

## HIDROGRAMA UNITÁRIO SINTÉTICO: UM PANORAMA DOS PRINCIPAIS MÉTODOS E ALGUNS RESULTADOS

*Andréia Pedroso<sup>1\*</sup>; Michael Männich<sup>2</sup>; Fernando Helmuth Syring Marangon<sup>3</sup>*

**Resumo** – Os hidrogramas unitários sintéticos (HUS) são ferramentas de grande utilidade para a estimativa de vazões máximas em bacias hidrográficas que não dispõem de monitoramento de vazão. Entretanto, apesar da aplicação funcional, esses métodos possuem muitas incertezas e, dado o grau de empirismo e subjetividade envolvido, nem sempre produzem resultados compatíveis com a realidade. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi revisar os principais métodos de HUS existentes e alguns resultados obtidos em diversos trabalhos, principalmente referentes a bacias hidrográficas pequenas. Constatou-se que desde a sua criação até o presente momento, o método do HUS foi submetido a diversas modificações e aprimoramentos, resultando em modelos mais acurados na determinação dos parâmetros e forma dos hidrogramas, melhorando também a aplicabilidade desses modelos.

**Palavras-Chave** – Hidrograma unitário sintético, métodos.

## SYNTHETIC UNIT HYDROGRAPH: AN OVERVIEW OF MAIN METHODS AND SOME RESULTS

**Abstract** – The synthetic unit hydrograph (SUH) are a handy tool for estimation of maximum flows in basins where no flow data is available. However, despite the functional use, these methods have many uncertainties and due the level of empiricism and subjectivity involved, the results are not all compatible with the real situations. In such context, the objective of this study was to review the main SUH methods and some results obtained for many studies, mainly related to small basins. It has been found that from its creation to the present, SUH method has undergone several changes and improvements, resulting in more accurate models in determining the hydrograph parameters and shape, also improving the applicability of these models.

**Keywords** – Synthetic unit hydrograph, methods.

<sup>1</sup> Engenheira ambiental, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná (PPGERHA/UFPR). E-mail: pedroso.ea@gmail.com.

<sup>2</sup> Engenheiro ambiental, mestre e doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Professor Adjunto no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA/UFPR). Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFPR). E-mail: mannich@ufpr.br.

<sup>3</sup> Bacharel e mestre em Geografia, doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia (UFPR). E-mail: fhsmarangon@gmail.com

## INTRODUÇÃO

Medidas, estimativas e modelagem de vazão de um rio são princípios fundamentais para a gestão dos recursos hídricos, bem como análises técnicas e científicas no projeto de estruturas hidráulicas, predição de respostas eco-hidrológicas e análise de risco de inundação (Bras, 1990). Dentre as vazões características necessárias para os projetos de recursos hídricos, destaca-se a importância da determinação de vazões máximas de projeto associadas a riscos, segurança de instalações e otimização de investimentos.

Segundo Tucci (1998), devido aos altos custos de implantação, dificilmente uma rede hidrometeorológica cobrirá todos os locais necessários ou possuirá registros históricos suficientes para subsidiar análises estatísticas de vazões máximas, especialmente em bacias hidrográficas com áreas de drenagem reduzidas, menos visadas para o aproveitamento hídrico e para as quais os investimentos são menos direcionados. Usualmente, parte-se da premissa que os custos de medição podem ser superiores aos custos decorrentes do superdimensionamento dos projetos de infraestrutura associados.

Para preencher esta lacuna as vazões máximas podem ser estimadas a partir de modelos hidrológicos de transformação de processos temporais de chuva (hietograma) em vazão (hidrograma); dividindo-se as ordenadas do hidrograma pelo volume de chuva efetiva obtém-se um hidrograma unitário (HU) que pode ser aplicado a outras chuvas efetivas de mesma duração (Bras, 1990).

Fundamentalmente, a determinação do HU também depende da disponibilidade de registros de vazões. Para tratar da ausência de dados foram desenvolvidas técnicas para relacionar características geométricas do hidrograma a características físicas das bacias hidrográficas, permitindo que, uma vez conhecidos esses parâmetros, curvas com volume unitário pudessem ser traçadas, representando uma aproximação aceitável da função-resposta do sistema (Bras, 1990). Diante dessa possibilidade e da frequente necessidade de obtenção de informações de vazões em rios desprovidos de estações hidrométricas, surgiu o estudo e o desenvolvimento de métodos para a obtenção do chamado hidrograma unitário sintético (HUS), independente da existência de dados hidrológicos de vazões, baseados nas relações geométricas dos hidrogramas e nas principais características das bacias hidrográficas (Pinto *et al.*, 1976).

De acordo com Hoffmeister e Weisman (1977), a essência do HUS segue os conceitos teóricos do HU. O primeiro HUS foi desenvolvido por Snyder, em 1938, passando por diversas modificações posteriormente. A maioria dos métodos desenvolvidos são baseados em relações obtidas através de análises de dados de um grande número de eventos e bacias hidrográficas, diferindo em termos das relações estabelecidas e dos procedimentos adotados (Bras, 1990; Singh *et al.*, 2014).

Por se tratarem de métodos simples e práticos, os HUS passaram a ser amplamente utilizados na realização de estudos hidrológicos (Silveira, 2016). Por outro lado, esses métodos possuem muitas incertezas que, em geral, superestimam as vazões máximas (Tucci, 1998; Cunha *et al.*, 2015).

A vantagem obtida pela simplicidade da aplicação dos HUS se contrapõe aos erros relacionados aos resultados obtidos, sendo necessários maiores aprimoramentos para a utilização destes. Além disso, previamente à sua utilização é necessária a aplicação de métodos de HUS em bacias hidrográficas semelhantes à de interesse e com dados de monitoramento para a melhoria dos resultados e, conseqüentemente, a validação do método para a referida área. Frente às diversas propostas de obtenção de HUS, a análise comparativa de resultados obtidos por diferentes métodos se torna importante por fornecer subsídios para a definição do mais adequado para a modelagem da região de interesse e a obtenção de resultados mais confiáveis.

Portanto, o objetivo deste estudo foi revisar os principais métodos de HUS existentes e alguns resultados obtidos em diversos trabalhos, principalmente referentes a bacias hidrográficas consideradas pequenas do ponto de vista de área de drenagem.

## HUS – PRINCIPAIS MÉTODOS E RESULTADOS SECUNDÁRIOS OBTIDOS

A aplicação de qualquer modelo HU está sujeita a três proposições básicas (Pinto *et al.*, 1976). Primeiramente, considera-se que chuvas de mesma duração e diferentes intensidades originam hidrogramas com ordenadas proporcionais aos volumes totais escoados. Além da linearidade, o conceito ainda assume que a chuva é uniformemente distribuída no tempo e espaço e é independente das precipitações anteriores. Conforme constatado por Bras (1990), isso limita a aplicação da técnica a chuvas uniformes sobre áreas relativamente pequenas.

O método do HU foi apresentado primeiramente por Sherman em 1932, ao observar, na análise de um grande número de eventos, certa regularidade nos hidrogramas de cheias e traduzir, através de equações empíricas, o comportamento do escoamento superficial resultante de determinada chuva. Posteriormente, o método foi aperfeiçoado por diversos outros autores, porém mantendo a ideia fundamental de se estabelecer relações entre os parâmetros do hidrograma e as características das bacias hidrográficas (Pinto *et al.*, 1970; Hoffmeister e Weisman, 1977). Dentre os métodos existentes, podem ser citados os estudos de Bernard, McCarty, Snyder, Clark, Taylor e Schwarz, Commons, Soil Conservation Service, Mitchell, Getty e McHughs, Dooge, Warnock (Pinto *et al.*, 1976).

Apesar das modificações, os estudos obedecem à mesma sistemática de desenvolvimento: i) seleção de eventos individuais com estruturas simples; ii) separação do escoamento de base; iii) definição da duração da chuva efetiva; iv) seleção de pares chuva-vazão de igual duração da chuva efetiva; v) definição quantitativa das características físicas da bacia hidrográfica a serem consideradas; vi) correlação entre as características físicas e o hidrograma de cheia e vii) representação gráfica ou matemática das correlações mais significativas, permitindo sua utilização para a predição do hidrograma unitário (Bras, 1990; Pinto *et al.*, 1976).

As características mais importantes do hidrograma, de acordo com Bras (1990), são a vazão de pico, tempo para o pico e tempo de base do HU, além da duração da chuva efetiva. Já as características físicas das bacias hidrográficas influenciam, em maior ou menor grau, no comportamento do escoamento e contribuem para a forma final do HU. Dentre as principais características físicas das bacias hidrográficas que influenciam o hidrograma resultante pode-se citar: geometria, área de drenagem, declividade, rugosidade do canal e densidade de drenagem da rede. Adicionalmente, outros fatores físicos da região que influenciam são recobrimento vegetal, tipo de solo e capacidade de infiltração.

O primeiro modelo de HUS foi apresentado por Snyder, sendo na sequência modificado por Taylor e Schwartz e pelo U.S. Army Corps of Engineers. Entretanto, de acordo com Singh *et al.* (2014), os estudos hidrológicos em bacias sem dados de monitoramento passaram a receber maior consideração aproximadamente a partir da década de 1990.

Inicialmente, Chow *et al.* (1988) classificaram os HUS em três tipos: a) aqueles que relacionam as características hidrológicas às características da bacia hidrográfica (HUS de Snyder); b) aqueles baseados em um hidrograma unitário adimensional (HUS do Soil Conservation Service – SCS); e c) aqueles baseados nos modelos de armazenamento das bacias hidrográficas (HUS de Clark).

Nessa mesma compreensão, Hoffmeister e Weisman (1977) separaram os diversos métodos de HUS em dois grupos, adimensionais (SCS) e empíricos (Snyder e Commons). Para os modelos ditos adimensionais, o hidrograma é resumido a uma curva padrão com coordenadas ou parâmetros

adimensionais, eliminando os efeitos do tamanho e forma da bacia hidrográfica. O hidrograma unitário triangular do SCS é o mais conhecido desse tipo; outros hidrogramas adimensionais foram desenvolvidos, porém ainda apresentavam notável correlação com a forma e tamanho das bacias. Em contrapartida, hidrogramas resultantes de equações empíricas relacionam as propriedades do hidrograma às características morfométricas das bacias. Nesse grupo, destacam-se os métodos de Snyder e Commons.

Hoffmeister e Weisman (1977) ainda analisaram comparativamente a acurácia dos métodos do SCS, de Snyder e de Commons em duas regiões hidrológicas da Nova Zelândia, para bacias hidrográficas com áreas de drenagem variando de 5 a 520 km<sup>2</sup>. À luz dos resultados obtidos, constataram que no método do SCS as vazões de pico do hidrograma variaram de 15% abaixo a 34% acima dos valores médios observados. Além disso, o formato do hidrograma não se aproximou daquele obtido para os HU determinados. Quanto ao HUS de Snyder, os coeficientes das equações apresentaram variações pequenas para bacias hidrográficas de uma mesma região, indicando se tratarem de uma propriedade regional. Ademais, o método superestimou em até 25% a vazão de pico em todos os casos, sendo considerado, no entanto, conservador e aceitável dentro da faixa de erro esperada para HU empíricos. Ainda, foi constatado que a utilização de informações de uma segunda bacia para calibrar os coeficientes do modelo melhorou os resultados em todos os casos. Com relação ao método de Commons, a vazão de pico estimada variou de 21% abaixo a 26% acima dos valores médios observados, além da discrepância de formatos entre os hidrogramas estimado e observado, principalmente no trecho de recessão. Dessa maneira o método de Snyder apresentou os melhores resultados no que tange ao desenvolvimento de HUS nas regiões analisadas. Outrossim ressalta-se que os erros no estudo hidrológico realizado podem ser oriundos de diversas fontes e etapas, tais como imprecisões nas leituras de cotas, curvas de descarga e registros de chuvas, aplicação da teoria do HU a eventos reais e variações hidrológicas locais.

Singh *et al.* (2014) classificaram os métodos em quatro grupos: tradicional, conceitual, probabilístico e geomorfológico. Os modelos de HUS tradicionais baseiam-se em equações empíricas cujos coeficientes variam em ampla faixa de valores. Os modelos conceituais são baseados na equação da continuidade e no armazenamento linear. Já os modelos probabilísticos, ou baseados em funções de distribuição de probabilidade, utilizam uma abordagem paramétrica e aplicam funções de densidade para derivação dos HUS. Por fim, os modelos geomorfológicos utilizam as características geomorfológicas das bacias hidrográficas para desenvolver hidrogramas unitários instantâneos. A Tabela 1 reproduz de Singh *et al.* (2014) o resumo do levantamento dos métodos de HUS e respectivos autores.

Tabela 1 – Métodos de HUS segundo Singh *et al.* (2014)

Método	Autor
<b>Hidrogramas Unitários Sintéticos Tradicionais</b>	
HUS de Snyder	Snyder (1938)
Modelo de Taylor e Schwarz	Taylor e Schwarz (1952)
Modelo adimensional Soil Conservation Service	SCS (1957)
<b>Hidrogramas Unitários Sintéticos Convencionais</b>	
HUI de Clark	Clark (1945)
HUI de Nash	Nash (1957)
HUI de Dooge	Dooge (1959)
HUI Não-Linear	Singh (1964)
Cascata Paralela Urbana	Diskin et al. (1978)

<b>Método</b>	<b>Autor</b>
Modelo Híbrido	Bhunya et al. (2005)
Modelo Híbrido Extendido	Singh et al. (2007)
<b>Hidrogramas Unitários Sintéticos Probabilísticos</b>	
Gamma Dois Parâmetros (2PGD)	Nash (1959), Aron e White (1982)
2PGD Gray	Gray (1961)
2PGD Croley	Croley (1980)
Transmutação	Singh (2000)
Gamma Simplificado	Bhunya et al. (2003)
Gamma Dois Parâmetros (2PGD) e Beta Três Parâmetros (3PBD)	Haktanir e Sezen (1990)
Gamma Dois Parâmetros (2PGD), Beta Três Parâmetros (3PBD), Weibull 2 Parâmetros (2PWD), Distribuição Qui-Quadrado Um Parâmetro (1CSD) e Distribuição Fréchet Dois Parâmetros (2PFD)	Koutsoyiannis e Xanthopoulos (1989), Bhunya et al. (2007, 2008, 2009)
Log Normal Dois Parâmetros, Gamma Dois Parâmetros, Gamma Inversa Dois Parâmetros, Beta Três Parâmetros, Kumaraswamy Três Parâmetros, <i>Two-sided power</i> Três Parâmetros, Pareto Dois Parâmetros, Gaussian Inversa Dois Parâmetros, F Dois Parâmetros, Weibull Dois Parâmetros e Distribuição de Fréchet Dois Parâmetros	Nadarajah (2007)
Nakagami-m	Sarkar et al. (2010), Sarkar e Rai (2011)
<b>Hidrogramas Unitários Sintéticos Geomorfológicos</b>	
HUI Geomorfológico (HUIG)	Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979)
HUI Geomorfo-climático	Rodríguez-Iturbe et al. (1982)
Gamma	Duchesne et al. (1997)
HUIG Hidráulico	Kirshen e Bras (1983)
Geomorfológico Cascata Não-Linear	Bérod et al. (1995)
Redes Neurais Artificiais Geomorfológico	Zhang e Govindaraju (2003)
HU Geomorfológico de Nash	Nourani et al. (2009)
HUI da Função Largura	Kirkby (1976),
HUI Parcimonioso	Grimaldi et al. (2012)
HUI da Função Largura Re-Escalada	Rinaldo et al. (1995)
Algoritmos de Caracterização Automatizada da Rede de Fluxo	O'Callaghan e Mark (1984)
Estudos de HUIG baseados em Modelo Digital do Terreno	Snell e Sivapalan (1994)

Segundo Singh *et al.* (2014), os métodos tradicionais de HUS de Snyder e do SCS e os modelos conceituais de HUS de Nash e Clark são os mais utilizados em estudos hidrológicos, nas mais diversas regiões, enquanto os outros modelos necessitam ser melhor explorados para que seja possível uma análise acerca da sua precisão e aplicabilidade. Já os modelos probabilísticos são considerados importantes na medida em que abordagem probabilística evita a subjetividade do formato do HU para satisfazer a restrição do volume unitário. Por fim, o desenvolvimento dos modelos HUS geomorfológicos possibilitou a determinação mais precisa dos parâmetros e forma dos hidrogramas, uma vez que os avanços na precisão dos modelos digitais de elevação aplicados simultaneamente a

softwares de extração das informações geomorfológicas das bacias hidrográficas melhoraram consideravelmente a aplicabilidade desses modelos.

Com relação ao estudo dos HUS no Brasil, Tucci (2003) avaliou que as limitações do método conduzem a diferentes hidrogramas, de acordo com cada evento, de modo que a estimativa de um HU médio e de HUS é subjetiva. A partir de dados de bacias hidrográficas com áreas de drenagem inferiores a 50 km<sup>2</sup> e predominantemente urbanas, Tucci (2003) determinou novas equações para a vazão de pico, tempo de pico e tempo de concentração para alguns eventos representativos de inundações pequenas e médias, aproximadamente até 10 anos de tempo de retorno, cujos resultados foram comparados com o HUS do SCS, com o tempo de concentração calculado por dois métodos: com base na declividade e comprimento do rio corrigidos em função dos fatores de canalização e urbanização e pelo método cinemático. Observou-se que o HUS do SCS para o tempo de concentração calculado em função da declividade e comprimento do rio subestimou o pico e superestimou o tempo de concentração em relação aos HU representativos, enquanto os resultados do tempo de concentração do método cinemático se aproximaram dos HU representativos.

Ainda com relação às limitações dos HUS, segundo Cunha *et al.* (2015), vem sendo observado que a aplicação destes modelos tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico, principalmente quando as magnitudes dos eventos são maiores, o que tem resultado no superdimensionamento de estruturas hidráulicas, não condizentes com a escala das bacias hidrográficas e com as observações de enchentes locais. Embora os resultados estejam a favor da segurança, os mesmos podem inviabilizar as obras ou instalações projetadas devido ao alto custo das estruturas hidráulicas ou de contenção de inundações superdimensionadas.

Adicionalmente, estudos realizados para avaliar os parâmetros definidos nos procedimentos existentes de obtenção de HUS, a fim de verificar a validade dos mesmos para bacias hidrográficas com características diferentes daquelas onde foram executados os estudos que deram origem aos modelos, reafirmam a necessidade de maior prudência ao se aplicar os modelos de obtenção de HUS definidos com dados empíricos regionais (Silveira, 2016).

## CONCLUSÕES

A utilização de HUS associados a modelos digitais do terreno, uso do solo e dados de precipitação expandiu a possibilidade de obtenção de estimativas de vazão em bacias hidrográficas desprovidas de monitoramento contínuo.

À luz dos estudos analisados, destaca-se que, em um contexto geral, os resultados demonstram que a aplicação dos HUS usualmente superestima as vazões de pico, sobretudo em eventos de grande magnitude.

Ademais, pode-se observar que desde a sua criação, em 1938, até o presente momento, o método do HUS foi submetido a diversas modificações e aprimoramentos, resultando na disponibilidade de uma vasta gama de modelos. Todavia, apesar do desenvolvimento em profusão de novos métodos, a robustez e praticidade de aplicação de HUS tradicionais tornam os mesmos ainda largamente aplicáveis para finalidades em que não se necessita de estimativas com grande precisão, mas sim de uma aproximação de ordem de grandeza de vazões. Já para estudos hidrológicos nos quais é necessário maior acurácia das estimativas, como estudos de inundação em obras que oferecem riscos à vida humana e/ou grandes prejuízos materiais, recomenda-se a aplicação de modelos mais detalhados e que consideram a influência de mais processos.

Entretanto, considerando que um modelo matemático, por mais complexo e detalhado que seja, será sempre uma aproximação da realidade, ressalta-se a importância da verificação da representatividade dos resultados obtidos a partir da aplicação de HUS.

## REFERÊNCIAS

- BRAS, R. L. (1990). *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1988) *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- CUNHA, S. F.; OLIVEIRA e SILVA, F. E.; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. (2015). Avaliação da Acurácia dos Métodos do SCS para Cálculo da Precipitação Efetiva e Hidrogramas de Cheia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 837 - 848, out./dez.
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; SERINALDI, F. (2012). A Continuous Simulation Model for Design Hydrograph Estimation in Small and Ungauged Watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 57:6, p. 1035-1051, ago.
- HOFFMEISTER, G.; WEISMAN, R. N. (1977). Accuracy of Synthetic Hydrographs Derived From Representative Basins. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22:2, p. 297-312, dez.
- PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. (1976). *Hidrologia Básica*. São Paulo: Edgard Blucher.
- SILVEIRA, A. L. L. da. (2016). Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 21 n. 1, p. 46 - 52, jan./mar.
- SINGH, P. K.; MISHRA, S. K.; JAIN, M. K. (2014). A Review of the Synthetic Unit Hydrograph: From the Empirical UH to Advanced Geomorphological Methods. *Hydrological Sciences Journal*, 59:2, p. 239-261, fev. 2014.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- TUCCI, C. E. M. (2003). Parâmetros do Hidrograma Unitário para bacias urbanas brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.8, n.2, p. 195-199.