

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA NO JAGUARIBE

Felipe Araújo¹, Marco Castro², Rubens Gondim³

RESUMO - Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água em trecho do Jaguaribe entre as cidades de Limoeiro do Norte e Jaguaruana, Ceará, tendo sido realizadas simulações, considerando cenários de mudanças climáticas para o ano de 2040. Foi utilizado o modelo EPDRIV1 para avaliação da qualidade da água para sete cenários simulados, cada um envolvendo diferentes incrementos de demanda de água para a carcinicultura e irrigação como consequência das mudanças climáticas. Foi considerado que as cidades manteriam seus sistemas de esgotamento sanitário operando de forma precária ou inexistente, além do aumento populacional. As simulações para os cenários atuais representaram de forma satisfatória os resultados de monitoramento realizado, indicando que o modelo estava bem calibrado. As simulações para 2040 indicaram piora na situação para todos os parâmetros de qualidade da água e foi observado que os níveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio e fósforo total não atenderiam aos mínimos requisitos legais. Verifica-se assim a necessidade de ações concretas para investimentos em saneamento básico na região e a necessidade de um planejamento estratégico para atendimento das demandas futuras do Baixo Jaguaribe. Assim, devem ser estabelecidas diretrizes orientadas para ações e investimentos que remontem à sustentabilidade dos aspectos quali-quantitativos, associados ao aquecimento global.

ABSTRACT - This study attempted to evaluate the water-quality conditions in the Jaguaribe river, between Limoeiro do Norte and Jaguaruana municipalities, state of Ceará, Brazil. A mathematical simulation applying the Georgia Environmental Protection Division's EPDRIV-1 model was conducted, considering IPCC A2 and B2 global climate-change scenarios for the year 2040. To conduct a water-quality assessment, seven scenarios were simulated, each considering different increases in irrigation and inland shrimp-farm water demands as a consequence of global warming. The augmentation of urban effluent loads due to population growth considering local trends was also taken into account. The simulations for most of the 2040 scenarios indicated a worsened situation for all water-quality standards, and it was observed that the levels of Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand (CBOD) and total phosphorus did not meet the minimum legal requirements. Sanitation infrastructure investments in the region were identified as a priority to reduce future pollution risks in the river basin.

Palavras-chave: mudanças climáticas, qualidade da água, modelagem.

1) Engenheiro da Petrobrás. Doutorando em Recursos Hídricos. Avenida Euzébio Rocha, 1000- Cidade da Esperança - 59164-100 Natal, RN, Brazil. e-mail: felipearaujo@petrobras.com.br.

2) Professor da Universidade Federal do Ceará ó Departamento de Engenharia hidráulica e Ambiental. :Av.Mister Hull s/n. Blocos 713. 60455-760 Fortaleza, CE marco@ufc.br

3) Pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical. Doutor em Recursos Hídricos da UFC. Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Fortaleza, CE. 60.511- 740. e-mail: rubens@cnpat.embrapa.br.

1 - INTRODUÇÃO

Eheart et al. (1999) concluíram que para o Meio Oeste dos Estados Unidos, o potencial impacto dos cenários de mudanças climáticas nos padrões de vazão crítica e a frequência e duração das condições críticas de qualidade da água é substancial. Descobriram que uma redução de 25% na precipitação média resultaria em 63% de redução na vazão dos rios e com a irrigação poderia chegar a 100%.

Quando se altera a vazão dos rios, alterações nos parâmetros de qualidade de água podem ocorrer. Os efeitos de mudanças climáticas no longo prazo podem levar a uma maior ou menor vazão do rio, alterando, portanto, seu poder de diluição (Wilby et al, 2006), sendo a qualidade da água afetada por reduções de vazão (IPCC, 2001).

Wilby et al. (2006) analisaram os impactos das mudanças climáticas na bacia de captação no rio Kennet, no sul da Inglaterra, aplicando-se o modelo climático do *Hadley Centre* (HadCM3), o modelo *Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis* (CGCM2) e o modelo do *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO Mk2), usando um modelo estatístico de redução de escala (SDSM) para gerar cenários climáticos. Os modelos CSIRO Mk2 e CGCM2 projetaram níveis crescentes de nitrato e amônia até 2050 e um declínio gradual em seguida, devido ao aumento da diluição ocasionado pelo aumento de vazão. Em contraste, o modelo HadCM3 projetou crescentes níveis de nitrato e amônia com extremos ocorrendo no final do século. Os picos finais de nitrogênio nítrico foram da ordem de 11 mg.L^{-1} .

Araújo (2005); Araújo et al. (2006) verificaram que a situação da qualidade da água é pior, a partir do município de Jaguaruana, onde a capacidade de autodepuração é reduzida devido à menor vazão no rio Jaguaribe e maior concentração de despejos domésticos e da carcinicultura de água doce existente na região. Observou-se ainda que a capacidade de suporte no trecho analisado encontra-se próxima da saturação e cargas poluentes adicionais tornariam o cenário ainda mais crítico.

O objetivo do presente estudo foi avaliar a capacidade suporte do corpo receptor considerando os cenários de aquecimento global A2 e B2 para o ano de 2040.

2 6 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi estudado um trecho da bacia de 40 km de extensão, onde houve monitoramento de vazões e qualidade das águas durante os anos de 2003 e 2004, conforme Araújo et al. (2006). Esses dados subsidiaram a quantificação das cargas poluentes na bacia e a calibração do modelo.

Para a classe 2 do CONAMA 357/05 são previstos usos como abastecimento humano, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, irrigação, aquíicultura e pesca. No Rio Jaguaribe, os usos históricos e desejáveis da água são compatíveis com os anteriormente mencionados, portanto, o gerenciamento ambiental deve priorizar níveis de qualidade conforme os padrões estabelecidos para a classe 2.

2.1. Seleção do modelo de qualidade da água

Na adoção do modelo de qualidade das águas mais apropriado ao Baixo Jaguaribe foram levados em consideração aspectos apontados por Bowie et al. (1985), quais sejam:

Avaliar até onde os objetivos planejados poderiam ser resolvidos com a aproximação unidimensional. Esta aproximação é válida para a maioria dos rios, e implica em considerar os gradientes laterais e verticais desprezíveis em relação aos gradientes longitudinais. Esta hipótese é perfeitamente compatível com as características do trecho do rio Jaguaribe que se deseja simular. Outro critério para seleção do modelo foi relacionado à natureza das vazões e a variação temporal de entradas dos constituintes e demais variáveis. Para situações em que seja necessário detalhamento temporal, onde as vazões variam em períodos horários ou diários, é necessária a utilização de um modelo dinâmico. Esta característica é importante para avaliar situações como o evento da despesca da carcinicultura, portanto, optou-se aqui por escolher um modelo que permitisse simular o regime não permanente. Capacidade de simular os principais contaminantes da água associados às fontes de poluição na bacia, quais seja: DBO, nitrogênio, fósforo e coliformes. Além disso, um modelo de domínio público facilita aplicações futuras em estudos que possam vir a ser de interesse por qualquer pesquisador interessado.

As considerações anteriormente mencionadas apontaram para a escolha do modelo hidrodinâmico e de qualidade da água denominado EPD-RIV1 (Martin & Wool, 2002), desenvolvido pela Divisão de Proteção Ambiental do Estado da Geórgia.

2.2. Elaboração de Cenários para as Simulações

Nakicenovic et al. (2000) definiram uma família de cenários básicos que foram classificados da seguinte forma: A1: baixo crescimento populacional, crescimento do PIB muito elevado, elevado consumo de energia, baixa mudança no uso da terra, alta a média disponibilidade de recursos, rápido desenvolvimento tecnológico, energia fóssil e balanceada; A2: alto crescimento populacional, médio crescimento do PIB, elevado consumo de energia, média a alta mudança no uso da terra, baixa disponibilidade de recursos, lento desenvolvimento tecnológico, energia regional; B1: baixo crescimento populacional, elevado crescimento do PIB, baixo consumo de energia, alta mudança no

uso da terra, baixa disponibilidade de recursos, médio desenvolvimento tecnológico, eficiência e introdução de tecnologias limpas; B2: médio crescimento populacional, médio crescimento do PIB, médio consumo de energia, média mudança no uso da terra, média disponibilidade de recursos, médio desenvolvimento tecnológico, dinâmica energética como a usual.

As mudanças climáticas dependem das forçantes que atuam nas emissões de dióxido de carbono e de aerossóis para a atmosfera, tais como: população, intensidade de emissão de carbono das fontes de energia, emissões sulfúricas, modalidade de crescimento econômico e desenvolvimento tecnológico. Os cenários A1 e B1 possuem as mesmas projeções populacionais, assumindo-se baixas taxas de fertilidade e de mortalidade. O cenário A2 assume alta fertilidade e alta mortalidade e o cenário B2 é intermediário. Optou-se, então, por simular os cenários A2 e B2 que projetam para 2040, uma população global entre 8,93 e 10,71 bilhões de habitantes (Nakicenovic et al., 2000).

As simulações matemáticas de qualidade da água aqui realizadas constituíram-se de uma ferramenta analítica para prever respostas do sistema quando submetido a diferentes cargas de poluição e de retiradas, que são representadas por cenários.

Destaca-se que não havia dados de um monitoramento contínuo e de longo período no trecho em estudo para as vazões e qualidade do rio Jaguaribe. No caso, só se dispunha de dados referentes a um dia de campanha nos meses de agosto, outubro e dezembro de 2003, o que inviabilizou uma análise considerando séries temporais.

Somente no caso dos efluentes da carcinicultura havia dados disponíveis de monitoramento realizados continuamente (Figueiredo et al., 2005). Assim, foi possível realizar uma simulação em regime não permanente, para um cenário específico, considerando apenas as variações temporais dos despejos da carcinicultura, que se produzem por ocasião da despesca do camarão.

Assim, os cenários foram baseados em eventos. Calibrou-se o modelo com os eventos de outubro e dezembro de 2003, e validou-se com o evento de agosto de 2008. Os cenários futuros foram então todos projetados sobre o mês de agosto de 2008.

A avaliação da qualidade da água considerou ainda as condições mais extremas, correspondendo a períodos de intensa demanda para irrigação e clima seco, conforme realizado por Cruise, (1999). Trabalhou-se então apenas com meses de estiagem, todos do segundo semestre, que é o período crítico em termos de capacidade de diluição do corpo receptor.

Deve-se frisar que não era o caso de realizar uma análise probabilística de vazão mínima no trecho em estudo, uma vez que o volume hídrico é função de uma decisão operacional de abertura de válvulas do reservatório Castanhão, não apresentando aleatoriedade. Por isso foram consideradas hipóteses de redução da oferta de vazão de montante para valores pré-estabelecidos numa faixa de intervalo provável, no sentido de cobrir possíveis situações de racionamento da água, como se verá mais adiante.

Em relação à definição dos cenários, torna-se importante verificar as tendências de evolução das cargas poluentes e das captações no Baixo Jaguaribe.

No que concerne às cargas poluentes de origem doméstica, verificou-se que as cidades que lançam efluentes no trecho em análise são Jaguaruana, Quixeré, Limoeiro do Norte, Tabuleiro do Norte e São João do Jaguaribe. Já a cidade de Russas apresenta drenagem que escoar para um ponto a jusante do trecho aqui analisado, portanto não será considerada neste estudo.

Como a carga poluente doméstica está associada à população das cidades, foi possível estabelecer uma relação entre as cargas futuras em 2040, a partir de projeções populacionais, conforme tratado a seguir.

Destaca-se que outra variável importante nas cargas domésticas é o grau de coleta e tratamento dos esgotos urbanos. Os níveis atuais de esgotamento sanitário dessas cidades são atualmente precários. Assim, foram concebidos cenários futuros considerando tanto situações com sistema de esgotamento sanitário eficiente como situações equivalentes à atual.

As cargas poluentes de carcinicultura apresentam uma relação com a quantidade de viveiros e a área cultivada. Até o ano de 2003 essa atividade apresentava um crescimento expressivo no Baixo Jaguaribe, entretanto, houve uma redução da quantidade de carcinicultores no ano de 2004, quando as condições de exportação já não eram tão atrativas. No período 2004 a 2008, não houve uma nova retomada de investimentos desse setor e nem existe uma perspectiva de crescimento para os próximos anos. Assim foi considerado para os cenários futuros, referentes ao ano de 2040, que as cargas de carcinicultura se manteriam no mesmo patamar do observado em 2004. Ressalta-se que o momento final da produção de camarão é obtido por meio da despesca, uma carga poluente que apresenta características peculiares e foi analisada em cenário específico.

No que concerne às captações para irrigação, o crescimento dos volumes das retiradas e os pontos de bombeamento no rio foram determinados considerando o aquecimento global e seus efeitos sobre as demandas hídricas das culturas irrigadas no Baixo Jaguaribe para os cenários A2 e B2 no ano 2040.

Já as captações para a carcinicultura, onde os viveiros estão sujeitos a taxas de evaporação e infiltração, precisando, assim, de bombeamentos para renovação e reposição de seus estoques de água, também foram determinadas considerando o aquecimento global.

Deste modo, considerando variações de: cenários de aquecimento global (A2 e B2), nível de saneamento básico dos municípios, redução da oferta de vazão de montante e carga poluente da despesca do camarão foram estabelecidos os seguintes cenários (Tabela 1).

Tabela 1 - Definição de Cenários para 2040

Cenário	Aquecimento Global	Saneamento Básico	Despesa do Camarão	Redução na Vazão de Montante
C1	Não	Não	Não	Não
C2*	A2	Não	Não	Não
C3	A2	Sim	Não	Não
C4	B2	Não	Não	Não
C5	A2	Não	Não	10%
C6	A2	Não	Não	20%
C7	A2	Não	Sim	Não

* cenário padrão: base de comparação

2.3. Determinação de Cargas Poluentes

Na presente modelagem foram consideradas cargas poluentes de dois tipos: dos esgotos domésticos e das atividades de carnicultura, que se configuram como as mais significativas no trecho estudado. São cargas do tipo pontual.

Destaca-se que a carga poluente líquida aqui considerada é a que efetivamente está presente no corpo receptor, e pode ser determinada nas ocasiões em que existem dados de monitoramento de vazão e concentração de contaminantes, conforme a expressão a seguir:

$$Kl = C \times Q \quad (1)$$

Kl= carga líquida no corpo receptor;

C = concentração do poluente;

Q = vazão do rio na seção;

Em relação às cargas de esgotos domésticos, foi verificado que as cidade que contribuem com lançamento a montante do trecho simulado são Quixeré, Limoeiro do Norte, Tabuleiro do Norte e São João do Jaguaribe, de modo que suas cargas estão presentes na modelagem incorporadas à condição de contorno de montante. No caso da cidade de Jaguaruana, ocorre o despejo de efluentes diretamente em uma seção intermediária do trecho simulado, portanto é tratada com contribuição lateral pontual.

Para o cálculo das cargas domésticas brutas foi utilizada a equação que estabelece uma ligação entre a quantidade de habitantes da cidade e a carga média produzida por cada indivíduo, conforme expressão a seguir:

$$Kb = pop \times cap \quad (2)$$

Kb= carga bruta relativa aos esgotos domésticos;

pop = população de um determinado centro urbano;

cap = contribuição de vazão mássica de poluentes por habitante;

Os valores de contribuição de poluentes por habitante foram obtidos a partir de Von Sperling (1996). Destaca-se que nem toda carga bruta gerada atinge o corpo receptor, seja porque existem

dispositivos de esgotamento como sumidouros e fossas, ou porque no próprio transporte entre a origem e o corpo receptor ocorre certa depuração natural do contaminante. Todavia, não existe uma metodologia padrão para a estimativa do percentual do esgoto bruto gerado que atinge o corpo receptor, pois depende de várias características das bacias hidrográficas e do esgotamento das cidades.

Assim, foram tomadas a carga líquida presente no corpo receptor, para a seção a montante do trecho simulado, e a carga bruta estimada nas respectivas cidades. Deste modo, foi possível estabelecer uma relação entre carga líquida e carga bruta, que poderia juntamente com projeções populacionais, ser utilizada para estabelecer as cargas poluentes domésticas da condição de contorno de montante e de contribuição lateral de Jaguaruana dos cenários futuros.

Ressalta-se que o fato do tempo de detenção no reservatório Castanhão ser alto permite que a carga gerada na bacia do Alto e Médio Jaguaribe seja depurada por um longo período e praticamente anulada. Como não há outras cargas significativas entre o reservatório e a seção de montante do trecho simulado, esse percentual calculado representa adequadamente a relação entre carga líquida e carga bruta, com pouca influência de fatores externos.

Assim, foram utilizados dados populacionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística o IBGE para determinar as populações futuras. Utilizou-se o método da progressão geométrica para representar o crescimento das cidades, adotando-se um valor de 1,5% ao ano, tomando como população base a estimativa publicada pelo IBGE para o ano de 2007 (<http://www.ibge.gov.br/>).

As relações entre cargas líquidas e brutas foram calculadas com base nos dados de monitoramento realizado por Araújo et al., (2006b). Em seguida, foi possível determinar, por meio das projeções populacionais, as cargas brutas em 2040 e, aplicando a relação obtida, gerar as cargas líquidas em 2040. No caso do cenário que contemplou a implantação de sistemas de esgotamento sanitário nas cidades foram consideradas eficiências de 95% para a DBO, 99,9% para coliformes termotolerantes e 90% para nitrogênio e fósforo.

A determinação das cargas poluentes associadas às atividades de carcinicultura foi possível graças ao monitoramento de volumes e concentração de poluentes nos viveiros de camarão, cujos resultados estão publicados em Araújo et al. (2006b).

As fazendas de carcinicultura localizadas no Baixo Jaguaribe consomem água frequentemente para repor as perdas por infiltração e por evaporação nos viveiros. Além disso, as fazendas criadoras de camarão renovam a água dos viveiros periodicamente para manter padrões de qualidade adequados ao cultivo, liberando efluentes para o rio Jaguaribe. Esse tipo de carga será referenciado aqui como efluente contínuo da carcinicultura.

Além dos efluentes contínuos gerados pela carcinicultura, outra fonte de poluição provocada por essa atividade ocorre durante a despesca. A despesca do camarão é o processo final da produ-

ção, onde são esvaziados os viveiros e colhidos os camarões para comercialização. Por causa do grande volume despejado no rio, e das elevadas concentrações de alguns poluentes presentes no efluente, a despesca é um evento de impacto significativo na qualidade da água do corpo hídrico receptor.

No caso das cargas de efluentes contínuos da carcinicultura, foram considerados, nos cenários de 2040, que seriam mantidos os mesmos patamares atuais, conforme tendência de estagnação dessa atividade observada nos últimos anos, de modo que não foi preciso realizar projeções futuras dessas cargas. Destaca-se que as fazendas de camarão consideradas na modelagem foram as que despejam diretamente no rio, pois existem fazendas que despejam em lagoas isoladas.

Em relação à carga dos efluentes da despesca da carcinicultura, que no presente estudo foi considerada em cenário específico, foram utilizados dados do monitoramento publicados por Rosa et al. (2006).

Assim, no evento simulado para a despesca foram considerados dois pontos de lançamento no Rio Jaguaribe (Figura 2). O primeiro se deu na seção SA62, município de Russas, para uma fazenda de 6 ha, cuja produção utilizava a técnica de aeração e fertilização. A segunda se deu na seção SA10, município de Jaguaruana, para uma fazenda de 18 ha, que utilizava de aeração, mas não fertilização.

De uma maneira geral os principais insumos utilizados no cultivo são: ração farelada com proteína, calcário dolomítico ou calcítico e fertilizantes superfosfato triplo, uréia, MAP (Rosa et al., 2006). Não foi observado o uso de antibiótico nas fazendas na área do levantamento. São assim observadas elevadas concentrações de fósforo, amônia e DBO nos efluentes da carcinicultura. Destaca-se que fazendas que utilizam fertilização na produção geraram efluentes mais concentrados.

2.4. Cálculo das Retiradas

Foi realizada uma análise das demandas de irrigação atual e futura no Baixo Jaguaribe, considerando os cenários de mudanças climáticas A2 e B2 no ano de 2040. Essas demandas foram então associadas a pontos de retirada ao longo do rio Jaguaribe, conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 - Demandas de Irrigação no Baixo Jaguaribe em 2040 ó Cenários A2 e B2

Demanda de Irrigação (m³/s) em Ago/2040					
Seção	A2	B2	Seção	A2	B2
A66	0,0267	0,0266	A38	0,1111	0,1106
A65	0,0390	0,0388	A37	0,0303	0,0302
A64	0,0027	0,0027	A26	0,0640	0,0637
A63	0,0011	0,0011	A25	0,0223	0,0222
A62	0,0341	0,0339	A24	0,0045	0,0044
A61	0,0205	0,0204	A23	0,0054	0,0054
A60	0,0178	0,0177	A22	0,0066	0,0066
A59	0,0149	0,0148	A21	0,0397	0,0395
A58	0,0260	0,0258	A20	0,0956	0,0951
A57	0,0187	0,0186	A18	0,0907	0,0903
A56	0,0351	0,0350	A16	0,0234	0,0233
A55	0,0032	0,0032	A15	0,0067	0,0067
A54	0,0022	0,0022	A13	0,0659	0,0656
A53	0,0012	0,0012	A11	0,0182	0,0181
A51	0,0024	0,0024	A10	0,0013	0,0013
A44	0,1049	0,1044	A9	0,0006	0,0006
A43	0,0105	0,0104	A8	0,0071	0,0071
A42	0,0027	0,0027	A7	0,0052	0,0051
A41	0,0411	0,0409	A5	0,3025	0,3011
A39	0,0042	0,0042	-	-	-

As demandas de carcinicultura foram determinadas por ocasião de monitoramento segundo Figueiredo et al. (2004); Figueiredo et al. (2005); Rosa et al. (2006) que contemplava os volumes acumulados nos viveiros ao longo de um ciclo de produção. Vale frisar que as captações para a carcinicultura são provenientes da necessidade de repor as águas devido aos fenômenos da evaporação e infiltração que ocorre nos viveiros, aproximadamente 1/3 das perdas de água dos viveiros era associada à evaporação e 2/3 associado à infiltração.

Para estimar as demandas de carcinicultura no ano de 2040, associadas aos cenários de mudança climática, tomou-se como base, em um primeiro momento, os valores de evapotranspiração nos cenários A2 e B2 determinados para a bacia do Baixo Jaguaribe por Gondim et al. (2008).

Os autores verificaram incrementos na evapotranspiração média anual, em relação a 1961-90 de 3,10% e 2,23%, para 2040 nos cenários A2 e B2, respectivamente. Destaca-se que existe uma relação direta entre evaporação e evapotranspiração, conforme ilustra a expressão a seguir:

$$ETP = EV \times K \quad (3)$$

EV = evaporação no tanque classe A em mm;

ETP = evapotranspiração de referência em mm;

K= coeficiente do tanque classe A;

Assim, para se conhecer as demandas futuras de carcinicultura associadas aos cenários A2 e B2 no ano de 2040, foi considerado que: 2/3 de volume de captação associados à infiltração da água dos tanques de camarão serão mantidos constantes; 1/3 de volume de captação, associado à evaporação da água dos tanques de camarão, apresentará um incremento, conforme as variações percentuais de evapotranspiração publicados em Gondim et al. (2008).

Seguindo essa metodologia, foram estimadas as demandas futuras associadas à criação de camarão em cativeiro, conforme ilustra a Tabela 3.

Tabela 3 - Demandas de Carcinicultura no Baixo Jaguaribe em 2040 ó Cenários A2 e B2

Demanda de Carcinicultura (m³/s) em Ago/2040					
Seção	A2	B2	Seção	A2	B2
A62	0,02418	0,02414	A25	0,01108	0,01106
A58	0,05441	0,05431	A22	0,06852	0,06839
A54	0,04031	0,04023	A21	0,02015	0,02011
A34	0,07557	0,07543	A13	0,06348	0,06336
A32	0,01411	0,01408	A10	0,02116	0,02112
A29	0,01310	0,01307	-	-	-

A demanda total em ago/2040 para irrigação é de 1310 L/s para o cenário A2 e 1304 L/s para o cenário B2. Já a demanda de carcinicultura é 406 L/s no A2 e 405 L/s no B2. Destaca-se que, no mês de agosto, o incremento para a demanda de irrigação entre 2008 e 2040 (52,3 L/s para o cenário A2 e 46,5 L/s para B2), foi bem superior ao incremento na demanda de carcinicultura (3,1 L/s para A2 e 2,3 L/s para B2).

2.5. Configurações das Simulações

Destaca-se que as simulações dos cenários 1 a 6 foram realizadas em regime permanente, pois as vazões e cargas eram constantes durante o evento simulado, assim, os resultados serão avaliados a partir de perfis longitudinais do corpo receptor.

Já no caso do cenário 7, que considera a despesca do camarão, a simulação foi realizada para regime não permanente, de modo que serão analisadas séries temporais dos poluentes nos pontos de lançamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração

Os eventos monitorados utilizados para calibração do modelo EPD-RIV1 foram out/03 e dez/03. No processo, foram utilizados os intervalos e valores típicos recomendados por Bowie et al. (1985) e Martin & Wool (2002), procurando variar os parâmetros (Tabela 4) para minimizar diferenças entre observado e simulado. Já nas Figuras 3 a 7 são apresentados os ajustes obtidos para as calibrações.

Tabela 4 - Parâmetros calibrados ó EPD-RIV1

Variável	Valor
Opção de cálculo de taxa de reaeração	COVAR
Opção de cálculo de saturação do OD	APHA
Multiplicador de temp. para decaimento do OD	1,024
Multiplicador de temp. para decaimento da DBO	1,047
Mult. de temp. p/ reação nitrogênio orgânico - amônia	1,047
Mult. de temperatura para reação amônia - nitrato	1,085
Mult. de temp. p/ decaimento de colif. termotolerantes	1,047
Multiplicador de temp. p/ extinção do orto-fosfato	1,04
Fração Oxigênio/Nitrogênio p/ nitrificação (mgO ₂ /mgN)	4,33
Taxa da reação nitrogênio org - amônia (dia ⁻¹ 20°C)	0,05
Taxa da reação amônia - nitrato (dia ⁻¹ 20°C)	0,05
Taxa da reação fósforo org. - orto-fosfato (dia ⁻¹ a 20°C)	0,05
Taxa para extinção do orto-fosfato (dia ⁻¹ a 20°C)	0,05
Sedimentação ou resuspensão da DBO (m/dia)	0,0
Sedimentação do nitrogênio orgânico (m/dia)	0,0
Sedimentação do fósforo orgânico (m/dia)	0,0
Taxa de denitrificação da DBO (dia ⁻¹ a 20°C)	0,0
Taxa de denitrificação do sedimento (dia ⁻¹ a 20°C)	0,0
Constante de dispersão (m ² /s)	2,8
Demanda de oxigênio do sedimento (g/m ² /dia)	0,0
Taxa de decaimento da DBO (dia ⁻¹ a 20°C)	0,05
Taxa de decaimento de colif. term. (dia ⁻¹ a 20°C)	0,25
Liberação de ortofosfato por bentos (g/m ² /dia)	0,0
Liberação de amônia por bentos (g/m ² /dia)	0,0

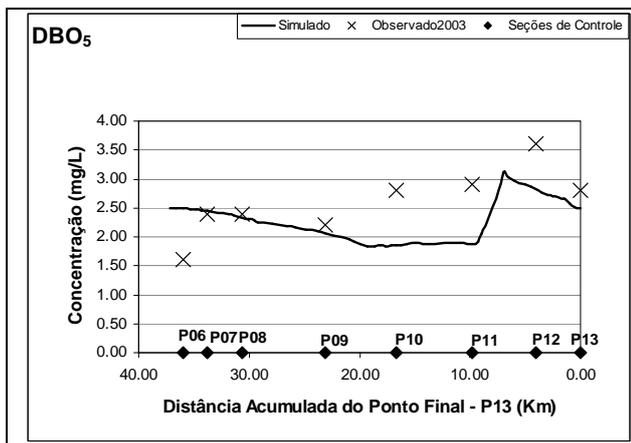


Figura 3 - Calibração da DBO

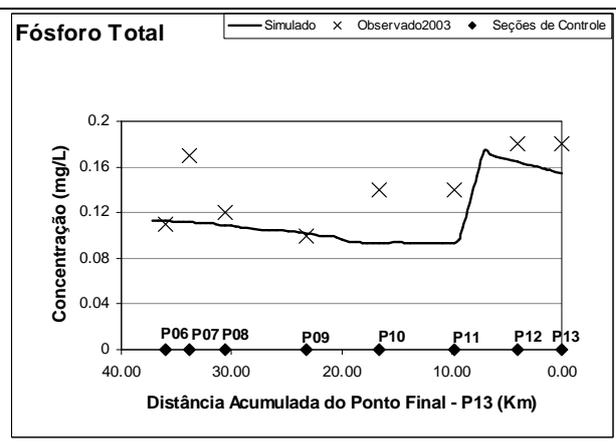


Figura 4 - Calibração do fósforo total

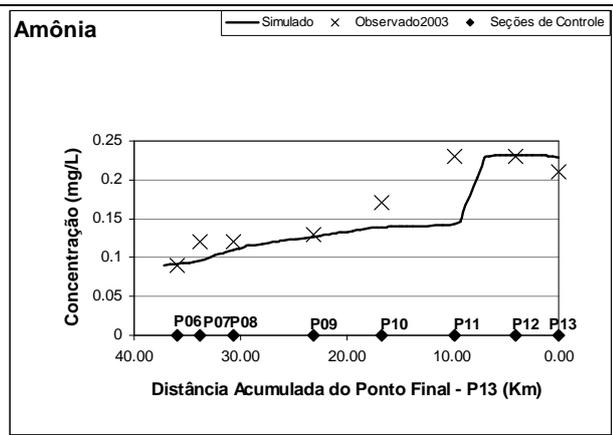


Figura 5 - Calibração da amônia

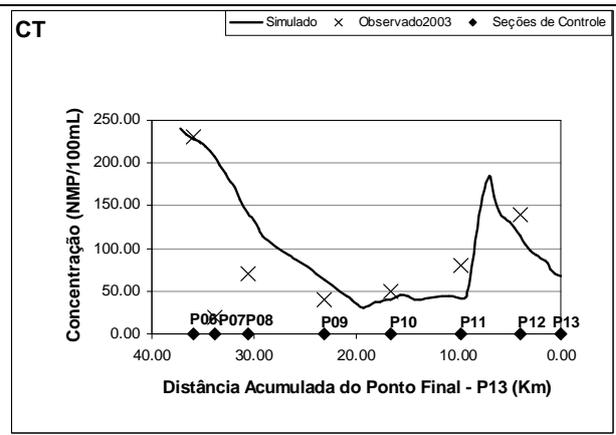


Figura 6 - Calibração de coliformes termotolerantes

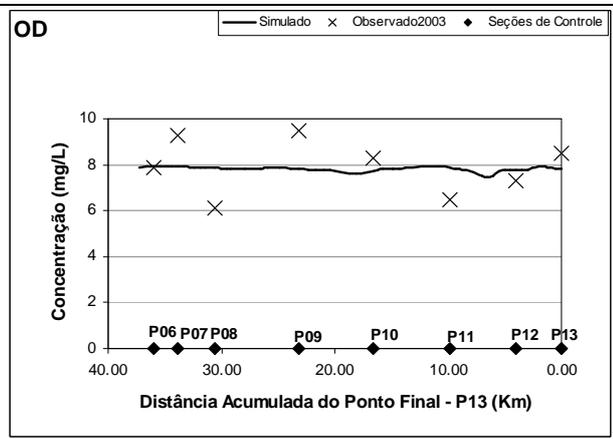


Figura 7 - Calibração do OD

3.2. Vazão

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados das simulações de vazão. Na Figura 8 verifica-se que o incremento das demandas de irrigação e carnicultura nos cenários C2 e C4 pouco impactam nas vazões do rio Jaguaribe, uma vez que os gráficos praticamente não se alteram. Na Figu-

ra 9 ilustra-se o comportamento da vazão quando ocorre redução da oferta de montante em 10% (C5) e 20% (C6).

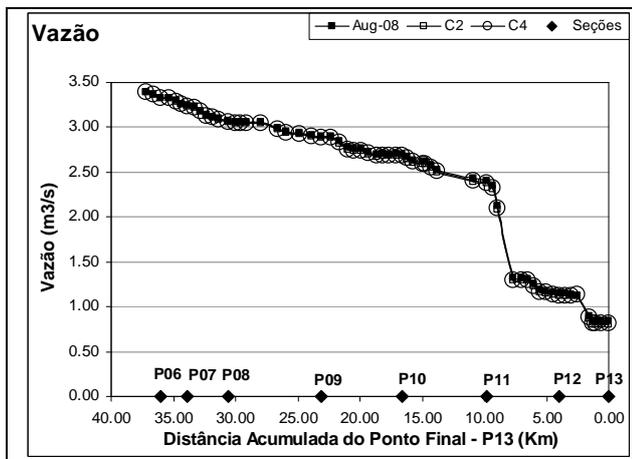


Figura 8 - Vazão em Ago/08 e Cenários C2 e C4

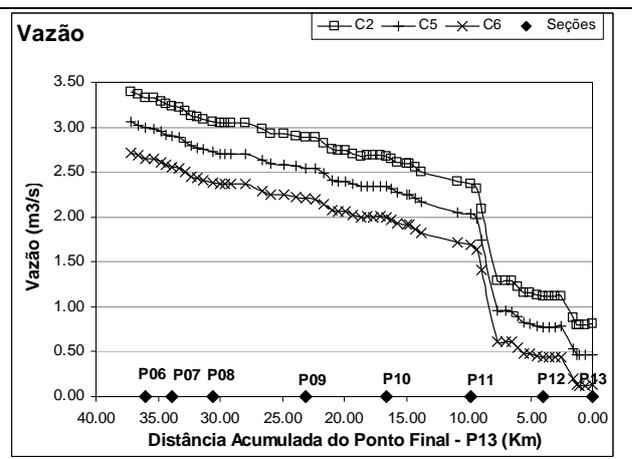


Figura 9 - Vazão nos Cenários C2, C5 e C6

3.3. DBO

Nas Figuras 10 a 13 são apresentados os resultados das simulações de DBO. Na Figura 10 observa-se que os gráficos de C1 e C2 tendem a superporem-se, revelando pouca influência do aquecimento global até o ano de 2040 na qualidade das águas do Baixo Jaguaribe, o já tinha sido observado também para vazões. Em alguns trechos do curso da água, os valores de DBO não atendem ao padrão do CONAMA 357/05, sendo superior a 5,0 mg/L (C1 e C2). Já com a implantação de saneamento básico (C3) os níveis de DBO estarão em patamares compatíveis com os usos da água de classe 2, com concentrações em torno de 1,0 mg/L. Da Figura 11 verifica-se que os C2 e C4 provocam impactos similares na qualidade da água do rio Jaguaribe. A Figura 12 mostra como a redução na oferta da vazão de montante impacta os níveis de DBO no trecho em estudo, elevando seu teor em cerca de 1,5 mg/L nos pontos críticos. A Figura 13 apresenta a simulação do evento da despeça, onde se observam concentrações de cerca de 30,0 mg/L e 15,0 mg/L a jusante dos pontos de lançamento, sendo o valor mais alto associado ao despejo da fazenda que utiliza fertilização na produção.

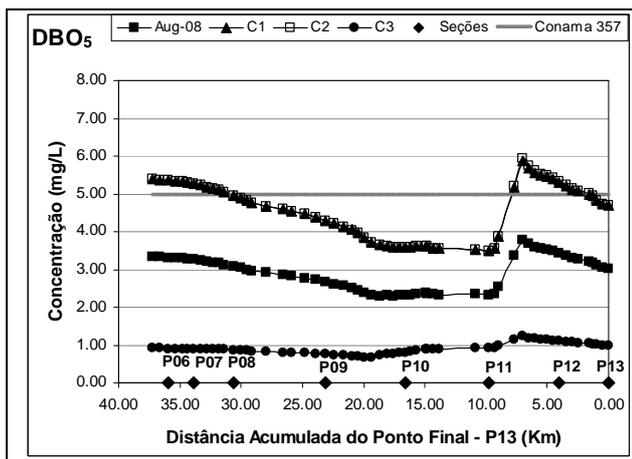


Figura 10 - DBO em Ago/08 e Cenários C1, C2 e C3

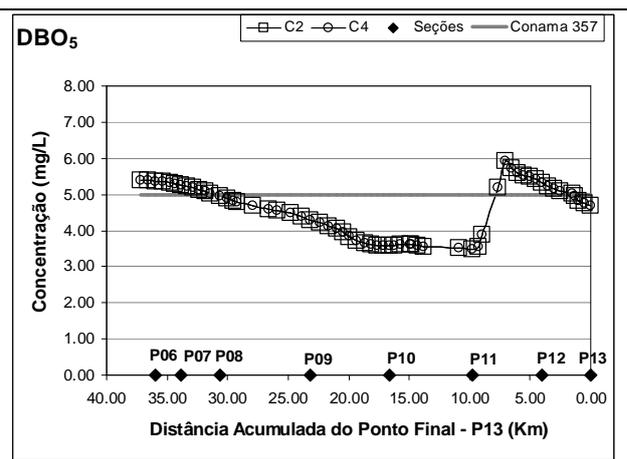


Figura 11 - DBO nos Cenários C2 e C4

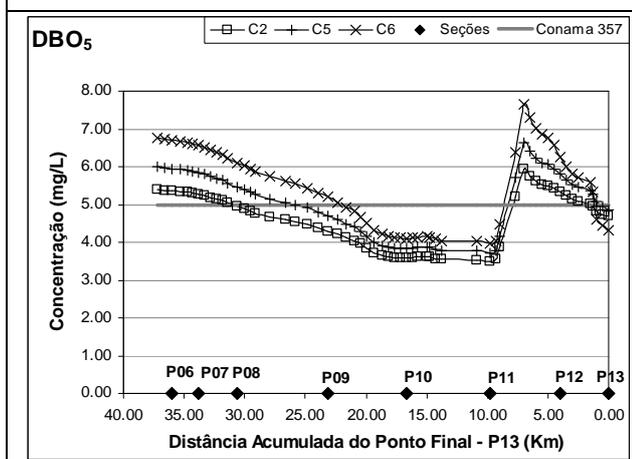


Figura 12 - DBO nos Cenários C2, C5 e C6

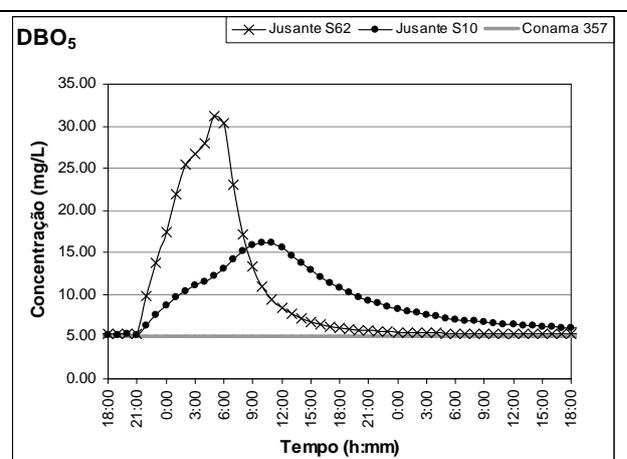


Figura 13 - DBO no Cenário C7

3.4. Fósforo Total

Nas Figuras 14 a 16 são apresentados os resultados das simulações de fósforo total. Os teores de fósforo total apresentaram-se críticos já na situação atual, superando o estabelecido para a classe 2 do CONAMA 357, que é o valor de 0,1 mg/L. Torna-se evidente os benefícios associados ao saneamento básico (C3), que proporciona redução de fósforo em mais de 50%, gerando uma condição de atendimento ao padrão estabelecido pela Resolução do CONAMA n 357. O cenário mais desfavorável foi o C6, quando os níveis de fósforo total atingiram 0,35 mg/L, no ponto a jusante do despejo da cidade de Jaguaruana. Na simulação da despesca (C7), observou-se aumento local da concentração do poluente para a fazenda de Russas (S62), que utilizava fertilizante no cultivo de camarão. Já na fazenda de Jaguaruana (S10) ocorreu o inverso, ou seja, o despejo, de baixa concentração em relação ao fósforo, melhorou temporariamente a condição do corpo receptor.

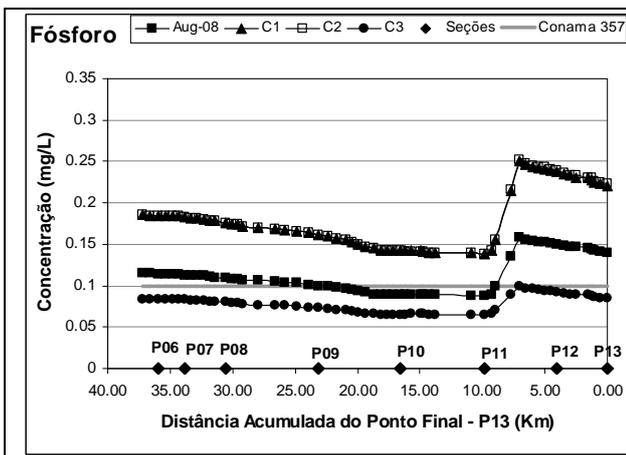


Figura 14 - Fósforo Ago/08 e Cenários C1, C2 e C3

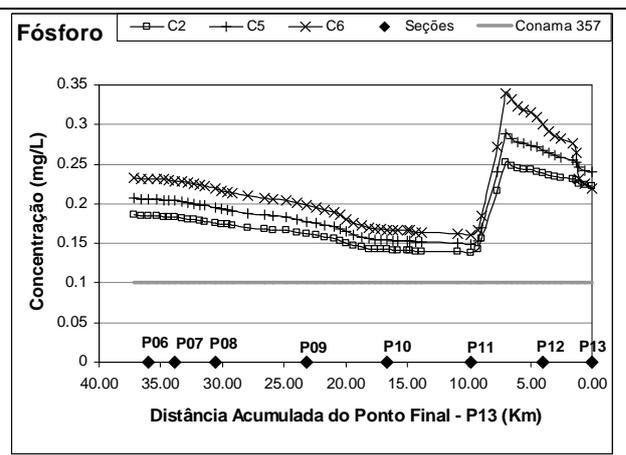


Figura 15 - Fósforo nos Cenários C2, C5 e C6

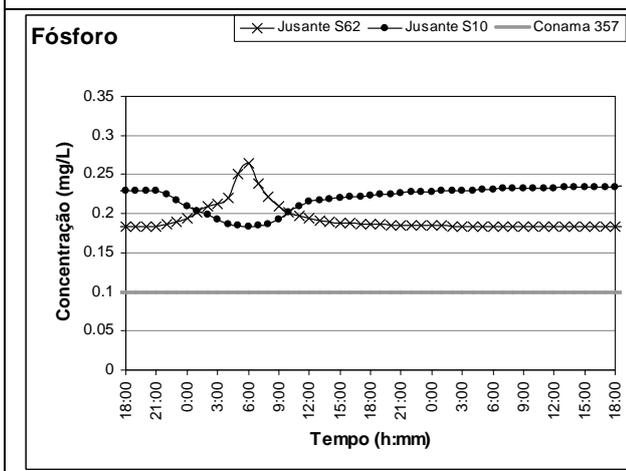


Figura 16 - Fósforo no Cenário C7

3.5. Amônia

Nas Figuras 17 a 19 são apresentados os resultados das simulações de amônia. Em todas as simulações as concentrações mantiveram-se abaixo do padrão da Resolução CONAMA 357, que é de 1,0 mg/L. Assim, os impactos associados ao aquecimento global tornam-se menos problemáticos mesmo nos cenários críticos (C5, C6, C7). O saneamento básico (C3) proporciona redução dos contaminantes para o patamar de 0,1 mg/L. Já os eventos da despesca provocaram fortes incrementos nos teores de amônia, elevando em cerca de quatro vezes a concentração logo a jusante da S62 (C7).

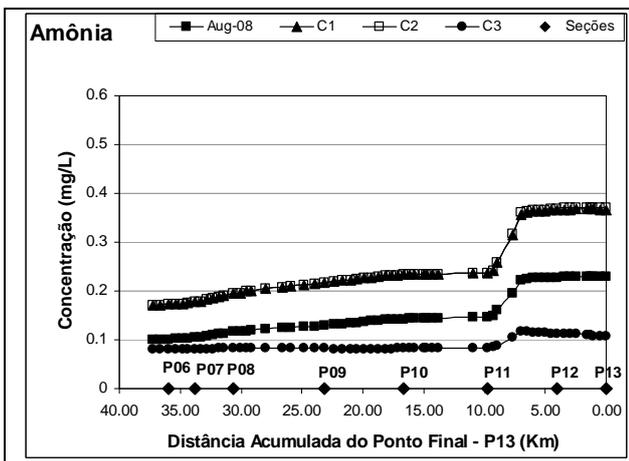


Figura 17 - Amônia Ago/08 e Cenários C1, C2 e C3

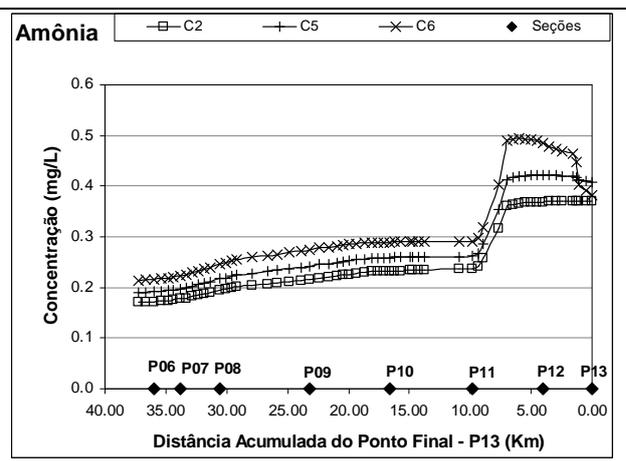


Figura 18 - Amônia nos Cenários C2, C5 e C6

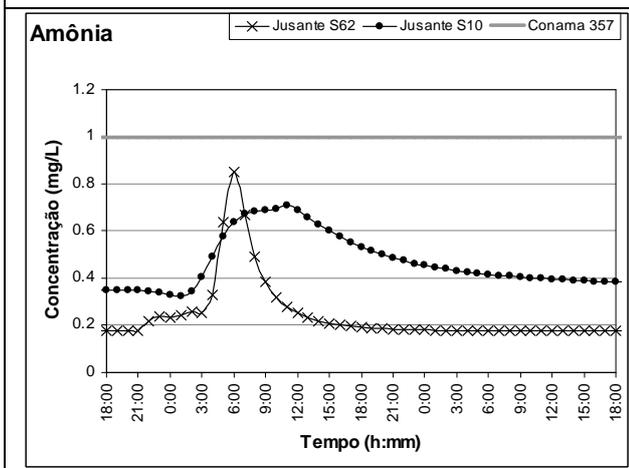


Figura 19 - Amônia no Cenário C7

3.6. Coliformes

Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os resultados das simulações de coliformes termotolerantes ó CT. Verifica-se que as concentrações de CT atenderam ao padrão do CONAMA 357 em todos os cenários. O saneamento básico da região é desejável e pode reduzir a concentração para valores abaixo de 50,0 mg/L (C3). A redução da oferta da vazão de montante associada ao aquecimento global (C5 e C6) causam uma elevação na concentração do poluente, mas as taxas de mortalidade do CT são suficientemente altas para proporcionar uma rápida redução do contaminante, mantendo os teores abaixo de 1000 NMP/100mL. Como o efluente da carcinicultura é praticamente isento desse tipo de poluente, o gráfico da simulação da despesca não foi apresentado para CT.

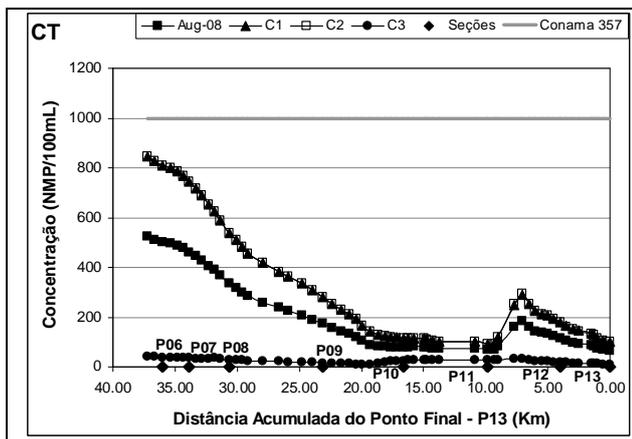


Figura 20 - Colif. Ago/08 e Cenários C1, C2 e C3

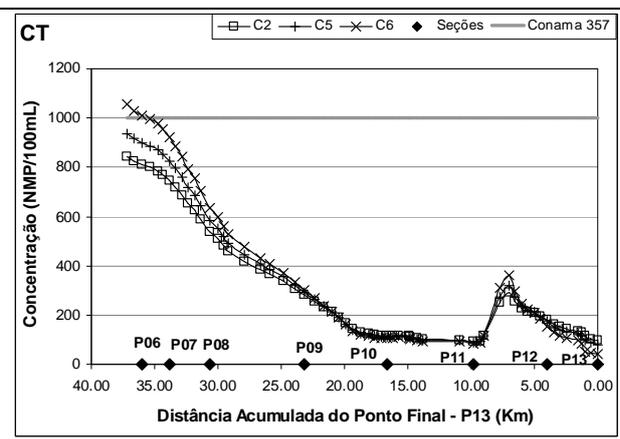


Figura 21 - Coliformes nos Cenários C2, C5 e C6

3.7. OD

Nas Figuras 17 e 18 são apresentados os resultados das simulações de OD, que manteve concentrações elevadas em todos os cenários. O CONAMA 357 estabelece valor superior a 5 mg/L para a classe 2, o que foi sempre atendido. O corpo receptor demonstrou assim boa capacidade de depurar a matéria orgânica sem que houvesse um consumo exagerado de OD. Destaca-se que o metabisulfito é utilizado durante a despesca para evitar o escurecimento da carapaça do camarão. Esse produto, se liberado diretamente nos cursos d'água, reage com o OD, podendo causar acidentes ambientais. Provoca ainda abaixamento do pH e intoxicação de animais. Esse efeito não foi aqui modelado.

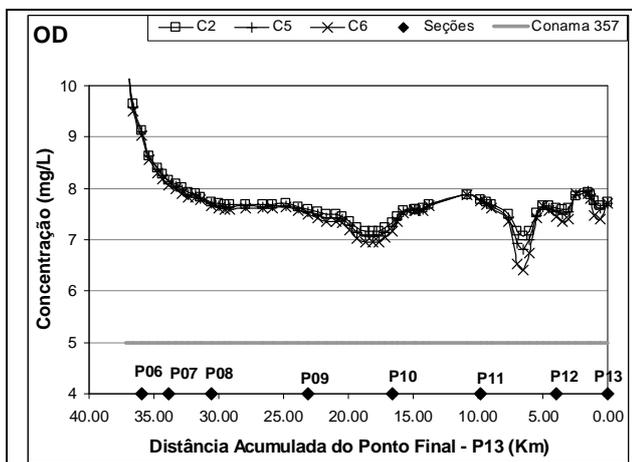


Figura 17 - OD nos Cenários C2, C5 e C6

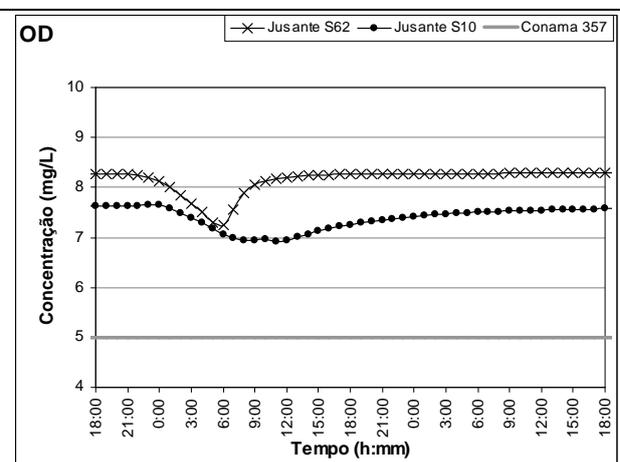


Figura 18 - OD no Cenário C7

Nos cenários C1 e C2 verificaram-se os efeitos na qualidade do rio Jaguaribe caso se concretizasse (C2) ou não (C1) a hipótese do aquecimento global, com incrementos nas taxas de evaporação, mas sem alteração da vazão disponível na bacia. As simulações indicaram que ocorreria uma diferença, comparando os cenários C1 e C2, nas concentrações máximas dos poluentes em cerca de

1%, portanto, insignificantes. Isso se deve ao fato de que o incremento nas demandas de irrigação e carcinicultura ($0,055 \text{ m}^3/\text{s}$) entre a situação atual e considerando o cenário A2 de aquecimento global, para o mês de agosto, representa apenas 2,3% da vazão média do rio ($2,38 \text{ m}^3/\text{s}$), o que pouco altera na sua capacidade de diluição e autodepuração.

Quando se avaliou as concentrações dos poluentes comparando os cenários de mudanças climáticas A2 e B2 no ano de 2040, foram obtidas diferenças desprezíveis entre ambos, ou seja, o efeito sobre a qualidade das águas é praticamente o mesmo para esses cenários, uma vez que suas demandas têm valores similares.

Destaca-se que Ferrier et al. (1995) utilizaram modelagem da qualidade da água para avaliar os impactos de mudanças climáticas nas concentrações de nitrato no rio Don, na Escócia. Foram avaliados cenários considerando alterações dos padrões agrícolas e de uso e ocupação do solo, e como consequência do aquecimento global, mudanças do regime de vazões na bacia hidrográfica, na temperatura e nas taxas de mineralização do nitrogênio. O efeito combinado desses fatores gerou um incremento de cerca de 100% nas concentrações de nitrogênio presentes no rio. Todavia, o aumento da taxa de mineralização, que produziu um aporte extra de carga de nitrogênio para o corpo receptor, foi o fator mais importante desse processo. Os demais fatores produziram, isoladamente, impactos pouco significativos.

Um paralelo pode ser feito entre o presente estudo e a publicação de Ferrier et. al. (1995). O fator determinante para a degradação ambiental foi o aumento de cargas de poluentes, sendo os efeitos diretos das mudanças climáticas secundários. O aumento da carga aqui se deu em relação aos efluentes domésticos, enquanto no estudo de Ferrier ocorreu segundo uma hipótese de aumento da taxa de mineralização na bacia hidrográfica.

Já quando se considerou redução da vazão de montante, os efeitos sobre a qualidade das águas foram significativos. Destaca-se que o aquecimento global poderá gerar redução das taxas de precipitação pluviométrica na região, e alterar outras variáveis meteorológicas, resultando em diminuição da oferta de água na bacia, como suposto pelos cenários C5 e C6.

Em tais hipóteses, os efeitos do aquecimento global causariam fortes impactos negativos na qualidade das águas. Torna-se assim, interessante desenvolver estudos a fim de quantificar os níveis de redução na vazão do rio Jaguaribe, associados às mudanças climáticas.

Destaca-se que o aquecimento global foi aqui testado tendo como horizonte o ano de 2040, mas trata-se de um processo com potencial de se desenvolver de forma mais intensa numa escala temporal mais longa.

Assim, em análises considerando horizontes de longo prazo, é possível que os efeitos do aquecimento global sobre o aumento das demandas de irrigação e carcinicultura possam gerar piora

significativa na qualidade das águas, de modo que é recomendável que novas pesquisas sobre esse tema considerem cenários para os anos de 2070 e 2100.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trecho analisado poderá enfrentar em 2040 problemas de contaminação por fósforo total e DBO, não atendendo aos padrões do CONAMA 357/05, caso não sejam realizadas melhoras nos sistemas de esgotamento sanitário da região. Os efeitos mais significativos de poluição do rio Jaguaribe em 2040 são os associados ao aumento da carga de poluentes domésticos.

Os impactos na qualidade das águas relativos ao incremento das demandas de irrigação e de carcinicultura como resultado do aquecimento global serão pouco significativos. Os cenários de aquecimento global A2 e B2 produzirão em 2040 impactos similares no corpo receptor, pois a diferença das demandas entre ambos é pequena quando comparada à vazão do rio Jaguaribe.

A redução de oferta de vazão de montante e a despesca do camarão são fatores que tornam o quadro de poluição do rio ainda mais crítico, principalmente quanto a DBO e fósforo total. Para os demais poluentes, embora ocorra elevação das concentrações, será ainda possível atender aos padrões do CONAMA 357/05 em 2040, mesmo em situações críticas desse tipo.

Recomenda-se que sejam estabelecidas diretrizes e medidas orientadas para planos e ações que possibilitem manter a sustentabilidade da oferta hídrica na bacia como um todo, considerando aspectos quali-quantitativos. Isto deverá configurar-se em um processo que refletirá na minimização de eventuais prejuízos sócio-econômicos e danos ambientais que estejam associados ao aumento das demandas provocado pelo aquecimento global e ao crescimento de cargas poluentes de origem domésticas.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, F. F. V. (2005). Simulação da qualidade de água e hidráulica para avaliar impactos dos efluentes da carcinicultura em trecho do Baixo Jaguaribe. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará.

ARAÚJO, F. F. V.; CASTRO, M.A.H.; FIGUEIREDO, M.C.B. Avaliação de impactos dos efluentes da carcinicultura em trecho do rio Jaguaribe por meio de simulação In: Gestão Sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará. ROSA, M. de F.; GONDIM, R.S.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. eds. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, p. 151 ó 196, 2006.

ARAÚJO, L. de F.; GOMES, R.B.; FIGUEIREDO, M.C.B.; ROSA, M. de F.; PAULINO, W.D. Qualidade das águas superficiais em áreas de influência das atividades de irrigação e carcinicultura In: Gestão Sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará. ROSA, M. de F.; GONDIM, R.S.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. eds. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, p. 151 ó 196, 2006.

- BOWIE G. L., MILLS W. B., PORCELLA D. B., CAMPBELL C. L., PAGENKOPF J. R., RUPP G. L., JOHNSON. K. M., CHAN P. W. H., GHERINI S. A. (1985) Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. 2. ed. EPA/600/3-85/040, U.S. Environmental Protection Agency. Athens.
- CRUISE, J.F.; LIMAYE, A.S.; AL-ABED, N. Assessment of impacts of climate change on water quality in the Southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n.6, p.1539-1550, 1999.
- EHEART, J.W.; WILDERMUTH, A.J.; HERRICKS, E.E. The effects of climate change and irrigation on criterion low streamflows used for determining total maximum daily loads. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n.6, p.1365-1372, 1999.
- FERRIER R.C., WHITEHEAD P.G., SEFTON C., EDWARDS A. C., PUGH K. (1995) Modelling Impacts of Land Use Change and Climate Change on Nitrate-Nitrogen in the River Don, North East Scotland. *Wat. Res.* v.. 29, n. 8, p. 1950-1956. 0043-1354-(95)-00004. Elsevier Science Ltd. Great Britain.
- FIGUEIREDO, M. C. B. ; ROSA, Morsyleide de Freitas ; ARAÚJO, Lúcia de Fátima Pereira ; CORREIA, Luís José de Almeida ; MORAIS, Lúcia de Fátima Sabóia de . Perfil das Fazendas de Camarão em Águas Interiores, na Região do Baixo Jaguaribe. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 9, n. 3, p. 101-108, 2004.
- FIGUEIREDO, M. C. B. ; ARAÚJO, Lúcia de Fátima Pereira ; GOMES, Raimundo Benvindo ; ROSA, Morsyleide de Freitas ; PAULINO, Walt Disney ; MORAIS, Lúcia de Fátima Sabóia de . Impactos ambientais do lançamento de efluentes da carcinicultura em águas interiores. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 167-174, 2005.
- GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de; EVANGELISTA, S. R. de M.; TEIXEIRA. A. dos S.; JÚNIOR, S. C. de F. F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* v.43, n.12, p.1657-1664, dez. 2008
- IPCC ó Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. McCARTH, J.J.; CANZIANI, O.F.; LEARY, A.N.; DOKKEN, D.J.; WHITE, K.S. (Eds.). *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: University Press, U.K. 2001. 217 p.
- MARTIN, J.L. e WOOL, T. (2002). *A Dynamic One-Dimensional Model of Hydrodynamics and Water Quality ó EPD-RIV1 Version 1.0: User's Manual*. Georgia Environmental Protection Division. Atlanta, Georgia. 188 p.
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GR. A.; JUNG, T.Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E.L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H-H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI. Z. Special Report on Emission Scenarios. [NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000. Disponível em <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>> Acesso em 03.01.2007.
- ROSA, M. F; GONDIM, R. S; FIGUEIREDO, M. C. (2006) *Gestão Sustentável no Baixo Jaguaribe*. 1 ed. Fortaleza-CE: Embrapa Agroindústria Tropical.
- GONDIM R. S., CASTRO M. A. H., EVANGELISTA S. R. M., FUCK JÚNIOR S. C. F., SOUSA S. A. M. (2008). Impacto das Mudanças Climáticas na Evapotranspiração de Referência, em Nível de Bacia Hidrográfica Utilizando um Sistema de Informações Geográfica. Taller Internacional Red Riegos CYTED. Florianópolis, Brasil.
- VON SPERLING, M. (1996). *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Universidade Federal de Minas Gerais ó UFMG. Belo Horizonte ó MG.
- WILBY, R.L.; WHITEHEAD, P.G.; WADE, A.J.; BURRERFIELD, D.; DAVIS, R.J.; WATTS, G. Integrated modeling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. *Journal of Hydrology*, v.330, n.1-2, p. 204 - 220, 2006.