

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ALOCAÇÃO ECONÔMICA ÓTIMA NUMA PLATAFORMA INTEGRADORA DE MODELOS PARA APOIO A DECISÃO NA DEFINIÇÃO DE INSTRUMENTOS DE GESTÃO BASEADOS EM MERCADO.

*Luiz Eduardo Nascimento Figueiredo¹ ; Marcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes; Gerald
Norbert Souza da Silva*

Palavras-Chave – Hidro-econômico, SADE

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por água devido ao crescimento da população, da necessidade por alimento, urbanização, energia e desenvolvimento industrial, associado à redução na disponibilidade do recurso em muitas regiões do mundo, está levando à crescente escassez de água e de acesso sustentável em todo o mundo. (Bekchanov et al, 2017). Urge o aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos, tarefa cada vez mais complexa, que vai requerer ferramentas analíticas tais como modelos e sistemas automatizados. Para que sejam efetivamente aplicados na gestão, os resultados de tais modelos precisarão ser disponibilizados de uma forma interativa e amigável para os decisores. (Loucks e Beek, 2017) Os Sistemas de Apoio a Decisão (SADs) são plataformas que permitem o acesso, através de uma interface, a uma base de modelos integrada a uma base de dados. Através de SADs, instrumentos de gestão diferentes podem ser simulados e ter seus impactos mensurados, podendo assim ser avaliados e considerados pelos tomadores de decisão. Os SADs disponibilizam ao usuário funções de acesso e gerenciamento tanto da base de modelos como da base de dados. Desta forma, podem ser representados diferentes instrumentos de gestão através da modelagem de alocação seja por mudanças em um critério de otimização ou por suas restrições.

Os instrumentos de gestão econômicos ou baseados em mercado são importantes instrumentos de política ambiental mais flexíveis que os instrumentos comando-e-controle. Para que induzam um comportamento eficiente do ponto de vista econômico precisam ser adequadamente desenhados e constantemente avaliados quanto à eficácia no alcance de tal objetivo. Dentro desse contexto, os modelos hidro-econômicos são muito úteis. Esta modelagem é baseada em uma rede de nós e links e identifica a alocação de água ótima considerando o seu valor econômico e as principais conexões espaciais, hidrológicas e de engenharia do sistema hídrico analisado. Essa representação descrita pela rede de nós e links, inclui o fluxo dos rios principais e secundários, a presença dos reservatórios, a recarga natural e descarga, os fluxos de retorno, e as demandas de água que representam o valor da água para o usuário em relação a disponibilidade do recurso. Dessa forma, os modelos hidro-econômicos identificam o ótimo econômico e simulam bem o efeito de instrumentos de gestão baseados em mercado. (HAROU ET AL, 2009)

Sendo um requerimento essencial para a construção de modelos hidro-econômicos, a estimação das curvas de demanda associando valores econômicos aos usos da água tem sido bem explorada na literatura. Harou et al. (2009) destacam a evolução deste campo de estudo na literatura apresentando modelos utilizados para os diversos tipos de uso para os recursos, que incluem os modelos de Programação Matemática Positiva (PMP) (HOWITT, 1995) muito utilizados na agricultura irrigada e o modelo de expansão de ponto (CRIFFIN, 2006).

1) Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul, Rua 7 de Setembro, 388 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, 90010-190, (79) 99942-5730, lenfigueiredo@gmail.com

Este estudo propõe a integração de curvas de demanda a um modelo de otimização baseado em redes para dessa forma disponibilizar um novo critério de otimização em um sistema de apoio a decisão, e assim prover aos decisores os resultados associados ao ótimo econômico dentro da plataforma. A plataforma de modelagem que está sendo usada é um Sistema de Apoio a Decisão Espacial (SADE), denominado HEAL System (Souza da Silva e Alcoforado de Moraes, 2021), cuja arquitetura e primeiras funcionalidades foram desenvolvidas em projeto CNPq/CT-HIDRO, coordenado pela UFPE e que permanece em desenvolvimento (Alcoforado de Moraes et al. 2020 d, projeto em andamento). Ao integrar as metodologias de estimação de funções de demanda e resultantes funções benefício, que também usam otimização, no HEAL System será possível além da disponibilização das mesmas para obter o modelo hidro-econômico, compartilhar com as referidas metodologias, os dados econômicos já existentes na base de dados da rede, bem como complementá-los usando tais resultados.

O estudo de caso proposto é a interligação das bacias do rio Ipojuca, Capibaribe, Sirinhaém e Una no Estado de Pernambuco. Essas bacias juntas incluem 128 municípios do estado e estão inseridas no Agreste Pernambucano, umas das regiões de menor potencialidade hídrica do Brasil, e que sofreu enormes impactos em recente período de seca na região. (Alcoforado de Moraes et al, 2020, projeto em andamento). Os resultados a serem obtidos, ao se incluir e disponibilizar aos decisores uma nova função objetivo com critério econômico, no Sistema de Apoio a Decisão espacial, serão representativos dos efeitos da aplicação de instrumentos de gestão econômicos ou baseados em mercado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelagem hidro-econômica

A modelagem hidro-econômica, tem seus primeiros trabalhos na década de 60 e 70. Os primeiros trabalhos a utilizar a demanda por água para otimizar um sistema de recursos foram Bear et al (1964, 1966, 1967, 1970), Rogers e Smith (1970), e Gisser e Mercado (1972, 1973). Ainda utilizando diversas nomenclaturas para esse tipo de modelagem, diversos autores apresentaram aplicações e extensões da engenharia hídrica sobre uma abordagem econômica da água.

Segundo Bekchanov et al. (2017), dois tipos de modelos econômicos para apoiar a gestão de recursos hídricos têm sido encontrados: modelos econômicos baseados em rede e os economywide (Insumo-Produto e Equilíbrio Geral). Os modelos econômicos baseados em rede são desenvolvidos sobre uma estrutura de rede em nós e links, que representa os fluxos da água dentro de um limite hidrológico específico (por exemplo, uma bacia hidrográfica). Podem ser descritivos ou prescritivos, segundo a classificação feita por Wurbs (2005) para modelos de apoio a gestão. Os primeiros são construídos para reproduzir o comportamento dos sistemas hídricos de forma bem detalhada, enquanto os prescritivos se propõem a identificar um comportamento ótimo de acordo com algum critério, simplificando para isso detalhes e condições operacionais. Esses últimos, pela sua própria natureza, são modelos de otimização, mas também podem ter componentes de simulação. Os resultados de modelos prescritivos econômicos são definidos como aqueles que maximizam ou minimizam o valor da função objetivo com o intuito de atender o critério de otimização econômico, respeitando as condições hidrológicas da rede bem como as ambientais e institucionais. São chamados de modelos hidro-econômicos e seus resultados são as quantidades ótimas de água alocadas a cada usuário/uso, do ponto de vista econômico, possíveis espacial e temporalmente de se obter, e por isso mesmo muitas vezes chamada de segundo ótimo. Ao identificar a alocação econômica ótima os modelos hidro-econômicos de otimização são importantes ferramentas na tomada de decisão na definição e avaliação de políticas e instrumentos de gestão de águas, pois podem mensurar os ganhos de eficiência que podem advir de diferentes desenhos dos mesmos.

Na literatura a modelagem vem sendo bastante utilizada para avaliar os diferentes instrumentos de gestão regulatórios e econômicos (Draper, Jenkins, et al., 2003; apud Pulido-Velazquez, Andreu,

et al., 2006; Moraes, Sampaio, et al. 2006; Moraes, et al., 2009, Cai, et al., 2010). Para uma revisão da literatura acerca do desenvolvimento desses modelos ver Harou et al (2009) e Bekchanov et al (2017). Dentre as aplicações no Brasil, pode-se citar: Alcoforado de Moraes et al., (2010), Marques et al (2010), Torres et al (2011), Torres et al. (2014), Silva (2017) e Mattiuzi et al (2019). Há, no entanto, ainda pouca utilização dos resultados desses modelos no apoio a decisão da gestão de recursos hídricos no Brasil e no mundo.

As curvas de demanda

Um conceito chave para a identificação do ótimo econômico ou alocação eficiente é o das curvas de demanda, que representam a variação dos valores econômicos da água com a quantidade alocada (Harou et al, 2009). Tal variação, ao ser representada e introduzida no modelo através dessas curvas, traz para o mesmo o efeito comportamental da mudança do valor econômico da água em períodos de escassez, com a redução na sua disponibilidade, bem como o aumento dos custos de disponibilização em relação a períodos úmidos. Diversos métodos têm se apresentado na obtenção das curvas de demanda para a água e são mais ou menos utilizados a depender do tipo de uso do recurso, da disponibilidade de dados entre outros. A seguir serão brevemente descritos os métodos usados neste estudo.

Expansão do ponto

O método de expansão de ponto tem sido utilizado por ser uma ferramenta simples e eficaz para estimar as curvas de demanda (Harou, et al. 2009, Griffin, 2006). O método é relativamente fácil de aplicar, uma vez que consiste na determinação de uma curva de demanda de água, a partir dos valores observados em um determinado ponto de operação (preço e quantidade) supondo constante a elasticidade-preço da demanda ao longo da curva. Esse ponto de operação é o valor observado do usuário, para o período analisado, a partir de um custo médio do recurso e a quantidade de água bruta usada. A elasticidade-preço, é obtida exogenamente e é característica de tipo de uso, bem como de região. O método consiste em partir de um ponto único, que observasse pertencer à função demanda, o qual é denominado de “âncora”, para resolver uma equação diferencial simples dada a premissa de ser constante a elasticidade-preço. Assim, estende-se a função, em duas direções, para longe desse ponto e obtém-se a curva de demanda. A principal vantagem deste método se apresenta em situações em que há poucos dados disponíveis. Além disso, este método pode ser potencialmente usado para todos os setores de demanda de água (GRIFFIN, 2006)

Neste estudo utilizar-se-á o método de expansão de ponto para a determinação das funções de demanda para os usos industrial e abastecimento urbano. Para isso, será utilizada, uma função elasticidade constante na forma abaixo, seguindo Griffin (2006) :

$$w = kp^{\varepsilon} \quad (1)$$

A partir da função de demanda será possível obter a função de benefício econômico total com a disponibilidade de água, a partir da integração da curva de demanda, já que esta última representa o benefício marginal em cada valor de uso de água. A soma das funções benefício econômico total para todos os usuários a quem a água será alocada na rede se constituirá na nova função objetivo a ser disponibilizada no HEAL System. O sistema poderá então prover a alocação econômica ótima entre os usuários da rede.

Programação Matemática Positiva (PMP)

Para o setor de agricultura irrigada, será utilizada a metodologia do PMP (Howitt, 1995). O método não requer um extenso conjunto de dados, por basear-se diretamente no comportamento maximizador do lucro dos produtores agrícolas e por isso tem sido considerado mais adequado do que os métodos estritamente estatísticos. Ademais, por ser um método autocalibrável e reproduzir os

resultados observáveis tem sido mais indicado na análise da produção irrigada em comparação ao método de expansão do ponto. (HAROU et al, 2009).

Segundo Howitt (1995) pode-se observar o PMP como um método de autocalibração desenvolvido em três etapas: 1) um problema de programação matemática linear de maximização do lucro sujeito a um conjunto de restrições de quantidade dos insumos e um conjunto de restrições de calibração. 2) uma etapa de calibração de uma função custo não linear para a quantidade de terra e uma função de produção não linear de forma a reproduzir os dados observáveis. 3) por fim, na terceira etapa, são introduzidas as funções de produção e custo calibradas na etapa 2 em um problema de maximização de lucro não linear sujeita as restrições de quantidade dos insumos e a restrição de quantidade total de água.

Em termos de modelagem e aplicação, na última década, a literatura tem apresentado o uso do modelo PMP com função de produção não linear na terceira etapa, uma função de produção regional com elasticidade constante (CES), algumas vezes acompanhada por uma função de custo quadrática (Medellín-Azuara et al. (2009), Howitt et al. (2009), Howitt e Medellín-Azuara (2008)), outras vezes, os autores tem utilizado uma função de custo exponencial (Medellín-Azuara et al. (2012), Howitt (2012), Howitt et al. (2010)). Para o Brasil, podem-se citar o uso do PMP nos trabalhos de Maneta et al (2009) e Torres et al. (2014). Silva et al (2015), Silva e Moraes (2018), Alcoforado de Moraes et al (2018), entre outros.

Para a obtenção das curvas de demanda para o setor de agricultura irrigada neste estudo os valores serão obtidos a partir da aplicação do método PMP descrito em Medellín-Azuara et al. (2009), Silva et al. (2015) e Alcoforado de Moraes et al. (2018). As três etapas são descritas com detalhes a seguir: i) um problema de programação linear para maximização do lucro do agricultor acompanhado das tradicionais restrições dos fatores de produção e das de não negatividade. São incluídas ainda restrições de calibração para o uso da terra e do mix de culturas para os valores observados. Matematicamente, o problema da etapa 1 é descrito abaixo:

$$Max_{x_{gi,terra}} \sum_g \sum_i \left(P_{gi} PM_{gi} - \sum_j W_{gji} a_{gji} \right) x_{gi,terra} \quad (2)$$

Sujeito a

$$\sum_i a_{gij} x_{gi,terra} \leq B_{gj} \quad \forall g, j \quad [\lambda_{ig,terra}^r] \quad (3)$$

$$x_{gi,terra} \leq X_{gi,terra} + \varepsilon [\lambda_{ig,terra}^c] \quad (4)$$

$$x_{gi,terra} \geq X_{gi,terra} - \varepsilon [\lambda_{ig,terra}^c] \quad (5)$$

A equação (2) é a função-objetivo lucro dependente da quantidade de hectares plantados por região g na cultura i , que se constituem nas variáveis de decisão $x_{gi,terra}$. P_{gi} é o preço da cultura i na região g , PM_{gi} a produtividade média da cultura i na região g , W_{gji} é o custo variável médio do insumo j na cultura i na região g , a_{gji} os coeficientes de Leontief dados pela razão do total de insumos usados em relação a terra, B_{gj} a quantidade total do insumo j na região g e $X_{gi,terra}$ é a quantidade de terra na cultura i na região g . Todos esses dados são obtidos a partir dos dados observáveis. A variável de decisão é $x_{gi,terra}$ que é a quantidade de terra na cultura i na região g . A partir dos resultados da otimização da etapa 1 são obtidos os $\lambda_{ig,terra}^r$, $\lambda_{ig,terra}^c$, $\lambda_{ig,terra}^c$ das restrições de insumo (eq. 3) e calibração (eqs. 4 e 5) que serão utilizados no processo de calibração na etapa 2.

Na segunda etapa são calibradas uma função custo quadrática para o insumo terra e uma função de produção não linear de elasticidade constante (CES) que serão depois utilizadas na etapa 3. A função custo é calibrada a partir do método proposto em Medellín-Azuara et al. (2009) e a calibração da função de produção CES a partir do trabalho de Howitt et al. (2012). Para isso serão usados os multiplicadores de Lagrange das restrições de calibração (eqs. 3) e as condições de primeira ordem do problema de programação linear da etapa 1, uma elasticidade preço do produto e quantidade do insumo terra determinado exogenamente. Matematicamente, a função custo quadrática e a função de produção CES podem ser descritas por:

$$TC_{gi}(x_{gi,terra}) = \alpha_{gi}x_{gi,terra} + \frac{1}{2}\gamma_{gi}x_{gi,terra}^2 \quad (6)$$

$$Y_{gi}(X_{gij}) = \tau_{gi} \left[\sum_j \beta_{gij} x_{gij}^\rho \right]^{\frac{\nu}{\rho}} \quad (7)$$

Os parâmetros a serem calibrados são α_{gi} (intercepto da função custo marginal) e γ_{gi} (inclinação da função custo marginal), τ_{gi} é o fator de escala da função de produção CES, β_{gij} parâmetro de participação de um dado recurso j para cada cultura i em uma região g ρ é obtido a partir da equação $\rho = \frac{\sigma-1}{\sigma}$, onde σ é a elasticidade de substituição entre os fatores e ν é o fator de retorno de escala da função de produção CES. Para detalhes do processo de calibração ver Medellín-Azuara et al. (2009), Howitt et al. (2012) e Figueiredo (2015).

Com as funções calibradas, a etapa 3, em que um modelo de maximização não linear conforme descrito abaixo, é aplicada. Nesta etapa a função objetivo e as restrições são descritas por:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x \geq 0} & \sum_g \sum_i P_{gi} \tau_{gi} \left[\sum_j \beta_{gij} x_{gij}^\rho \right]^{\frac{\nu}{\rho}} \\ & - \sum_g \sum_i \left(\alpha_{gi} x_{gi,terra} + \frac{1}{2} \gamma_{gi} x_{gi,terra}^2 \right) \\ & - \sum_g \sum_i \sum_{j \neq terra} (W_{gji} x_{gij}) \end{aligned} \quad (8)$$

Sujeito a

$$\sum_i a_{gij} x_{gi,terra} \leq B_{gj} [\lambda_{ig,terra}^i] \quad \forall g, j \quad (9)$$

$$\sum_i x_{gi,\acute{a}gua} \leq Avail. B_{\acute{a}gua,g} [\lambda_{ig,water}^{avail}] \quad \forall g \quad (10)$$

Onde, a equação 8 é a função objetivo não linear na qual a variável de decisão é x_{gij} quantidade do insumo j , no produto i , na região g , a equação 9 são as restrições de quantidade do insumo j na região g e a equação 10 são as restrições de disponibilidade de água da qual os valores econômicos da água serão obtidos. Os parâmetros P_{gi} , W_{gji} , B_{gj} , $B_{\acute{a}gua,g}$, a_{gij} são todos observados e idênticos aos da etapa 1. Os parâmetros τ_{gi} , β_{gij} , ρ , ν , α_{ig} e γ_{ig} são os parâmetros apresentados e calibrados na etapa 2 e $Avail$ é o parâmetro de disponibilidade da água a qual obteremos valores econômicos

$\lambda_{ig,water}^{avail}$ para cada disponibilidade de recurso de 100% a 5%. O valor econômico $\lambda_{ig,water}^{avail}$ representa o benefício marginal líquido do recurso.

O método PMP será integrado ao HEAL System, como um novo modelo na base desenvolvido em linguagem GAMS compartilhando a mesma base de dados associada à rede de nós e links, que já incorpora dados hidrológicos aos econômicos e produzindo resultados (as curvas de demanda propriamente ditas), que serão devidamente associados aos nós de demanda agrícolas da rede. A partir das curvas de demanda são também obtidas as funções de benefício econômico (a serem representadas por uma função polinomial e seus parâmetros) que quando associadas aos mesmos nós de demanda, possibilitarão a definição da nova função-objetivo do modelo baseado em redes já existente no HEAL System. A alocação econômica ótima e seus resultados serão obtidos e disponibilizadas no sistema de apoio a decisão.

Sistema de Apoio a Decisão Espacial

Um sistema de apoio a decisão espacial (SADE) é uma aplicação combinada das ferramentas de sistema de informação geográfica (SIG) e sistemas de apoio a decisão (SAD) (Alcoforado de Moraes, 2012). Os SADs servem de suporte aos tomadores de decisão através do uso de uma base de modelos a ser aplicada a uma base de dados. Assim, para ser considerado um SAD, o sistema deve possuir três características: um Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGBD), um Sistema Gerenciador de Base de Modelos (SGBM) e o Sistema de Gestão e Geração de Diálogo (SGGD) que é a interface que deve prover a facilidade indicada (Loucks & Beck, 2017). Já os SIG's, constituem-se em sistemas de informação, que capturam e armazenam dados acerca das diferentes características do lugar, além de fornecer análises e apresentar informações georreferenciadas, sendo possível a manipulação dos dados inseridos no sistema. Ou seja, um SIG é uma plataforma georreferenciada de informação. (USGS, 2005)

A combinação dessas duas tecnologias (SADE's) possibilita a conexão dos modelos de apoio a decisão a uma base de dados espacial (Walsh, 1992) e tem sido extensivamente aplicada no planejamento e gestão de recursos hídricos.

HEAL System

HEAL System é um sistema de apoio a decisão espacial (SADE), cujos principais módulos e funcionalidades já desenvolvidos consistem em: aquisição/ conformação de dados geográficos; a geração/ modificação da rede de nós e links e da base de dados associada; e a geração de modelos, entre outras funcionalidades, que estão sendo desenvolvidas no contexto do projeto de pesquisa do Programa Pró-Recursos Hídricos financiado com recursos da Agência Nacional de Águas (ANA) e gerenciado pela CAPES. O sistema foi desenvolvido na forma de um serviço web e projetado para ser completamente compatível com o Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e outros serviços (mapas) que utilizam Open Web Service (OWS). Além disso, o sistema está apto a adicionar outras fontes de dados como por exemplo o IBGE. (Alcoforado de Moraes et al., Relatório Técnico em preparação 2020)

Dentro do HEAL System já está desenvolvida e disponibilizada uma rede de nós e links representativa da área de estudo atual, cujos dados geográficos, hidrológicos e econômicos dos nós de oferta e demanda estão armazenados em uma base de dados espacial. A partir da rede atual, existente no HEAL já foram gerados modelos de otimização utilizando diversos critérios não-econômicos. Os nós da rede representam as entidades físicas e os links as conexões entre estas entidades. Assim, a rede de nós e links estabelece a base para o acoplamento dos sistemas hidrológicos e econômicos, possibilitando a integração de modelos econômicos. Até o momento, os modelos de otimização baseados em rede gerados a partir do HEAL apresentam apenas o critério hidrológico e estão associados a um modelo Insumo-Produto de forma que a plataforma já mensura

os impactos econômicos e sociais de tais estratégias também mas a partir de um critério não-econômico (Alcoforado de Moraes et al., Relatório Técnico em preparação 2020).

Integrando as curvas de demanda obtidas através das metodologias PMP e Expansão de Ponto aos nós de demanda da rede da área de estudo já representados no HEAL System, será possível obter a alocação ótima de acordo com o critério econômico e comparar os seus efeitos com as estratégias de alocação não econômicas. Importante frisar que essas últimas representam bem os efeitos da aplicação de instrumentos de gestão regulatórios enquanto a alocação econômica ótima representa instrumentos de gestão mais flexíveis, os baseados em mercado.

Dados

No estágio atual desse estudo foram obtidas curvas de demanda para os nós de agricultura irrigada usando o método PMP. Foram utilizados os seguintes dados : quantidade dos insumos, custos variáveis dos insumos, produtividade média das culturas e preço por unidade das culturas, entre outros. A quantidade de trabalhador e de suprimento, o custo da terra e do trabalho e os preços e produtividades médias das culturas foram obtidos a partir dos dados municipais do Censo Agropecuário (IBGE, 2006) e da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2002-2012); a quantidade de água a partir do Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industriais e Agricultura Irrigada nº 6 (FUNARBE, 2011); a quantidade de terra foi obtida dos dados de outorgas fornecidas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, o custo do suprimento do relatório de custo da produção agrícola CONAB (2010) e o custo da água do trabalho Kelman e Ramos (2005). Figueiredo (2015) apresenta de forma detalhada a obtenção dos dados necessários ao PMP a partir da base de dados visualizada.

Estudo de caso

A região modelada apresenta no total 128 municípios, em uma área equivalente a 34% do Estado e uma população de 40% e 25% do PIB Estadual que em 2011 foi de aproximadamente 114 bilhões de reais segundo dados do IBGE. Atualmente as bacias de Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una já são interligadas de alguma forma e uma rede de nós e links com mais de 700 nós de oferta e demanda, representando as conexões existentes já foi desenvolvida e está disponível no HEAL System, no contexto do projeto de pesquisa ANA-CAPEs. Dentre os nós de demanda modelados na rede atual foram identificados 110 referentes ao setor de irrigação distribuídos em 38 municípios da região de estudo.

RESULTADOS

Os 110 nós de demanda para a irrigação representados na rede ocorrem em 38 municípios de Pernambuco. As culturas foram divididas em cinco setores de acordo com sua classificação CNAE (1130 – Cana de Açúcar, 1199 – Tomate, 1211 – Inhame, Cará e Hortaliças, 1334 – Frutas e 1393 – Pastagem)

Os resultados obtidos para os valores econômicos podem ser observados na tabela 1. A média dos 110 pontos de demanda ficou em R\$0,937/m³ muito superior ao custo de energia necessário para a disponibilização do recurso que, segundo Kelman e Ramos (2005) era de R\$0,03/m³. Ademais observou-se uma grande variabilidade entre os valores obtidos tanto nós de demanda obtidos valores acima de R\$17/m³ e outras com valores abaixo de R\$0,07/m³, isto decorre, pois, os nós de demanda foram formados para representar apenas um grupo de culturas inseridas no mesmo CNAE, dessa forma, possuindo maior diferenciação entre os rendimentos por m³ e conseqüentemente nos valores econômicos.

Tabela 1 – Valores sombra obtidos para 100% da disponibilidade de água em R\$/m³

Parâmetro	Media (R\$/m³)	Desvio Padrão	Valor máximo (R\$/m³)	Valor mínimo (R\$/m³)	Número de nós de demanda
$\lambda(ig,water)$	0,937	2,568	17,265	0,006	110

*Elaboração própria a partir dos resultados obtidos no GAMS

Na tabela 2 pode-se observar mais detalhadamente os impactos da especificação da cultura no cálculo do valor econômico obtido. Enquanto que as culturas de tomate (CNAE 1199) apresentaram valores econômicos em média de R\$7,44/m³ as culturas do grupo CNAE 1211(Inhame, Cará e Hortaliças) apresentaram uma média de R\$0,064/m³. Além disso, podemos observar que a cultura que apresentou maior quantidade de nós de demanda foi a cana de açúcar que apresentou uma média de R\$0,17/m³. Outro ponto a ser visualizado é que, como nós de demanda pertencentes ao mesmo município e mesma cultura tendem a possuir os mesmos valores econômicos devido ao uso dos dados municipais referente as culturas, o coeficiente de variação (desvio padrão/média) passa a ser uma boa medida de variação dos valores econômicos das diferentes culturas entre os municípios. Observa-se, por exemplo, que o CNAE 1130 (cana de açúcar) apresentou o menor coeficiente de variação (0,655) o que indica a pouca diferença do valor econômico da cultura entre os municípios, em que a mesma é cultivada. Já o CNAE 1334 (frutas) apresentou o maior coeficiente de variação (1,045) o que indicou uma maior variabilidade nos valores econômicos do cultivo de frutas entre os municípios.

Tabela 2 - Valores sombra obtidos para 100% da disponibilidade de água em R\$/m³ por classificação CNAE

Cultura	Parâmetro	Média (R\$/m³)	Desvio Padrão	Valor máximo (R\$/m³)	Valor mínimo (R\$/m³)	Número de nós de demanda
Cana-de-açúcar	$\lambda(ig,water)$	0,17	0,11	0,58	0,03	46
Tomate		7,44	5,04	17,235	1,42	10
Inhame, Cará e Hortaliças		0,064	0,066	0,27	0,01	27
Frutas		0,819	0,856	2,49	0,006	23
Pastagem		0,082	0,071	0,168	0,018	4

*Elaboração própria a partir dos resultados obtidos no GAMS

Quando reduzimos a quantidade disponível de água, os valores econômicos tendem a apresentar um aumento em relação ao valor em 100% da disponibilidade. Porém conforme pode ser observado na tabela 3 esse impacto tende a ser maior quanto menor o valor econômico obtido, verifica-se que o valor mínimo passou de R\$0,006/m³ para R\$0,039/m³ enquanto que o valor máximo passou de R\$17,265 para R\$17,30/m³.

Tabela 3 – Valores sombra obtidos para 60% da disponibilidade de água em R\$/m³

Parâmetro	Media (R\$/m³)	Desvio Padrão	Valor máximo (R\$/m³)	Valor mínimo (R\$/m³)	Número de nós de demanda
$\lambda(ig,water)$	0,982	2,577	17,30	0,039	110

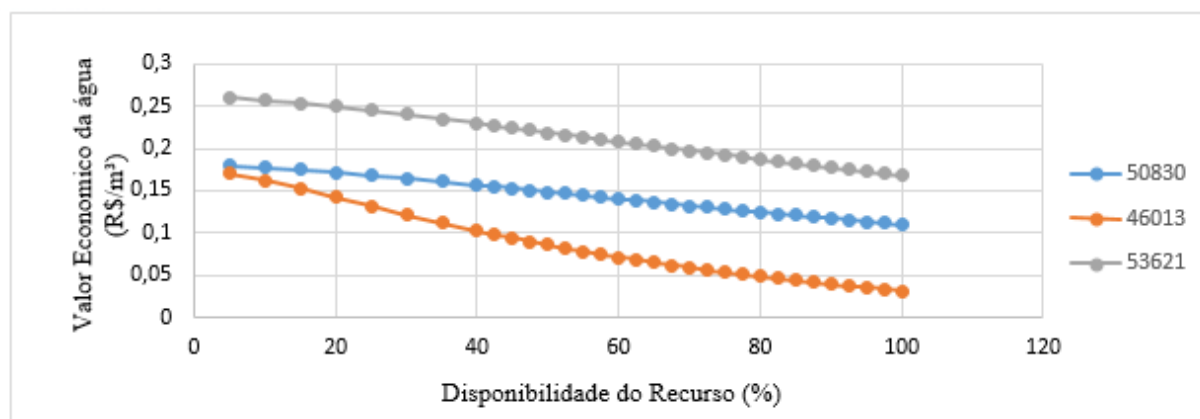
*Elaboração própria a partir dos resultados obtidos no GAMS

Por fim, podemos visualizar o comportamento do valor econômico em relação a disponibilidade de água a partir do gráfico 1, onde são apresentadas curvas de demanda para 3 nós de demandas

escolhidos aleatoriamente a título de exemplo. É possível observar a característica decrescente da curva de demanda assim como a inclinação.

Para a integração com o HEAL System, ainda será necessário integrar as curvas de demanda e gerar funções benefício econômico associadas a quantidade de água. Essas serão aproximadas por uma função polinomial para cada nó de demanda, e ao ser somadas constituirão a função objetivo do modelo hidro-econômico, que identificará a alocação econômica ótima.

Figura 1 – Variação no $\lambda(ig,water)$ (R\$/m³) a partir da redução da quantidade de água disponível de 100% até 5% para 3 nós de demanda.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs-se a apresentar resultados parciais de um estudo, que pretende identificar a alocação econômica ótima da água entre os usuários de 4 bacias interligadas no agreste pernambucano. O modelo hidro-econômico será disponibilizado em uma plataforma integrada de modelos de apoio a decisão (HEAL System), que já conta com um modelo de otimização com critério hidrológico e uma matriz insumo-produto. A obtenção do modelo hidro-econômico é simplificada devido aos recursos existentes no SADE (HEAL System) e potencializados os seus resultados através da ligação com a matriz insumo-produto já existente. Ademais o SADE facilita a comparação desses novos resultados com os associados a outros critérios de otimização como os que levam em consideração apenas aspectos hidrológicos e operacionais tais como: operação de reservatórios, prioridades de abastecimento humano, energia, entre outros. A mensuração de impactos econômicos e sociais devido a diferentes decisões na alocação entre os usuários diretos das bacias pode ser feita através da integração de modelos. Esses efeitos podem ser relacionados não apenas aos usuários para quem foi alocado o recurso, mas para toda a região. Diferentes cenários de disponibilidade hídrica e infra-estrutura hídrica podem também ser avaliados, provendo assim informações importantes para a definição e avaliação de instrumentos de gestão de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G.; CUNHA, M. P. D.; ET. AL. (2020) *Integração de modelos econômicos para apoio à decisão em políticas de alocação de águas*. Situação: Em andamento; Natureza: Pesquisa.
- ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G; BIEWALD, A ; CARNEIRO, A C G ; SOUZA DA SILVA, G NORBERT ; P, A ; LOTZE-CANPEM H . (2018). *The impact of global change on economic values of water for Public Irrigation Schemes at the São Francisco River Basin in Brazil*. Regional Environmental Change, v. 1, p. 1,
- BEKCHANOV, M. et al. (2017). *Systematic Review of WaterEconomy Modeling Applications*. J. Water Resour. Plan. Manage., 143(8), 1-18.

- CONAB.(2010) *Custos de Produção Agrícola: A metodologia da Conab*. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília,
- FIGUEIREDO, L. E. N. (2015). *A demanda da água para irrigação: uma aplicação da programação matemática positiva para os perímetros irrigados do submédio do Rio São Francisco*. Dissertação Universidade Federal de Pernambuco, Recife: [s.n], Pernambuco, Brasil
- FUNARBE. (2011). *Desenvolvimento da Matriz de Coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil*. Fundação de Apoio à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- GRIFFIN, R. C. (2006). *Water Resource Economics, the Analysis of Scarcity. Policies and Projects*. Cambridge: MIT Press., [s.n.].
- HAROU, J.J., PULIDO-VELAZQUEZ, M., ROSENBERG, D.E; MEDELLIN-AZUARA. J; LUND, J.R; HOWITT, R.E. (2009) Hydro-economic models: Concepts, design, applications and future prospects. *Journal of Hydrology*. 375:627-643.
- HOWITT R, MEDELLÍN-AZUARA J, MACEWAN DL, J.R. (2012) *Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management*. *Environmental Modelling & Software* 38:244 – 258 doi:10.1016/j.envsoft.2012.06.013.
- HOWITT, R.E. (1995) *Positive Mathematical Programming*. *American Journal of Agricultural Economics*.77 (2) 329-342.
- HOWITT, R.E., KAPLAN, J., LARSON, D., MACEWAN, D., MEDELLIN-AZUARA, J., HORNER, G., LEE, N.S. (2009) *Central Valley Salinity Report*. Central Valley Water Quality Control Board.
- IBGE (2009), *Censo Agropecuário 2006*. IBGE: Rio de Janeiro.
- KELMAN,J. RAMOS, M. (2005) *Custo, valor e preço da água utilizada na agricultura*. REGA – Vol. 2, no. 2, p. 39-48, jul./dez.
- LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. (2017) *Water Resource Systems Modeling: Its Role in Planning and Management*. *Water Resource Systems Planning and Management*. Springer, [s.n.].
- MEDELLIN-AZUARA, J., HOWITT, R.E., WALLER-BARRERA, C., MENDOZA-ESPINOSA, L.G., LUND, J.R., TAYLOR, J.E., (2009). *A Calibrated Agricultural Water Demand Model for Three Regions in Northern Baja California*. *Agrociência* 43, 83 – 96.
- SILVA, G. S. D.; ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. (2015) *Curvas de demanda da irrigação difusa e abastecimento humano e a identificação da alocação econômica ótima no Sub-médio do rio São Francisco*. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Brasília.
- SOUZA DA SILVA, G,N; ALCOFORADO DE MORAES, M.M.G. (2021) *Decision Support for the (Inter-)Basin Management of Water Resources Using Integrated Hydro-Economic Modeling*. *Hydrology* 8, 42.
- USGS - United States Geological Survey. (2005) *Geographic Information Systems (GIS) Poster*.
- WALSH, M. R.(2014) *Toward spatial decision support systems in water resources*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, p. 158-169, 1992.USGS. U.S. Geological Survey. Earth Explorer, 2013. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: fev.
- WURBS, R. A.; MUTTIAH, R. S.; FELDEN, F. (2005) *Incorporation of climate change in water availability modeling*. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 10, p. 375–385.

