

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE RECESSÃO A PARTIR DE DADOS DE GRAVIMETRIA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA - PR

Ana Paula Muhlenhoff¹ ; Rodrigo Caduro Dias de Paiva² & Tobias Bernward Bleninger³ & Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes⁴

RESUMO – A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante a tomada de decisões em termos de gestão do recurso hídrico disponível. O uso das informações obtidas a partir de sensoriamento remoto tem ganhado espaço nos trabalhos de calibração e validação de modelos hidrológicos, especialmente em regiões sem monitoramento ‘in situ’. A alternativa ainda pouco explorada é a da obtenção ‘a priori’ de parâmetros comuns a diversos modelos hidrológicos, muitas vezes características físicas da bacia, mas sem possibilidade de monitoramento, a partir dos dados de sensoriamento remoto. Neste trabalho, é apresentada uma primeira investigação sobre esta possibilidade para o coeficiente de recessão do aquífero, parâmetro comum aos modelos. A estimativa é feita a partir dos dados de armazenamento total da bacia, derivados dos dados coletados pelos satélites da missão GRACE. Os resultados obtidos desta primeira aplicação do método ainda precisam ser verificados. Outras áreas de estudo devem ser utilizadas e a comparação com resultados do parâmetro calibrado por modelos hidrológicos já implementados é uma alternativa para a futura validação da metodologia.

ABSTRACT – Hydrological modeling is an important tool towards making decisions related to the management of available water resources. Information obtained through remote sensing has been more used in researches of hydrologic models calibration and validation. This is true especially in regions without ‘in situ’ monitoring. A less explored alternative is obtaining ‘a priori’ common parameters to many hydrologic models. Frequently they are physic basin characteristics, but without monitoring possibility by remote sensing data. On this work, it is presented a first investigation about this possibility for the aquifer recession coefficient, which is a common parameter in models. The estimative is calculated through total basin storage data from numbers collected by satellites of GRACE mission. The obtained results on this first method application still need to be verified. Other areas of study must be applied. Also, the comparison with the calibrated parameter results through hydrologic model already implemented is an alternative for future validation of the methodology.

Palavras-Chave – GRACE; Recessão, Modelagem.

¹ Doutoranda no PPGERHA, Universidade Federal do Paraná. Email: anapaula.dhs@ufpr.br

² Professor no IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: rodrigo.paiva@ufrgs.br

³ Professor no PPGERHA, Universidade Federal do Paraná. E-mail: tobias.bleninger@gmail.com

⁴ Professor no PPGERHA, Universidade Federal do Paraná. E-mail: cris.dhs@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Cada vez mais os dados obtidos através das tecnologias desenvolvidas para o sensoriamento remoto tem sido aplicados a problemas de hidrologia (Ha et al., 2018; Bastiaanssen *et al.*, 2007; Melesse *et al.*, 2016; Serrat-Capdevila, *et al.*, 2014; Dembele *et al.*, 2016). O uso simultâneo e combinado de produtos de sensoriamento remoto para a calibração de modelos hidrológicos não somente com base nas observações de vazão ainda é um tema que não foi esgotado em suas possibilidades (Oliveira et al., 2017; Nijzink et al., 2018).

Nijzink *et al.* (2018) mostraram que a construção de modelos hidrológicos com múltiplas fontes de dados simultaneamente pode ser uma alternativa satisfatória para determinar os parâmetros do modelo utilizado numa situação em que faltem dados *in situ* para a calibração. Por resultados, obtiveram reduções significativas no espaço amostral de possibilidades de valores aos parâmetros quando da utilização conjunta de todas as informações selecionadas para este estudo, de forma especial as informações adicionais inseridas pelos dados de armazenamento total de água, TWS, disponibilizados pelo GRACE.

Os parâmetros dos modelos de base física representam uma característica da bacia que uma vez não sendo possível ser medida é determinada no processo de calibração. Desta forma, além de utilizar os dados obtidos por sensoriamento remoto no processo de validação e calibração de modelos hidrológicos (Nijzink *et al.*, 2018), trabalhos como os de Macedo *et al.* (2019) usaram os dados do GRACE também para estudar a recessão na bacia do rio Mississippi. Este trabalho (Macedo *et al.*, 2019), abre a possibilidade para a partir dos dados de sensoriamento remoto, criar alternativas para a determinação dos parâmetros dos modelos hidrológicos ‘*a priori*’.

Neste caso, o problema da calibração do modelo passaria a ter tantos graus de liberdade a menos quantos parâmetros fossem possíveis determinar a partir das observações e informações que fossem possíveis derivar das medidas feitas pelos sensores remotos. A partir desta hipótese, o presente trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para a determinação *a priori* do coeficiente de recessão de uma bacia hidrográfica a partir de uma correlação com os dados de armazenamento total de água (TWS) disponibilizados como produtos da missão GRACE.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta consiste basicamente: (i) no estabelecimento da relação entre os valores de TWS (Total Water Storage) medidos pelo GRACE e o coeficiente de recessão da bacia hidrográfica; (ii) na comparação dos valores obtidos na etapa anterior com aqueles obtidos do procedimento usual de calibração de um modelo hidrológico. O modelo hidrológico escolhido para implementação na bacia hidrográfica do Rio Passaúna, escolhida como área de estudo, é o Modelo

de Grandes Bacias – MGB, descrito a seguir, bem como cada uma das etapas para elaboração do trabalho.

Área de Estudo

O rio Passaúna é afluente pela margem direita do Alto rio Iguaçu e drena uma área de cerca de 217km². Localizada no primeiro planalto paranaense, com altitude média de 900 m, tem sua nascente no município de Almirante Tamandaré, e percorre cerca de 57 km definindo o limite territorial entre Curitiba e os municípios de Campo Magro e Campo Largo. Em sua porção baixa corta parte do município de Araucária (Figura 1). O reservatório existente na bacia hidrográfica configura-se como manancial de abastecimento de água para Curitiba e Região Metropolitana e é de responsabilidade da Companhia de Saneamento do Estado do Paraná – SANEPAR (Silva Filho, 2010).

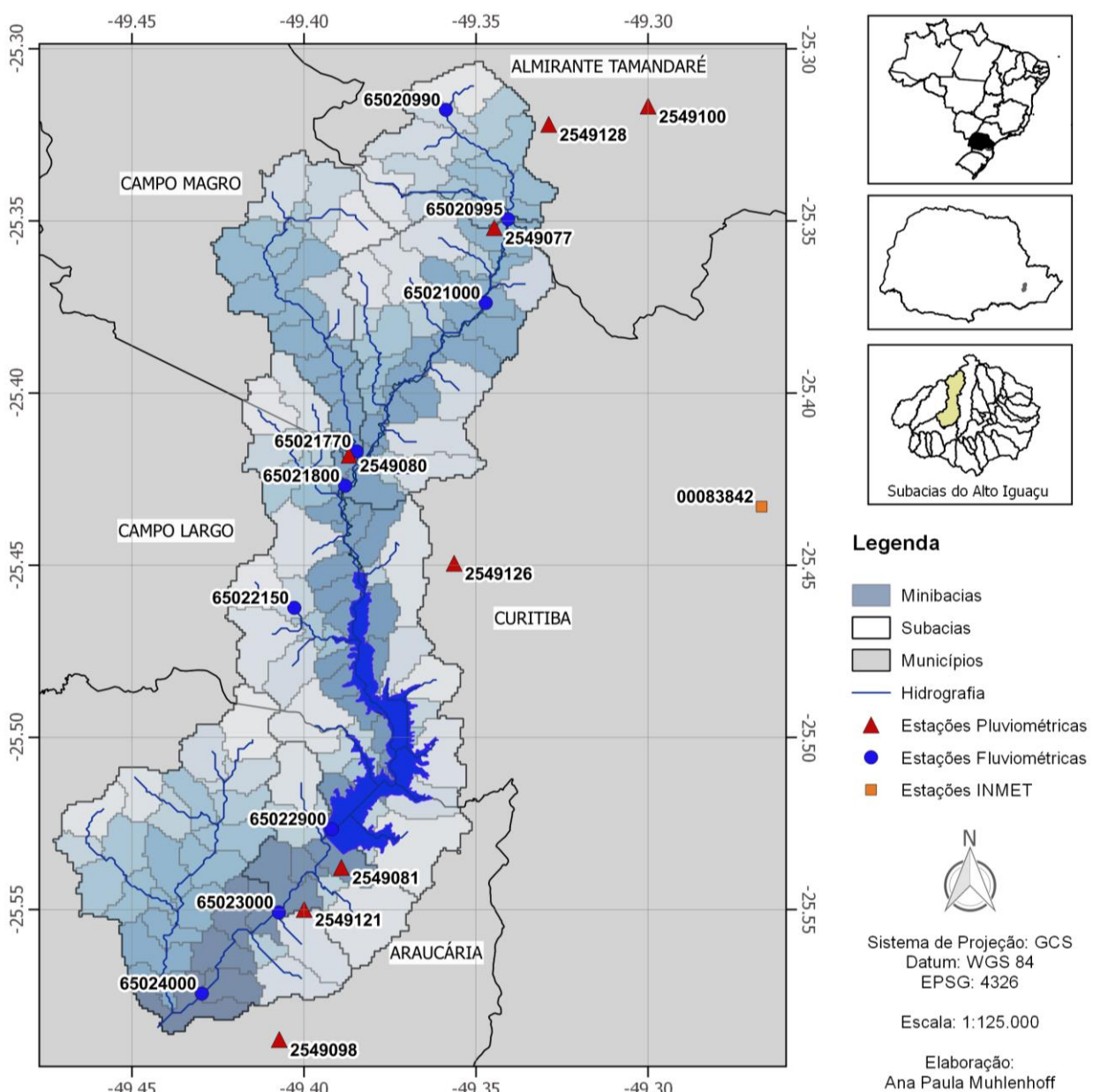


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Passaúna na região metropolitana de Curitiba

Missão GRACE e GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment – Follow)

A missão *GRACE* foi lançada em março de 2002 pelas agências espaciais dos Estados Unidos da América (NASA) e Alemanha (DLR). A missão *GRACE-FO*, que deu continuidade à primeira, teve início em 2018 (NASA, 2019). O objetivo principal da missão foi o de permitir a obtenção do campo gravitacional terrestre. É composta por dois satélites idênticos separados por uma distância de cerca de 220 km, numa mesma órbita polar de aproximadamente 500 km de altitude. A distância entre os dois satélites é continuamente monitorada por meio de medições de micro-ondas e com precisão de um micrômetro (WAHR *et al.*, 1998 *apud* Xavier, 2012). Os satélites sendo diferentemente atraídos pelo campo de gravidade da Terra, juntamente com medições das suas posições, permitem determinar mudanças bastante pequenas no campo de gravidade da Terra.

As variações de distância e a velocidade nestas variações correspondem aos dados brutos observados, os quais passam por etapas de processamento adicionais a fim de eliminar os efeitos não-gravitacionais (por exemplo, o efeito de marés e correntes marítimas). Desta forma, os efeitos resultantes se devem apenas às reais variações no campo gravitacional terrestre. As soluções para os dados do GRACE são calculadas para uma resolução espacial de 400 km, e distribuídas pelos centros de processamento: (i) *Center of Space Research (CRC)* da Universidade do Texas (EUA); (ii) *GeoForschungsZentrum (GFZ)* em Potsdam (Alemanha) e; (iii) *Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA)*. A medição das variações continentais dos volumes totais de água (*Total Water Storages – TWS*) é um dos produtos disponibilizados por estes centros.

Conforme descrito em WAHR *et al.* (1998) *apud* Xavier (2012) uma vez que possível remover dos dados brutos todos os efeitos não-gravitacionais (contaminação do sinal devido a deformações na crosta terrestre ocasionadas por terremotos, variabilidade das massas de água próximas ao mar, variações decorrentes da pressão atmosférica, marés, entre outros), o sinal restante será atribuído unicamente às mudanças nos estoques continentais de água e de neve. Desta forma, o uso desta informação (*TWS*) em termos de modelagem hidrológica está associada ao armazenamento de água nas bacias hidrográficas. Neste trabalho, foram utilizados os resultados de *TWS* disponibilizados pelo JPL/NASA.

Coefficiente de recessão

A taxa de produção do fluxo de base, que representa a porção da vazão de um rio mantida pela restituição de águas subterrâneas, é indicada por meio do coeficiente de recessão (k). Este coeficiente é uma característica da bacia hidrográfica e pode ser obtido pela análise do hidrograma observado nos períodos de seca, nos quais é possível assegurar que toda a vazão presente no rio é devido ao escoamento de base da bacia hidrográfica. Conforme cita Silva *et al.*, (2010), alguns dos métodos para a determinação do coeficiente de recessão são os métodos de Maillet ou Barnes (Dewandel *et al.*, 2002), Boussinesq (Dewandel *et al.*, 2002), Matching Strip (Snyder, 1935, Mello *et al.*, 1994, Tallaksen, 1995), Correlação (Langbein, 1938; Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995; Smakhtin, 2001) e Drogue (Kresic, 1997).

A forte conexão entre o regime de recarga e descarga da água subterrânea e os demais componentes do fluxo hidrológico influencia diretamente na vazão dos cursos d'água (Silva *et al.*,

2010). Neste sentido, e como uma característica física da bacia, é um dos mais comuns parâmetros encontrados em modelos hidrológicos na fase de geração e separação dos escoamentos. É, portanto, responsável por um dos graus de liberdade no processo de calibração dos modelos hidrológicos que o possuem como parâmetro para calibração. Neste trabalho a proposta é estimar este coeficiente a partir dos dados de armazenamento de água medidos de forma indireta pelo TWS, disponibilizado pelo GRACE e comparar com o coeficiente de recessão obtido a partir da análise do hidrograma para a mesma bacia em estudo.

Relação entre *TWS* e o coeficiente de recessão da bacia hidrográfica

Em bacias hidrográficas em que os períodos de cheia e seca são bem definidos e não há muitas influências de regularização por reservatórios no sistema de drenagem natural, a fase de estiagem do hidrograma pode ser aproximada por um modelo de reservatório linear simples, conforme descreve a Equação 1, em que: S representa o armazenamento da bacia hidrográfica [volume]; Q é a vazão de saída da bacia hidrográfica [volume/tempo] e; k é o coeficiente de recessão da bacia hidrográfica em unidades de tempo [tempo].

$$S = k \cdot Q \quad (1)$$

No período de estiagem, não havendo entradas de água no sistema por meio de precipitação, toda a variação do escoamento da bacia hidrográfica é em decorrência do escoamento subterrâneo, de tal forma que a equação do balanço hídrico simplificado pode ser escrita em termos da vazão de base (Q_b) e do armazenamento total da bacia (S), conforme apresenta a Equação 2.

$$\frac{dS}{dt} = -Q_b \quad (2)$$

Da Equação 1, tem-se uma relação que expressa o armazenamento da bacia hidrográfica (S) em função de sua vazão (Q). Substituindo a vazão (Q) expressa em função de (S) na Equação 2, esta pode ser reescrita como na Equação 3.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{k} \quad (3)$$

Separando as variáveis na Equação 3 e aplicando a integração em ambos os lados da equação, a solução desta equação diferencial, organizada conforme a equação geral da reta, é dada pela Equação 4, em que: S_0 representa o armazenamento da bacia hidrográfica no início da recessão [volume].

$$\ln(S) = -\frac{\Delta t}{k} + \ln(S_0) \quad (4)$$

Os dados de armazenamento total de água medidos pelo GRACE não tem um referencial, são medições, que teriam, durante o período de recessão das bacias hidrográficas o mesmo

comportamento que a fase de recessão do hidrograma, que é toda referente ao escoamento de base, conforme descrito até aqui. Estabelece-se a hipótese de que os valores do armazenamento total medidos pelo GRACE (TWS) diferem de uma constante no tempo, adimensional, (C) dos valores de armazenamento registrados na bacia hidrográfica (S), tal como expressa a Equação 5.

$$S = TWS + C \quad (5)$$

Desta forma a Equação 4, pode ser reescrita, em termos de TWS , tal como expressa a Equação 6, em que: TWS_0 representa o armazenamento total de água registrado pelo GRACE no início da recessão [volume].

$$\ln(TWS + C) = -\frac{\Delta t}{k} + \ln(TWS_0 + C) \quad (6)$$

Estimativa da constante C

Para cada par de pontos que caracterizam a recessão, seja na série de vazões ou na série de totais de água armazenados, dada a primeira ocorrência, a segunda pode ser estimada conhecendo-se o decaimento por unidade de tempo e aproximando a função a uma função linear, conforme ilustra a Figura 2 e descreve a Equação 7

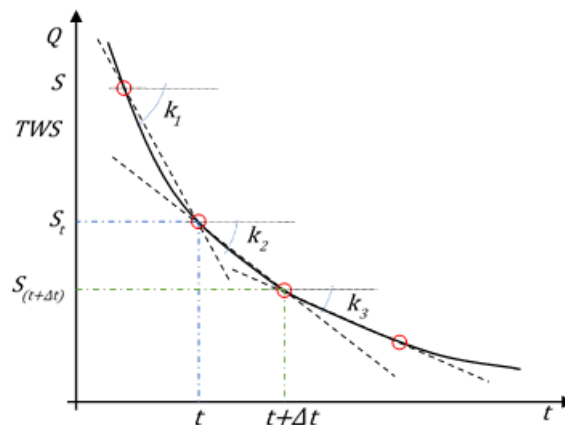


Figura 2 – Esquematisação do procedimento proposto para determinação do coeficiente de decaimento e da constante C

$$S_{t+\Delta t} = S_t - \frac{\Delta t}{k} * S_t \quad (7)$$

que escrita em termos de TWS , é dada pela Equação 8.

$$\frac{TWS_{t+\Delta t} - TWS_t}{\Delta t} = -\frac{1}{k} * TWS_t - \frac{C}{k} \quad (8)$$

Definição das recessões

O início do período de recessão foi definido a partir de um limiar que tomou por base a permanência dos dados em questão, vazões médias diárias observadas (dados da estação de monitoramento fluviométrico da Agência Nacional de Águas) e armazenamento total na bacia (TWS).

Foram definidos seis diferentes limiares, com valores de permanência superior a 70, 75, 80, 85, 90 e 95%, respectivamente, conforme apresentado esquematicamente pela Figura 3. Os valores registrados inferiores a este limiar e com o valor seguinte menor foram armazenados, par a par. Este procedimento foi implementado em um código Python.

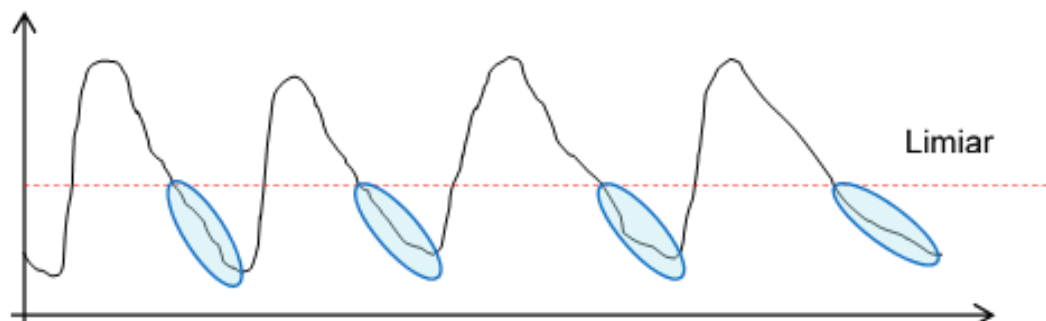


Figura 3 – Esquemática do procedimento para definição das recessões

Implementação e Calibração do Modelo de Grandes Bacias – MGB

O modelo de grandes bacias – MGB (Collischonn *et. al.*, 2007) é um modelo de transformação chuva-vazão determinístico, conceitual e distribuído em células desenvolvido para a aplicação a grandes áreas. Implementá-lo a uma bacia hidrográfica como a do rio Passaúna tornou-se um desafio adicional. O modelo foi implementado para a bacia de contribuição da estação fluviométrica de código 65021800 (Ponte da BR-277 – Campo Largo), localizada imediatamente a montante do reservatório do Passaúna, com área de drenagem não superior a 85 km². O período de calibração escolhido para esta primeira avaliação foi o anterior a construção e enchimento do reservatório, no período de 1985 a 1990.

Conforme é possível observar na Figura 1, a bacia foi discretizada em mini bacias (limiar de delimitação das minis bacias foi estabelecido em 2 km²) e os dados de chuva foram derivados para cada mini bacia a partir das estações 02549077 e 02549080, ambas localizadas na bacia hidrográfica em estudo. Os dados de clima foram retirados da estação Curitiba do INMET (00083842), localizada na bacia hidrográfica do rio Barigui. Nesta etapa de desenvolvimento do trabalho, os parâmetros considerados no MGB como parâmetros fixos, que não entram no processo de calibração, foram mantidos como sugeridos pelo manual do modelo (Medeiros *et. al.*, 2018). A calibração foi realizada por tentativa e erro, e numa próxima etapa deve ser refinada utilizando a alternativa automática disponibilizada para a calibração do MGB.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados obtidos da implementação do modelo MGB para a bacia de contribuição do reservatório do rio Passaúna são apresentados nas Figuras 4 e 5, comparação dos hidrogramas e curva de permanência simulada e observada, respectivamente. O coeficiente de qualidade do ajuste obtido desta primeira calibração foi de 0,615, entretanto, o erro medido pelo BIAS

ainda é de 13,7 %. Para este conjunto de parâmetros, e configuração atual do modelo implementado, o coeficiente de recessão do aquífero (C_b) não se mostrou como um dos parâmetros mais sensíveis para esta bacia, alterações no seu valor praticamente não produziam implicações nos resultados para o hidrograma e curva de permanência.

Nas próximas etapas do trabalho serão obtidos os valores do coeficiente de recessão da bacia a partir dos dados de TWS medidos pelo GRACE para esta mesma área, com base na proposta apresentada e estes valores serão comparados ao valor obtido para este parâmetro quando da sua obtenção da forma convencional, a partir da calibração do modelo MGB para a área em questão.

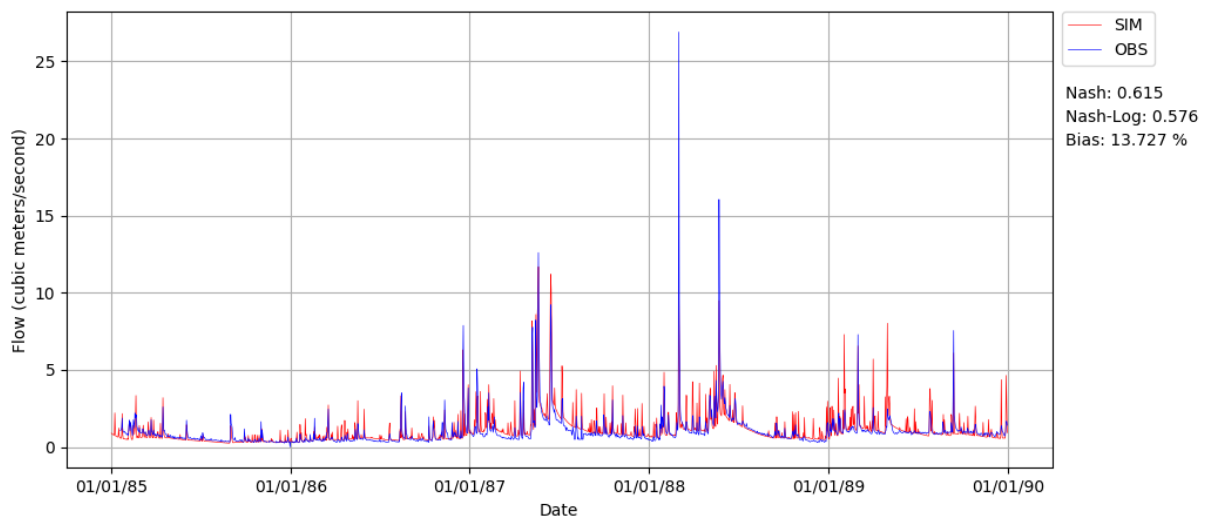


Figura 4 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800

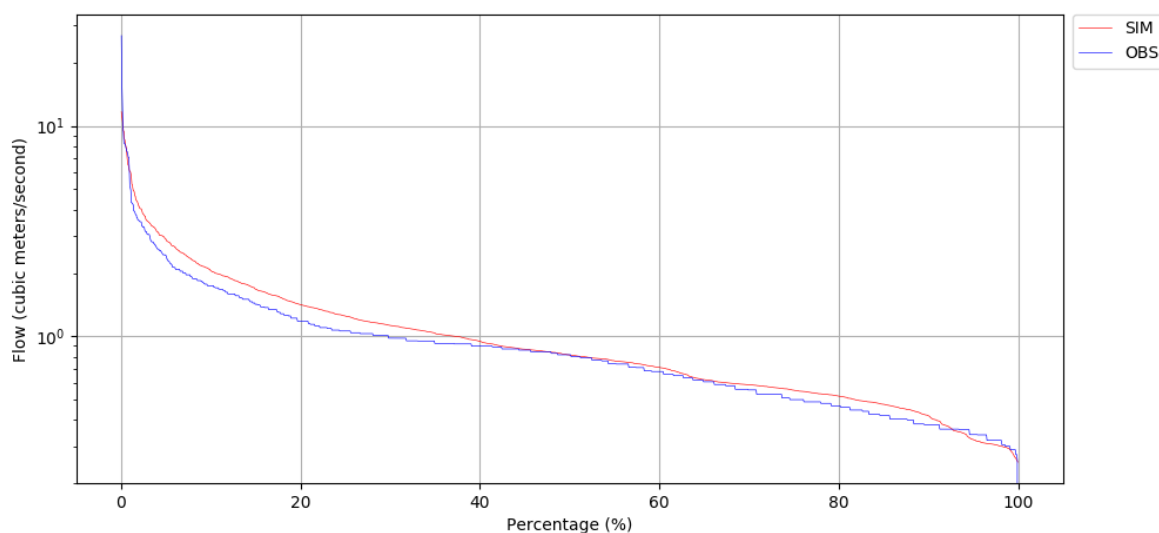


Figura 5 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho dá início ao desenvolvimento de uma metodologia de estimativa do coeficiente de recessão do aquífero a partir dos dados de armazenamento total de água (TWS), disponibilizados

do tratamento da informação coletada pelos satélites da missão GRACE. O conceito que permite esta abordagem é o de que em bacias hidrográficas em que os períodos de cheia e seca são bem definidos e não há muitas influências antrópicas no sistema de drenagem natural, a fase de estiagem do hidrograma pode ser aproximada por um modelo de reservatório linear simples. Não havendo entrada de água no sistema no período de seca (pela não ocorrência de precipitação) infere-se que toda a variação de escoamento da bacia é decorrente do escoamento subterrâneo. Portanto, os dados de TWS podem ter correlação com a fase de recessão dos hidrogramas observados.

A partir do da análise das equações, é proposta uma regressão linear para a obtenção dos coeficientes de recessão a partir dos dados de TWS. A área de estudo escolhida inicialmente pode não ter sido a mais adequada em função da interferência de reservatórios na regularização das vazões e armazenamento da bacia hidrográfica. Entretanto, o assunto continua a ser estudado e os próximos passos seriam a aplicação deste método a outras áreas de estudo, atentando para as limitações inerentes ao método; a inspeção visual dos hidrograma observados e estimativa do coeficiente de recessão a partir dos dados convencionais de vazão e estimativa do coeficiente de recessão a partir da análise da série disponível pelo GRACE para as mesmas regiões e; por fim, comparação com os resultados de modelos hidrológicos para os quais este coeficiente já tenha sido calibrado a fim de validar a metodologia de obtenção do mesmo a priori.

AGRADECIMENTOS

A CAPES pela bolsa de doutorado. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Ao Grupo de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

- BASTIAANSEN, W.G.M.; HARSHADEEP, N.R. (2007) “*Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help?*” *Irrig. Drain. Syst.*, 19, 269–284.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. (2007) “*The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling*”. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895.
- DEMBELE, M.; ZWART, J.Z. (2016) “*Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso*”. *West Africa. Int. J. Remote Sens.* V 37, 3995–4014.
- DOELL, PETRA et al. (2014) “*Global- scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites.*” *Water Resources Research*, v. 50, n. 7, p. 5698-5720.
- HA, LAN THANH et al. (2018) “*Calibration of Spatially Distributed Hydrological Processes and Model Parameters in SWAT Using Remote Sensing Data and an Auto-Calibration Procedure: A Case Study in a Vietnamese River Basin*”. *Water*, v. 10, n. 2, p. 212.

MACEDO, E. E.; BEIGHLEY, R. E.; DAVID, C. H.; REAGER, J. T. (2019) “Using GRACE in a streamflow recession to determine drainage water storage in the Mississippi River Basin”. Journal Hydrology and Earth System Discussions. EGU. 9p.

MEDEIROS, M. S.; FLEISCHMANN, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; CORATI, B.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K.; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2018) “Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools”. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. IPH/UFRGS. 83p.

MELESSE, A.M.; WENG, Q.; THENKABAIL, P.S.; SENAY, G.B. (2016) “Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling”. Sensors, 2016, 7, 3209.

NASA. (2019). GRACE-FO. “Gravity Recovery and Climate Experiment – Follow”. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/missions/grace-fo> >. Acesso em: Abril de 2019.

NEALE, C.M.U.; COSH, M.H. (2010). “Remote Sensing and Hydrology”; IAHS Red Book Series; Publ. 352; IAHS: Wallingford, UK; p. 482.

NIJZINK, R. C. et al. (2018) “Constraining conceptual hydrological models with multiple information sources”. Water Resources Research, v. 54, n. 10, p. 8332-8362.

OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. (2017) “Como acertar pelos motivos certos? Integração de modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto visando a calibração de modelos.” Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Florianópolis – SC.

SERRAT-CAPDEVILA, A.; VALDES, J.B.; STAKHIV, E.Z. (2014) “Water Management Applications for Satellite precipitation products: Synthesis and Recommendations”. J. Am. Water Resour. Assoc., 50, 509–525.

SILVA FILHO, L. V. da. (2010) “Qualidade e percepção ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Passaúna”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Curitiba.

SILVA, R. F. G.; BACELLAR, L. DE A. P.; FERNANDES, K. N.. (2010) “Estimativa de parâmetros de aquíferos através do coeficiente de recessão em áreas de embasamento cristalino de Minas Gerais”. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 63(3): 465-471, jul./set. de 2010.

XAVIER, L. N. R. (2012) “Modelagem Hidrológica com o Aporte de dados da Missão Espacial GRACE: Aplicação a Bacias Brasileiras”. Tese de doutorado. Programa de Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.