**. London, Troubador Publishing Ltda.: ed. 3°. 2009.

SILVA, V. S. V.. **Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo chuva-vazão concentrado**. Dissertação de Mestrado. 156f., PPGRHS, IPH-UFRGS, 2011.

SILVA, Vitor S. V. *Estimativa de Vazões Mediante Regionalização de Parâmetros do Modelo IPH II na Bacia do Rio Ijuí-RS*. **XIII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), 2021.

TRAMBLAY, Y.; BOUVIE, C.; AYRAL, P.-A.; MARHANDISE, A.. *Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modeling efficiency and initial soil moisture conditions estimation*. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 11, Issue 1, p.157-170, 2011.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F.; MELLO, J. M.; ÁVILA, L. F. *Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

WILLMOT, C.J.. *On the validation of models*. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.