

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUPERFICIAIS NO PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS, UTILIZANDO INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E CONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES DE VAZÃO

Bruna Kiechaloski Miró Tozzi^{1}; Cláudio Marchand Krüger²; Carlos Eduardo Curi Gallego³; Rodolpho Humberto Ramina⁴; Rafael Fernando Tozzi⁵; Christian Taschelmayer⁶*

Resumo – A determinação das disponibilidades hídricas superficiais de uma bacia hidrográfica representa uma das etapas mais importantes do planejamento dos recursos hídricos. O presente artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia utilizada para o cálculo das disponibilidades hídricas superficiais que tem como diferencial a utilização da subdivisão da bacia hidrográfica em áreas de análise baseadas em ottobacias, por estas permitirem uma transição dos dados existentes para as divisões hidrográficas e proporcionarem a possibilidade de realização de diversos agrupamentos, conforme a finalidade da informação analisada. A metodologia permite obter os valores estimados das grandezas características nas áreas de análise, baseadas nas ottobacias nas quais a área principal de estudo é discretizada, e incorporá-los a um banco de dados georreferenciados. Além disso, esta metodologia também permite que seja realizada a espacialização das disponibilidades, com a locação das vazões em pontos específicos, representados pelos centroides das áreas de análise e, posteriormente, pela interpolação espacial dos valores para garantir uma maior continuidade dos mapas das grandezas características. A abordagem apresentada no presente artigo já foi utilizada em alguns trabalhos realizados nos últimos anos no Brasil, como na elaboração dos Planos de Recursos Hídricos do Estado do Paraná e do Estado do Tocantins.

Palavras-Chave – disponibilidade hídrica; interpolação; planejamento.

PROPOSED METHODOLOGY FOR SURFACE WATER AVAILABILITY DETERMINATION OF WATER RESOURCES PLANNING, USING SPATIAL INTERPOLATION AND SURFACE FLOW CONSTRUCTION

Abstract – The available surface water determination in a watershed is one of the most important stages of the water resources planning. This article aims to present a methodology for the surface water availability calculation whose differential use a subdivision of watershed in ottobacias based areas analysis, that they allow for a transition of data existing for hydrographic divisions and provide the possibility of making various groupings, as the purpose of the analyzed information. The methodology allows to obtain the estimated values of the characteristic quantities in the areas of analysis, ottobacias based on the main area in which the study is discretized, and incorporate them into a georeferenced database. Furthermore, this methodology also allows the spatial distribution for available surface water be held, with the lease of the flow at specific points, represented by the centroides of the analysis areas and, subsequently, the values spatial interpolation to ensure greater continuity of the characteristic quantities maps. The approach presented in this

¹ *Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, brunamiro@cobrape.com.br.

² Consultor da Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, claudio.kruger@terra.com.br.

³ Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, cadu@cobrape.com.br.

⁴ Consultor da Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, rhramina@uol.com.br.

⁵ Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, rafaeltozzi@cobrape.com.br.

⁶ Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, christiantaschelmayer@cobrape.com.br.

paper has been used in some work undertaken in recent years in Brazil, as in the elaboration of the Water Resources of the State of Paraná and Tocantins.

Keywords – water availability; interpolation; planning.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia diferenciada para o cálculo das disponibilidades hídricas superficiais, sempre necessárias no planejamento de recursos hídricos, principalmente na elaboração de Planos de Recursos Hídricos. O cálculo das disponibilidades hídricas superficiais é usualmente realizado a partir da utilização de dados disponíveis na bacia hidrográfica, definida pela Lei nº 9.433/97 como a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Neste sentido, a metodologia proposta adota a subdivisão do território em estudo em áreas de análise baseadas em *ottobacias*⁷, por estas permitirem uma transição dos dados existentes para as divisões hidrográficas e proporcionarem a possibilidade de realização de diversos agrupamentos, conforme a finalidade da informação analisada.

A metodologia permite obter os valores estimados das grandezas características nas áreas de análise, baseadas nas *ottobacias* nas quais a área principal de estudo é discretizada, e incorporá-los a um banco de dados georreferenciados. Em um Plano de Recursos Hídricos, como um plano de bacias hidrográficas, este procedimento é fundamental para as análises de planejamento, tais como a avaliação dos riscos de não atendimento à demanda em cada uma das áreas discretizadas.

A metodologia permite ainda a espacialização das disponibilidades hídricas, com a locação das vazões em pontos específicos, representados pelos centroides das áreas de análise e, posteriormente, a interpolação espacial dos valores para garantir uma maior continuidade dos mapas de vazões médias e disponibilidades hídricas. A metodologia proposta busca inovar a forma de cálculo das disponibilidades hídricas, de forma a contribuir com a análise dos recursos hídricos, facilitando a determinação da relação entre as disponibilidades e as demandas hídricas. Esta abordagem já foi utilizada em alguns trabalhos realizados nos últimos anos, como na elaboração dos Planos de Recursos Hídricos do Estado do Paraná e do Estado do Tocantins.

METODOLOGIA

A metodologia de cálculo das disponibilidades hídricas superficiais apresentada no presente artigo se baseia na interpolação espacial dos valores de referência obtidos, de modo a gerar superfícies de vazões que representem o comportamento hidrológico em qualquer ponto da bacia hidrográfica. Da mesma forma que ocorre com as metodologias convencionais, o primeiro passo para elaboração do cálculo das disponibilidades hídricas superficiais é a realização da coleta dos dados existentes no local. Em geral, utilizam-se os dados provenientes do banco de dados da Agência Nacional de Águas – ANA, denominado Hidroweb, complementados por informações obtidas de órgãos federais e estaduais. É importante ressaltar que todos os estudos já existentes para o local devem ser utilizados como balizadores do trabalho.

⁷ Bacias geradas pela aplicação da metodologia proposta por Pfafstetter, O. Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação. Rio de Janeiro, RJ: DNOS, 1989.

Quanto à determinação do período dos dados a serem utilizados, convém apontar inicialmente que, nos estudos hidrológicos, existem duas abordagens que podem ser adotadas na seleção das estações. A primeira define um período-base para todos os dados de vazão, descartando os períodos fora do mesmo e executando os preenchimentos de falhas que se fizerem necessários. A segunda utiliza as séries históricas integralmente, independente do período. Via de regra, nos casos em que as séries hidrológicas possuem um longo período em comum, com poucos dados a serem preenchidos, deverá ser utilizada a primeira abordagem. Quando existem dificuldades na escolha das estações devido à existência de falhas e períodos de observação distintos, a escolha das estações deverá ser baseada na segunda abordagem.

Depois de feita a seleção dos dados, têm-se as vazões específicas das grandezas hidrológicas mais relevantes a partir dos valores obtidos das séries hidrológicas dos postos selecionados para análise, comumente: vazões específicas médias de longo período (em $l/s.km^2$) e vazões específicas de 95% de permanência (em $l/s.km^2$). Estas vazões específicas representam o potencial hídrico de cada ponto da bacia, como mostra a Figura 1. Potencial Hídrico da Bacia. Estudos anteriores (CEHPAR, 1990, 1991 e 1995) e Kaviski, Krüger e Illich (1993, 1994a, 1994b) demonstraram a validade desta abordagem para estudos de regionalização hidrológica nos estados do Paraná e Santa Catarina.



Figura 1 – Potencial Hídrico da Bacia

O passo seguinte consiste em determinar o ponto onde deve ser “aplicada” a vazão total das estações fluviométricas na área de análise. Toma-se um cuidado especial com a locação dos mesmos, os quais são movidos para o centroide da sua área de drenagem. Deste modo, o valor de vazão medido em um ponto corresponde à contribuição de toda a área de drenagem. Para isso, com o auxílio de softwares de geoprocessamento ArcGIS, são traçadas as áreas de drenagem de todos os pontos, e então eles são movidos para os centroides dessas áreas, como mostra Figura 2. Locação dos Pontos no Centroide. Cabe ressaltar as áreas de drenagem devem ter seu traçado coincidente com as *ottobacias* características do local.



Figura 2 – Locação dos Pontos no Centroide

A mudança das vazões específicas das grandezas relevantes para o centroide da bacia hidrográfica é explicada matematicamente pelo raciocínio descrito a seguir.

A vazão total (Q) escoada numa bacia hidrográfica pode ser determinada pela integração da vazão específica local (q) ao longo da totalidade da superfície da bacia hidrográfica:

$$Q = \int_A q(x,y) dx dy, \quad (1)$$

ou pode ser determinada, em função da vazão específica média (q_m) e da área da bacia hidrográfica (A):

$$Q = q_m A. \quad (2)$$

Em pequenas bacias hidrográficas, o campo vazão específica pode ser aproximado como uma função linear:

$$q(x,y) = ax + by + c, \quad (3)$$

substituindo (3) em (1), resulta:

$$Q = a \int x dx dy + b \int y dx dy + c \int dx dy. \quad (4)$$

Pode-se verificar que:

$$A = \int_A dx dy; \quad x_c = \frac{1}{A} \int_A x dx dy, \quad e \quad y_c = \frac{1}{A} \int_A y dx dy, \quad (5)$$

onde x_c e y_c são, respectivamente, a abscissa e a ordenada do centroide da bacia hidrográfica.

Substituindo (5) em (4), resulta:

$$Q = A(ax_c + by_c + c), \quad (6)$$

$$Q = Aq(x_c, y_c). \quad (7)$$

Ou seja, quando o campo vazão específica é linear, a vazão total (Q) pode ser determinada como o produto da área total da bacia hidrográfica pelo valor da vazão específica no centroide.

Comparando (6) com (2), conclui-se que:

$$q_m = q(x_c, y_c). \quad (8)$$

Quando o campo vazão específica é não-linear, o resultado (7) não é exato, mas em geral pode ser considerado como uma boa aproximação.

Outra alternativa seria a locação dos pontos nos locais das estações. No entanto, ao optar pela locação no centroide da bacia, assume-se que aquele ponto representa o comportamento médio da sua área de análise, já que a vazão observada na exutória é originada da contribuição de toda a região a montante.

Depois de deslocadas as vazões características das grandezas relevantes para o centroide de sua área de drenagem, a interpolação de valores pontuais é realizada através do software ArcGIS, extensão *Spatial Analyst*, módulo *Topo to Raster*. O módulo *Topo to Raster* foi escolhido por utilizar uma técnica de interpolação por diferenças finitas, que combina a eficiência de uma interpolação local (por exemplo, o método do Inverso do Quadrado da Distância), com métodos de interpolação global, que utilizam uma superfície de continuidade, como o interpolador *Kriging* (Mccoy e Johnston, 2002). Este interpolador produz superfícies contínuas e com grande robustez (com menos erros de inter e extrapolação). Os arquivos de saída são no formato de imagens *raster*, como mostra a Figura 3. Superfícies de Vazões a seguir.

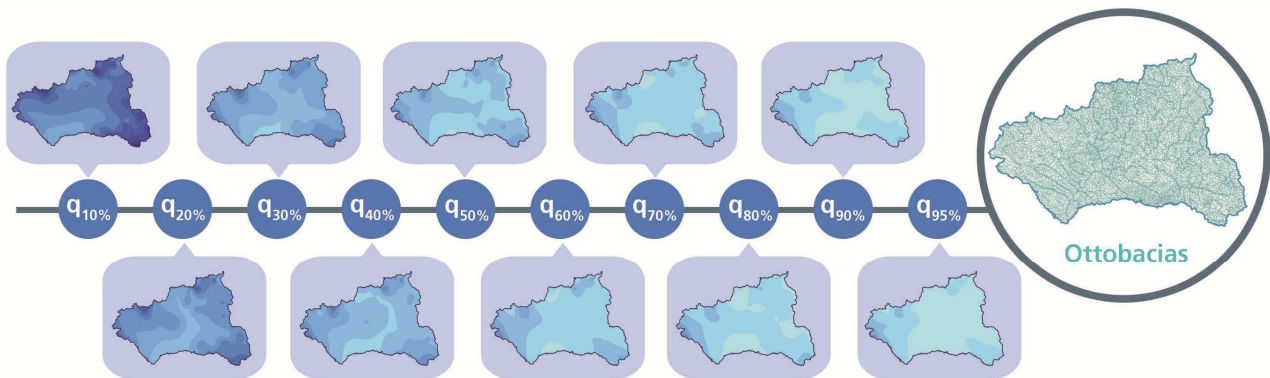


Figura 3 – Superfícies de Vazões

Apesar de haver influência de fatores locais, principalmente relativos à hidrogeologia e cobertura do solo, na escala de Planos de Recursos Hídricos a distribuição espacial da disponibilidade hídrica é fortemente influenciada pela precipitação, a qual tem um padrão espacial com variações contínuas. Estudos detalhados em pequenas bacias poderiam evidenciar variações espaciais mais acentuadas de disponibilidade hídrica superficial, tendo em vista a possível ocorrência de padrões diferenciados de cobertura do solo, relevo e hidrogeologia em uma escala de trabalho maior.

A partir da distribuição espacial dessas variáveis, podem ser obtidas pelo software ArcGIS as médias das variáveis para cada *ottobacia*. A partir dos valores médios das *ottobacias*, pode-se calcular a disponibilidade hídrica superficial em qualquer ponto de um rio. Para isso um procedimento computacional implementado no programa ArcGIS realiza a integração de todas as *ottobacias* a montante do ponto, calculando assim uma média ponderada das disponibilidades em toda a região afluente ao ponto de interesse. A agregação das diversas variáveis é realizada pela média ponderada dos dados, onde a variável na bacia desejada é igual ao somatório das variáveis nas *ottobacias* pertencentes à bacia desejada, multiplicadas pelas suas áreas correspondentes, dividido pela área total da bacia desejada, como mostra a equação (9) abaixo:

$$X_b = \frac{\sum(X_o \cdot A_o)}{A_{total}} \quad (9)$$

Onde:

X_b = variável na bacia (mm);

X_o = variável na *ottobacia* (mm);

A_o = área da *ottobacia* (km²);

A_{total} = área total da bacia (km²).

Este processo permite que todas as grandezas características sejam incorporadas a um banco de dados por *ottobacias*, permitindo assim a obtenção dos valores de vazões em qualquer ponto do local escolhido.

CONCLUSÃO

Instrumentos de planejamento de recursos hídricos, tais como os Planos Estaduais de Recursos Hídricos e os Planos de Bacia Hidrográfica, são dinâmicos, devendo sempre ser realizados de forma a refletir situações presentes e buscar se antecipar a situações futuras.

Ao determinarem as disponibilidades hídricas de suas áreas de interesse, estes instrumentos deverão determinar vazões – expressas por diferentes parâmetros – existentes nos exutórios das principais bacias afluentes (que correspondem a unidades de planejamento hídrico) e em pontos notáveis selecionados.

Enquanto a maioria dos procedimentos usuais de determinação das disponibilidades hídricas exige a determinação concentrada das vazões em determinados pontos dos rios, com maior escala de detalhamento, a metodologia proposta neste artigo se baseia em uma abordagem espacial distribuída da disponibilidade hídrica superficial.

Não obstante, a modelagem detalhada continuará sendo essencial na solução de conflitos de uso e outorgas de recursos hídricos, com a determinação de esquemas topológicos para o balanço de vazões e volumes, isso exige um maior nível de detalhamento, assim como modelagens com programas especializados. Para a construção de estudos de planejamento, métodos mais diretos podem ser de grande valia para permitir que os prazos sejam cumpridos, bem como trabalhar com bases de dados imperfeitas, como é a realidade de grande parte das bacias hidrográficas brasileiras.

Em resumo, a metodologia proposta para cálculo de disponibilidade hídrica privilegia a espacialização dos parâmetros característicos de forma a respeitar a continuidade da variação espacial das vazões específicas na área do estudo, realizado em uma escala que compreende grandes áreas. Esta abordagem é eficaz para melhorar os processos de planejamento, dando mais celeridade aos diagnósticos, apoiando a elaboração dos planos de recursos hídricos dentro de seus prazos e com resultados efetivos.

REFERÊNCIAS

- CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROF. PARIGOT DE SOUZA (1990). *HG-64 - Avaliação do potencial hídrico da região metropolitana de Curitiba*. Curitiba.
- CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROF. PARIGOT DE SOUZA (1991). *HG-68 - Regionalização de vazões em pequenas bacias hidrográficas no Estado de Santa Catarina*. Curitiba.
- CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROF. PARIGOT DE SOUZA (1995). *HG-77 - Regionalização de vazões em pequenas bacias hidrográficas do Estado do Paraná*. Curitiba.
- COBRAPE. Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (2009). Diagnóstico das Disponibilidades e Demandas Hídricas e Resultados das Oficinas Participativas. In *Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins*. Palmas.
- COBRAPE. Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (2010a). Aspectos Estratégicos para a Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais. In *Plano Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais*. Belo Horizonte.
- COBRAPE. Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (2010b). Cenários Alternativos. In *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Paraná*. Curitiba.
- COBRAPE. Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (2013). Prognóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. In *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba*. Brasília.
- KAVISKI, E.; KRÜGER, C. M.; ILLICH, I. (1993). Regionalização de vazões médias em pequenas bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina. In *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Gramado, Nov. 1993.
- KAVISKI, E.; KRÜGER, C. M.; ILLICH, I. (1994a). Computational method for regional analysis of flows in small watersheds. In *First International Conference on Hydroinformatics*, Delft, Holanda.
- KAVISKI, E.; KRÜGER, C. M.; ILLICH, I. (1994b). Regionalização de vazões em pequenas bacias hidrográficas no Estado de Santa Catarina. In *Anais do XVI Congresso Latino Americano de Hidráulica*, Santiago, Chile.
- MCCOY, J.; JOHNSTON, K. (2002). *Using ArcGIS Spatial Analyst*. New York – NY: ESRI, 232 p.
- PFAFSTETTER, O. (1989). *Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação*. DNOS Rio de Janeiro - RJ: