

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA MUDANÇA CLIMÁTICA SOBRE A REPOSTA HIDROLÓGICA COM MÉTODO DE DESAGREGAÇÃO

*Pedro Guilherme de Lara*¹; *Masato Kobiyama*²; *Keisuke Nakayama*³

Resumo – O presente trabalho apresenta como a mudança climática afeta o armazenamento da água na bacia hidrográfica. Para isso foi empregado um modelo hidrológico conceitual concentrado de tanque, a fim de ajustar a resposta hidrológica de duas bacias hidrográficas que possuem dados observados, sendo uma localizada no Brasil (clima tropical) e a outra (clima frio) no Japão. Ambas foram selecionadas, pois satisfazem a curva de Budyko. A partir do ajuste da formulação hidrológica para as bacias, uma perturbação climática foi realizada no regime sazonal de precipitação destas bacias. Com isto evidenciou-se que a mudança climática, determinada por esta perturbação, pode afetar de maneira importante o comportamento do armazenamento da água de ambas as bacias. Por mais que as bacias hidrográficas apresentem características climatológicas e hidrológicas distintas, o mais intrigante foi que a perturbação na sazonalidade do regime de precipitação não alterou a geração de vazão das duas bacias hidrográficas, e sim modificou igualmente a forma como a água é armazenada.

Palavras-Chave – Mudança climática, método de desagregação, armazenamento de água.

EVALUATION OF CLIMATE CHANGE EFFECT ON HYDROLOGIC RESPONSE WITH DOWNWARD APPROACH

Abstract – The present paper shows how the climate change affects the water storage dynamics at the catchment scale. A simple, linear precipitation-runoff model was used in order to adjust the hydrological response of two catchments that possess observed data, being one tropical catchment located in Brazil, and the other cold located in Japan. These catchments were selected due to the Budyko curve employment. After adjusting the hydrological formulation to both catchments, a climate disturbance was performed in the seasonal precipitation regime of these catchments. It is clearly observed that the climate change affected water storage behavior in these catchments. As much as catchments exhibit distinct hydrological and climatic characteristics, the most intriguing was that disturbances in the seasonality did not alter the discharge response of both catchments however that the disturbances changed equally their storage dynamic.

Keywords – Climate change, downward approach, water storage.

1. INTRODUÇÃO

Estudos a cerca das mudanças climáticas e seus efeitos na resposta hidrológica vêm sendo desenvolvidos por diversos autores, tais como: Atkinson *et al.* (2002), Eder *et al.* (2003) e Jothityangkoon & Sivapalan (2009). Na estruturação de modelos conceituais hidrológicamente embasados, estes autores empregaram o método da desagregação (*downward approach*). Este método foi argumentado por Mendiondo & Tucci (1997), e foi mais detalhadamente explicado e aplicado por Sivapalan *et al.* (2003).

¹: CB&I Brasil, pedro.lara@cbi.com

²: Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), masato.kobiyama@ufrgs.br

³: Instituto de Tecnologia de Kitami, Japão, nakayama@mail.kitami-it.ac.jp

Este método tem favorecido um melhor entendimento da interação dos processos de geração de vazão da bacia hidrográfica, embasando previsões de eventos de estiagem e inundação. Além disso, os autores mostraram que o método da desagregação auxilia na análise dos efeitos da mudança climática sobre a reposta hidrológica da bacia, como também o efeito sobre sua paisagem (formação pedológica e cobertura vegetal).

Um dos princípios do método da desagregação é o aprendizado sobre a resposta hidrológica, através da representação gráfica e através de métodos simplificados da estatística aplicados aos dados hidrológicos observados da bacia hidrográfica. Nas análises das séries temporais de precipitação e vazão, extraíram-se padrões de eventos e suas respectivas intensidades, além de tempos de resposta de diferentes tipos de escoamentos, evidenciados em uma curva de recessão. Na primeira etapa, utiliza-se a curva de Budyko, a qual é empregada na determinação do balanço hídrico médio anual em termos da razão evapotranspiração e precipitação anual (E/P). Budyko (1974) utilizou uma base de dados, com bacias hidrográficas de diversas partes do mundo, e mostrou que E/P estabelece em primeira ordem uma medida de aridez climatológica. Desta forma, a evapotranspiração evidencia a paisagem da bacia, principalmente no que se refere à cobertura vegetal, e também o grau de disponibilidade hídrica e disponibilidade energética condicionada pelo clima local da bacia hidrográfica. Logo a curva de Budyko é empregada na classificação e tendência do tipo de clima que a bacia hidrográfica está inserida e seu estado de equilíbrio.

Milly (1994) investigou as interações entre clima e paisagem do balanço hídrico médio anual com o *Bucket Model* proposto por Manabe (1969). O autor pôde explorar as bases físicas da curva de Budyko, mostrando a importância da mudança climática e a capacidade de armazenamento da água no solo. Embora aplicando a bacias localizadas nos EUA no leste das Montanhas de Rocky, o autor não embasou seu estudo com calibração do modelo hidrológico conceitual.

Jothityankoon & Sivapalan (2009) estenderam o trabalho de Milly (1994), calibrando um modelo conceitual de tanques em bacias hidrográficas da Austrália e Nova Zelândia. Eles investigaram o efeito das condições antecedentes sobre a reposta média anual do balanço hídrico e o efeito da mudança climática sobre o regime de vazões empregando dados observados. A conclusão foi que em climas áridos, a profundidade do solo desempenha um papel importante na geração de vazão da bacia, enquanto em climas úmidos seu papel é pouco sensível. Além disso, mostraram que o efeito da cobertura da vegetação é representado, predominantemente, através da evapotranspiração – transpiração da vegetação e evaporação do solo exposto.

Nesta circunferência, há uma pergunta: qual é o efeito da mudança climática sobre a resposta hidrológica? Portanto, o objetivo do presente trabalho foi investigar o efeito da mudança climática sobre o armazenamento da água na bacia hidrográfica, em termos do balanço hídrico médio anual. Para isso, incorporaram-se as hipóteses já trabalhadas por Jothityankoon & Sivapalan (2009) a um tipo de modelo de tanque. O presente trabalho ajustou-o, utilizando dados observados, em duas bacias hidrográficas em climas distintos, uma do clima tropical do Maranhão e a outra do clima frio do norte do Japão. A partir disso, perturbações no padrão sazonal do regime de precipitações foram realizadas, a fim de investigar a resposta hidrológica resultante nas duas bacias.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A Bacia do Rio Tokoro (UTM 732816, 4854589) ao norte do Japão, na ilha de Hokkaido, possui uma área de 1930 km². Zhou & Tachibana (2003) demonstraram que os principais tipos de cobertura de solo para toda a província de Hokkaido são: pântanos, campos de arroz, pastagens/campos, solo exposto, área urbana, floresta, campina de Sasa (espécie de bambu) e campos arados. O clima é frio e úmido com presença de neve, com temperaturas variando de -30°C

até 30°C e precipitação anual de cerca de 1000 mm. Esta bacia apresenta um coeficiente de escoamento na ordem de 0,45.

A Bacia do Rio Pindaré (UTM 454898, 9600441) localizada no interior do estado de Maranhão, nordeste do Brasil, possui uma área de aproximadamente 20.000 km² e está inserida no bioma amazônico. Ela está condicionada a um clima quente úmido com temperatura média anual de 26°C e com precipitação anual de 1500 mm, classificado como tropical com estação seca no inverno. A bacia apresenta um coeficiente de escoamento de aproximadamente 0,40. Os dados empregados são provenientes do Hidroweb – ANA e do banco de dados climatológicos da EMBRAPA correspondentes ao período de janeiro de 1985 até dezembro de 2000. Desta forma, nas duas as bacias, foram utilizados 16 anos de dados diários de precipitação, vazão e evapotranspiração.

A Figura 1 mostra o padrão mensal (sazonalidade) do ciclo hidrológico de cada uma das bacias hidrográficas em termos de precipitação (P), evapotranspiração potencial (Ep) e vazão (Q).

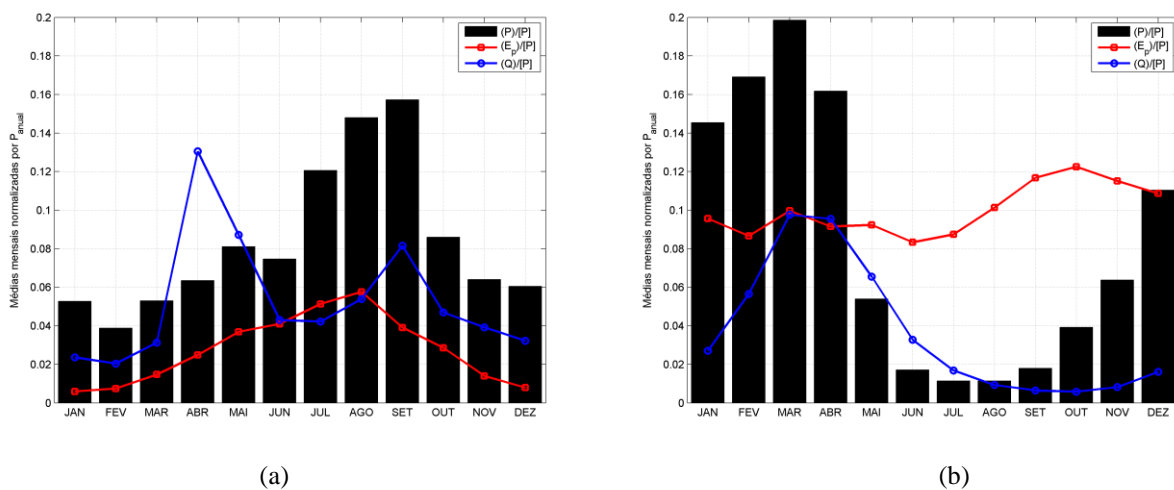


Figura 1 – Variação mensal de longo período entre 1985 e 2000: (a) Bacia do Rio Tokoro; (b) Bacia do Rio Pindaré.

2.2. Balanço de massa

O modelo de tanque utilizado é simples e envolve pouca complexidade, o que facilita a avaliação do efeito da mudança climática. Neste modelo, o processo de infiltração não considera o escoamento superficial hortoniano, mas sim o escoamento superficial do tipo Dunne, conforme Jothityankoon & Sivapalan (2009) (Figura 2).

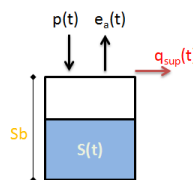


Figura 2 – Modelo conceitual.

A avaliação dos efeitos da mudança climática sobre a resposta hidrológica foi realizada através da análise por evento sazonal e análise por eventos alternados. Evento sazonal representa o padrão natural e eventos alternados representam as perturbações climáticas, o que define o efeito da mudança climática. Este conceito foi apresentado e aplicado por Eder *et al.* (2003) e Jothityankoon & Sivapalan (2009). Estas formas de análise determinam o padrão de como a série temporal de

precipitação é inserida na formulação hidrológica. Então, a análise por evento sazonal é determinada como:

$$m = 1$$

$$p = \frac{P}{m \cdot t_u} \quad (1)$$

onde p é a precipitação diária [mm/d]; P é precipitação anual [mm/ano] para cada ano considerado; m é o período chuvoso; e t_u é a duração deste período chuvoso [dia]. Na análise por evento sazonal, m é considerado como 1 para todos os anos, pois somente há um período chuvoso [dia].

Para a análise por eventos alternados segue a relação:

$$m = \frac{J}{t_e + t_{ent-e}} \quad (2)$$

$$p = \frac{P}{m \cdot t_e}$$

onde J é o número de dias do ano considerado [d]; t_e é a duração média anual dos eventos para o ano considerado [d]; e t_{ent-e} é a duração média anual entre cada evento sucessivo.

A evapotranspiração é considerada uniforme para cada ano, tanto na análise sazonal quanto na análise por eventos alternados:

$$e_a = \frac{E}{J} \quad (3)$$

onde e_a é a evapotranspiração [mm/d]; e E é a evapotranspiração anual [mm/ano].

Assim, o balanço hídrico é determinado segundo a relação:

$$\frac{dS}{dt} = p - e_a - q \quad (4)$$

onde S é o armazenamento da água [mm]; q é a vazão diária [mm/d]; e dt é o intervalo do tempo fixo em 1 dia. Na eq.(4), o armazenamento da água na bacia é controlado predominantemente pelo solo. A formulação gera resultados na escala anual, no entanto é empregada com intervalo de tempo diário, conforme o método da desagregação.

A Figura 3 ilustra os conceitos de análise por eventos alternados e análise sazonal.

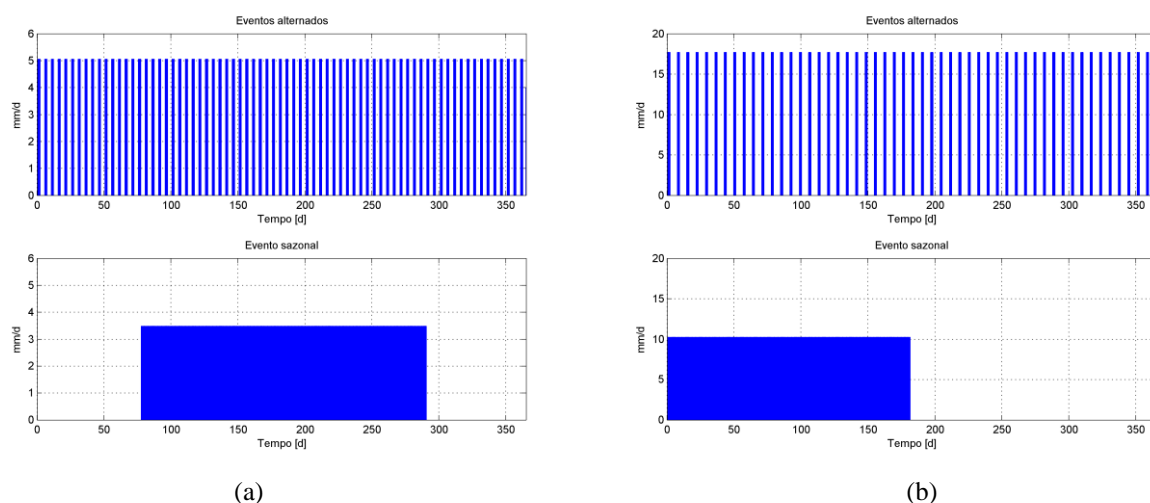


Figura 3 – Conceitos de resposta climatológica em cada bacia: Eventos alternados e Evento sazonal. a) Bacia do Rio Tokoro; (b) Bacia do Rio Pindaré.

Assim, o modelo hidrológico utilizado no presente trabalho apresenta um conceito simples e depende somente dos parâmetros hidrológicos: m , t_u , t_e , t_{ent-e} , D e ϕ . Sendo D a profundidade média

do solo [mm] na bacia hidrográfica e ϕ a porosidade média do solo [cm^3/cm^3]. Todos os parâmetros possuem embasamento hidrológico, ou seja, derivam da série observada de precipitação (m , t_u , t_e e t_{ent-e}) ou das propriedades físicas médias do solo (D e ϕ) para cada bacia hidrográfica. Nota-se que o efeito da mudança climática é avaliado segundo as alterações no padrão sazonal das séries temporais de precipitação. Logo, os volumes de precipitação e de evapotranspiração permanecem inalterados, tanto empregando a análise sazonal quanto a análise por eventos alternados.

2.3. Análise de eficiência

O presente trabalho considerou duas funções objetivo a fim de avaliar o desempenho dos ajustes do modelo hidrológico. As funções de volumes medidos (dV) e correlação linear ($\rho_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}}$) são:

$$dV = \left(\frac{\overline{\zeta_{sim}}}{\zeta_{obs}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (5)$$

$$\rho_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}} = \frac{cov_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}}}{\sqrt{var_{\zeta_{sim}} \cdot var_{\zeta_{obs}}}} \quad (6)$$

onde ζ_{obs} é a vazão observada, ζ_{simu} é a vazão simulada. A eq.(5) determina a fração da vazão total observada em relação à vazão total simulada. Atkinson *et al.* (2002) indicaram estas funções como eficiente em análises de longo período.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como a escolha das bacias hidrográficas seguiu os critérios de elas estarem em regiões climáticas distintas e de apresentarem suas características naturais preservadas, a curva de Budyko foi utilizada para evidenciar o cumprimento dos critérios. A relação E_p/P para a Bacia do Rio Tokoro (0,38) é menor do que 1, indicando que o local está em clima úmido. A mesma relação para a Bacia do Rio Pindaré (1,20) é maior do que 1, indicando que o local está em clima úmido com tendência a semi-árido, devido a presença de inverno seco. E a representação gráfica de E_p/P (abscissa) contra E_d/P (ordenada) ajusta a curva determinada por Budyko, o que implica que estas bacias ainda preservam sua paisagem natural ou seu estado de equilíbrio (Figura 4).

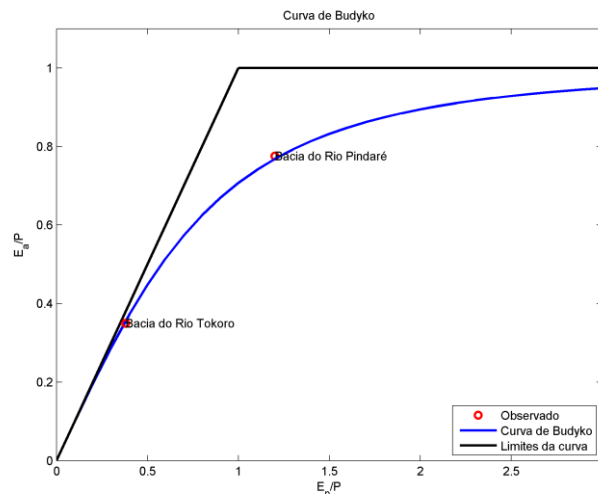


Figura 4 – Curva de Budyko.

Na comparação entre as vazões médias anuais simuladas e observadas, foi obtido que para a bacia do Rio Tokoro, $dV = 3\%$ e $\rho_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}} = 0,92$ e para a bacia do Rio Pindaré $dV = 2\%$ e $\rho_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}} = 0,82$. Isto permite dizer que o modelo conceitual obteve bons desempenhos para ambas as bacias. A bacia do Rio Tokoro mostrou melhor correlação estatística, o que pode ser explicado pelo fato no qual essa bacia possui a melhor qualidade da base de dados. A Tabela 1 apresenta os parâmetros do modelo ajustados para as duas bacias hidrográficas.

Tabela 1. Parâmetros hidrológicos empregados no ajuste do modelo conceitual.

Bacia do Rio Tokoro			Bacia do Rio Pindaré		
Parâmetro	Evento sazonal	Eventos alternados	Parâmetro	Evento sazonal	Eventos alternados
m	1	-	m	1	-
t_u [dia]	180	-	t_u [dia]	180	-
t_e [dia]	-	2	t_e [dia]	-	2
t_{ent-e} [dia]	-	3	t_{ent-e} [dia]	-	5
D [mm]	820	820	D [mm]	2000	2000
ϕ [cm ³ /cm ³]	0,45	0,45	ϕ [cm ³ /cm ³]	0,50	0,50

Empregando a análise por evento sazonal, a qual representa a realidade do ciclo hidrológico devida à representação bem definida de um período chuvoso e outro período seco em ambas as bacias, o armazenamento médio mostrou flutuação da década de 1980 para a década de 1990, com tendência inversa entre as bacias. A bacia do Rio Tokoro mostrou aumento do armazenamento médio em relação à precipitação média anual e a bacia do Rio Pindaré mostrou leve tendência de diminuição do armazenamento médio em relação à precipitação média anual (Figura 5).

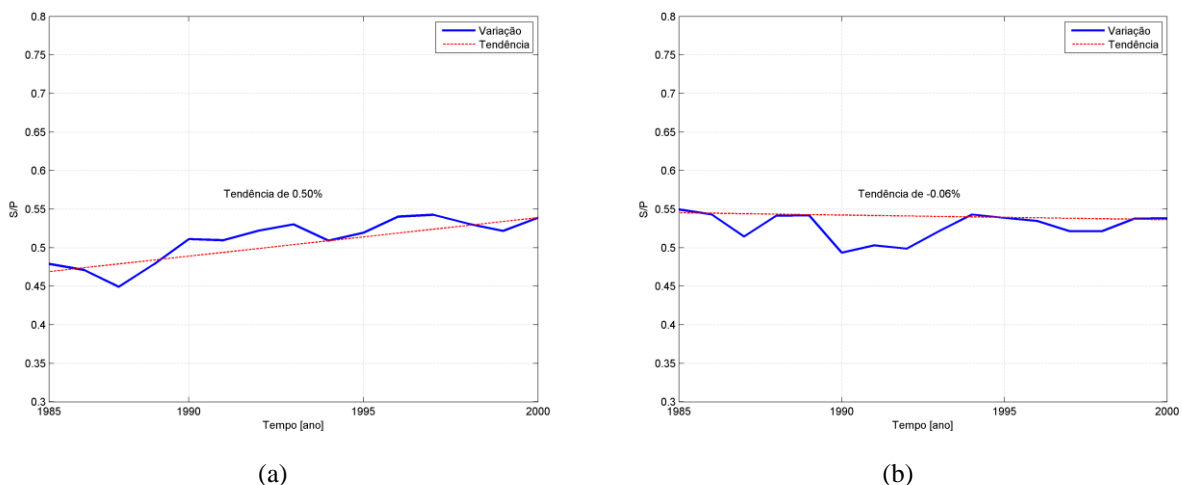


Figura 5 – Variação do armazenamento médio em relação à precipitação média anual entre 1985 e 2000: a) Bacia do Rio Tokoro; (b) Bacia do Rio Pindaré.

Tal flutuação é esperada, pois faz parte da variabilidade do ciclo hidrológico. Fujibe *et al.* (2005) mostraram que em todo o Japão tem ocorrido uma intensificação dos eventos chuvosos de verão, e, além disso, tem se observado o aumento da quantidade de água infiltrada a partir do derretimento da neve no início da primavera nas últimas décadas. Isto corrobora com o aumento do armazenamento médio em relação à precipitação da bacia do Rio Tokoro. Por outro lado, Alves *et*

al. (2011) identificaram uma tendência de diminuição do escoamento na região nordeste do Brasil, o que condiz com a tendência da redução do armazenamento médio em relação à precipitação média anual da bacia do Rio Pindaré. Desta forma, o modelo conceitual empregado para o balanço hídrico anual, entre o ano de 1985 e o ano de 2000, mostra resultados condizentes à calibração com dados de vazão observados e condizentes com outras pesquisas.

Agora, considerando os mesmos dados empregados na modelagem supracitada, o presente estudo levanta um ponto de reflexão. Modificando a forma como a precipitação perturba o sistema, definido pela bacia hidrográfica, de evento sazonal para eventos alternados, observa-se uma alteração do armazenamento da água na bacia.

Empregando a análise por eventos alternados, a bacia hidrográfica foi condicionada a uma perturbação do seu equilíbrio de longo período definido pela sazonalidade do ciclo hidrológico. Esta perturbação, a qual representa a mudança climática, fez com que as bacias hidrográficas respondessem à dinâmica do armazenamento como se estivessem sempre com excedente hídrico, sem a ocorrência de variabilidade no armazenamento da água ao longo do tempo, entre o ano de 1985 e o ano de 2000.

Na simulação dessa perturbação, o modelo utilizado demonstrou a mesma reposta hidrológica com mesmo desempenho de eficiência, sendo que $dV = 3\%$ e $\rho_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}} = 0,92$ para a bacia do Rio Tokoro e $dV = 2\%$ e $\rho_{\zeta_{sim}, \zeta_{obs}} = 0,82$ para a bacia do Rio Pindaré. Na Figura 6, observa-se que ambas as bacias, independentemente das condições climáticas e hidrológicas, responderam igualmente a perturbação do seu regime natural de precipitação.

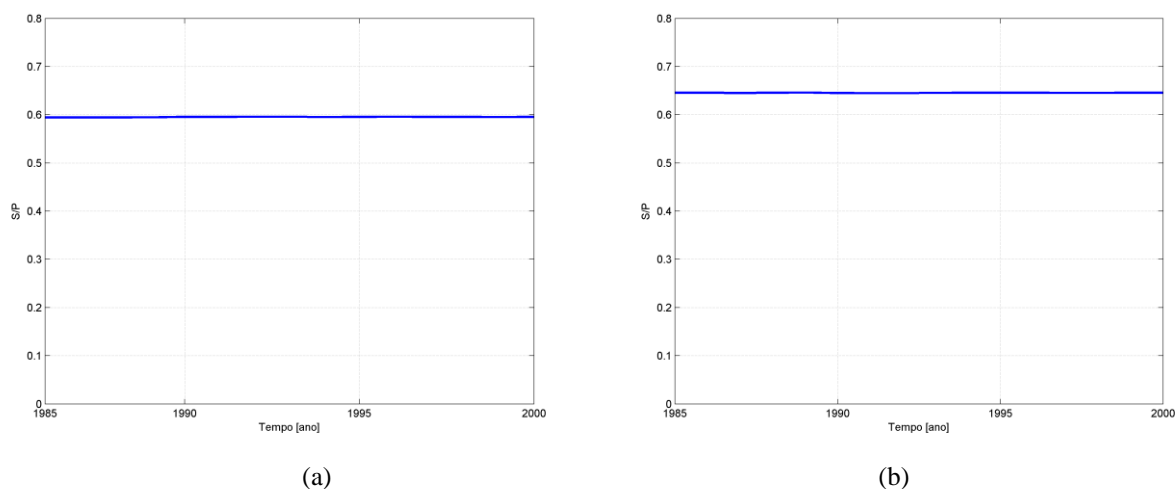


Figura 6 – Variação do armazenamento médio em relação à precipitação média anual entre 1985 e 2000: (a) Bacia do Rio Tokoro; (b) Bacia do Rio Pindaré.

Com a perturbação determinada pela análise de eventos alternados, os valores do armazenamento tenderam a estabilizar-se na condição de saturação ou de quase saturação. Os resultados mostram patamares diferentes para as bacias devido às características distintas de profundidade do solo e porosidade de cada bacia. Interessante é de que a geração de vazão é idêntica ao obtido com a análise sazonal. A única alteração na reposta hidrológica das duas bacias, condicionada à mudança climática determinada pela análise de eventos alternados, ocorreu na forma do armazenamento da água.

4. CONCLUSÃO

O resultado mostrou que perturbações na sazonalidade do regime de precipitação, as quais caracterizam o efeito da mudança climática, alteram o armazenamento da água em escala de bacia

hidrográfica. Salienta-se que foi empregada uma estrutura hidrológica simples com poucos parâmetros, no entanto todos eles sendo hidrológicamente justificados. Com isto são lançados alguns pontos de reflexão. Por que tal comportamento ocorre? Se a formulação hidrológica está embasada fisicamente e hidrológicamente, este estudo pode auxiliar no entendimento da mudança climática no que se refere à disponibilidade hídrica? Qual é o efeito da mudança climática sobre a reposta hidrológica?

Alterações no padrão natural da precipitação, em cada uma das bacias, geraram a mesma resposta hidrológica, em termos de vazão, no entanto alterou-se a forma como a água é armazenada. Tal perturbação foi gerada empregando o conceito de análise por eventos alternados, em bacias hidrográficas com características climatológicas e hidrológicas distintas. Alterando a forma como os eventos de precipitação ocorrem, fora do seu padrão sazonal natural, o armazenamento da água passa a ser diferente, mas mantendo o regime de vazões inalterado.

Concluí-se que a mudança climática, se considerada com uma alteração do padrão sazonal do regime de precipitação, tem potencial de modificar a maneira como água é armazenada na bacia hidrográfica. Esta constatação é importante, a qual deve ser mais bem analisada e embasada com monitoramento hidrológico e aprimoramento das formulações hidrológicas. A investigação deste comportamento pode contribuir em estudos de disponibilidade hídrica e no melhor entendimento do efeito da mudança climática sobre a reposta hidrológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, B.C.C.; FILHO, F.A.S.; SILVEIRA, C.S. (2011). Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS). 2011. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. A água no mundo em transformação.
- ATKINSON, S.; WOODS, R. A.; SIVAPALAN, M. (2002). Climate and landscape controls on water balance model complexity over changing timescales. *Water Resour. Res.*, 38(12), 1314, doi: 10.1029/2002WR001487.
- BUDYKO, M.I. (1974) *Climate and life*. Academic Press. 508p.
- EDER, G.; SIVAPALAN, M.; NACHTNEBEL, H. P. (2003). Modeling of water balances in Alpine catchment through exploitation of emergent properties over changing time scales. *Hydrol. Process.* 17(11): pp.2125-2149.
- FUJIBE, F.; YAMAZAKI, N.; KATSUYAMA, M.; KOBAYASHI, K. (2005). The Increasing Trend of Intense Precipitation in Japan Based on Four-Hourly Data for a Hundred Years. *SOLA*, Vol. 1, 041-044, doi: 10.2151/sola.2005-012.
- JOTHITYANGKON, C.; SIVAPALAN, M. (2009). Framework for exploration of climatic and landscape controls on catchment water balance, with emphasis on inter-annual variability. *J. Hydrol.* 371: pp.154 – 168.
- MANABE, S. (1969) Climate and ocean circulation 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Weather Rev.* 97(11), pp.739–774.
- MENDIONDO, E.M.; TUCCI, C.E.M. (1997). Escalas hidrológicas: I conceitos. *RBRH Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2(1), pp.21-44.
- MILLY, P.C.D. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resour. Res.* 30(7), pp.2143–2156.
- SIVAPALAN, M.; BLÖSCHL, G.; ZHANG, L.; VERTESSY, R. (2003). Downward approach to hydrological prediction. *Hydrol. Process.* 17, pp.2101-2111.
- ZHOU, J. & TACHIBANA, H. (2003). Land Use/Cover Changes in Hokkaido Wetlands, Yufutsu Mires as a Case Study. *Reports of the Taisetsuzan Institute of Science* 37, pp.23 – 36.