

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL USANDO MODELO CLIMÁTICO REGIONAL: ESTADO DE PERNAMBUCO – NORDESTE DO BRASIL

CLIMATE CHANGE IMPACT ON RUNOFF USING REGIONAL CLIMATE MODEL: PERNAMBUCO STATE-NORTHEAST OF BRAZIL

A. Ribeiro Neto¹, S.M.G.L. Montenegro¹, L.P. Silva¹, J.A. Cirilo¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

ribeiront@gmail.com, suzanam.ufpe@gmail.com, lpsjampa@yahoo.com.br, almir.cirilo@gmail.com

Abstract

The objective of this study is to estimate the impacts of climate change in the water availability in Pernambuco (99,123 km² surface area). It has been used precipitation, air temperature and relative humidity calculated by the Global Circulation Model (HadAM3P) and dynamically downscaled by the regional climate model ETA CCS. The systematic biases in precipitation were corrected using cumulative probability. The potential evapotranspiration was calculated with the air temperature and relative humidity (Hargreaves method). The impact in water resources is estimated by means of the water balance calculations based in the Thornthwaite-Mather method. The simulations correspond to the recent past (1961–1990) and a future (2071–2100) climate under the IPCC SRES A2 and B2 emissions scenarios. The average surface runoff calculated with the water balance for the entire state was 213.86 m³/s (baseline), 164.62 m³/s (A2) and 173.70 m³/s (B2) representing a reduction of 18.8% and 23.0% respectively.

Palavras-Chave: Mudanças Climáticas, Balanço Hídrico, Modelagem Regional.

Key-words: Climate Change, Water Balance, Regional Modeling

INTRODUÇÃO

Vários são os impactos esperados para ocorrerem sobre os recursos hídricos diante de mudanças do clima do planeta. Tais impactos poderão influenciar diretamente os usos que são feitos da água como o abastecimento humano, irrigação e geração de energia, assim como outros aspectos relacionados como a drenagem urbana, qualidade da água e erosão e transporte de sedimentos. A avaliação de impactos de mudanças do clima sobre os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica ou região pode ser realizada a partir das simulações dos próprios modelos climáticos globais (MCG) ou utilizando-se a precipitação e as variáveis climatológicas para a determinação da evapotranspiração calculados por esses modelos como dado de entrada em modelos hidrológicos.

O uso direto dos resultados das simulações de modelos climáticos significa interpretar o saldo precipitação menos evaporação como sendo igual à vazão na bacia hidrográfica. Apesar da simplicidade da estimativa e da baixa resolução (malha com células variando entre 100 e 300 km de comprimento), alguns estudos utilizando essa metodologia têm contribuído para a determinação do impacto das mudanças do clima sobre os recursos hídricos. Milly et al. (2005) utilizaram resultados de simulações de modelos climáticos para estimativa da variação da descarga líquida em 165 bacias ao redor do planeta. Trabalho semelhante foi realizado por UK Met Office (2005) utilizando o modelo climático do Hadley Centre HadGEM1. Para Milly et al. (2005), no semiárido do Nordeste, a vazão dos rios no Século XXI reduzirá em até 20%, enquanto UK Met Office (2005) indica aumento da vazão entre 50% e 200%.

Ao invés de utilizar os resultados de escoamento superficial dos modelos climáticos, uma alternativa é o uso de modelos hidrológicos em que se utilizam temperatura do ar e precipitação calculadas pelos modelos globais. A integração de MCG foi realizada com o modelo hidrológico VIC (*Variable Infiltration Capacity*) por Vicuna et al. (2007), com o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) por Tomasella et al. (2009) e Nóbrega et al. (2011), e com o modelo HBV por Van Pelt et al. (2009) e Akhtar et al. (2009).

Uma forma simplificada de simulação hidrológica é o cálculo do balanço hídrico na região de estudo. Similarmente ao uso de modelos hidrológicos, a aplicação dessa metodologia deve utilizar as saídas dos modelos climáticos para determinar o escoamento superficial. Essa foi a forma utilizada por Salati et al. (2008) para avaliação da disponibilidade hídrica no Brasil no futuro, utilizando o método de Thornthwaite-Mather para o cálculo do balanço hídrico.

O objetivo do artigo é, a partir de dados provenientes de modelos climáticos, realizar o balanço hídrico na área correspondente ao território do Estado de Pernambuco e, assim, estimar o impacto das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água superficial, sobre a evapotranspiração real e umidade do solo.

METODOLOGIA

Área de Estudo

O Estado de Pernambuco está localizado na porção leste do Nordeste do Brasil (Figura 1) e possui área de 99.123,0 km², que representa cerca de 6,49% da área do Nordeste. Cerca de 80% da área do Estado possui características de semiárido (mesoregiões do São Francisco Pernambucano, Sertão Pernambucano e parte do Agreste), cuja precipitação média anual varia de 400 mm a 800 mm. No restante da área do Estado (parte do Agreste, zona da Mata e Metropolitana do Recife), a precipitação média anual pode ultrapassar 2.000 mm. A evaporação potencial anual está acima de 2.000 mm na maior parte do território do Estado, podendo chegar a 3.000 mm na porção semiárida. Para efeito de planejamento dos recursos hídricos, o Estado está dividido em 29 unidades hidrográficas de planejamento, cuja vazão média anual totaliza 263,54 m³/s (Pernambuco, 1998).



Figura 1 – Localização e Mesoregiões do Estado de Pernambuco.

Método de Thornthwaite-Mather

O método de balanço hídrico climatológico de Thornthwaite-Mather determina o regime hídrico de um local a partir de dados de Capacidade de Água Disponível (CAD), precipitação e evapotranspiração potencial (Pereira, 2005). O resultado do balanço são os valores de escoamento superficial, deficiência hídrica, evapotranspiração real e o total de água retida no solo em cada intervalo de tempo. A umidade do solo, quando $P - ETP < 0$ em um tempo qualquer é dada por:

$$W_{t+1} = W_t \cdot e^{\frac{P_{t+1} - ETP_{t+1}}{W_c}}, \text{ se } P - ETP < 0 \quad (1)$$

onde W_{t+1} é a umidade do solo no $t+1$, W_t é a umidade do solo no tempo t , P é a precipitação, ETP a evapotranspiração potencial e W_c a Capacidade de Água Disponível (CAD) do solo. Nessa situação, a evapotranspiração real (ETR) e o déficit hídrico (DEF) serão dados por:

$$ETR_{t+1} = P_{t+1} - (W_{t+1} - W_t) \quad (2)$$

$$DEF_{t+1} = ETP_{t+1} - ETR_{t+1}, \text{ se } ETR_{t+1} < ETP_{t+1} \quad (3)$$

$$DEF_{t+1} = 0, \text{ se } ETR_{t+1} = ETP_{t+1} \quad (4)$$

Quando $P - ETP \geq 0$, a umidade do solo, ETR e DEF serão dados por:

$$W_{t+1} = W_t + P_{t+1} - ETP_{t+1} \quad (5)$$

$$ETR_{t+1} = ETP_{t+1} \quad (6)$$

$$DEF_{t+1} = 0 \quad (7)$$

O escoamento superficial (RO) é calculado fazendo

$$RO_{t+1} = W_{t+1} - W_C, \text{ quando } W_{t+1} > W_C \quad (8)$$

ou

$$RO_{t+1} = 0, \text{ quando } W_{t+1} \leq W_C \quad (9)$$

Dados Disponíveis

A precipitação necessária para a aplicação do balanço hídrico foi obtida da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas, totalizando 348 postos pluviométricos. A precipitação média em cada célula em que a área referente ao Estado de Pernambuco foi discretizada foi calculada com o método do inverso do quadrado da distância:

$$P_{\text{media}} = \frac{P_1 \cdot 1/d_1^2 + P_2 \cdot 1/d_2^2 + \dots + P_n \cdot 1/d_n^2}{1/d_1^2 + 1/d_2^2 + \dots + 1/d_n^2} \quad (10)$$

onde P_{media} é a precipitação média na célula, P_n é a precipitação do n-ésimo posto localizado na vizinhança da célula e d_n a distância do posto ao centro da célula.

A evapotranspiração potencial foi calculada com o método de Hargreaves, que utiliza dados de temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$ (T) e umidade relativa em % (UR):

$$ETP = F \cdot 0,158 \cdot (100 - UR)^{0,5} \cdot (32 + 1,8 \cdot T) \quad (11)$$

onde ETP é a evapotranspiração potencial em mm/mês, F é o fator de evapotranspiração potencial em mm/mês, que leva em conta a latitude do posto climatológico. Foram utilizadas as normais climatológicas dos postos pertencentes à rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) conforme relação da Tabela 1.

Tabela 1 – Postos Climatológicos Utilizados no Cálculo da Evapotranspiração Potencial.

Código	Nome	Lon	Lat
35060818	Recife	-35,0669	-8,1862
36060768	Surubim	-36,0669	-7,6862
36060818	Caruaru	-36,0669	-8,1862
36560818	Pesqueira	-36,5669	-8,1862
36560918	Garanhuns	-36,5669	-9,1862
37060868	Arcoverde	-37,0669	-8,6862
38060768	Triunfo	-38,0669	-7,6862
38560868	Floresta	-38,5669	-8,6862
39560818	Cabrobó	-39,5669	-8,1862
40560918	Petrolina	-40,5669	-9,1862

A capacidade de armazenamento do solo foi obtida de um trabalho realizado por Dunne e Willmott (1996), em que se chegou a uma estimativa global da água disponível no solo para a vegetação (entendida como capacidade de retenção de água no solo), discretizada numa malha de 0,5 graus terrestres. Informações sobre os conteúdos de areia, argila e matéria orgânica, profundidade radicular, e espessura dos horizontes, foram utilizadas para estimar a capacidade de retenção de água no solo.

Modelo Climático Regional

O quarto relatório de avaliação (AR4) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* utiliza um conjunto de cenários denominado *Special Report Emissions Scenarios* (SRES), que visam pesquisar futuros desenvolvimentos no meio ambiente global com especial referência à produção dos gases do efeito estufa e

emissões de aerossóis (IPCC, 2000). O conjunto de cenários varia de uma condição mais favorável, denominado de B2, até uma situação em que a emissão de gases de efeito estufa reflete um futuro mais pessimista denominado de cenário A2.

Estudos voltados para a avaliação de impactos resultantes de mudanças climáticas têm utilizado simulações de modelos climáticos globais para a estimativa das variáveis climáticas do futuro. Ao todo, o IPCC apresentou em seu AR4 simulações de 23 Modelos de Circulação Global Oceano-Atmosfera (MCG). Uma deficiência dos MCG's diz respeito à baixa resolução espacial, que pode variar entre 100 e 300 km. Para contornar esse problema, uma alternativa é o uso de modelos regionais que utilizam como condição de contorno a saída do MCG. Há um ganho significativo na representação dos processos climatológicos que ocorrem na escala regional, pois a resolução espacial utilizada pode variar entre 20 e 50 km. A iniciativa Cenários Regionalizados de Clima Futuro da América do Sul (CREAS), desenvolvida no âmbito do Programa de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira do Ministério do Meio Ambiente (PROBIO), permitiu a simulação do modelo climático regional Eta CCS aninhado ao modelo climático global HadAM3P do *UK Met Office Hadley Centre* da Inglaterra (Marengo *et al.*, 2009). Foram realizadas simulações para os cenários A2 e B2 abrangendo um período base de 1960 a 1990 e um período no futuro entre os anos de 2071 e 2100.

A precipitação gerada pelo modelo Eta CCS no período base foi comparada com a precipitação medida pelos postos pluviométricos. Verificou-se que a precipitação do modelo está subestimada. Para corrigir esse erro, que ocorre de forma sistemática, utilizaram-se funções de distribuição de probabilidade em cada ponto da grade do modelo Eta CCS. A técnica de correção, utilizada por Wood *et al.* (2002), admite que a distribuição de probabilidade das duas séries de dados (modelo e medida) devem ser iguais. A Figura 2 mostra como a precipitação P_0 calculada pelo modelo é corrigida com o auxílio das curvas FDP para se chegar a $P_{\text{corrigido}}$.

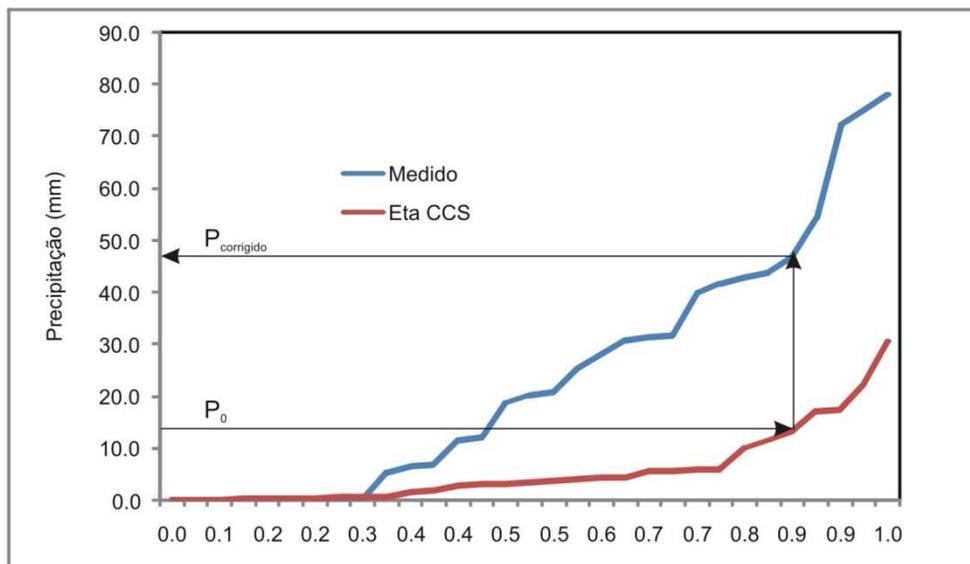


Figura 2 – Correção do erro sistemático com funções de distribuição de probabilidade.

Cálculo do Balanço Hídrico

A área de estudo foi discretizada em células com $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ de largura (aproximadamente 10 km) (Figura 3). Em cada célula, foram aplicadas as equações de 1 a 9 do método de Thornthwaite-Mather. Primeiramente, o método foi aplicado para o período base (1960-1990), utilizando-se a precipitação medida e, em seguida, com a precipitação do modelo Eta CCS para o mesmo período. Os valores médios de longo termo da vazão podem ser comparados para avaliação das simulações. A vazão calculada com dados medidos é igual a $267,78 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão calculada com dados do modelo Eta CCS é $213,86 \text{ m}^3/\text{s}$ e o valor estimado no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco igual a $263,54 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pernambuco, 1998). A vazão do Plano Estadual foi estimada com o modelo GRH/UFPE concebido a partir do modelo SMAP, que utiliza a separação do escoamento baseada no método do *Soil Conservation Service*.

A Figura 4 mostra o escoamento superficial de longo período (1960-1990) para cada mês do ano resultante de duas séries: i) balanço hídrico com precipitação, temperatura do ar e umidade relativa observados; ii) balanço hídrico com precipitação, temperatura do ar e umidade relativa calculados pelo modelo Eta CCS. Os dados de entrada provenientes do modelo Eta CCS mostraram-se adequados para a simulação do balanço hídrico, apesar da subestimação da vazão em parte dos meses. Esse comportamento pode ser, ainda, motivado pela característica da precipitação calculada pelo Eta CCS, que, apesar da correção realizada, ainda pode ter sido responsável pela vazão inferior.

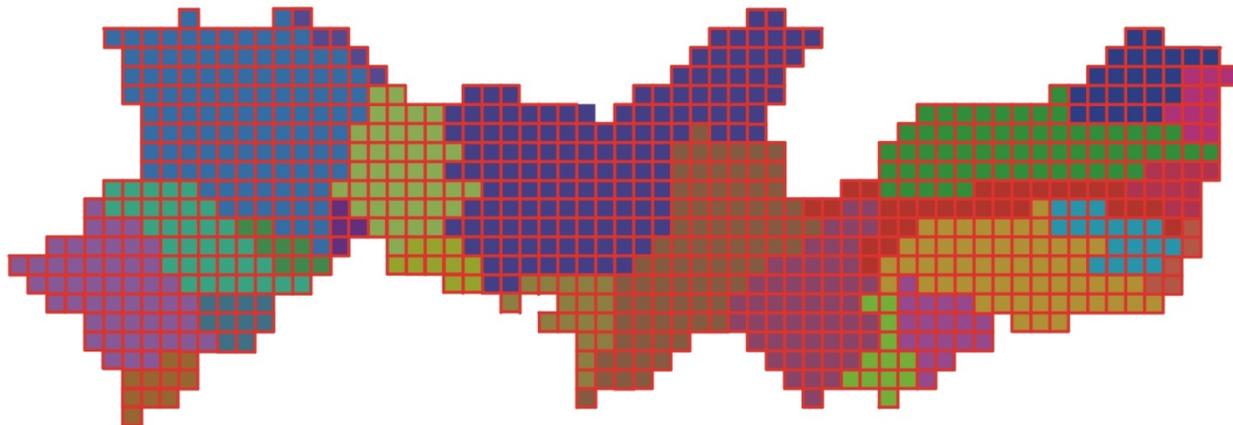


Figura 3 – Grade com células discretizadas representando as bacias hidrográficas da área de estudo.

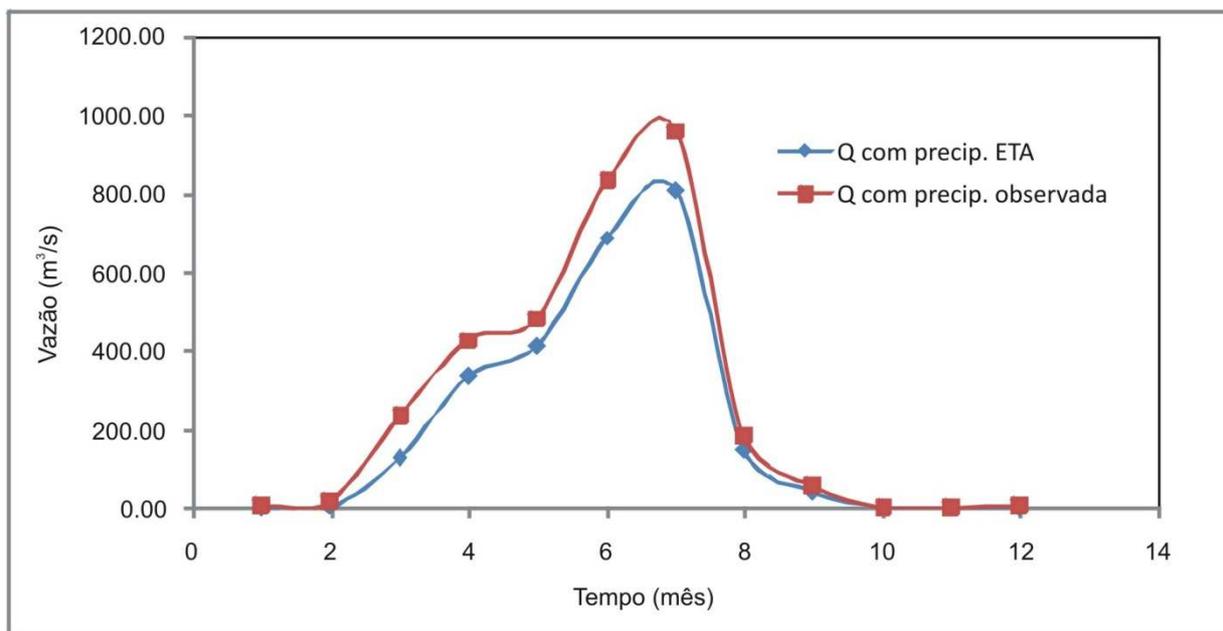


Figura 4 – Vazão de longo termo no período base.

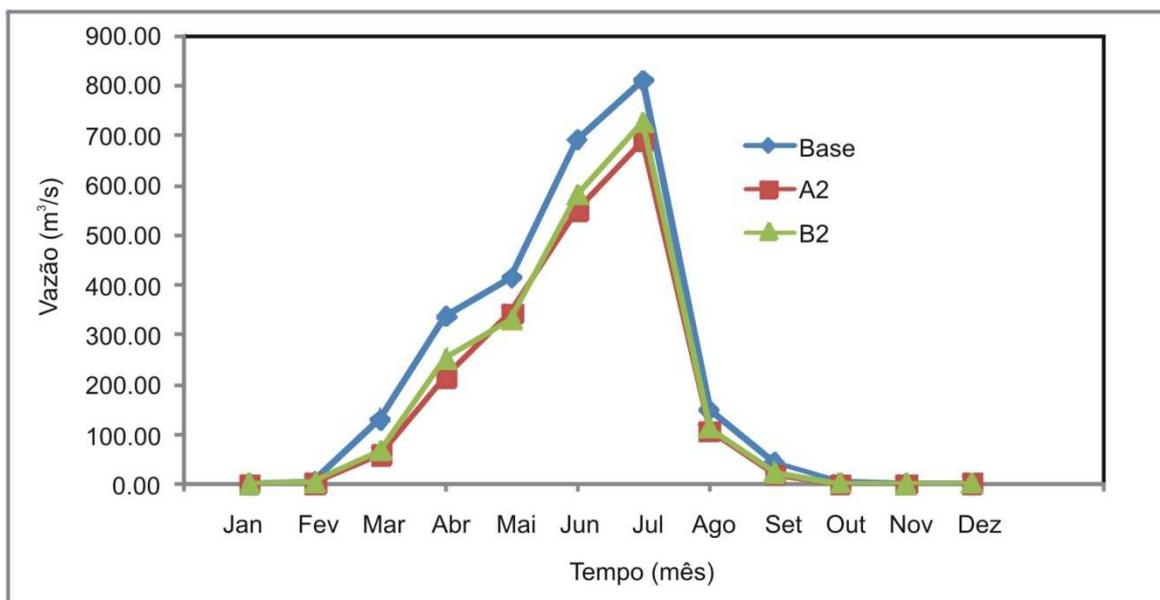


Figura 5 – Vazão dos períodos base (1960-1990) e cenários (2070-2100).

A análise de impacto de possíveis mudanças climáticas é feita comparando-se o escoamento superficial do período base com o escoamento dos cenários A2 e B2 do IPCC para o período 2070-2100 (Figura 5). No período base, as entradas de precipitação e evapotranspiração potencial são as calculadas pelo Eta CCS. A vazão média anual dos períodos base, A2 e B2 são, respectivamente, iguais a 213,86, 164,62 e 173,70, que resulta em uma redução do escoamento superficial de 23,03% e 18,78% nos cenários A2 e B2, respectivamente.

Os resultados podem ser analisados, também, com a espacialização da anomalia entre o período base e os cenários para as variáveis vazão (Figura 6), evapotranspiração (Figura 7) e umidade do solo (Figura 8).

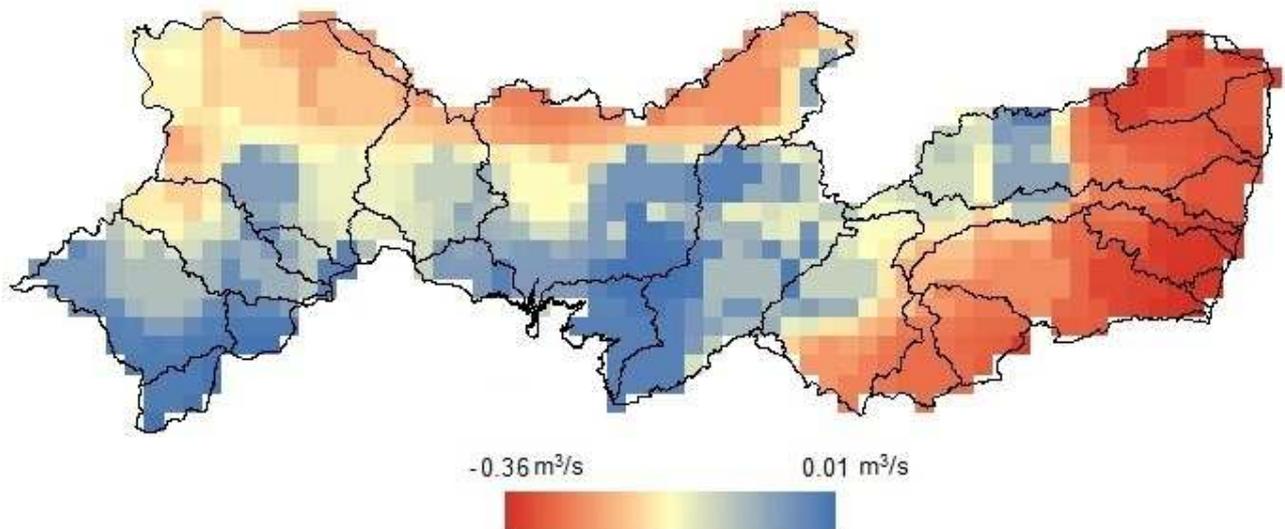


Figura 6 – Diferença do escoamento superficial entre o cenário A2 e período base em m^3/s (valores negativos indicam redução do escoamento).

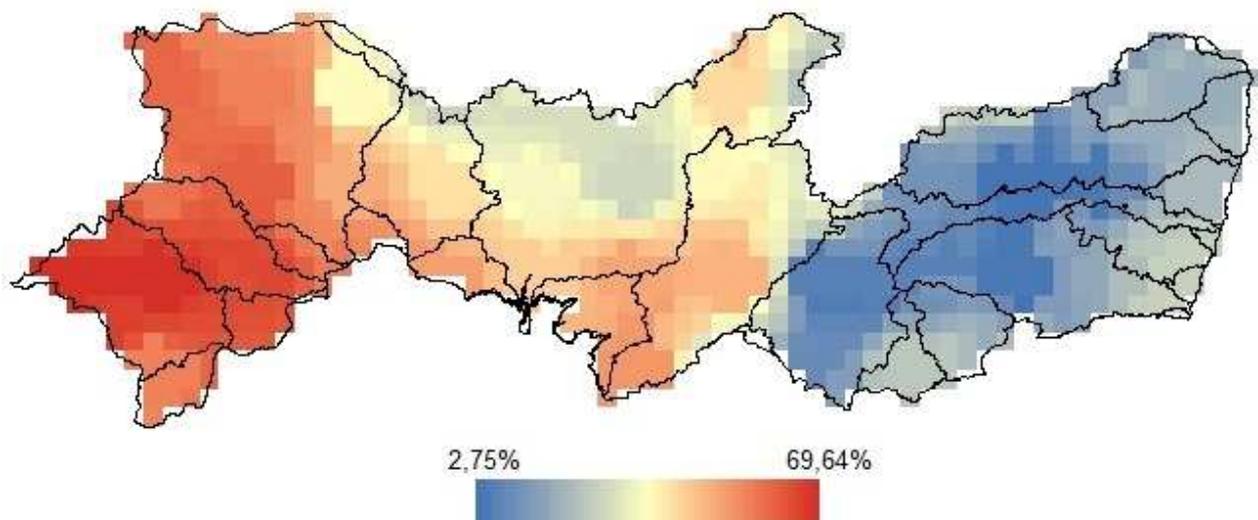


Figura 7 – Diferença da evapotranspiração real entre o cenário A2 e período base em porcentagem.

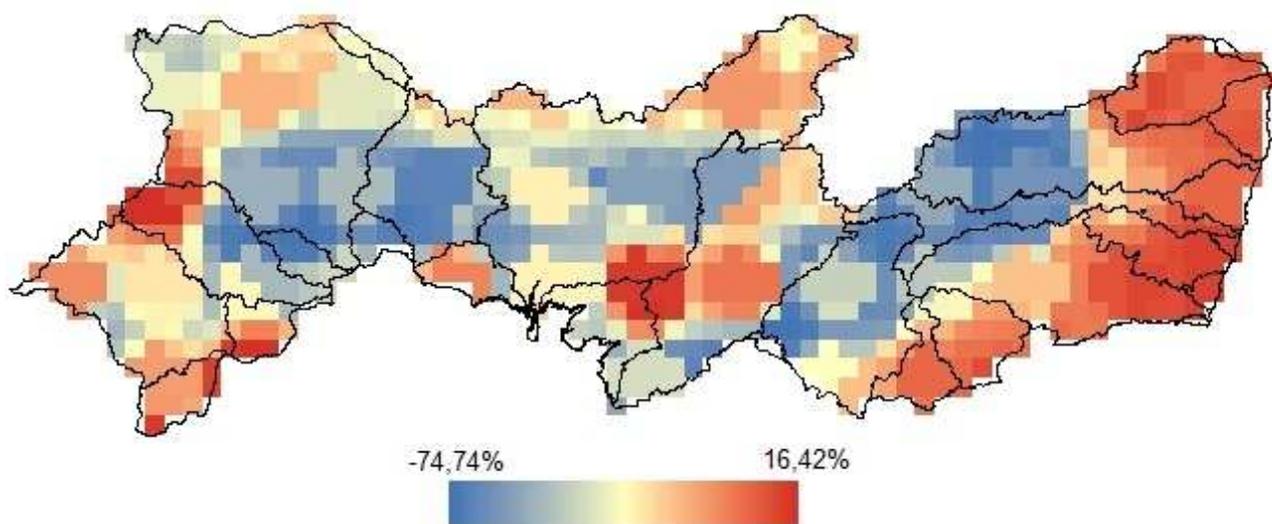


Figura 8 – Diferença da umidade do solo entre o cenário A2 e período base em porcentagem.

DESCOBERTAS E DISCUSSÕES

Os valores obtidos nas simulações estão em acordo com os encontrados por Milly et al. (2005) e em desacordo com os valores encontrados por UK Met Office (2005) e Salati et al. (2008). Enquanto UK Met Office (2005) encontrou aumento de vazão, Salati et al. (2008) obtiveram redução da vazão no Nordeste do Brasil em níveis que se aproximaram da vazão nula. Segundo Salati et al. (2008), a região Nordeste foi a que apresentou o pior desempenho quando se compararam os resultados do balanço hídrico com os correspondentes à vazão medida. Os valores de redução da vazão em torno de 20% estão próximos dos obtidos por Milly et al. (2005).

Em virtude da discretização da área de estudo em células quadradas, foi possível a verificação da distribuição espacial das anomalias referentes a cada variável simulada. Percebe-se que a vazão de longo termo reduzirá em praticamente todo o Estado, com maior impacto nas zonas do Agreste e da Mata. O Sertão semi-árido apresenta menor redução da vazão em termos absolutos, provavelmente, em função dos valores nessa área já serem baixos. A evapotranspiração real pode aumentar em até 70% no Sertão e apresentar menor alteração no Agreste e zona da Mata. A anomalia da umidade do solo apresentou um comportamento mais heterogêneo que as demais variáveis, mas consegue-se identificar áreas com aumento da umidade na zona da Mata e redução em pontos do Sertão.

CONCLUSÕES

O uso da formulação do cálculo do balanço hídrico com o método de Thornthwaite-Mather para avaliação de impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos mostrou ser uma boa alternativa ao uso de modelos hidrológicos complexos e que exigem um maior número de dados de entrada e calibração de parâmetros. Os valores médios de longo termo da vazão obtida com o balanço hídrico e os valores de vazão indicados no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado mostraram-se próximos, 267,78 m³/s e 263,54 m³/s, respectivamente.

O balanço hídrico no território do Estado de Pernambuco utilizando variáveis climatológicas calculadas com modelo climático permitiu avaliar o saldo de escoamento superficial referente aos cenários do IPCC para o período de 2070 a 2100. Foram utilizados dados do modelo regional Eta CCS aninhado ao modelo global HadAM3P. As simulações permitiram a estimativa, para cada cenário e para os modelos climáticos utilizados, de como se comportam as variáveis escoamento superficial, evapotranspiração real e umidade do solo.

O uso de modelos climáticos regionais para a realização de downscaling dinâmico tem se mostrado a forma mais eficiente para estudos de mudanças climáticas. É particularmente importante em estudos de áreas cujas dimensões não são compatíveis com a resolução espacial dos modelos climáticos globais. Com referência aos objetivos deste artigo, para a obtenção de resultados mais conclusivos, é necessário o uso de um maior número de modelos climáticos, com preferência para aqueles que conseguem representar bem os processos climáticos da região de estudo. A média dos modelos pode amenizar as tendências que podem ocorrer quando se utiliza apenas um modelo.

É necessária a busca de informações de capacidade de armazenamento do solo com melhor resolução espacial haja vista que o dado utilizado no artigo possui informação em uma malha de 50 km de lado. A melhor representação da umidade do solo pode repercutir nos resultados de escoamento superficial e evapotranspiração real.

Maior cuidado deve ser dado, também, com a validação do modelo de balanço hídrico. Neste estudo, comparou-se o resultado da simulação do período base (1960-1990) apenas com a vazão média anual de longo termo. Deve-se tentar obter, ao menos, valores médios mensais de longo termo para comparação. Nesse caso, seria necessário um estudo de regionalização da vazão nas bacias hidrográficas do Estado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio recebido pelo projeto Estudos das Mudanças Climáticas e seus Impactos em Pernambuco, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Programa em Mudanças Climáticas e à Rede Brasileira de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais, todos financiados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia do Governo do Brasil.

REFERÊNCIAS

- Akhtar M, Ahmad N, Booij MJ. Use of Regional Climate Model Simulations as input for Hydrological Models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya Region. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 1075-1089, 2009.
- Dunne KA, Willmott CJ. Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. **International Journal of Climatology**, 16, 841-859, 1996.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 570 pp., 2000.
- Marengo JA, Ambrizzi T, Rocha RP et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v.35, n. 6, p. 1073-1097, 2009.
- Milly PCD, Dunne KA, Vecchia AV. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. **Nature**, v. 438, p. 347-350, 2005.
- Nóbrega MT, Collischonn W, Tucci CEM, Paz, AR. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15, p. 585–595, 2011.
- Pereira AR. Simplificando o Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.
- Pernambuco. Plano Estadual de Recursos Hídricos – Documento Síntese. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente – Diretoria de Recursos Hídricos. 1998.
- Salati T, Schindler W, Victoria DC, Salati E, Souza JCS, Nova NAV. Economia das Mudanças Climáticas no Brasil. Estimativas da Oferta de Recursos Hídricos no Brasil em Cenários Futuros de Clima. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 80 p, 2008.
- Tomasella J, Rodriguez DA, Cuartas LA, Ferreira M, Ferreira JC, Ferreira JC, Marengo J. Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na Bacia do Rio Tocantins. CCST/INPE, Cachoeira Paulista, 2009.

- UK Met Office. Climate change, rivers and rainfall. Recent research on climate change science from the Hadley Centre. 2005.
- Van Pelt SC, Kabat P, ter Maat HW et al. Discharge Simulations Performed with a Hydrological Model Using Bias Corrected Regional Climate Model Input. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 2387-2397, 2009.
- Vicuna S, Maurer EP, Joyce B et al. The Sensitivity of California Water Resources to Climate Change Scenarios. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 2, p. 482-498, 2007.
- Wood AW, Maurer EP, Kumar A, Lettenmaier DP. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, 2002.