

Mudanças climáticas e o escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Goiana - Pernambuco - Brasil

Recibido: 16 de marzo de 2012. Aceptado en versión final: 9 de mayo de 2012.

Antonio Marcos dos Santos*
Josicléda Domiciano Galvincto*
Magna Soelma Bezerra de Moura**

Resumo. O objetivo deste estudo é projetar e analisar o comportamento do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Goiana frente aos cenários de mudanças climáticas B2 e A2. As simulações foram desenvolvidas através do modelo hidrológico semi-distribuído simples de dois parâmetros e a temperatura média mensal do ar, representando os cenários de mudanças climáticas, foi projetada pelo modelo climático regional Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS). Os resultados apontam que as maiores reduções no escoamento superficial ocorrerão nos meses do segundo

semestre, para ambos os cenários de mudanças climáticas, podendo proporcionar problemas, os quais refletirão diretamente sobre a organização espacial dos municípios inseridos na bacia, requerendo, assim, medidas de enfiamentos dos impactos das mudanças climáticas no âmbito regional no intuito de minimizar prejuízos no futuro.

Palavras chave: Clima, recursos hídricos, projeção e impactos socioespaciais.

Cambio climático y el flujo en la cuenca del rio Goiana – Pernambuco - Brasil

Resumen. El objetivo de este estudio es diseñar y analizar el comportamiento del flujo en la cuenca del río Goiana frente a los escenarios del cambio climático B2 y A2. Las simulaciones se realizaron por medio del modelo hidrológico semi-distribuido simple con dos parámetros y la temperatura media mensual del aire, con la representación de los escenarios del cambio climático, fue diseñada por el modelo climático regional Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS). Los resultados muestran que las mayores reducciones del flujo se producen en la segunda

mitad del año, para ambos escenarios del cambio climático, y puede presentar problemas que se reflejan directamente en la organización espacial de los municipios incluidos en la cuenca, por tanto se requieren medidas de mitigación de los impactos del cambio climático en el plano regional con el fin de minimizar daños a futuro.

Palabras clave: Clima, recursos hídricos, proyección y impacto socio-espacial.

* Universidad de Pernambuco, Brasil. E-mail: geo_fisic@yahoo.com.br; josicledar@hotmail.com

** Empresa Brasileira de Investigación Agropecuaria, Embrapa, Brasil. E-mail: magna_upaa@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Os reflexos das mudanças climáticas são visíveis em várias partes do planeta a exemplo do que vem acontecendo com os recursos hídricos. Alterações na dinâmica global da temperatura média do ar e das precipitações pluviométricas afetam a quantidade e, conseqüentemente, na qualidade desse recurso vital para sobrevivência humana (Ma *et al.*, 2008). Cunha *et al.* (2002) e Santos *et al.* (2010) acrescentam que os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos são sentidos tanto na oferta quanto na demanda. De acordo com os pesquisadores, alterações na dinâmica da precipitação pluviométrica vêm provocando variações na distribuição temporal dos recursos hídricos, proporcionando aumento na procura por este recurso em algumas áreas (conflitos) e disponibilidade além da demanda em outras.

Em vários países, principalmente nos subdesenvolvidos e nos considerados em desenvolvimento, a relação mudanças climáticas e recursos hídricos afetam seus dinamismos socioespaciais. No continente africano e asiático, as reduções nas vazões de várias bacias hidrográficas desde a década de 1980 trazem consigo reduções na produtividade agrícola das grandes, médias e pequenas propriedades rurais e conturbações nas áreas urbanas de países como o Malavi, Tanzânia, Camarões, República Democrática do Congo, Congo, China, Índia entre outros. As conseqüências assentam-se no agravamento da falta de alimentos, desempregos e migrações. Acrescentam-se disseminações de doenças de veiculação hídrica como a cólera, Leishmaniose entre outras (Madulu, 2003; Tingem *et al.*, 2008; Yongjian, 2003).

Bates *et al.* (2008) e Santos *et al.* (2010) apontam que parte dos estudos divulgados no âmbito mundial sobre a relação mudanças climáticas e recursos hídricos apresentam três resultados. Em várias bacias vem sendo evidenciados incrementos no escoamento superficial, a exemplo das localizadas nas altas latitudes e boa parte dos Estados Unidos. Em regiões inseridas na África ocidental, sul da Europa e parte da América do Sul registram-se reduções no escoamento superficial. Há também regiões em que não são identificadas ten-

dências negativas e nem positivas no escoamento superficial.

No Brasil, Marengo (2006) aponta que bacias hidrográficas de grande porte apresentam reduções no escoamento superficial e em outras, tendência de aumento. Problemática que aliada aos cenários de mudanças climáticas, sejam os mais otimistas e/ou pessimistas, poderá acarretar mudanças na organização socioespacial urbana e agrária inseridas no território brasileiro.

Os reflexos dos impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade dos recursos hídricos, a exemplo do que foram apresentados nos estudos listados anteriormente, despertam nas comunidades científicas a necessidade de desenvolverem novos instrumentos técnicos-metodológicos e bases teóricas capazes de subsidiarem estudos destinados ao conhecimento cada vez mais apurados sobre as relações entre mudanças climáticas e recursos hídricos.

No seio das novas investidas científicas, destaca-se o desenvolvimento do modelo hidrológico semi-distribuído simples, o qual é capaz de simular vazões nas mais variadas escalas temporais e espaciais de análise. Este modelo foi apresentado por Xiong e Guo (1999). Cinco anos depois, Guo *et al.* (2002) utilizaram o referido modelo para simular e projetar os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Gangjiang e Hanjiang, ambas inseridas no território nacional da República Popular da China. Os resultados, segundo os autores, foram considerados ótimos.

Outro relevante estudo foi realizado por Jiang *et al.* (2007), objetivando avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água na bacia hidrográfica do rio Dongjiang, também na China. Para alcançar o objetivo do estudo foram testados seis modelos hidrológicos e de balanço hídrico entre eles o modelo hidrológico mensal semi-distribuído simples de dois parâmetros de Guo, sendo que este apresentou resultados satisfatórios nos testes, principalmente, ao comparar os dados de vazão simulados com os observados.

Aos poucos o modelo hidrológico mensal semi-distribuído simples vem sendo utilizado em vários estudos desenvolvidos em diferentes regiões do mundo e com novas adaptações. Vale destacar os

trabalhos desenvolvidos por Mauelhi *et al.* (2006), Duarte (2009), Silva e Galvínio (2010) entre outros. Exames que apontaram resultados satisfatórios obtido pelo modelo, colocando-o como uma ferramenta de fundamental importância nas políticas de planejamento dos recursos hídricos atrelada a gestão do território.

Diante dos reflexos envolvendo mudanças climáticas e os recursos hídricos superficiais, problemática que refletem na organização socioespacial de diferentes regiões no planeta e, da eficiência do modelo hidrológico desenvolvido por Xiong e Guo (1999) o presente artigo tem como objetivo projetar e analisar o comportamento do escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Goiana tendo como agente modificante os cenários de mudanças climáticas B2 e A2.

Trata-se de um estudo que busca contribuir com as políticas de planejamento dos recursos hídricos na referida bacia hidrográfica auxiliando na gestão dos territórios municipais inseridos nesta unidade ambiental. Almeja-se, também, contribuir com novos estudos no seio da ciência geográfica e áreas afins utilizando a proposta metodológica de Xiong e Guo (1999) nos diagnósticos das relações entre mudanças climáticas e os recursos hídricos superficiais.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Goiana está localizada entre as coordenadas de 07°22'20" e 07°54'47" latitude sul e 34°49'06" e 35°41'43" longitude oeste no Estado de Pernambuco, Brasil (Figura 1). Possui uma área de 2.847,53 km² abrangendo 26 municípios da Região da Zona da Mata Norte pernambucana. Abastece com suas águas o consumo doméstico, industrial e agrícola da maioria destes territórios municipais.

Os meses com maiores índices pluviométricos sobre a bacia são: março, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro (Figura 2), os quais, também, são considerados os mais frios na escala anual de acordo com Santos e Galvínio (2009).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Obtenção dos dados

O modelo hidrológico mensal semi-distribuído simples montado para simular o escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Goiana com base na proposta de Xiong e Guo (1999) tem como variáveis de entrada a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração potencial e como elementos dos

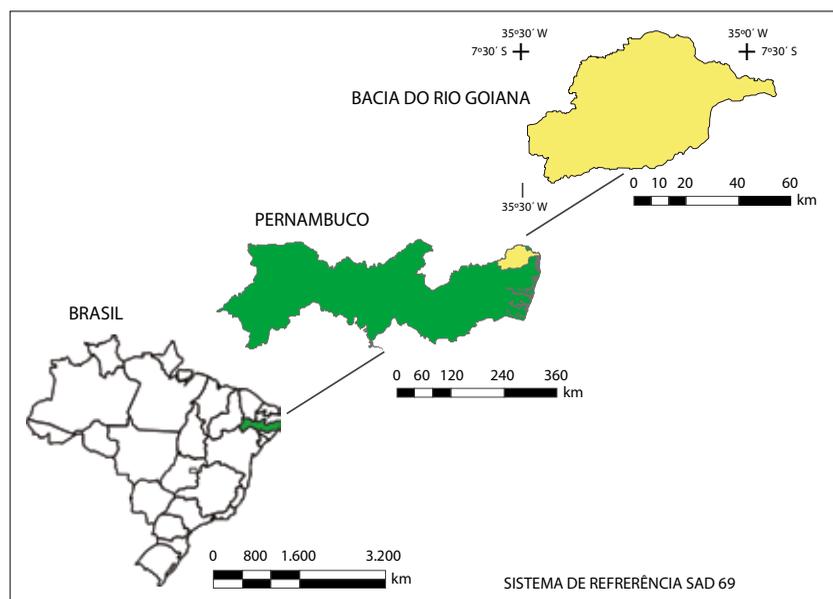


Figura 1. Bacia hidrográfica do rio Goiana – Pernambuco, Brasil.

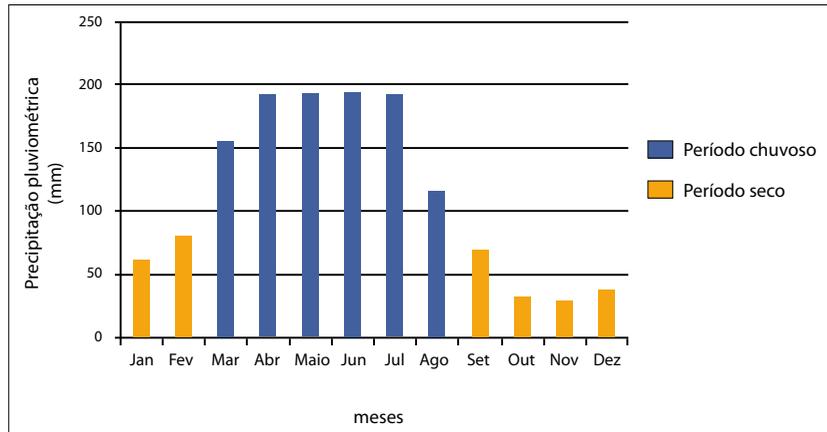


Figura 2. Normal climatológica pluviométrica mensal para a bacia hidrográfica do rio Goiana.

parâmetros a porosidade e profundidade dos solos e a interceptação da chuva pela cobertura vegetal, este último elemento inserido especificamente para o presente estudo.

Os dados de precipitação pluviométrica mensal utilizados para calibração do modelo foram coletados do banco de informação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), registrados em cinco postos pluviométricos distribuídos ao longo da bacia hidrográfica (Figura 3). A série histórica utilizada abrange os anos de 1963 a 1992.

Os dados de evapotranspiração potencial mensal, os quais abrangem o mesmo período da

série histórica pluviométrica, foram gerados pelo modelo de Balanço Hídrico Climatológico de Thornthwaite e Mather (1995) para cada um dos postos pluviométricos (equação 1).

$$ETP = 16 \left(10 \frac{Tm}{I} \right)^a \left(\frac{Nbs}{12} \right) \left(\frac{Nd}{30} \right) \quad (1)$$

Em que, *ETP* é a evapotranspiração potencial mensal; *Tm* é a temperatura média mensal adquirida do banco de dados do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE) correspondentes aos anos dos dados pluviométricos, é a média de

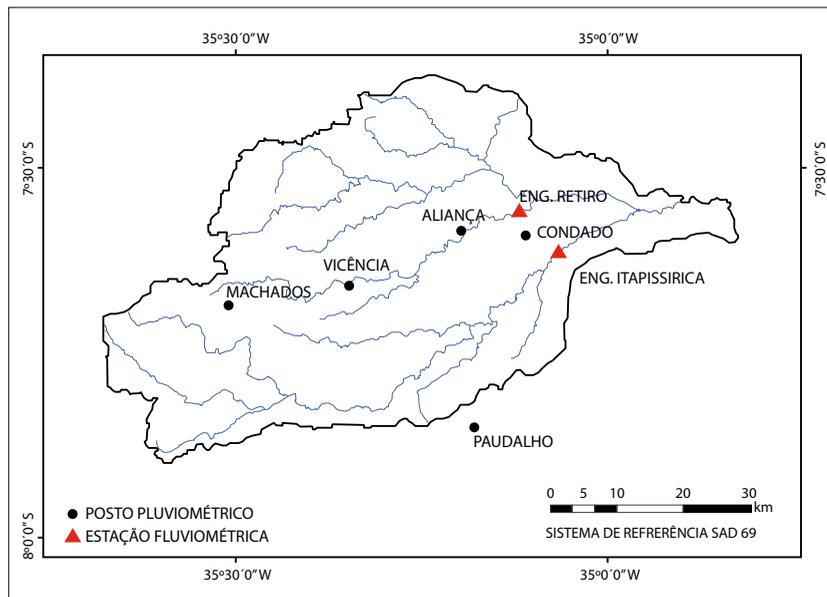


Figura 3. Postos pluviométricos e estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Goiana.

horas por dia com insolação, Nd é o número de dias no mês, e I e a foram obtidos pelas equações 2 e 3, respectivamente.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0.2 Tm)^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 0.49 + 0.018I - 7.7 \times 10^{-5} I^2 + 6.75 \times 10^{-7} I^3 \quad (3)$$

Quanto aos dados referentes à estrutura pedológica (porosidade e profundidade) da bacia hidrográfica em estudo, estes foram obtidos do banco de informações do Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE) e correlacionados com os estudos de Brasil (1981) e Galvêncio (2005).

Para obtenção do quantitativo de água interceptada pela cobertura vegetal foi analisada a estrutura do uso do solo da bacia hidrográfica com base no estudo de Santos *et al.* (2008) e no Projeto Nacional de Ações Integradas Público Privadas para a Biodiversidade (PROBIO), somadas às verificações em campo.

Para calibração do modelo hidrológico foram utilizados dados de vazão coletados nas estações fluviométricas do Engenho Retiro (anos de 1978 a 1986) e do Engenho Itapissirica (ano de 1974 a 1983), localizadas no interior da bacia (Figura 3). Informações obtidas do banco de dados da Agência Nacional das Águas (ANA).

A validação do modelo, para ambas as estações fluviométricas, ocorreu com dados que abrange os anos de 1987 a 1989 para Estação do Engenho Retiro e de 1985 a 1989 para Estação do Engenho Itapissirica, coletados do banco de dados da ANA.

Desenvolvimento, calibração e validação do modelo hidrológico

De posse dos dados climatológicos e físicos da bacia, o próximo passo foi o desenvolvimento, calibração e validação do modelo hidrológico semi-distribuído simples. A equação 4 apresenta a estrutura de funcionamento do referido modelo.

$$Q_t = S(t) \tanh [S(t)/SC] \quad (4)$$

Em que, Q_t é o escoamento superficial médio mensal; $S(t)$ representa o armazenamento de água

no solo; \tanh é a tangente hiperbólica e SC é a capacidade de campo dos solos da bacia.

Para obtenção do armazenamento de água nos solos utilizou-se a equação 5.

$$S_t = S(t-1) + P(t) - E(t) \quad (5)$$

Em que, S_t é o armazenamento de água no solo; $S(t-1)$ é o armazenamento de água no solo no mês anterior, $P(t)$ é a precipitação pluviométrica média mensal e $E(t)$ representa a evapotranspiração potencial mensal.

Para obtenção da capacidade de retenção da água nos solos da bacia utilizou-se a equação 6.

$$SC = \text{Porosidade} * \text{Profundidade} * 100 \quad (6)$$

A porosidade é um valor adimensional apresentado em porcentagem, enquanto que a profundidade foi obtida em metros.

Montado o modelo hidrológico, efetuou-se sua calibração e validação. Para isto, foram utilizados os critérios de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) e o erro relativo. Critérios apontados pelos estudos de Ajami *et al.* (2004), Galvêncio (2005), Mouelhi *et al.* (2006) e Webb *et al.* (2008) como eficazes para calibrações e validações de modelos hidrológicos.

A equação 7 apresenta a base do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970).

$$R^2 = \frac{F_0 - F}{F_0} 100 \quad (7)$$

Em que, R^2 é o critério de eficiência de Nash e Sutcliffe; F_0 é a soma do quadrado da diferença entre o escoamento observado e sua média, F é a soma do quadrado da diferença entre o escoamento observado com o estimado. Quanto mais próximo for o R^2 de 100% maior é a eficiência e a simulação.

A equação 8 apresenta a base de cálculo do erro relativo.

$$RE = \sum (\bar{Q}_i - Q_i) / \sum \bar{Q}_i 100 \quad (8)$$

Em que, RE é o erro relativo; Q_i é o escoamento superficial estimado e \bar{Q}_i representa o escoamento

mento observado. Quanto mais próximo de zero for o valor do *RE*, melhor será a simulação.

Espacialização da temperatura média do ar e simulação do escoamento superficial

Após montagem, calibração e validação do modelo hidrológico semi-distribuído simples, partiu-se para simulação do escoamento superficial frente aos cenários de mudanças climáticas, B2 (otimista) e A2 (pessimista). Para isto, foram selecionados dados de temperatura média mensal do ar gerado pelo modelo climático regional Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS), desenvolvido pelo Centro de Estudos Meteorológicos Hadley e reprojeto para o território brasileiro em uma grade regular de 0,5° x 0,5° pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os anos selecionados foram 2030 e 2060 para ambos os cenários de mudanças climáticas. Os dados de temperatura média mensal do ar foram espacializados sobre a bacia hidrográfica através do método de interpolação da Krigagem ordinária com o auxílio do software Arcgis 9.3 e, conseqüentemente, transformados em mapas.

A partir dos dados de temperatura provenientes do PRECIS foi simulada a evapotranspiração potencial mensal gerada por meio do modelo de Balanço Hídrico Climatológico de Thornthwaite e Mather (1995), através da equação 1, apresentada anteriormente.

A variável evapotranspiração potencial mensal, obtida no processo descrito no parágrafo anterior, alimentou o modelo hidrológico, sendo que, a variável precipitação pluviométrica utilizada para cada ano projetado foi a média histórica mensal

obtida através dos dados observados para cada uma das cinco estações pluviométricas supracitadas. O não uso dos dados de precipitação pluviométrica projetado pelo PRECIS ocorreu devido aos discrepantes valores no quantitativo de chuva gerado pelas simulações nos diferentes modelos climatológicos.

O escoamento superficial simulado, para ambos os cenários, foi comparado com a média histórica do escoamento observado e através desta confrontação obteve-se o desvio percentual mensal gerado pela Equação 9. Os resultados foram representados em gráficos.

$$\delta p\% = 100(Q_i - Q_{mo}) / Q_{mo} \quad (9)$$

Em que, $\delta p\%$ é o desvio percentual mensal do escoamento superficial, Q_i é o escoamento superficial mensal simulado e Q_{mo} é a média histórica do escoamento superficial observado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração, validação e funcionamento do modelo hidrológico

A Tabela 1 apresenta os resultados finais dos parâmetros empregados na calibração do modelo hidrológico mensal semi-distribuído simples. Resultados que atingiram o critério de eficiência de Nash e Sutcliffe no valor de 96.09% na estação fluviométrica do Engenho Retiro e de 96.48% na estação do Engenho Itapissirica. Já o Erro Relativo foi de 0.10 na estação fluviométrica do

Tabela 1. Valores finais dos componentes dos parâmetros utilizados para calibração do modelo hidrológico

Postos pluviométricos	Componentes dos parâmetros		
	Porosidade do solo (%)	Profundidade (m)	Interceptação da chuva pela cobertura vegetal (%)
Aliança	64	3	45
Vicência	65	5,2	45
Machados	40	1,6	50
Paudalho	41	3,6	50
Condado	41	3,1	40

Engenho Retiro e de 0,14 na estação do Engenho Itapissirica.

A calibração do modelo hidrológico ocorreu através de modificações realizadas nos parâmetros. Os primeiros ajustes foram feitos nos componentes referentes às características dos solos da bacia hidrográfica. Como há predomínio do Argissolo Vermelho e do Argissolo Vermelho-Amarelo, solos com grandes concentrações de argila no horizonte Bt, foram utilizados valores de porosidade sugeridos por Galvínio (2005), que variam entre 40 a 65% para esses tipos de solos. Quanto ao fator profundidade Brasil (1981) destaca que os solos citados apresentam em média uma profundidade superior a 4m em vários pontos da bacia hidrográfica. A partir daí, os valores de profundidade utilizados durante o processo de calibração variaram entre 1.5 a 5.5 m.

Em relação ao componente de interceptação da pluviosidade pela cobertura vegetal, Santos *et al.* (2008) apontam que mais da metade da cobertura vegetal da bacia é representada pelo cultivo da cana-de-açúcar. Prática agrícola que de acordo com Sanches *et al.* (2008) atua como boa interceptadora das águas provenientes das chuvas a, depender, de sua fase de desenvolvimento. A partir daí, optou-se em utilizar na calibração que 30 a 50% da precipitação pluviométrica, a qual chega até a bacia, é interceptada pela cobertura vegetal.

Quanto à validação do modelo hidrológico, este atingiu pelo critério de eficiência de Nash e Sutcliffe um valor de 94% na estação fluviométrica do Engenho Retiro e de 93.14% na estação fluviométrica do Engenho Itapissirica. Já o Erro Relativo foi de 0.11 na estação fluviométrica do Engenho Retiro e de 0.14 na estação do Engenho Itapissirica. Resultados semelhantes aos atingidos pela calibração, apontando, assim, para o bom funcionamento do modelo.

Cenários de mudanças climáticas e a temperatura média mensal do ar

Cenário B2

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) o cenário de mudanças climáticas B2 é considerado otimista. Cenário, que foi projetado tendo como base uma

organização socioespacial com médio crescimento populacional e ênfases locais e regionais para a sustentabilidade socioambiental e econômica.

Para os meses de março, abril, maio, junho, julho e agosto, ambos considerados como os seis meses mais frios na escala anual sobre a bacia hidrográfica, o modelo climático regional PRECIS projeta para o cenário B2 acréscimos médios de 1° C por mês entre os anos de 2030 a 2060 (Figura 3).

A projeção para março de 2030 indica uma temperatura média do ar no valor de 26° C em toda área da bacia, chegando a 27° C em 80% da mesma no ano de 2060. Para o mês de abril, em 2030, as projeções apontam uma temperatura média do ar no valor de 26° C em 80% da bacia, valor que expandirá por toda área da bacia no ano de 2060 (Figura 3).

Para o mês de maio, ano de 2030, a projeção do PRECIS aponta que 70% da área da bacia hidrográfica apresentará uma temperatura média de 25° C, valor que permanecerá em 50% da área em 2060. Também, projeta-se para a outra metade da bacia, no ano de 2060, uma temperatura média de 26° C (Figura 3).

A projeção para o mês de junho não sofrerá alterações bruscas no intervalo entre 2030 a 2060 e, sim, pequenos recuos e avanços entre as classes de temperatura de 24, 25 e 26° C. Para o mês de julho, ano de 2030, projeta-se duas classes de temperatura, uma com 24° C e outra com 25° C. Trinta anos depois, cada uma das classes receberá incremento de 1° C, atingindo assim 25 e 26° C, respectivamente (Figura 3).

Para o mês de agosto, último do período frio, projeta-se para o ano de 2030 duas classes de temperatura, uma com 24° C e outra com 25° C. Classes que permaneceram em 2060, porém, com um tímido surgimento da classe com valor de 26° C (Figura 3).

As projeções da temperatura média do ar gerada pelo modelo PRECIS para os meses do período seco (setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) entre os anos de 2030 a 2060 apontam em média aumento de 1° C. Dinâmica semelhante à apresentada nos meses do período frio (Figura 3).

Para o mês de setembro as projeções indicam duas classes de temperatura, uma com 25° C e outra

com 26° C, sendo que, a primeira ocupa 70% da área da bacia em 2030 e expande para 80% da mesma no ano de 2060 (Figura 3).

Para o mês de outubro, ano de 2030, projeta-se a divisão da bacia em duas classes de temperatura, uma com 25° C e outra com 26° C. Classes que terão incremento de 1° C no intervalo de 2030 a 2060, alcançando 26 e 27° C, respectivamente (Figura 3).

Em relação ao mês de novembro, projeta-se para o ano de 2030 temperaturas médias de 25 e 26° C e no intervalo de 2030 a 2060 simula para cada classe de temperatura aumento de 1° C. Para o mês de dezembro de 2030 as projeções indicam que 80% da bacia apresentará temperatura média de 26° C e uma pequena área com 27° C. O incremento de 1° C no intervalo 2030-2060 amplia a área de temperatura de 27° C e, conseqüentemente, reduz para 40% a área com 26° C (Figura 3).

Para o mês de janeiro, ano de 2030, projeta-se uma temperatura média no valor de 26° C em 70% da bacia e 25° C no restante. Com aumento de 1° C no intervalo 2030-2060 projeta para o referido mês temperatura de 27° C em 90% da bacia e 26° C na área restante. Para o mês de fevereiro grande parte da bacia terá temperatura projetada em 27° C com uma pequena área apresentando 28° C. O incremento de 1° C expandirá em 2060 a área com temperatura de 28° C e reduzirá a área com 27° C (Figura 3).

Cenário A2

O cenário de mudanças climáticas A2, de acordo com o IPCC (2007) é considerado pessimista e modela uma organização socioespacial com alto crescimento da população aliado ao alto consumo de energia e fraco desenvolvimento tecnológico.

Para os meses considerados frios na bacia hidrográfica em estudo projetam-se acréscimos que variam entre de 1 a 2° C na temperatura média mensal do ar no intervalo de 2030 a 2060 (Figura 4).

No mês de março, a projeção para o ano de 2030 aponta praticamente para toda bacia hidrográfica temperatura média do ar no valor de 27° C. Trinta anos depois, projeta-se um incremento de 1 a 2° C, proporcionando para a área da bacia temperaturas de 27 e 28° C (Figura 4).

Para o mês de abril, ano de 2030, projeta-se para 80% da bacia temperatura média de 27° C com uma pequena área no sudoeste e leste apresentando 25 e 28° C, respectivamente. No intervalo de 2030-2060 as projeções indicam aumento de 1 a 2° C conduzindo a bacia a apresentar em 30% de sua área temperatura de 27° C e no restante 28° C (Figura 4).

No mês de maio o acréscimo de 2° C no intervalo de 2030-2060 levará a temperatura na maior parte da bacia de 25° C em 2030 a 27° C no ano de 2060 (Figura 4).

Para o mês de junho, ano de 2030, projeta-se a divisão da bacia em duas faixas de temperaturas, uma com 24° C e outra com 25° C. O incremento de 1° C elevará a temperatura para 25 e 26° C no ano de 2060, no referido mês, respectivamente (Figura 4).

A projeção para o mês de julho, ano de 2030, divide a bacia em duas classes de temperatura média do ar, uma com de 23° C e outra com 24° C. Para o ano de 2060, o aumento de 1 e 2° C ao longo da bacia proporcionará o surgimento de três classes de temperatura, uma com 24° C, outra com 25° C e uma pequena área com 26° C no exutório da bacia (Figura 4).

No mês de agosto, ano de 2030, o PRECIS estima duas faixas de temperatura média do ar, 24 e 25° C. No intervalo de 30 anos as projeções indicam aumento de 2° C em 90% e de 1° C em 10% da bacia, configurado a espacialização da temperatura média nos valores de 24, 25 e 26° C no ano de 2060 (Figura 4).

Para os meses do período seco, projetam-se acréscimos que variam entre 1 a 3° C no intervalo de 2030 a 2060 (Figura 4). As projeções para setembro, ano de 2030, subdivide a bacia em duas faixas de temperatura, uma com 25 e outra com 26° C. No intervalo entre 2030 a 2060 as projeções apontam um incremento de 1° C em 70% da bacia e 2° C em 30%. Acréscimos que proporcionará temperatura média de 26° C na maior parte da bacia e 27° C na região do exutório e no setor leste (Figura 4).

As projeções para o mês de outubro fragmenta a bacia em duas faixas de temperatura, 25 e 26° C. No intervalo de trinta anos projeta-se um aumento

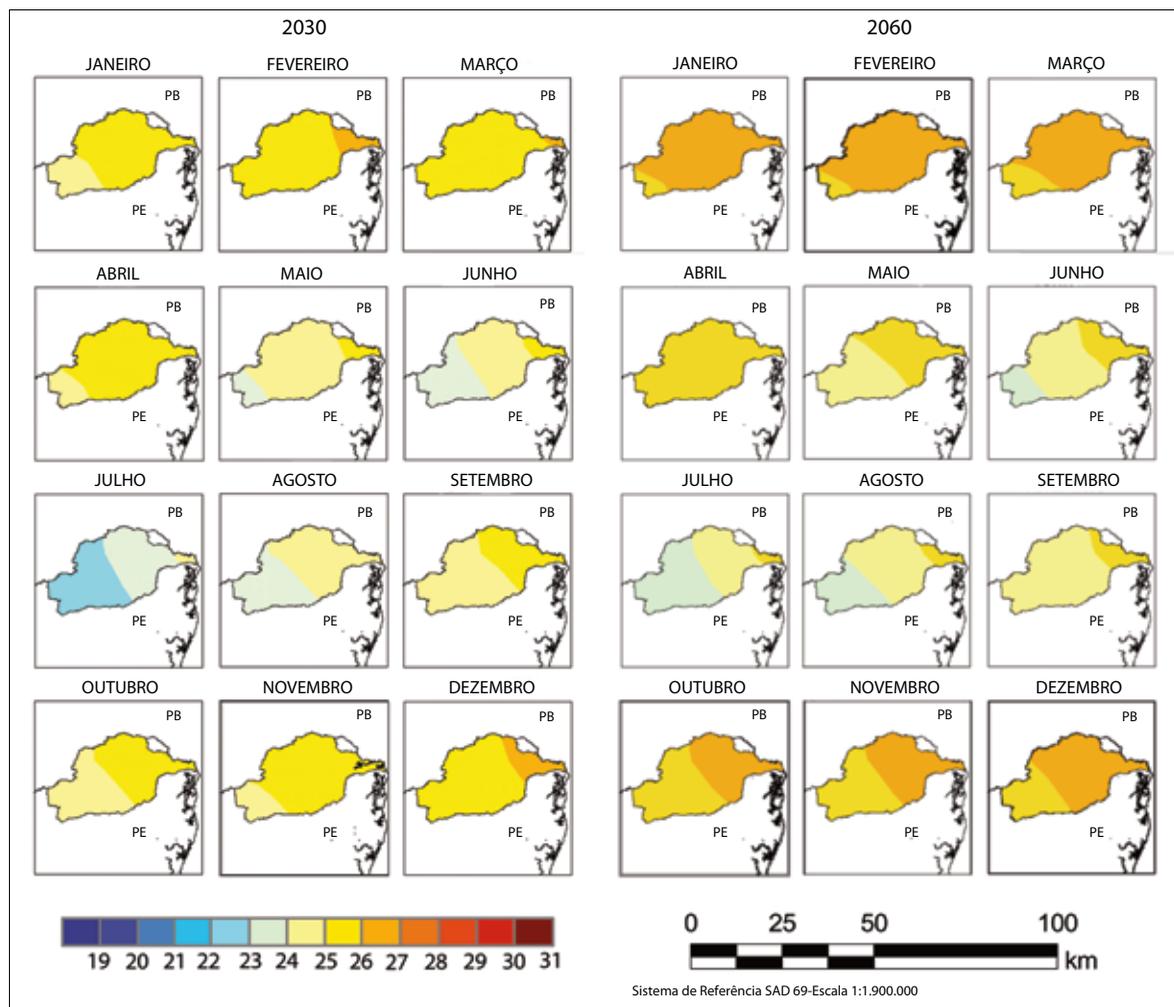


Figura 4. Projeção do modelo climático PRECIS relativo à temperatura média mensal do ar para o ano de 2030 e 2060 sobre a bacia hidrográfica do rio Goiana (cenário B2).

de 2° C em toda a área da bacia, indicando que no ano de 2060 a temperatura média do ar poderá chegar a 27° C em 80% da bacia e a 28% na porção restante (Figura 4).

Para o mês de novembro, ano de 2030, as duas classes de temperatura projetada para o mês de outubro permanecem, porém, incrementos de 2 e 3° C no intervalo de 2030 a 2060 modulam três classes de temperatura no fim do intervalo, as quais correspondem a 27, 28 e 29° C (Figura 4).

No mês de dezembro, ano de 2030, projeta-se duas classes de temperatura, uma com 26 e outra com 27° C. Com o incremento de 2°C a bacia

apresentará no ano de 2060 temperaturas de 28 e 29° C (Figura 4).

O PRECIS apresenta para o mês de janeiro de 2030 temperatura média do ar no valor de 27° C para toda área da bacia. No intervalo entre os anos de 2030 a 2060 projetam-se acréscimos de 1 a 2° C, configurando, assim, duas faixas de temperatura no ano de 2060, uma com 28 e outra com 29° C. Dinâmica semelhante ao mês de janeiro é projetada para o mês de fevereiro, porém, a classe de 29° C abrange uma área superior a ocupada no mês anterior.

Projeção do escoamento superficial nos cenários de mudanças climáticas B2 e A2

Os reflexos das projeções da temperatura média mensal do ar, nos cenários B2 e A2, sobre o escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Goiana são apresentados nas Figuras 5 e 6. Nelas, além de conter a simulação do escoamento em m^2/s comparado com a média histórica observada, apresentam-se, também, os desvios percentuais do escoamento simulado sobre a média histórica observada.

Estação fluviométrica do Engenho Retiro

Na estação fluviométrica do Engenho Retiro (Figura 5), as maiores reduções no escoamento superficial projetado em comparação com a média histórica observada, ocorrem no segundo semestre de cada ano, em ambos os cenários. Para os meses que compõem o primeiro semestre as vazões projetadas não apresentam grandes distâncias em relação às observadas.

O que justifica a diferenciação entre o comportamento do escoamento no segundo semestre em relação ao primeiro é à disponibilidade de água. No semestre inicial, apesar do aumento da temperatura média do ar e, conseqüentemente, da evapotranspiração potencial, a quantidade de água provenientes das chuvas será suficiente para não causar grandes reduções no escoamento superficial, ao contrário do segundo semestre composto pela maioria dos meses do período seco.

Julho é o mês que apresenta à maior redução no escoamento superficial. Em 2030 projeta-se um desvio percentual de 63% e 64% abaixo da média histórica observada nos cenários B2 e A2, respectivamente. Enquanto que, em 2060, neste mesmo mês, o escoamento apresenta um desvio percentual de 67% e 71% abaixo da média histórica observada para os cenários B2 e A2, respectivamente.

Os valores elevados de redução do escoamento superficial projetados para o mês citado anteriormente decorrem da fragilidade do modelo hidrológico na simulação de vazões em períodos com altos volumes pluviométricos. Em meses bastante chuvosos, a exemplo de junho e julho para a bacia hidrográfica do rio Goiana, o modelo tende a

subestimar os escoamentos superficiais decorrentes destes índices pluviométricos. Problema semelhante foi encontrado por Lucas *et al.* (2009) ao utilizar o referido modelo no estudo realizado na região hidrográfica do Xingú no Brasil.

Outro ponto importante a ser destacado é que com o passar dos anos projeta-se um distanciamento entre os valores do escoamento estimado no cenário B2 com o estimado para os mesmos períodos no A2. Os maiores distanciamentos entre os cenários são projetados para maio, setembro e outubro (Figura 5).

Para o mês de maio, ano de 2030, o distanciamento entre os cenários é de 0.3% do desvio percentual, atingindo 10.4% no ano de 2060. Para o mês de setembro, no primeiro ano projetado, o distanciamento é de 5.9%, chegando a 13.2% no ano de 2060. As projeções para o mês de outubro indicam 3% do desvio percentual no ano de 2030 e 10% trinta anos depois.

Os distanciamentos entre os valores do escoamento superficial estimado nos meses citados anteriormente são decorrentes do distanciamento entre os valores da temperatura média do ar entre os dois cenários de mudanças climáticas nestes períodos.

Estação fluviométrica do Engenho Itapissirica

Para estação fluviométrica do Engenho Itapissirica (Figura 6) é possível notar que a projeção para o mês de julho, em ambos os cenários de mudanças climáticas, apresenta as maiores reduções no escoamento superficial. Problema semelhante foi encontrado para o referido mês na estação fluviométrica do Engenho Retiro devido a problemas no modelo hidrológico, o qual subestima o escoamento em períodos de picos pluviométricos.

Em relação aos demais meses, nota-se uma nítida diferença entre o comportamento do escoamento no primeiro semestre em comparação com o segundo. No primeiro semestre, a disponibilidade de água oriunda das chuvas permite um distanciamento menor em relação à média histórica observada, ou seja, assim como pontuado para a estação fluviométrica do Engenho Retiro, o impacto nesse período será menor em comparação com o segundo semestre. Este último com maior penalidade devido à menor disponibilidade de água.

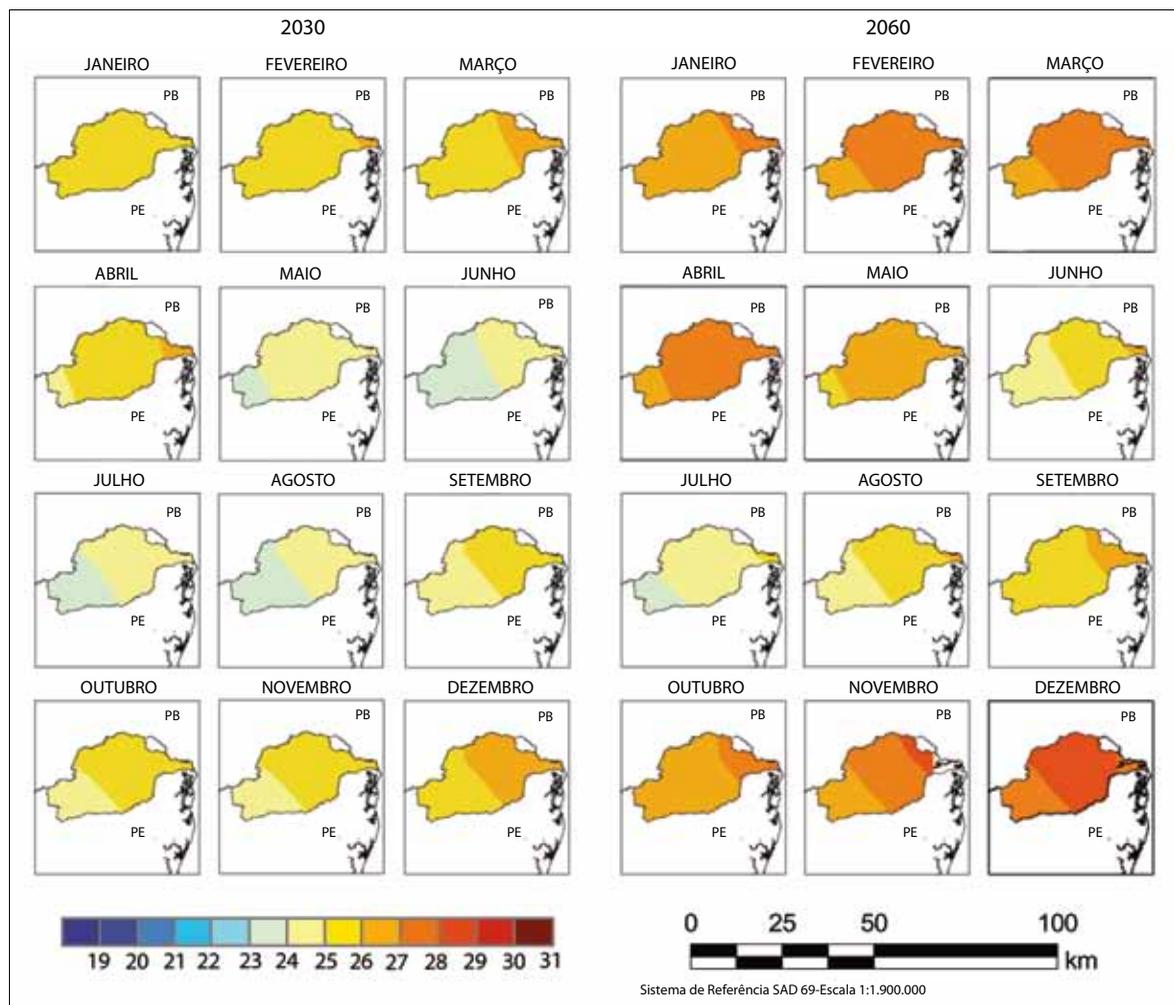


Figura 5. Projeção do modelo climático PRECIS relativo à temperatura média mensal do ar para o ano de 2030 e 2060 sobre a bacia hidrográfica do rio Goiana (cenário A2).

Quanto às diferenças entre os valores do escoamento projetado no cenário B2 com o A2, destaca-se o mês de maio, o qual apresenta o maior distanciamento entre os cenários. Para o ano de 2030, a diferença entre os dois cenários de mudanças climáticas representa 4.2%, atingindo 17% no ano de 2060 (Figura 7).

O distanciamento entre o valor do escoamento simulado no mês de maio possui a mesma causa do distanciamento apontado para a estação fluviométrica do Engenho Retiro, ou seja, o fator temperatura.

Possíveis impactos das mudanças do escoamento superficial na dinâmica espacial da bacia hidrográfica do rio Goiana

Diante do exposto anteriormente é possível traçar possíveis reflexos das mudanças climáticas na dinâmica socioespacial da bacia hidrográfica do rio Goiana com a redução do escoamento superficial.

Um dos reflexos será na disponibilidade de água para abastecimento doméstico, principalmente nos meses do segundo semestre, período seco. Problemática embasada nas reduções drásticas do escoamento superficial apontada nas simulações para os meses deste período. Isto poderá implicar

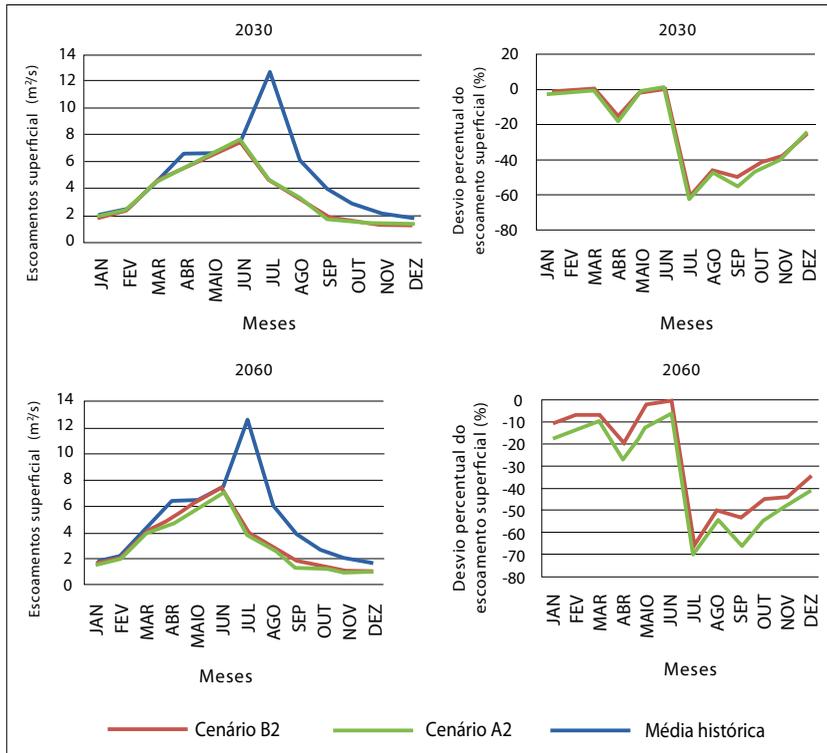


Figura 6. Escoamento superficial simulado para os anos de 2030 e 2060, cenários B2 e A2 e seu desvio percentual em relação à média histórica observada na estação fluviométrica do Engenho Retiro.

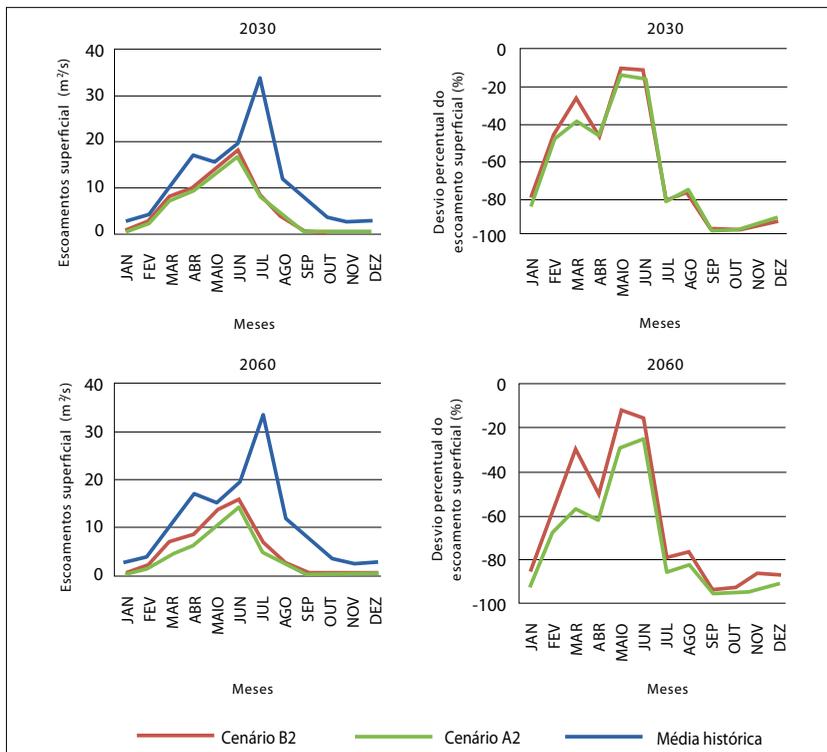


Figura 7. Escoamento superficial simulado para os anos de 2030 e 2060, cenários B2 e A2 e seu desvio percentual em relação à média histórica observada na estação fluviométrica do Engenho Itapissirica.

em políticas de racionamento de água a partir de 2030, visto que, dos 26 municípios que tem seus limites territoriais inseridos na bacia hidrográfica, 22 são abastecidos por suas águas. Consequentemente poderá haver aumento no preço dos serviços de captação, tratamento e distribuição deste recurso.

Doenças de veiculação hídrica poderão voltar a se configurar como uma das principais causas de internações e mortes nos municípios inseridos na bacia hidrográfica. Entre elas a diarreia infantil, esquistossomose e leptospirose. Problema que terá ligação na redução de água potável para o consumo doméstico da população de baixo poder aquisitivo, proporcionando com que esta população consuma água sem tratamento captada dos cursos hídricos e de outras fontes que estejam contaminadas, principalmente nos meses mais atingido pela redução do escoamento superficial.

O setor agropecuário também poderá ser afetado. Isto, por que, durante boa parte do ano, mesmo a bacia hidrográfica estando inserida na zona climática úmida e subúmida, há necessidade de irrigação para algumas culturas, entre elas a cana-de-açúcar. Com a redução do escoamento, principalmente no período seco, poderá acarretar, também, a redução do cultivo deste vegetal, que segundo Brasileiro e Marciel (2009) é a principal base econômica da Zona da Mata Pernambucana, região que está inserida a bacia hidrográfica em estudo.

Com possíveis problemas no cultivo da cana-de-açúcar, poderá desencadear um velho processo de mobilidade populacional, a migração. Neste contexto, trabalhadores desempregados poderão migrar do espaço rural para cidades e, de algumas cidades de menor porte econômico para centros regionais inseridos na bacia hidrográfica, exemplo da cidade de Timbaúba e Goiana. Há também, possibilidades de migrarem para a região metropolitana de Recife, de João Pessoa e para o pólo agroindustrial de Juazeiro-Petrolina. Fenômenos semelhantes foram diagnosticados por Madalu (2003) na Tanzânia.

Outro impacto a ser configurado refere-se à entrada das águas do Oceano Atlântico pelo exutório da bacia hidrográfica. Com redução do escoamento superficial as águas fluviais não terão força para limitar a entrada das águas salgadas do

mar. Consequentemente poderá haver modificações no dinamismo zoogeográfico aquático, com desaparecimento de espécies de peixes e crustáceos que só sobrevivem sobre águas doces, assim como, espécies que necessitam da mistura da água doce e salgada para sobrevivência. Isto implicará em mudanças nos modos de vida das comunidades de pescadores(as) e marisqueiros(as) que habitam o entorno da foz do rio Goiana.

Outro impacto a ser destacado refere-se ao acúmulo de sedimentos nos leitos dos principais rios da bacia hidrográfica. Com a diminuição considerável do escoamento superficial, estes não terão mais forças, que tem atualmente, para carregarem até o oceano os sedimentos gerados na bacia. Como consequência poderá haver mudanças na dinâmica da geomorfologia fluvial da bacia, transformando os principais canais fluviais em anastomosados, ou seja, canais com formação de bancos de areias ao longo do curso segundo Christofolletti (2006).

Acrescentam-se ainda as intensificações dos conflitos pelos usos múltiplos da água. Conflitos que poderão ser travados pelos usuários do setor agropecuário, destacando, em sua maioria, os grandes e médios latifundiários; pequenos agricultores; habitantes do espaço urbano; pescadores e carcinicultores, estes últimos concentrados na foz do principal rio da bacia hidrográfica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo hidrológico mensal semi-distribuído simples apresentou resultados satisfatórios apontados pelos coeficientes de calibração utilizados. Porém, houve leves subestimações nos picos de precipitação, principalmente no mês de julho.

Quanto à temperatura média mensal do ar, obtida pelo modelo PRECIS e espacializada sobre a bacia hidrográfica do rio Goiana no intervalo entre 2030 a 2060, projetam-se incrementos que atinge 1° C em vários meses no cenário B2 e até 2° C no cenário A2.

Os reflexos da projeção da temperatura média mensal do ar sobre o escoamento superficial da bacia hidrográfica em estudo terá impacto maior nos meses do segundo semestre, para ambos os cenários

de mudanças climáticas. Consequentemente, a redução no escoamento superficial poderá acarretar modificações no modo de vida das populações dos municípios locais com o passar dos anos. Problemas, principalmente, ligados a disponibilidade de água para o abastecimento doméstico e no setor de empregabilidade de mão-de-obra no setor agrário.

Essas possíveis implicações requerem medidas de enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos para que possam minimizar prejuízos futuros. Para atingir tal meta, além da sociedade civil, os poderes públicos municipais, estaduais e federais devem atuar de forma articulada, levando em consideração o dinamismo sistêmico dos elementos climáticos que atuam sobre a bacia hidrográfica, assim como, a dinâmica dos elementos físicos-naturais e sociais presentes na unidade ambiental em estudo.

Apesar da contribuição que este trabalho poderá fornecer para o planejamento integrado dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Goiana, novos diagnósticos devem ser realizados com o intuito de complementar este estudo. Trabalhos futuros poderão: analisar com mais detalhes a dinâmica das precipitações pluviométricas e seu relacionamento com o escoamento superficial na bacia; desenvolver novos modelos hidrológicos com intuito de diagnosticar a relação entre as mudanças climáticas e o escoamento superficial local; análises com aprofundamentos maiores entre a relação mudanças climáticas, escoamento superficial e o dinamismo socioespacial dos territórios construídos sobre a área da bacia hidrográfica; entre outros.

REFERÊNCIAS

- Ajami, N. K., H. Gupta, T. Wagener e S. Sorooshian (2004), “Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system”, *Journal of Hydrology*, no. 298, pp.112-135.
- Bates, B. C., W. K. Zbigniew, S. Wu e J. P. Palutikof (2008), *El Cambio Climático y el agua*, Secretaría del IPCC, Ginebra.
- Brasil (1981), *Projeto RADAMBRASIL*, Ministério das Minas e Energia, Folhas SB.24/25 Jaguaribe – Natal, Rio de Janeiro.
- Brasileiro, R. S. e C. A. A. Marciel (2009), “Agricultura familiar agroecológica na Mata pernambucana: desenvolvimento territorial rural e identidade cultural”, In: Marciel, C. A. A. (Org.), *Entre Geografia e Geosofia: abordagens culturais do espaço*, Ed. UFPE, Recife, pp. 21-48.
- Christofolletti, A. (2006), “Geomorfología fluvial”, en Christofolletti, A. (org.), *Geomorfología*, 2ed., 9 reimp., Edgard Blucher, São Paulo, pp. 52-78.
- Cunha, L. V., R. Oliveira e V. B. Nunes (2002), “Impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos de Portugal”, *Climate Change in Portugal, Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*, Lisboa, p.13.
- Duarte, C. C. (2009), *Análise dos Impactos das Mudanças climáticas no escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Tapacurá, a partir da utilização de um modelo de balanço hídrico semi-distribuído simples*, Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Galvincto, J. D. (2005), *Balanço hídrico a superfície do Açude Epiácio Pessoa, utilizando modelos digitais de elevação*, Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Guo, S., J. Wang, L. Xiong, A. Ying e D. Li (2002), “A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China”, *Journal of Hydrology*, no. 268, pp. 1-15.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007*. The Physical Science Basis: contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jiang, T., Y. D. Chen, C. Xu, X. Chen e V. P. Singh (2007), “Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China”, *Journal of Hydrology*, no. 336, pp. 316-333.
- Lucas, E. W. M., F. Assis, S. Sousa, F. D. S. Silva e P. S. Lucio (2009), “Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, núm. 3, pp. 308-322.
- Ma, Z., S. Kang, L. Zhang, L. Tong e X. Su (2008), “Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China”, *Journal of Hydrology*, no. 352, pp. 239-249.
- Madulu, N. F. (2003), “Linking poverty levels to water resource use and conflicts in rural Tanzania”, *Physics and Chemistry of the Earth*, núm. 28, pp. 911-917.

- Marengo, J. A. (2006), *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*, Ministério do Meio Ambiente, Brasília.
- Mouelhi, S., C. Miche, C. Perrin e V. Andreássian (2006), “Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model”, *Journal of Hydrology*, no. 318, pp. 200-214.
- Nash, J. E. e J. Sutcliffe, (1970), “River flow forecasting through conceptual models - Part I: a discussion of principles”, *Journal of Hydrology*, no. 3, pp. 282-290.
- Sanches, H. J., P. Ruiz, P. Arribas e T. R. Cane (2008), “Climatic changes agriculture is maintainable development in the Rich Coast”, *Singapore Journal of Tropical Geography*, no. 27, pp. 231-247.
- Santos, A. M. e J. D. Galvêncio (2009), “O fenômeno de La Niña atuando sobre a precipitação pluviométrica do município de Timbaúba – Pernambuco”, *VIII Encontro Nacional de Pós-Graduação em Geografia*, Curitiba [cd-rom].
- Santos, A. M., J. D. Galvêncio e M. S. B. Moura (2008), “Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para identificação da cobertura fitogeográfica da bacia hidrográfica do rio Goiana-PE”, *II Simpósio de Geografia Física do Nordeste*, João Pessoa [cd-rom].
- Santos, A. M., J. D. Galvêncio e M. S. B. Moura (2010), “Os recursos hídricos e as mudanças climáticas: discursos, impactos e conflitos”, *Revista Geográfica Venezuelana*, núm. 51, pp. 59-68.
- Silva, C. A. V. e J. D. Galvêncio (2010), “Relação clima escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Pirapama – PE”, *Revista Brasileira de Geografia Física*, núm. 2, pp. 57-69.
- Thornthwaite, C. W. e J. R. Mather (1955), “The water balance”, Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, (Publications in *Climatology*, no. 11).
- Tingem, M., M. Rivington e J. Colls (2008), “Climate variability and maize production in Cameroon: Simulating the effects of extreme dry and wet years”, *Singapore Journal of Tropical Geography*, no. 29, pp. 357-370.
- Webb, B. W., D. M. Hannah, D. R. Moore, L. E. Brown e F. Nobiliss (2008) “Recent advances in stream and river temperature research”, *Hydrological Processes*, no. 22, pp. 902-918.
- Xiong, L. e S. Guo (1999), “A two-parameter monthly water balance model and its application”, *Journal of Hydrology*, no. 216, pp. 111-123.
- Yongjian, D. (2003), “Eco-environment range in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers”, *Journal of Geographical Sciences*, no. 13, pp. 172-180.