

Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil

Integrating water allocation modelling into the DPSIR Indicator System: application to the semi-arid region of Brazil

Matheus Duarte de Araújo^{1*} , Márcia Maria Rios Ribeiro¹ , Cybelle Frazão Costa Braga² 

RESUMO

Este estudo propõe uma abordagem combinada do modelo força motriz-pressão-estado-impacto-resposta (FPEIR) com a modelagem de alocação de água para avaliar as estratégias de gerenciamento da demanda hídrica na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró (RN). O crescimento populacional aliado ao desenvolvimento econômico, a inadequada gestão e as mudanças climáticas são as forças motrizes para a escassez hídrica e os conflitos do sistema hídrico em análise. O Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do estado é responsável pela gestão da bacia em foco. Os instrumentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos (definidos pela Lei nº 9.433/97) encontram-se parcialmente implementados na bacia. A Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN) projeta a ampliação do sistema hídrico. Nesta pesquisa, o sistema Apodi-Mossoró foi analisado frente a quatro estratégias de alocação e variações nas condições requeridas para os seus reservatórios. A análise realizada mostra falhas no atendimento às demandas do sistema, as quais poderão ser amenizadas nas estratégias que incorporam a gestão da demanda de água e o aporte das águas da transposição do Rio São Francisco. Os resultados permitem sugerir medidas adaptativas de economia de água, incluindo o seu reúso, como opções para um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos da bacia.

Palavras-chave: análise de sistemas; gerenciamento da demanda hídrica; alocação de água.

ABSTRACT

This study proposes a combined approach of the DPSIR (Driving forces-Pressures-State-Impact-Response) model with water allocation modeling to evaluate water demand management strategies in the Apodi-Mossoró River Basin (Rio Grande do Norte, Brazil). Population growth coupled with economic development, inadequate management and climate changes are the driving forces for water scarcity and the conflicts of under analysis here. The State's Integrated Water Resources Management System is responsible for managing the basin in focus. The instruments of the National Water Resources Policy (defined by Law 9.433/97) are partially implemented in the basin. The Water and Sewage Company of Rio Grande do Norte projects the expansion of the water system. In this research, the Apodi-Mossoró System was analyzed considering four allocation strategies and variations in the conditions required for its reservoirs. The analysis shows failures in meeting the demands of the system, which can be mitigated through strategies that incorporate water demand management and water transfers from the São Francisco River Basin. The outcomes suggest adaptive water saving measures, including water reuse, as options for better water planning and management in the basin.

Keywords: system analysis; water demand management; water allocation.

INTRODUÇÃO

A escassez de água é uma realidade vivida pelos habitantes da região semiárida brasileira. A crescente demanda hídrica (abastecimentos humano, industrial e agrícola), agravada pela poluição dos mananciais, aumenta a pressão sobre os recursos hídricos, constituindo um problema para os desenvolvimentos social e econômico

(AMORIM; RIBEIRO; BRAGA, 2016). A situação decorre do mal gerenciamento da água, acrescido das condições climáticas locais, o que se reflete em déficit hídrico e se configura como um problema de governança da água (SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017). Assim, a crise hídrica é, de forma primária, uma crise de governança de água (OECD, 2015).

¹Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB), Brasil.

²Instituto Federal da Paraíba - João Pessoa (PB), Brasil.

*Autor correspondente: matheusduarte887@gmail.com

Recebido: 23/08/2017 - Aceito: 11/09/2018 - Reg. ABES: 184425

Diante da necessidade de se analisarem os complexos sistemas de recursos hídricos (oferta e demandas a serem atendidas), é preciso buscar por ferramentas metodológicas que possibilitem entender os processos políticos, institucionais, sociais, econômicos e ambientais (não apenas os hídricos) de uma região. A literatura registra que o *Statistics Canada* desenvolveu o quadro *Stress-Response* (SR) em 1979, considerando que as respostas de um processo seriam tanto ambientais, como sociais (RAPPORT, 1979). O SR evoluiu para o *Pressure-State-Response* (PSR), formato que foi aplicado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) para a avaliação ambiental (OECD, 1993). Posteriormente, a Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA, 1999), considerando as estruturas pressão-estado-resposta (PER) e pressão-estado-impacto-resposta (PEIR) (nessa última inclui-se a dimensão “impacto”), desenvolveu o modelo *driving forces-pressure-state-impact-response* (DPSIR) (traduzido por força motriz-pressão-estado-impacto-resposta — FPEIR). O formato FPEIR explicita as conexões entre as causas dos problemas ambientais, suas pressões, estados, seus impactos e respostas da sociedade. Por ser baseado em relação causa-efeito, o sistema interliga, portanto, as atividades humanas que exercem pressão sobre o meio ambiente com a alteração da qualidade e quantidade dos recursos naturais (estado) que causam os impactos.

A EEA (1999; 2003) define as categorias do sistema FPEIR da seguinte forma:

- forças motrizes (F) descrevem os desenvolvimentos social, econômico e demográfico da sociedade e as mudanças geradas no estilo de vida, nível de consumo e padrões de produção;
- os indicadores de pressão (P) descrevem a evolução da liberação de substâncias (emissões), agentes físicos e biológicos, a utilização de recursos e o uso do solo pelas atividades humanas;
- os indicadores de estado (E) possibilitam a descrição da quantidade e qualidade dos fenômenos físicos (como a temperatura), biológicos (como unidades populacionais de peixes) e químicos (como a concentração atmosférica de CO₂) em determinada área;
- as mudanças no estado produzem os impactos (I) nas funções ambientais, incluindo as saúdes humana e do ecossistema, a disponibilidade de recursos etc.;
- as respostas (R) são ações exercidas pela sociedade (grupos ou indivíduos) e pelo governo para prevenir, compensar, melhorar ou adaptar-se às mudanças no estado do ambiente.

O arcabouço FPEIR se presta para avaliar diversos aspectos, incluindo questões de recursos hídricos, como sistemas de reservatórios (problemática deste artigo), abastecimento de água, qualidade de água, águas subterrâneas etc. O sistema de indicadores FPEIR vem sendo aplicado como uma ferramenta isolada ou integrada a outros arcabouços, usado como concebido originalmente ou com alterações.

Conceitos como sustentabilidade, vulnerabilidade, participação pública e construção de cenários têm sido explorados. Dois aspectos contribuem para o amplo uso do modelo FPEIR (GARI; NEWTON; ICELY, 2015): uma estrutura de indicadores com objetivos políticos relacionados aos problemas ambientais e o foco em relações causais de uma forma clara que interessa à classe política. Os exemplos que se seguem, sendo a maioria deles da área de recursos hídricos, mostram a ampla utilização da ferramenta FPEIR.

Aplicações do modelo força motriz-pressão-estado-impacto-resposta

O desempenho do modelo foi pesquisado por Tscherning *et al.* (2012), que analisaram 21 aplicações da matriz FPEIR na intenção de verificar se o arcabouço auxilia, de fato, a tomada de decisão. Com base nos estudos averiguados e na experiência dos próprios autores no uso do modelo FPEIR em pesquisas de problemas europeus, foram desenvolvidos dois critérios cruciais que devem ser considerados: o desenvolvimento de modelos conceituais que integrem diferentes disciplinas, especialistas e tomadores de decisão, assim como envolvam aqueles que são afetados pelas decisões; e, o potencial desses arcabouços em explicar os resultados e a análise da pesquisa para diferentes disciplinas, especialistas e envolvidos, apresentando as alternativas das decisões. Os autores concluem que os estudos com o FPEIR foram capazes de prover soluções efetivas para o que chamam de “problemas do mundo real”.

Discutindo sobre indicadores para avaliação e monitoramento do desenvolvimento sustentável, Pires *et al.* (2017) avaliam como 170 indicadores referentes ao uso e ao gerenciamento da água se comportam em relação a quatro critérios de sustentabilidade (social, ambiental, institucional e econômico). A matriz de avaliação, com a identificação e descrição dos indicadores, foi construída classificando-os de acordo com o arcabouço do FPEIR. Os autores explicam que um indicador, em função de sua natureza e atributo, pode ser bem classificado em uma das dimensões (ou em mais de uma) do sistema FPEIR. Os resultados mostram que dos indicadores analisados, 24 atendem à maioria dos critérios de sustentabilidade.

Em Sun *et al.* (2016), são estabelecidos indicadores para avaliar a sustentabilidade do uso da água baseando-se no modelo FPEIR. Os autores argumentam que o gerenciamento sustentável da água é essencial por assegurar a integração dos aspectos sociais, econômicos e ambientais na gestão da água. O método Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi utilizado em conjunto com a matriz FPEIR para avaliar as alternativas sustentáveis para o sistema hídrico da cidade de Bayannur (na Mongólia), uma região que enfrenta problemas de escassez de água. O arcabouço combinando FPEIR e AHP foi capaz de sintetizar os fatores sociais e econômicos que impactam a sustentabilidade dos recursos hídricos e entender as principais relações de causa e efeito do sistema hídrico regional. Os resultados mostram que as medidas de eficiência

de água não são usadas na região, sendo necessário incentivá-las, incluindo o gerenciamento da demanda de água.

Outra discussão em torno de sustentabilidade e modelo FPEIR é encontrada em Ness, Anderberg e Olsson (2010). Argumenta-se que a ciência da sustentabilidade necessita de arcabouços que integrem diversas disciplinas e níveis; assim, propõe-se um arcabouço institucional de múltiplo nível a ser acoplado à matriz FPEIR. Uma aplicação foi feita no problema de eutrofização do mar Báltico causado pela agricultura sueca.

Estudando a bacia hidrográfica Maharlou-Bakhtegan (no Irã), submetida à escassez hídrica, a pesquisa de Rasi Nezami *et al.* (2013) propõe uma abordagem que associa o modelo FPEIR com a análise de cenários. Relações de causa e efeito foram identificadas pelo FPEIR, e 15 cenários foram concebidos com base nessas relações. Para avaliar esses cenários, nove indicadores de gerenciamento hídrico foram avaliados pelo modelo MODSIM (capaz de considerar o uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas — LABADIE, 2005). Entre esses indicadores, estão os abastecimentos doméstico, industrial e agrícola, a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos recursos subterrâneos. Os autores concluem pela necessidade de se imporem limites ao desenvolvimento da área agrícola, a fim de serem atingidas condições desejáveis para todos os indicadores pesquisados.

Henriques *et al.* (2015) também simulam cenários de gestão hídrica — nesse caso, para a Inglaterra e o País de Gales, em um horizonte temporal até 2050. Os panoramas foram elaborados considerando entrevistas com os envolvidos no problema e foram denominados de cenários de demandas incontroláveis, de inovação, de comportamento sustentável e de resiliência local. A cadeia causal de forças motrizes, pressões, estados, impactos e repostas foi explorada com a metodologia FPEIR. Os resultados alertam que: cenários que consideram o crescimento econômico de curto prazo exacerbam os impactos negativos das mudanças climáticas, produzindo uma deterioração da qualidade de água e reduzindo sua disponibilidade; e cenários caracterizados pela sustentabilidade de longo prazo promovem substancial melhoria ambiental.

As pesquisas de Sun *et al.* (2016) e Rasi Nezami *et al.* (2013) exemplificam a possibilidade de integração do sistema FPEIR com demais ferramentas, respectivamente o método AHP e o modelo MODSIM. Além desse tipo de integração a um modelo já existente, há pesquisas que sugerem alterações no próprio arcabouço FPEIR, como apresentado em Kelble *et al.* (2013). Os autores propõem um modelo conceitual que integra serviços ecossistêmicos ao FPEIR. O novo modelo é denominado Ecosystem Based Management — Driver, Pressure, State, Ecosystem Service, Response (EBM-DPSER). A proposta foi aplicada aos ecossistemas Florida Keys e Dry Tortugas. Argumenta-se que o módulo “impacto”, no tradicional FPEIR, é focado nos impactos antropocêntricos negativos no ecossistema. Substituindo o impacto “I” do

DPSIR pelos serviços ecossistêmicos (DPSER), o modelo EBM-DPSER incorpora mudanças negativas e positivas no ecossistema.

Vulnerabilidade é o cerne do estudo de Hamouda, El-Din e Moursy (2009), que propõem arcabouço para avaliá-la em sistemas hídricos de três países da região leste da bacia do rio Nilo. O arcabouço possui cinco fases, sendo a primeira delas a de desenvolvimento e classificação de indicadores. Para realizar essa tarefa, adotou-se a metodologia FPEIR. Os resultados mostram que a vulnerabilidade hídrica é maior no Sudão, em seguida na Etiópia. No Egito, país menos vulnerável dos três, a vulnerabilidade está associada a fatores hidrológicos. No Sudão e na Etiópia, ela se relaciona com questões de pobreza e subdesenvolvimento. Entretanto, para os três países, a governança da água requer um gerenciamento adequado dos recursos hídricos disponíveis.

Qualidade de água e problemas de eutrofização são tratados em Kagalou *et al.* (2012). Eles fizeram uma simulação do modelo FPEIR na bacia do rio Kalamas, um dos mais importantes sistemas aquáticos do oeste da Grécia. Os resultados revelam que as forças motoras (que levam às pressões) são a agricultura, a pecuária e as numerosas fontes de poluição existentes pela área da bacia. As respostas devem considerar a eliminação da poluição difusa, a redução da carga orgânica e medidas de proteção à biodiversidade.

Mathetsa (2015) também aborda as ameaças na qualidade de água. O Parque Nacional e Patrimônio Histórico Mapungubwe (MNPNS), na África do Sul, é o caso de estudo. Na formulação do FPEIR, uma abordagem participativa foi utilizada onde os envolvidos foram entrevistados. O modelo indicou a presença de processos socioeconômicos e naturais que afetam a qualidade de água (agricultura, mineração, conservação ambiental e turismo). Um dos mais importantes resultados detectados foi a fragilidade institucional associada à pobre implementação das leis relacionadas com água.

Questões de águas subterrâneas e o uso do arcabouço FPEIR são discutidas em Mimidis *et al.* (2017). O sistema aquífero Nea Peramos, em uma área costeira da Grécia, é a área pesquisada. A matriz FPEIR possibilitou entender as relações de causa e efeito entre a sociedade local e o ambiente. Os autores concluem que o sistema se constitui em uma metodologia-chave para auxiliar na tomada de decisão. Entretanto, para analisar sistemas complexos, ferramentas auxiliares devem ser consideradas, como análise de sensibilidade, análise multicritério e sistema de informações geográficas. Áreas costeiras e estuarinas são também averiguadas em Gari, Newton e Icely (2015), os quais apresentam estudos categorizados em dois grandes grupos: os que fazem uso do sistema FPEIR de forma isolada e os que o utilizam conjuntamente com outras ferramentas.

No problema abordado nesta pesquisa, foca-se no modelo FPEIR e no processo de alocação de água como importantes ferramentas do gerenciamento de recursos hídricos na região semiárida brasileira. A alocação de água será processo bem sucedido se for capaz de distribuir

a água entre os seus diversos usos, baseando-se no conhecimento e cadastramento dos principais usuários e na adoção de princípios de uso sustentável, eficiência econômica e equidade social. Para alocar bem a água, é preciso conhecer o sistema hídrico envolvido e planejar a sua operação. A modelagem de um sistema tem sido usada para definir o seu comportamento físico, considerando os objetivos de maximizar os benefícios advindos da disponibilidade hídrica (BERHE, 2013; PESSOA; ASSIS; VIEIRA, 2016).

Para auxiliar a tomada de decisão, os atores envolvidos na gestão de recursos hídricos podem contar com o emprego de ferramentas denominadas Sistemas de Suporte a Decisões (SSD). Existem SSD que simulam com eficiência sistemas complexos de recursos hídricos, assim como modelos que calculam a demanda. Nesse sentido, é possível simular os sistemas de forma que se aloque a água disponível aos diversos usos, a fim de que as condições sociais, econômicas e legais sejam atendidas (POFF *et al.*, 2016; UUSITALO *et al.*, 2015). Para isso, o desenvolvimento de regras de operação de reservatórios e a modelagem matemática simulam o comportamento físico do sistema, quantificando os valores de água a serem distribuídos.

Nesta pesquisa, utilizando-se do sistema de indicadores FPEIR associado ao modelo de alocação de água AcquaNet (PORTO *et al.*, 2003), o qual é utilizado para modelar a rede de fluxo do sistema hídrico, objetiva-se modelar e analisar cenários de gerenciamento da demanda hídrica na bacia hidrográfica do rio Apodi–Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte. Esse procedimento enquadra-se entre aqueles que abordam um sistema de recursos hídricos, associam outras ferramentas ao modelo FPEIR e fazem uso da análise de cenários de atendimento às demandas (denominados no estudo de “estratégias”).

ESTUDO DE CASO

No contexto do semiárido brasileiro, com seus peculiares problemas, está a bacia hidrográfica do rio Apodi–Mossoró (BHAM), no Estado do Rio Grande do Norte. A BHAM ocupa uma área de 14.276 km², o que corresponde a 26,8% do território do Estado, sendo a maior bacia hidrográfica de dominialidade completamente estadual do Rio Grande do Norte (ANA, 2015).

A análise efetuada nesta pesquisa concentra-se em dois reservatórios situados no rio Apodi–Mossoró, em seu Médio Curso, na porção cristalina da bacia:

- o reservatório de Pau dos Ferros, localizado no município de Pau dos Ferros, ocupa uma área de 259.960 km², com capacidade total de armazenamento de 54.846.000 m³;
- o reservatório de Santa Cruz, localizado no município de Apodi, que possui área de 34,13 km² e capacidade total de 599.710.000 m³ (SEMARH, 2017). A bacia hidrográfica e a localização dos reservatórios estão representadas na Figura 1.

Os reservatórios Pau dos Ferros e Santa Cruz, os quais compõem o hidrossistema Apodi–Mossoró, possuem projetos de sistemas de adutoras complexos, podendo induzir a diversos usos conflitantes pela água. Os projetos analisados neste estudo são: sistema Alto Oeste, para abastecimento de municípios do Alto Curso da BHAM; a adutora Apodi/Mossoró, para abastecimento do município de Mossoró (RN) e região (localizada no Baixo Curso); e o Projeto de Irrigação Santa Cruz, na construção da adutora para o perímetro irrigado da Chapada do Apodi (CAERN, 2017).

O sistema Alto Oeste tem como objetivo principal abastecer a região do Alto Curso por um sistema integrado entre os reservatórios Pau dos Ferros e Santa Cruz. Atualmente, o primeiro está no volume morto e desenvolve-se um estudo de viabilidade de uma adutora expressa a partir do segundo para reativá-lo. O nível zero gerou a necessidade de uma adutora emergencial de engate rápido, que opera temporariamente do reservatório Santa Cruz para o abastecimento dos municípios que eram abastecidos pelo Pau dos Ferros (CAERN, 2017). A adutora Santa Cruz–Mossoró poderá aumentar em 60% a atual oferta de água no município de Mossoró.

O projeto justifica-se pela possível substituição dos poços profundos do aquífero Açú, localizados à jusante da barragem Armando Ribeiro Gonçalves, que, atualmente, abastecem 60% do município e estão em regime de exaustão (PREFEITURA DE MOSSORÓ, 2010). O Projeto de Irrigação Santa Cruz, a partir da construção da adutora para o perímetro irrigado da Chapada do Apodi, objetiva a ampliação do sistema, a fim de possibilitar o desenvolvimento das áreas irrigadas no Médio e Baixo cursos da bacia (CAERN, 2017).

A Figura 2 apresenta o sistema hídrico da BHAM com os projetos da Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), destacando-se os projetos de adutoras estudados nesta pesquisa.

METODOLOGIA

As etapas metodológicas da pesquisa envolvem:

- a caracterização da área de estudo;
- a identificação e análise das variáveis a comporem os indicadores da matriz FPEIR;
- a simulação da alocação de água no hidrossistema Apodi–Mossoró com o modelo AcquaNet e a consideração de estratégias de demanda;
- a identificação das melhores estratégias para o gerenciamento da demanda de água na BHAM.

Identificação das variáveis do modelo força matriz–pressão–estado–impacto–resposta

No que se refere à etapa de identificação dos indicadores do modelo FPEIR, a estrutura concebida para a respectiva matriz é apresentada na Figura 3. As variáveis que formam os cinco conjuntos de indicadores do modelo FPEIR, após identificadas, foram caracterizadas detalhadamente.

Essa caracterização é entendida como um importante resultado da pesquisa e, sendo assim, está apresentada na seção de Resultados e Discussão.

A alocação de água é uma das variáveis da dimensão “Resposta” (Figura 3) e tem especial destaque na pesquisa. Quatro cenários de demanda de água, chamados de estratégias, foram concebidos e simulados. Assim, o arcabouço proposto para análise do problema associa o componente de alocação de água e a concepção de cenários ao sistema FPEIR. Trata-se, portanto, do uso da matriz FPEIR acoplada a outras metodologias como feito, por exemplo, em Sun *et al.* (2016), Gari, Newton e Icely (2015), Henriques *et al.* (2015), Rasi Nezami *et al.* (2013) e Kelble *et al.* (2013).

A simulação da alocação de água e definição das estratégias de demanda

Entre os *softwares* de modelagem de alocação de água está o AcquaNet, o qual é uma modificação do MODSIM. O AcquaNet tem o objetivo de auxiliar tomadores de decisão no gerenciamento de reservatórios e bacias

hidrográficas e é um sistema de fácil operacionalização entre usuário e computador (PORTO *et al.*, 2003). Ele difere de modelos como CALSIM, Aquarius, RiverWare e WaterWare, que requerem maiores habilidades na manipulação (JARADAT, 2010). O modelo AcquaNet tem sido utilizado em estudos como o de Teixeira e Porto (2008), na alocação de água como método de suporte à decisão na bacia do rio Piracicaba; nos estudos de Miranda e Mauad (2014), para avaliação do reservatório Três Irmãos (no estado de São Paulo); nos estudos de Fernandes *et al.* (2017), para alocação de água na bacia do rio Jaguaribe (Ceará), considerando cenários de mudanças climáticas. Nesse *software*, a otimização é executada em intervalo de tempo mensal, de forma sequencial, não garantindo o ótimo global para um período de tempo à frente.

Nas simulações realizadas nesta pesquisa, foram utilizados os relatórios da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015) para informações dos dados físicos dos reservatórios. As vazões afluentes foram estimadas por meio de modelo SMAP, no período de 1955 a 1985, a partir dos dados

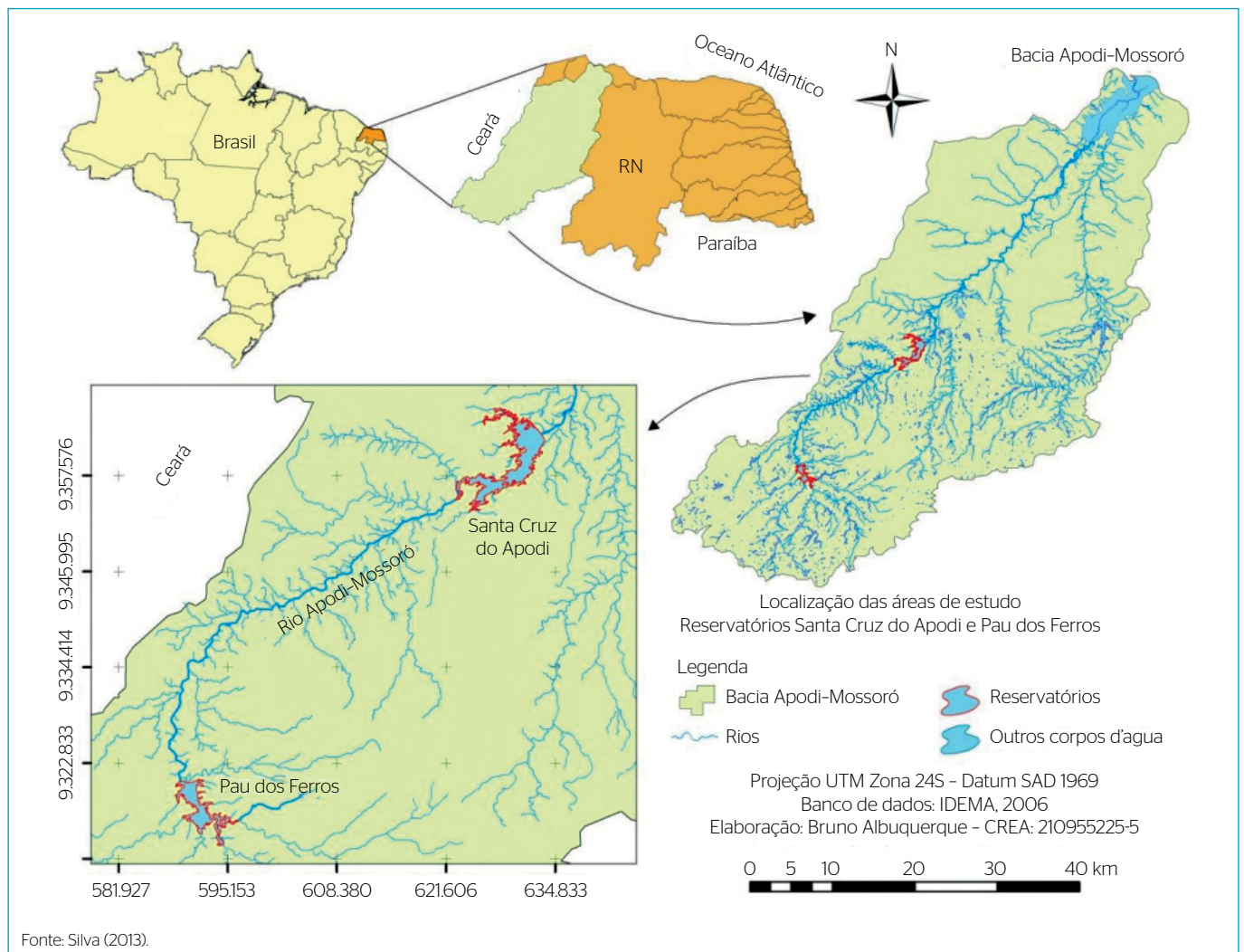


Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró e reservatórios Santa Cruz e Pau dos Ferros no estado do Rio Grande do Norte.

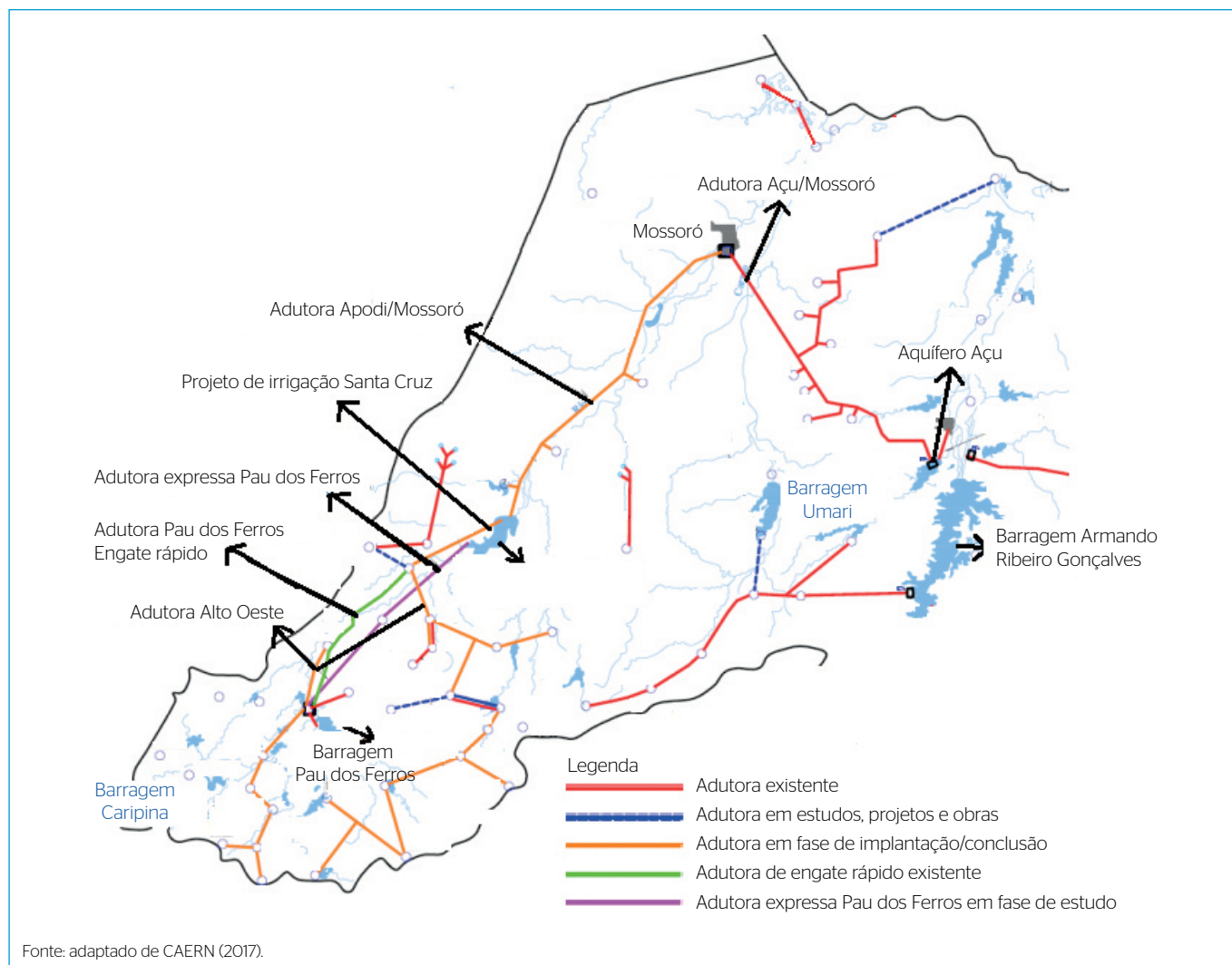


Figura 2 - Sistema hídrico da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró com destaque para as adutoras envolvidas do hidrossistema de mesmo nome do rio.

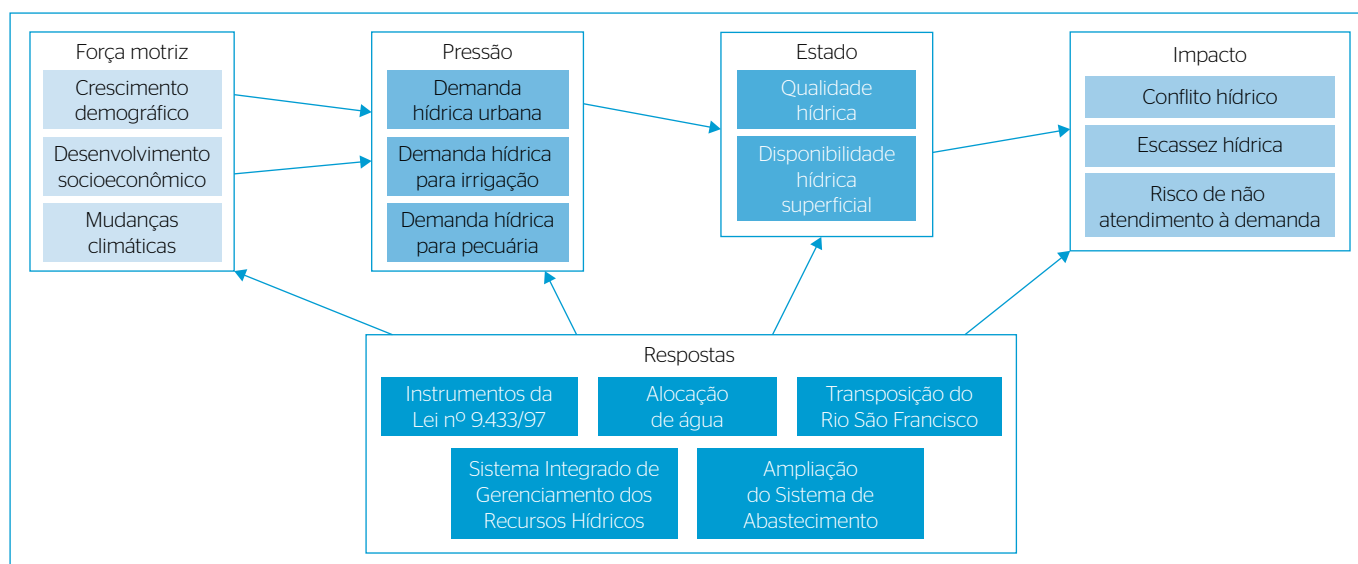


Figura 3 - Modelo força motriz–pressão–estado–impacto–resposta para a bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró.

referentes à climatologia coletados do *website* HidroWeb da ANA (ANA, 2017). A demanda de água de irrigação foi estimada a partir do balanço hídrico baseado na abordagem de coeficiente de colheita dupla FAO-56 desenvolvido por Allen *et al.* (1998), que fornece cálculos separados de transpiração das culturas e evaporação do solo. A demanda para abastecimento urbano e pecuária foram estimadas seguindo a metodologia do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas–Açu (PBHPA) (ANA, 2016).

A Figura 4 apresenta a rede de fluxo elaborada no modelo AcquaNet e utilizada para simular a alocação de água dos dois reservatórios em foco. O modelo representa o sistema de recursos hídricos por intermédio de nós, que são: de volume (reservatórios), de passagem (confluências, pontos de entrada e pontos de demanda) e arcos ou *links* (canais, tubos de abastecimento e rio natural). As demandas do sistema são definidas em abastecimento urbano (AU), irrigação (Irrig.) e pecuária (Pec.) para seis conjuntos de municípios atendidos no hidrossistema Apodi–Mossoró. Os *links* representam o fluxo de água do rio Apodi–Mossoró a partir de um sistema hídrico em série; a afluência se dá à montante, em Pau dos Ferros, para jusante, em Santa Cruz. A rede de fluxo contém o retorno de jusante para montante pelas adutoras Alto Oeste e Pau dos Ferros de engate rápido, a partir do reservatório Santa Cruz, para abastecimento das demandas da região do Alto Curso da bacia.

Como método de sistema de suporte à decisão, a alocação de água é feita por meio de estratégias (cenários) focadas na oferta e demanda, com o objetivo de simular computacionalmente as respostas da CAERN para a escassez hídrica. No modelo de rede de fluxo, as demandas foram estrategicamente ordenadas em prioridades de atendimento (P) pelos códigos P1, P2, P3 e P4. A ordem de prioridades no atendimento à demanda é: P1 > P2 > P3 > P4. As estratégias de alocação e operação dos reservatórios estão expostas a seguir e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Estratégias de atendimento às demandas e condições de operação dos reservatórios.

| Estratégias de alocação | Estratégia e reservatório | Prioridade |
|---|---|--|
| E1 – urbana | E1 V30: volume meta dos reservatórios definido em 30% | Demanda urbana: P1 Volume do reservatório: P2 |
| | E1 V10: volume meta dos reservatórios definido em 10% | Demanda de irrigação: P3 Demanda da pecuária: P2 |
| E2 – agrícola | E2 V30: volume meta dos reservatórios definido em 30% | Demanda urbana: P1 Volume do reservatório: P3 |
| | E2 V10: volume meta dos reservatórios definido em 10% | Demanda de irrigação: P2 Demanda da pecuária: P2 |
| E3 – sistema de reúso e gestão da demanda de água | E3 V30: volume meta dos reservatórios definido em 30% | Demanda urbana: P1 Volume do reservatório: P2 |
| | E3 V10: volume meta dos reservatórios definido em 10% | Demanda de irrigação: P3 Demanda da pecuária: P2 |
| E4 – flexibilização | E4 V30: volume meta dos reservatórios definido em 30% | Demanda urbana: P1 (60%) Demanda urbana: P3 (40%) Volume do reservatório: P2 |
| | E4 V10: volume meta dos reservatórios definido em 10% | Demanda de irrigação: P2 (60%) Demanda de irrigação: P4 (40%) Demanda da pecuária: P2 (60%) Demanda da pecuária: P4 (40%) |

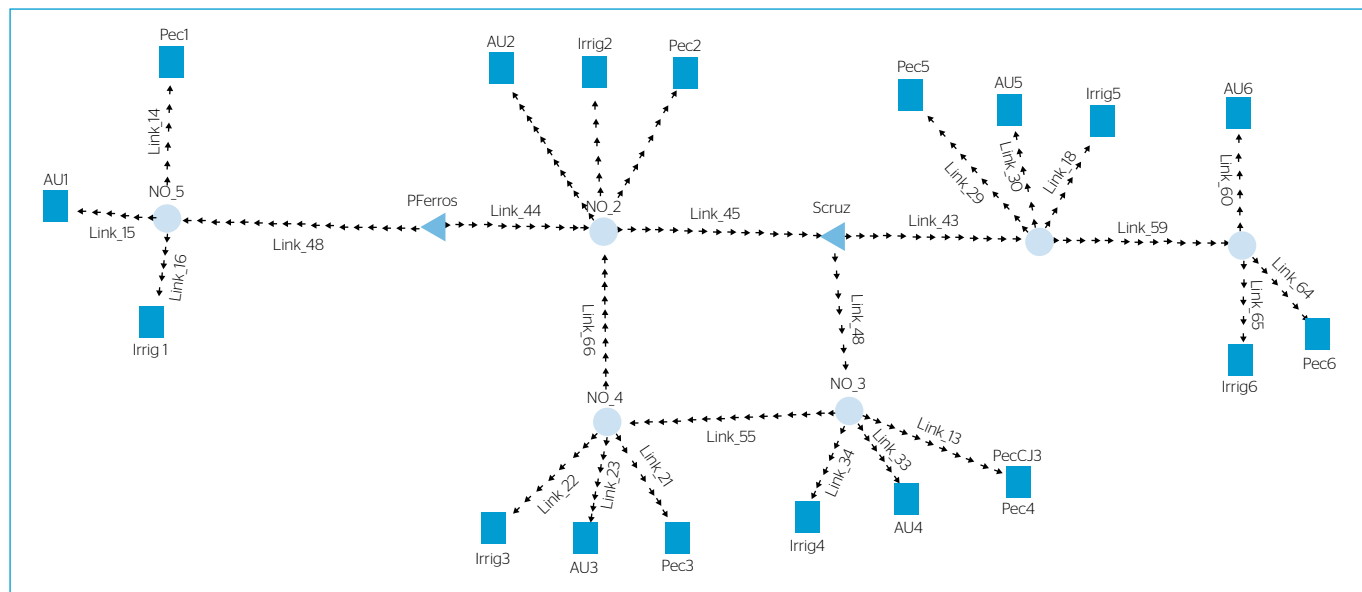


Figura 4 - Rede de fluxo da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró: hidrossistema Apodi-Mossoró.

Para defini-las, seguiram-se as metodologias de Martins *et al.* (2013) e Ahmadi, Moridi e Sarang (2017).

Estratégia 1: abastecimento urbano

Diante da prerrogativa estabelecida pela Lei nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997) (da Política Nacional de Recursos Hídricos) de o abastecimento humano possuir prioridade em casos de escassez hídrica, essa configuração confere maior prioridade para o atendimento urbano (P1) e para a manutenção de um percentual que deve ser mantido no reservatório de um mês para outro (P2), chamado volume meta, frente ao atendimento da demanda para irrigação (P3). Desse modo, após o abastecimento urbano, a água é reservada e poderá atender à demanda urbana no futuro.

Estratégia 2: Irrigação

Considerando maior flexibilidade para os usos, além do abastecimento urbano, nessa configuração, o atendimento à demanda urbana recebe a maior prioridade (P1) por todo o tempo, o atendimento à demanda de irrigação recebe a P2 e o percentual de manutenção do reservatório, a P3. A estratégia justifica-se pela busca do desenvolvimento do setor agrícola.

Estratégia 3: sistema de reúso e gestão da demanda de água (GDA)

A configuração prevê uma redução de 30% da demanda por parte dos usuários do abastecimento urbano. Essa configuração é justificada na proposição de mudanças de hábitos no uso da água mediante a adoção de aparelhos que reduzam a demanda e por técnicas de reúso de água.

Estudos no semiárido (BARROS; RUFINO; MIRANDA, 2016; GUEDES; RIBEIRO; VIEIRA, 2014) mostram a possibilidade de se atingirem reduções no consumo de água a partir da adoção de várias alternativas de gestão da demanda de água (GDA). Segundo Albuquerque, Ribeiro e Vieira (2008), é possível atingir os seguintes resultados: captação de água de chuva para residências — 36,00%; aparelhos que reduzam a demanda para residências — 38,33%; torneiras e chuveiros econômicos para residências e edifícios — 21,83%; medição individualizada para edifícios — 25,00%; reúso de água em casas e edifícios — 36,00%. A demanda estimada por parte dos usuários para irrigação prevê a adoção de um sistema de reúso da água servida para irrigação proposto por Silva *et al.* (2012). Informações de Dantas *et al.* (2014) indicam que o sistema possibilita redução no consumo de 34% por meio de um sistema de irrigação por gotejamento que opera com água residuária doméstica primária.

Estratégia 4: flexibilização

A média de água perdida no estado do Rio Grande do Norte no processo de abastecimento está entre 49 e 51% (CAERN, 2017). Diante do

desperdício de água da distribuição, Martins *et al.* (2013) propuseram, na análise de estratégias de alocação para a bacia do rio Piranhas-Açu, uma configuração para considerar a remoção da prioridade absoluta da demanda urbana prevista em lei. O objetivo é evitar a penalização para usos mais eficientes.

Diferentemente das outras estratégias, essa configuração propõe prioridades para atender a frações das demandas. Dada a importância do abastecimento urbano, 60% dessa demanda deve ser atendida em P1; após a fração urbana ser atendida, a alocação passaria a atender 60% das demandas de irrigação e pecuária, ambas recebendo P2. Sendo alcançadas 60% de todas as demandas (atendendo a P1 e P2), a demanda urbana retorna a ter maior prioridade (com P3) para atendimento dos seus 40% restantes e, por fim, os 40% restantes da irrigação e pecuária são atendidos, recebendo P4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão organizados em duas seções que apresentam e discutem:

- cada um dos cinco conjuntos de indicadores do sistema FPEIR e suas respectivas variáveis;
- a simulação da alocação de água e identificação das melhores estratégias de gerenciamento da demanda.

Indicadores do modelo força motriz–pressão–estado–impacto–resposta para a bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró

Indicador força motriz

O crescimento da população de Mossoró apresenta-se como a maior força motriz do indicador crescimento demográfico. O município cresce a uma taxa média anual de 1,97%, enquanto no Brasil essa taxa é de 1,17% (IBGE, 2015). Esse crescimento é reflexo do avanço do desenvolvimento econômico, caracterizado pelo aumento na capacidade produtiva de bens e serviços. A cidade tornou-se sede de grandes investimentos estatais, principalmente com a instalação da Petrobras, que, aliada com o desenvolvimento da atividade salinera e do seu distrito industrial, proporcionou à cidade um crescimento industrial diversificado (PREFEITURA DE MOSSORÓ, 2010). Todos esses fatores promovem o aumento da demanda hídrica de diferentes usuários de água.

A região estudada sofre influência de eventos como o *El Niño*–Oscilação Sul (ENOS) e suas consequências. No que se refere às secas na região semiárida brasileira, a maior de todas, em 1877–79, dizimou metade da população no Nordeste e quase todo o rebanho bovino. Depois dessa, outras grandes secas seguiram-se, destacando-se a mais recente, de 2012 a 2017. As elevadas taxas de evaporação e a grande

variabilidade interanual dos deflúvios proporcionam significativa oscilação na disponibilidade hídrica superficial da região (CGEE, 2016).

Indicador pressão

A exigência de água da BHAM é principalmente concentrada nos centros urbanos e rurais, os quais foram identificados e agrupados na etapa metodológica de alocação de água desta pesquisa (Figura 4). A estimativa total da demanda para os principais usos está disposta na Tabela 2.

As demandas estimadas dos municípios da adutora Alto Oeste (Tabela 2) apresentam diferença para a vazão de regularização do sistema. A demanda estimada totaliza $3,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e o projeto da adutora apresenta vazões de regularização, com garantia de 95%, no valor de $4,52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ANA, 2017). Essa diferença pode ser explicada pelo fato de a concessionária de água computar, no volume medido, a parcela de água perdida na distribuição, seja por vazamentos, seja por subligações.

A demanda estimada dos municípios abastecidos pela adutora Santa Cruz–Mossoró apresentou valor de $0,04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, abaixo da vazão de regularização de garantia de 95% do projeto (que é de $0,395 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Nesse caso, a diferença pode ter relação com o fato de parte da demanda do município de Mossoró continuar a ser atendida pela adutora Açú/Mossoró.

Indicador estado

A disponibilidade hídrica superficial da bacia é representada por 618 açudes (27,4% dos açudes estaduais), que, juntos, somam um volume total de $469.714.600 \text{ m}^3$ de água, 11% do volume total de água acumulado do Rio Grande do Norte. A disponibilidade subterrânea é de $68.330.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, a qual é distribuída nos aquíferos presentes na BHAM: Dunas, Aluviões, Barreiras, Jandaíra, Açú e Cristalino. Desses, destaca-se o Açú, com maior profundidade e disponibilidade é responsável por parte do abastecimento urbano da cidade de Mossoró (SERHID, 1998).

No que se refere à qualidade hídrica, o programa de monitoramento das águas do Rio Grande do Norte, Programa Água Azul, do Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (IGARN), utiliza o Índice de Qualidade das Águas (IQA), que serve de informação básica de qualidade de água para o público em geral. O histórico do IQA do açude Pau dos Ferros oscila entre “médio” e “bom”. O IQA do

reservatório Santa Cruz varia entre “ruim” e “bom”. Os resultados indicam concentrações relativamente elevadas de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo e nitrogênio, o que sugere que o que mais afeta a qualidade de água são os usos agropastoris no entorno dos reservatórios (PROGRAMA ÁGUA AZUL, 2017). A qualidade da água tem sido tema recorrente nos estudos com o método FPEIR, como se verifica em Mathetsa (2015), Kagalou *et al.* (2012), Ness, Anderberg e Olsson (2010), entre outros.

Indicador impacto

Conforme a Figura 3, para o indicador impacto consideram-se como variáveis os conflitos hídricos, a escassez hídrica e o risco de não atendimento às demandas. Todas essas variáveis possuem estreita conexão entre si. Uma discussão sobre elas é apresentada a seguir.

Diante da atual seca no Nordeste brasileiro (2012–2017), o relatório da CAERN (2017) revela que as regiões do Alto Oeste, Alto e Médio Cursos do rio Apodi–Mossoró possuem o maior número de municípios em situação de colapso hídrico no estado. Dos 47 reservatórios monitorados pelo IGARN, o Pau dos Ferros é um dos 10 da unidade federativa que se apresenta com volume morto — outros 19 reservatórios operam nesse volume (CAERN, 2017).

O reservatório Santa Cruz encontra-se em situação de emergência, com 19,5% (dados de agosto de 2017) de seu volume original (ANA, 2017). Ainda assim, por ser um dos maiores reservatórios da bacia, é base de projetos de ampliação do abastecimento como resposta à escassez hídrica da região.

Indicador resposta

As respostas são as medidas de resolução que podem ser direcionadas a qualquer compartimento do sistema de indicadores. Isto é, a resposta pode ser direcionada para os indicadores força motriz, pressão, estado ou impacto. A Tabela 3 descreve os indicadores do tipo “resposta” do sistema e a sua respectiva condição. No que se refere à resposta “alocação de água”, esta pesquisa realizou simulações que são apresentadas na subseção posterior.

O aumento da demanda de água na BHAM é entendido como uma das pressões geradas pelo crescimento populacional (este uma força motriz). Diante do contexto, os recursos hídricos apresentam-se em um estado indesejável nos aspectos de qualidade e quantidade. Um dos impactos dessa situação são os conflitos pelo uso da água (daí a necessidade de alocá-la adequadamente). As respostas são múltiplas, como demonstrado na Tabela 3. Nessa categoria de indicador, muito importante são os instrumentos de gestão de recursos hídricos da Política Nacional de Recursos Hídricos. A alocação da água (essencial para a implementação do instrumento da outorga dos direitos de uso da água) é considerada uma outra variável do indicador resposta e tem destaque na proposta metodológica desta pesquisa.

Tabela 2 - Demanda estimada dos municípios contemplados nos projetos de ampliação do abastecimento.

| Municípios abastecidos | Abastecimento urbano ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | Irrigação ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | Pecuária ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) |
|---|---|--|---|
| Adutora Alto Oeste | 0,15 | 3,12 | 0,08 |
| Adutora Santa Cruz–Mossoró + Irrigação Santa Cruz | 0,35 | 7,39 | 0,06 |
| Somatório das demandas | 0,50 | 10,51 | 0,14 |

A definição de uma variável em uma das categorias dos indicadores do sistema FPEIR pode sofrer alteração em função do entendimento do especialista que a esteja definindo. Esse aspecto é até discutido na literatura. Gari, Newton e Icely (2015) mostram que o uso do solo pode ser compreendido como pressão ou força motora; que a eutrofização poderá ser classificada em pressão ou estado; que a retirada de água poderá ser identificada como força motriz ou pressão. Pires *et al.* (2017) também discutem que um indicador poderia ser classificado em mais de uma dimensão do sistema FPEIR. Assim, por exemplo, a escassez hídrica (assumida como um impacto no problema em foco) poderia ser entendida como uma força motriz ou uma pressão. Essas discrepâncias são aceitáveis, pois se vinculam ao fato de que o mundo real é muito mais complexo do que poderia ser expresso por relações causais

a serem explicitadas pelo modelo FPEIR, como já alertado pela Agência Europeia de Meio Ambiente em uma das suas primeiras publicações sobre o método (EEA, 1999).

Simulação da alocação de água e identificação das melhores estratégias de gerenciamento da demanda

A alocação de água, conforme identificado na Tabela 3, constitui-se em uma das “respostas” para melhor gerenciar o hidrossistema Apodi-Mossoró. Sendo assim, de acordo com as estratégias de alocação definidas, foi elaborado um sistema de rede de fluxo (com base no modelo integrado para análise de sistemas complexos em recursos hídricos AcquaNet) para o cenário de ampliação do sistema hídrico da

Tabela 3 - Respostas da matriz força motriz-pressão-estado-impacto-resposta para a bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró.

| Descrição do indicador resposta | Condição |
|---|---|
| Instrumentos da Lei nº 9.433/97 | Plano de Recursos Hídricos: o primeiro Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) do Rio Grande do Norte foi concluído em dezembro de 1999, tendo sido elaborado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH) por meio de consultoria especializada. O plano está em processo de atualização, a partir de um convênio entre a SEMARH e o Ministério do Meio Ambiente (MMA), e conta com o apoio da ANA (IGARN, 2016). |
| | Enquadramento: o instrumento no Rio Grande do Norte não é considerado como parte da Política Estadual dos Recursos Hídricos. Isso ocorre pelo fato de o Decreto Estadual nº 9100/1984 (RIO GRANDE DO NORTE, 1984), que enquadrou cursos e reservatórios de água no estado dos corpos estaduais, ter sido promulgado antes da Lei das Águas. |
| | Outorga: o órgão competente em matéria de outorga e licenciamento de obras hídricas é a SEMARH, que, na forma da Lei nº 8.086/2002 (RIO GRANDE DO NORTE, 2002), art. 3º, incisos VI e VIII, respectivamente, pode delegar essas competências ao Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (IGARN). |
| | Cobrança: não obstante a previsão normativa do art. 4º, inciso IV, da Lei Hídrica estadual, o Rio Grande do Norte ainda não implementou a cobrança pelo uso da água no seu estado. |
| | Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos: o instrumento não é considerado um instrumento da Política Estadual de Recursos Hídricos, não havendo banco de dados sobre os recursos hídricos. |
| Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SIGERH) | SEMARH: por meio da Lei Complementar nº 340/07, foi criada a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), o órgão gestor central do SIGERH e encarregado do gerenciamento da política hídrica estadual. |
| | CERH: o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) é o órgão colegiado de deliberação coletiva e caráter normativo. Entre suas competências, enfatizam-se as seguintes: arbitramento, em grau de recurso, dos conflitos existentes entre bacias ou entre usuários e estabelecimento de critérios para a cobrança pelo uso das águas. |
| | CBHAM: o Decreto Estadual nº 21.881/10 criou o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró (CBHAM), regulamentando (em seu art. 2º) que o referido comitê é um órgão colegiado no âmbito da respectiva bacia hidrográfica. |
| Transposição do rio São Francisco | Como acréscimo à oferta de água, a transposição do rio São Francisco projeta um crescimento de área irrigável e atendimento às demandas urbanas a partir de uma vazão média de 1,4 m³.s⁻¹. Para Rêgo <i>et al.</i> (2017), as condições atuais de escassez na bacia do rio São Francisco deveriam ser consideradas no contexto geral da transposição de vazões para o semiárido nordestino. |
| Ampliação do sistema de abastecimento | Sistema Alto Oeste: esse sistema tem como objetivo principal abastecer a região do Oeste Potiguar por um sistema integrado entre os reservatórios Pau dos Ferros e Santa Cruz. O sistema, por meio de uma vazão de 4,52 m³.s⁻¹, visa abastecer 24 cidades do Médio e Alto cursos do rio, bem como dois distritos e 64 comunidades rurais (SEMARH, 2017). |
| | Adutora Santa Cruz-Mossoró: essa adutora tem como objetivo a tomada de água da barragem Santa Cruz por meio da vazão de 0,39 m³.s⁻¹ para o abastecimento de Mossoró e outros três municípios (SEMARH, 2017). |
| | Projeto de Irrigação Santa Cruz: esse projeto de construção da adutora para o perímetro irrigado da Chapada do Apodi é a resposta de ampliação para o desenvolvimento das áreas irrigadas no Baixo Curso da bacia. A área apta para irrigação é estimada em 263,72 km². A vazão de 6 m³.s⁻¹ será captada por meio de uma estação de bombeamento principal localizada no rio Apodi (SEMARH, 2017). |
| Alocação de água conforme estratégias de demanda concebidas | A simulação da alocação de água, considerando estratégias de demanda de água, é utilizada como auxílio nas tomadas de decisões na gestão de recursos hídricos, com base em modelagem que define o comportamento físico do sistema. A alocação de água é proposta neste artigo como resposta para que seja otimizado o atendimento às demandas. |

BHAM com os projetos Alto Oeste, Integração Santa Cruz–Mossoró e Irrigação do Perímetro Irrigado de Santa Cruz. A Figura 5 apresenta os resultados da confiabilidade do sistema em função das demandas existentes a partir dos diferentes usos considerados. A Tabela 4 expõe os resultados de falhas no abastecimento e a frequência de operação

dos reservatórios abaixo do volume meta, de acordo com as estratégias de alocação.

No atendimento às demandas necessárias, a estratégia 1 (E1) — urbana apresentou 100% de percentual fornecido (Figura 5) para o abastecimento urbano. Entretanto, maiores falhas foram observadas

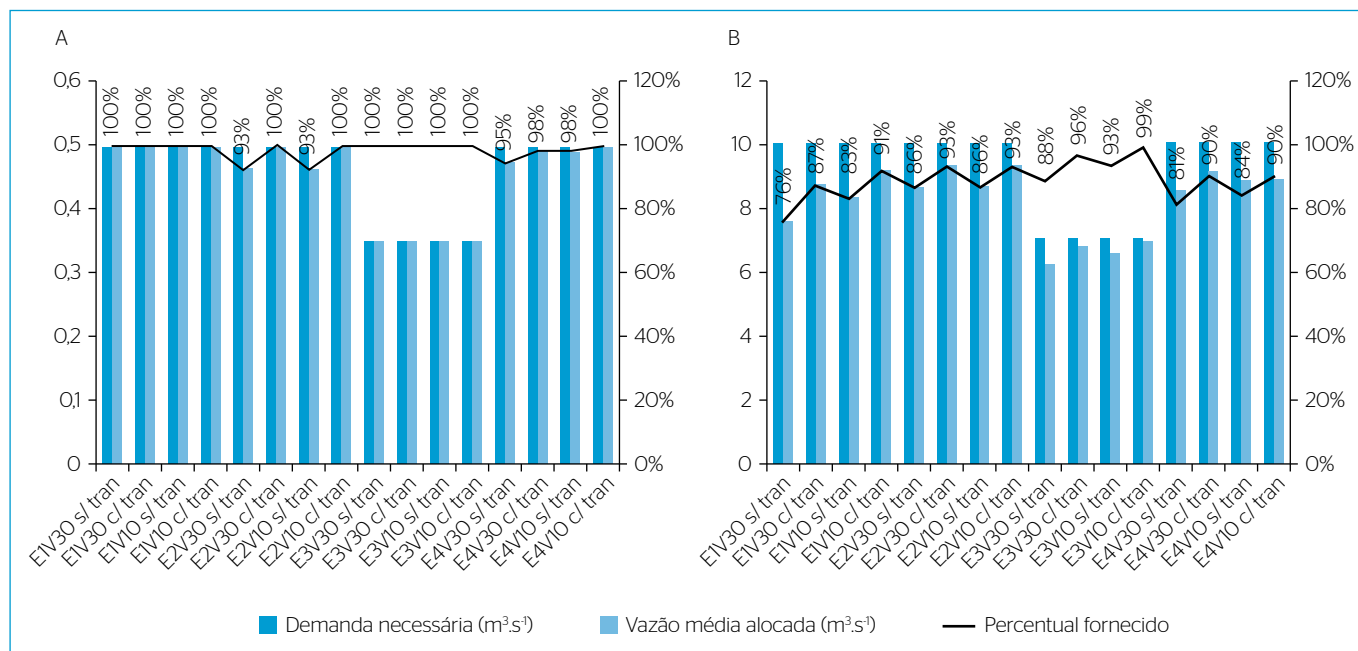


Figura 5 – (A) Abastecimento urbano; (B) irrigação: vazões médias alocadas por uso e estratégia e o percentual de atendimento da demanda necessária.

Tabela 4 - Falhas do reservatório Pau dos Ferros e Santa Cruz e de atendimento às demandas por estratégia de alocação.

| Estratégia | Frequência abaixo do volume meta (%) | | Falha na irrigação (%) | Falha no abastecimento urbano (%) | Falha pecuária (%) |
|------------------|--------------------------------------|---------|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| | P. Ferros | S. Cruz | | | |
| E1 V30 s/ trans. | 22,78 | 17,50 | 21,99 | 0,00 | 17,59 |
| E1 V30 c/ trans. | 16,94 | 13,06 | 11,11 | 0,00 | 8,05 |
| E1 V10 s/ trans. | 7,50 | 8,33 | 15,37 | 0,05 | 13,06 |
| E1 V10 c/ trans. | 0,00 | 0,00 | 7,59 | 0,00 | 0,00 |
| E2 V30 s/ trans. | 51,11 | 48,89 | 6,95 | 6,95 | 11,85 |
| E2 V30 c/ trans. | 31,11 | 30,83 | 4,44 | 3,82 | 4,26 |
| E2 V10 s/ trans. | 31,11 | 28,33 | 12,41 | 4,18 | 12,17 |
| E2 V10 c/ trans. | 16,11 | 16,11 | 4,63 | 1,08 | 4,31 |
| E3 V30 s/ trans. | 12,50 | 9,72 | 10,42 | 0,00 | 0,00 |
| E3 V30 c/ trans. | 2,22 | 2,22 | 2,96 | 0,00 | 0,00 |
| E3 V10 s/ trans. | 7,50 | 5,83 | 6,53 | 0,00 | 0,00 |
| E3 V10 c/ trans. | 0,00 | 0,00 | 0,92 | 0,00 | 0,00 |
| E4 V30 s/ trans. | 25,28 | 21,67 | 15,72 | 9,31 | 14,68 |
| E4 V30 c/ trans. | 20,18 | 15,42 | 12,83 | 7,06 | 11,39 |
| E4 V10 s/ trans. | 18,06 | 15,28 | 9,47 | 7,38 | 8,96 |
| E4 V10 c/ trans. | 6,18 | 4,32 | 9,49 | 5,97 | 8,33 |

P. Ferros: Pau dos Ferros; S. Cruz: Santa Cruz; E1: estratégia 1; V30: volume meta dos reservatórios definido em 30%; V10: volume meta dos reservatórios definido em 10%; E2: estratégia 2; E3: estratégia 3; E4: estratégia 4; s/ trans.: sem transposição das águas do rio São Francisco; c/ trans.: com transposição das águas do rio São Francisco.

para a irrigação (Tabela 4), dada a prioridade de manutenção do reservatório (P2) ser maior que a de atendimento à demanda de irrigação (P3). A falha do sistema para fornecimento hídrico à irrigação resulta em prejuízos para o desenvolvimento econômico das regiões.

O percentual fornecido para irrigação na estratégia 2 (E2) — agrícola assume os melhores resultados para o padrão de consumo de $10,51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A vazão alocada para as estratégias que admitem volume meta em 10% é superior, dada a possibilidade da captação mesmo em níveis emergenciais dos reservatórios. A vantagem dessa configuração é a maior capacidade de atendimento às demandas de irrigação, sendo a água um insumo necessário para o desenvolvimento econômico. Porém, diante da variabilidade das chuvas e da presença de longos períodos de estiagem, operar os reservatórios em níveis abaixo de 10% é um risco para o atendimento das necessidades vitais da população (abastecimento urbano) em possíveis regimes de seca extrema.

A flexibilidade da prioridade absoluta do abastecimento urbano da estratégia 4 (E4) — flexibilidade possibilita maior percentual fornecido para irrigação (Figura 5), de modo que o déficit de demanda como insumo ao desenvolvimento agrícola é reduzido e compartilhado entre os outros usuários. Ressalva-se, entretanto, que a Lei Federal nº 9.443/1997 (BRASIL, 1997) prioriza o abastecimento urbano em situação de escassez. A estratégia prejudica o usuário final do abastecimento quando se entende que essa penalização da ineficiência do abastecimento e respectivas perdas deve ser imposta às companhias responsáveis pela distribuição de água (e não ao usuário final).

A estratégia 3 (E3) — GDA apresenta os melhores percentuais de fornecimento para irrigação, chegando a alocação de 99% da demanda necessária se operada em volume meta de 10%, associada ao aporte da transposição das águas do rio São Francisco. A redução da demanda resulta em maior confiabilidade do sistema e decréscimo na frequência de operação dos reservatórios em nível reduzido de água (Tabela 4).

A utilização clássica do modelo FPEIR ao problema permitiu ressaltar e caracterizar as variáveis essenciais nas relações de causa e efeito. A consideração da alocação de água como uma das respostas do método FPEIR possibilitou detalhar, por meio das estratégias simuladas, falhas e atendimentos às demandas de abastecimento urbano, de irrigação e para a pecuária (Figura 5 e Tabela 4). Esses resultados resumem as condições de funcionamento do hidrossistema Apodi–Mossoró, disponibilizando informações para a tomada de decisão. Decisão esta que deve ser centrada na busca pela sustentabilidade do uso da água na região, minimizando a vulnerabilidade e focando alternativas eficientes de uso da água, como discutido em Gari *et al.* (2015), Pires *et al.* (2017), Sun *et al.* (2016), Henriques *et al.* (2015), Hamouda, El-Din e Moursy (2009), entre outros.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa utiliza o sistema de indicadores FPEIR associando-o à simulação de alocação de água na bacia do rio Apodi–Mossoró com foco no hidrossistema de mesmo nome. A simulação permitiu analisar estratégias (condições dos reservatórios e prioridades de atendimento às demandas), considerando os projetos de ampliação e integração do referido sistema. O objetivo de se partir das forças motrizes de crescimento econômico, aumento populacional e mudanças climáticas até as respostas de solução para a escassez hídrica nos reservatórios Santa Cruz e Pau dos Ferros permitiu agregar as informações, a fim de auxiliar o processo de tomada de decisão no contexto do gerenciamento das demandas da BHAM e propor medidas mitigadoras para o planejamento do sistema.

Os indicadores selecionados sugerem que o crescimento demográfico, o desenvolvimento econômico, as mudanças climáticas, as secas e o mal gerenciamento da água associados às demandas hídricas urbanas, pecuárias e de irrigação representam as forças motrizes e pressões para o atendimento às demandas da bacia. O estado do hidrossistema indica disponibilidade e qualidade hídricas deficitárias, o que representa impactos de escassez hídrica e conflitos pelo uso da água. Para compor o indicador de disponibilidade hídrica, foram utilizados dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado de 1988. Entretanto, alerta-se para a urgente necessidade de se proceder à atualização do plano estadual pelo Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte.

Observa-se que, entre as respostas para a gestão dos recursos hídricos, os instrumentos do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos previstos na Lei nº 9433/1997 (BRASIL, 1997) não foram implementados em sua totalidade na BHAM. Enquanto isso, a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado promove alternativas de ampliação do sistema de abastecimento na bacia para o atendimento das demandas e soluções da crise hídrica, adotando a tradicional ótica da expansão da oferta.

A proposta de alocação de água como uma resposta ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos do sistema estudado, por meio de simulação feita por esta pesquisa, mostrou falhas no atendimento às demandas do sistema. Assim, medidas adaptativas de economia de água, incluindo o reúso de água no abastecimento urbano e na irrigação (inseridos na E3 — GDA), foram identificadas como as melhores alternativas.

Essa é uma pesquisa que faz uso do sistema de indicadores FPEIR, contribuindo para seu entendimento e demonstrando que, de fato, a ferramenta (como apontado por outros pesquisadores) é de auxílio para entendimento das causas e dos efeitos do problema em foco. Tratando-se de uma questão de alocação de água, cenários de atendimento às demandas necessitavam ser concebidos e simulados. Dessa forma, um modelo de alocação de água e a consideração de cenários foram acoplados à

matriz FPEIR. Isso revela que, metodologicamente, a associação de outros métodos ao modelo FPEIR produz arcabouços interessantes e capazes de gerar resultados para apoio à tomada de decisão, seja na gestão de recursos hídricos (caso da pesquisa), seja nas demais áreas do conhecimento. Como verificado na literatura e comprovado na aplicação exposta neste artigo, o entendimento das relações causa-efeito é uma das grandes vantagens do sistema FPEIR.

AGRADECIMENTOS

Este artigo foi desenvolvido no âmbito do Projeto Bramar, financiado pela FINEP/CT-HIDRO. Durante a realização desta pesquisa, o primeiro autor recebeu bolsa do CNPq para realizar mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Todos os autores agradecem às instituições mencionadas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (2015) *Programa Nacional de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão das Águas: Relatório Progestão 2015* - Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte: ANA.
- _____. (2016) *Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu*. Brasília: ANA.
- _____. *Hidroweb*: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: mar. 2017.
- AHMADI, A.; MORIDI, A.; SARANG, A. (2017) Integrated Planning of Water Resources Based on Sustainability Indices, a Case Study: Hamoon-Jazmorian Basin. *Environmental Energy and Economic Research*, v. 1, n. 1, p. 61-74. <http://doi.org/10.22097/eeer.2017.46457>
- ALBUQUERQUE, T.M.A.; RIBEIRO, M.M.R.; VIEIRA, Z.M.C.L. (2008) Análise multicriterial de alternativas tecnológicas para redução do consumo de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 4, p. 99-110. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n4.p99-110>
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) *Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO. 300 p. (Irrigation and Drainage, Paper 56).
- AMORIM, A.L.; RIBEIRO, M.M.R.; BRAGA, C.F.C. (2016) Water resources conflicts in shared water basins: the Piranhas-Açu Water Basin case study. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 36-45. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p36-45>
- BARROS, M.B.; RUFINO, I.A.A.; MIRANDA, L.I.B. (2016) Mecanismos poupadores de água como suporte ao planejamento urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 251-262. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p251-262>
- BERHE, FT.; MELESSE, A.M.; HAILU, D.; SILESHI, Y. (2013) MODSIM-based water allocation modelling of Awash River Basin, Ethiopia. *Catena*, v. 109, p. 118-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.04.007>
- BRASIL. (1997) *Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). (2016) *Secas no Brasil: política e gestão proativas*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos/Banco Mundial.
- COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (CAERN). *Ações para o abastecimento do Sistema em Colapso*. Rio Grande do Norte: CAERN. Disponível em: <<http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/DOC/DOC000000000145758.PDF>>. Acesso em: jul. 2017.
- DANTAS, D.C.; FRANÇA E SILVA, E.F.; MÉLO, R. F.; DANTAS, M.S.M.; SILVA, G.F.; SILVA, M.M. (2014) Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando efluente doméstico. *Revista Irriga*, v. 1, n. 1, p. 179-189. <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v1n1p179>
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). (1999) *Environmental Indicators: Typology and Overview*. European Environment Agency. 19 p.
- _____. (2003) *Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting*. European Environment Agency. 20 p.
- FERNANDES, R.D.O.; SILVEIRA, C.D.S.; STUDART, T.M.D.C.; SOUZA FILHO, F.D.A.D. (2017) Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 11. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716033>
- GARI, S.R.; NEWTON, A.; ICELY, J.D. (2015) A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, v. 103, p. 63-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013>
- GUEDES, M.J.F.; RIBEIRO, M.M.R.; VIEIRA, Z.M.C.L. (2014) Alternativas de gerenciamento da demanda de água na escala de uma cidade. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 51-62. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p123-134>
- HAMOUDA, M.A.; EL-DIN, M.M.N.; MOURSRY, F.I. (2009) Vulnerability Assessment of Water Resources Systems in the Eastern Nile Basin. *Water Resources Management*, v. 23, n. 13, p. 2697-2725. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-009-9404-7>
- HENRIQUES, C.; GARNETT, K.; WEATHERHEAD, E.K.; LICKORISH, F.A.; FORROW, D.; DELGADO, J. (2015) The future water environment – Using scenarios to explore the significant water management challenges in England and Wales to 2050. *Science of the Total Environment*, v. 512-513, p. 381-396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.047>

- Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte (IGARN). (2010) *Bacia Apodi/Mossoró*. Disponível em: <<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/DOC/DOC0000000000028892.PDF>>. Acesso em: jun. 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2015) *População estimada 2015*. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais.
- JARADAT, N.E.A.M.M. (2010) *Evaluation of Water Resources Management Options in Gaza Strip using WEAP*. 150 f. Tese (Mestrado) - An-Najah National University, Palestina.
- KAGALOU, I.; LEONARDOS, I.; ANASTASIADOU, C.; NEOFYTOU, C. (2012) The DPSIR Approach for an Integrated River Management Framework: a Preliminary Application on a Mediterranean Site (Kalamas River -NW Greece). *Water Resources Management*, v. 26, n. 6, p. 1677-1692. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9980-9>
- KELBLE, C.R.; LOOMIS, D.K.; LOVELACE, S.; NUTTLE, W.K.; ORTNER, P.B.; FLETCHER, P.; COOK, G.S.; LORENZ, J.J.; BOYER, J.N. (2013) The EBM-DPSER Conceptual Model: Integrating Ecosystem Services into the DPSIR Framework. *PLoS One*, v. 8, n. 8, p. e70766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070766>
- LABADIE, J. (2005) MODSIM: River basin management decision support system. In: SINGH, V.; FREVERT, D. (orgs.). *Watershed Models*. Boca Raton: CRC Press. p. 569-591.
- MARTINS, E.S.P.R.; BRAGA, C.F.C.; NYS, E.; SOUZA FILHO, F.A.; FREITAS, M.A.S. (2013) Impacto das mudanças do clima e projeções de demanda sobre o processo de alocação de água em duas bacias do Nordeste semiárido. Brasil: Banco Mundial/ANA. v. 1. 88 p. (Série Água Brasil 8.)
- MATHETSA, S.M. (2015) *Assessing water quality status by means of the Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) model around Mapungubwe National Park, Limpopo Province, South Africa*. Dissertação (Mestrado em Ciência) - University of South Africa, África do Sul.
- MIMIDIS, K.; ANDRIKAKOU, P.; KALLIORAS, A.; PLIAKAS, F. (2017) The DPSIR approach to groundwater management for sustainable development in coastal areas: The case of Nea Peramos aquifer system, Kavala, Greece. *Water Utility Journal*, v. 16, p. 67-80.
- MIRANDA, R.B.D.; MAUAD, F.F.I. (2014) Influence of sedimentation on hydroelectric power generation: Case study of a Brazilian reservoir. *Journal of Energy Engineering*, v. 141, n. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000183](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000183)
- NESS, B.; ANDERBERG, S.; OLSSON, L. (2010) Structuring problems in sustainability science: The multi-level DPSIR framework. *Geoforum*, v. 41, n. 3, p. 479-488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.12.005>
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). (1993) OECD core set of indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment. *Environment monographs*. Paris: OECD.
- _____. (2015) *OECD Principles on Water Governance Welcomed by Ministers at the OECD Ministerial Council Meeting on 4 June 2015*. Paris: OECD.
- PESSOA, M.F.; ASSIS, L.F.; VIEIRA, A.S. (2016) Planejamento Ótimo da Água na Agricultura Irrigada: Um Estudo de Caso em um Perímetro Paraibano. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 7, n. 1. <https://doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2016.001.0019>
- PIRES, A.; MORATO, J.; PEIXOTO, H.; BOTERO, V.; ZULUAGA, L.; FIGUEROA, A. (2017) Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management. *Science of the Total Environment*, v. 578, p. 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.217>
- POFF, N.L.; BROWN, C.M.; GRANTHAM, T.E.; MATTHEWS, J.H.; PALMER, M.A.; SPENCE, C.M.; WILBY, R.L.; HAASNOOT, M.; MENDOZA, G.F.; DOMINIQUE, K.C.; BAEZA, A. (2016) Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 1, p. 25-34. <https://doi.org/10.1038/nclimate2765>
- PORTO, R.L.L.; ROBERTO, A.N.; SCHARDONG, A.; MÉLLO JÚNIOR, A.V. (2003) Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. In: SILVA, R.C.V. *Métodos numéricos em recursos hídricos*. Porto Alegre: ABRH. p. 93-240.
- PREFEITURA DE MOSSORÓ. (2010) *Relatório I - Diagnóstico da Situação Atual do Sistema de Saneamento Básico de Mossoró*. Mossoró: Prefeitura de Mossoró.
- PROGRAMA ÁGUA AZUL. *Rede compartilhada de monitoramento da qualidade da água: monitoramento da qualidade das águas superficiais 4º relatório semestral*. Disponível em: <http://www.programaaguazul.ct.ufrn.br/relatorios/aguas_superficiais/2016/5RelatorioSemestralCompleto2016.pdf>. Acesso em: ago. 2017.
- RAPPORT, D. (1979) *Towards a comprehensive framework for environmental statistics: a stress-response approach*. Ottawa: Statistics Canada.
- RASI NEZAMI, S.; NAZARIHA, M.; MORIDI, A.; BAGHVAND, A. (2013) Environmentally sound water resources management in catchment level using DPSIR model and scenario analysis. *International Journal of Environmental Research*, v. 7, n. 3, p. 569-580. <https://dx.doi.org/10.22059/ijer.2013.637>
- RÊGO, J.C.; GALVÃO, C.O.; ALBUQUERQUE, J.P.T.; RIBEIRO, M.M.R.; NUNES, T.H.C. (2017) A Gestão de recursos hídricos e a transposição de águas do rio São Francisco para o açude Epitácio Pessoa - Boqueirão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017. *Anais...* Porto Alegre: ABRH.
- RIO GRANDE DO NORTE. (1984) *Decreto nº 9.100, de 22 de outubro de 1984*. Enquadra cursos e reservatórios d'água do Estado na classificação estabelecida na Portaria nº 13, de 15 de janeiro de 1976, do Ministro do Interior, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.semarnh.rn.gov.br/>>. Acesso em: jun. 2017.

RIO GRANDE DO NORTE. (2002) *Lei nº 8.086, de 15 de abril de 2002*. Cria o Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte – IGARN, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.semarh.rn.gov.br/>>. Acesso em: jun. 2017.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH). *Bacias Hidrográficas do RN*. Disponível em: <<http://www.semarh.rn.gov.br/>>. Acesso em: jun. 2017.

SECRETARIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS – SERHID. *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte – PERH/RN*. Natal (RN), nov.1998.

SILVA, P.H.P. da; RIBEIRO, M.M.R.; MIRANDA, L.I.B. (2017) Uso de cadeia causal na análise institucional da gestão de recursos hídricos em reservatório no semiárido da Paraíba. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 22, n. 4, p. 637-646. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017149982>

SILVA, A.P.C. (2013) *Biomonitoramento da qualidade da água e percepção ambiental na bacia hidrográfica Apodi-Mossoró, RN*. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SILVA, L.P.; SILVA, M.M.; CORREA, M.M.; SOUZA, F.C.D.; SILVA, E.F.F. (2012) Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 5, p. 480-486. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500003>

SUN, S.; WANG, Y.; LIU, J.; CAI, H.; WU, P.; GENG, Q.; XU, L. (2016) Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework. *Journal of Hydrology*, v. 532, p. 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.028>

TEIXEIRA, C.A.; PORTO, R.L. (2008) Modelo matemático para gerenciamento de quantidade e qualidade da água em rios. Um estudo de caso: bacia do rio Piracicaba. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 2, n. 2, p. 79-104. <http://dx.doi.org/10.18316/121>

TSCHERNING, K.; HELMING, K.; KRIPPNER, B.; , S.; GOMEZ Y PALOMA, S. (2012) Does research applying the DPSIR framework support decision making? *Land Use Policy*, v. 29, n. 1, p. 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.05.009>

UUSITALO, L.; LEHIKOINEN, A.; HELLE, I.; MYRBERG, K. (2015) An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environmental Modelling & Software*, v. 63, p. 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.017>

