

# DISCUSSÃO TEÓRICA E ANALÍTICA SOBRE VALORAÇÃO AMBIENTAL E A COBRANÇA PELO USO DE RECURSOS HÍDRICOS: A ESTRUTURAÇÃO DAS BASES DE UM MODELO A PARTIR DA ANÁLISE DE REDES NEURAI (ARN)

Lucas Salamuni<sup>1</sup>  
Heloísa de Puppi e Silva<sup>2</sup>

## RESUMO

Um dos principais anseios da sociedade contemporânea é o desenvolvimento de métodos capazes de realizar uma administração eficiente dos recursos hídricos, imprescindível à vida no planeta. Tendo em vista a indubitável necessidade de se gerenciar tal recurso da melhor forma possível, o presente artigo tem como objetivo organizar sistematicamente e qualitativamente as relações entre as variáveis dos cálculos de valoração ambiental para precificação de recursos hídricos, utilizando como base a lógica da Análise de Redes Neurais (ARN). Para tanto, se prestou a uma pesquisa exploratória de método dedutivo, com discussão teórica analítica de instrumentos e técnicas aplicadas à valoração de recursos hídricos. São análises qualitativas que explicitam esclarecimentos sobre a estruturação das bases dos cálculos e propiciam compreensões mais aprofundadas sobre o modelo das relações entre as principais variáveis do valor cobrado pelo uso da água. Nesse sentido, a pesquisa se utilizou da bibliografia de técnicas econométricas e da gestão de recursos hídricos, a partir da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), culminando na identificação da inexistência de aplicação clara do uso de técnicas econométricas de ARN ou Equações Simultâneas para a precificação da água no Brasil. Emergiu desta pesquisa a necessidade de realização de entrevistas com profissionais da área de hidrologia, bem como a aplicação e o uso de bases quantitativas, o que ressalta a importância e necessidade da realização de trabalhos ulteriores. Como resultado, foi estruturado um diagrama com a relação das variáveis envolvidas na precificação da água, atendendo a PNRH.

Palavras-chave: Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Valoração e Gestão Ambiental. Precificação da Água. Análise de Redes Neurais (ARN). Equações Simultâneas

<sup>1</sup> Aluno do 5º período do curso de Ciências Econômicas da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2020-2021). *E-mail*: lucas.salamuni@mail.fae.edu

<sup>2</sup> Orientadora da Pesquisa. Doutora em Tecnologia e Desenvolvimento pela UTFPR. Professora da FAE Centro Universitário. *E-mail*: heloisa.puppi@fae.edu

## INTRODUÇÃO

Tendo em vista sua importância econômica, estratégica e social, a água se trata efetivamente de uma questão a ser administrada pelas nações. Um dos desafios de sua gestão abrange os instrumentos pelos quais os especialistas são capazes de quantificar o valor a ser cobrado pelo uso dos recursos hídricos. Isto posto, estudos que contribuam ao tema da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), são relevantes para toda sociedade. Assim, com o intuito de promoção da eficiência das metodologias de precificação, este artigo teve como tema a estruturação das bases teóricas de um modelo específico – condizente com os alicerces fundamentais da teoria econômica – para a valoração dos recursos hídricos, essencial para o desenvolvimento prático do instrumento da cobrança da PNRH.

Usualmente, no Brasil, não são aplicados de modo explícito modelos econométricos que captem a formação de preços de mercado, nas bases de cálculos da precificação da água. Ora por resistência ideológica sobre o uso do termo “mercado”, ora pelo estágio de amadurecimento sobre o tema. O que ocorre são estimativas que cumprem com as exigências da PNRH a partir dos estudos de hidrologia e da economia, desenvolvendo uma lógica que aproxima o cruzamento da disponibilidade, da qualidade com a demanda hídrica (CEIVAP, 2019).

Conforme a PNRH (BRASIL, 1997),

Art. 5º São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

I - os Planos de Recursos Hídricos;

II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;

III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;

IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos;

V - a compensação a municípios;

VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Os Planos de Recursos Hídricos fazem projeções de disponibilidade e da demanda hídrica, considerando nos estudos hidrológicos o enquadramento das classes dos rios, a outorga e o comportamento dos setores usuários de recursos hídricos. Tais Planos também contém as estimativas das necessidades de investimentos das bacias hidrográficas que são utilizados no momento da implementação ou revisão do instrumento da cobrança. Assim, a partir de *proxies* dos cálculos da capacidade de pagamento dos usuários da bacia, são cruzadas as informações da disponibilidade, qualidade e demanda hídrica (CEIVAP, 2019).

Os principais estudos que tratam do tema são de implementação do instrumento da cobrança e suas revisões. No âmbito das bacias hidrográficas interestaduais, o mais recente é a revisão dos estudos da cobrança pelo uso de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, iniciado em 2018 e concluído em 2020. O estudo apresenta pesquisas realizadas sobre os modelos da cobrança em bacias hidrográficas nacionais e internacionais, relacionando variáveis de qualidade, disponibilidade e demanda hídrica, bem como boas práticas de uso dos recursos hídricos na proposta da fórmula de cálculo do valor cobrado (CEIVAP, 2020).

Entendendo isso, o presente artigo problematiza o tema dando atenção para a necessidade de se organizar uma série de variáveis relativas à disponibilidade, à qualidade e à demanda hídrica, utilizando-se de modelos econômicos apropriados para o processo de precificação da água. Isso passa pela discussão teórica e analítica, bem como pela sistematização qualitativa de variáveis que, depois de organizadas e estruturadas em um modelo econométrico, propiciem um aprimoramento da aplicação de modelos quantitativos utilizados nos cálculos da precificação dos recursos hídricos realizados nas bacias hidrográficas do país.

Sendo assim, a principal indagação do presente trabalho consiste no estudo sobre qual modelo qualitativo organizaria de modo mais apropriado as relações entre variáveis para os cálculos de valoração ambiental, pertinentes à precificação dos recursos hídricos no Brasil. Por pressuposto, entende-se que as bases de organização das variáveis a partir da Análise de Redes Neurais (ARN) fornece as bases iniciais para a aplicação e uso de Equações Simultâneas em próximos estudos, resultando em um melhor ordenamento das variáveis da disponibilidade, qualidade e demanda hídrica e gerando aperfeiçoamentos dos cálculos sobre a precificação da água.

Diante disso, o objetivo geral da pesquisa é organizar sistematicamente e qualitativamente as relações entre as variáveis dos cálculos de valoração ambiental para precificação de recursos hídricos, utilizando como base a lógica da Análise de Redes Neurais (ARS).

Como relevância expõe-se que o esforço desta pesquisa e as variáveis levantadas auxiliem profissionais brasileiros na busca de melhores práticas de precificação nas bacias hidrográficas, em consonância com as sucessivas atualizações e adaptações dos modelos desenvolvidos até o momento, que resultam no cálculo do valor cobrado. Intenta-se, então, a geração de contribuições para o processo de amadurecimento deste conhecimento, compactuando com as reais necessidades de investimentos para disponibilidade e qualidade hídrica, e aumentando a efetividade da PNRH.

O artigo está organizado em quatro seções: (1) referencial teórico, em que são abordados aspectos expositivos de conceitos de ordem econômica, instrumentos da

Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), experiências referentes a outros países e, principalmente, aspectos relacionados à cobrança e valoração ambiental; (2) referencial metodológico, relativo aos principais instrumentos metodológicos abordados pela pesquisa, como a Análise de Redes Neurais (ARN), bem como Equações Simultâneas; (3) metodologia de pesquisa; (4) apresentação dos resultados; e as considerações finais, com a análise dos resultados obtidos e indicação de estudos ulteriores.

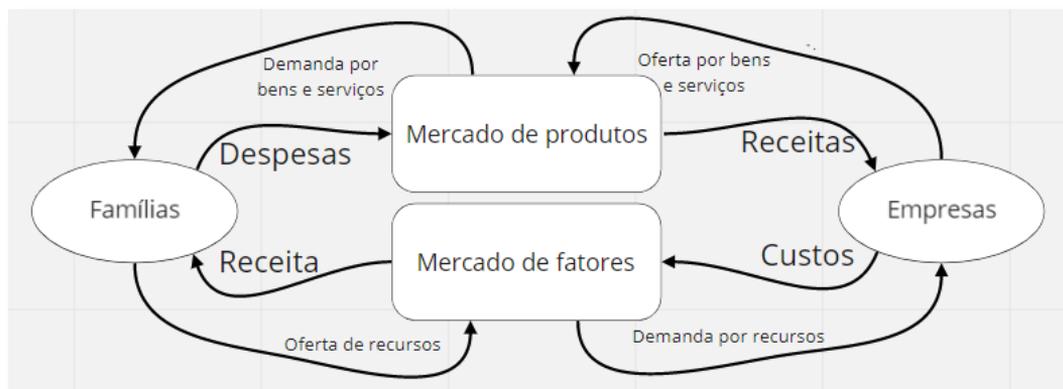
## 1 VALORAÇÃO AMBIENTAL DE RECURSOS HÍDRICOS

O aspecto fundamental da teoria econômica é lidar, bem como administrar, a aplicação dos recursos escassos a fim de satisfazer as diversas necessidades humanas. Nesse sentido, a partir de análises microeconômicas, pode-se inferir que as decisões e comportamentos de empresas, famílias e demais agentes econômicos compartilham uma estreita ligação com a própria disponibilidade e qualidade desses recursos. Tal ligação, por sua vez, assume um viés recíproco, ao mesmo tempo em que a disponibilidade e a qualidade dos recursos influenciam o comportamento dos agentes, o comportamento dos agentes é igualmente influenciado pela disponibilidade e qualidade desses recursos naturais. Sendo assim, a mesma aplicação econômica utilizada para compreender o comportamento de famílias e empresas pode ser voltada para analisar questões ambientais (CALLAN; THOMAS, 2009).

Um sistema econômico consiste na ideia de dois fluxos: um real e outro monetário. “No lado real se dá o emprego de recursos e o suprimento de bens e serviços. No lado monetário se dá a remuneração dos recursos empregados e o pagamento pelos bens e serviços adquiridos” (ROSSETTI, 1971, p. 185). Juntos eles compõem o chamado Fluxo Circular de Renda (FIGURA 1). O Fluxo Circular da Renda envolve a maneira pela qual se formam os preços dos bens, dos serviços e dos fatores de produção, todos determinados em seus próprios mercados, de acordo com suas ofertas e demandas, além de abrangerem questões acerca “do que”, “quanto” e “para quem” se deve produzir. Ademais, o próprio Fluxo ainda agrega questões acerca de “como” se deve produzir – referente aos processos relacionados às empresas – o que pode ser traduzido pela eficiência produtiva e a eficácia alocativa de cada processo (GARCIA; VASCONCELLOS, 2017).

De acordo com Callan e Thomas (2009, p. 4) “a base para modelar a relação entre atividade econômica e meio ambiente é a mesma que fundamenta toda a teoria econômica”. Com a finalidade de aplicação da economia na seara do meio ambiente, e com o intuito de se estabelecer uma relação entre a atividade econômica e o meio natural, cabe a adoção adaptativa do modelo de Fluxo Circular da Renda.

FIGURA 1 – Fluxo de Circular de Renda



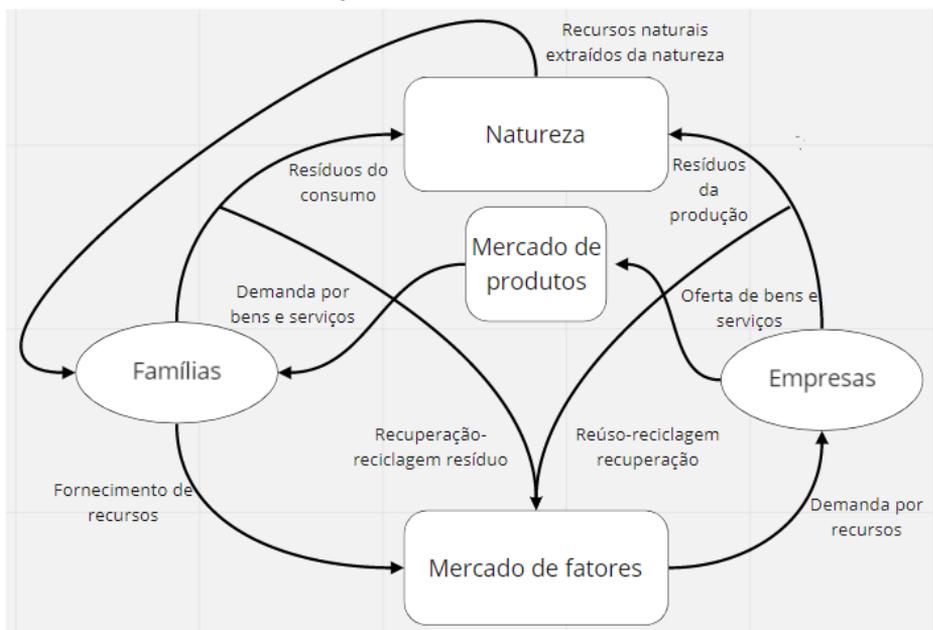
FONTE: Garcia, Vasconcellos (2017, p. 11)

No entendimento das relações entre os agentes econômicos e o meio ambiente, o Modelo do Balanço de Materiais, como é chamado o fluxo adaptado, explicita aspectos como a natureza, os resíduos provenientes da produção e consumo, recursos naturais extraídos. Em suma, a principal contribuição de tal modelo está no modo pelo qual ele “descreve como a atividade econômica explora o estoque de recursos naturais do planeta, tal qual o solo, minerais e a água” (CALLAN e THOMAS, 2009 p. 5).

O Modelo do Balanço de Materiais esclarece as conexões entre os agentes econômicos e a natureza ao ponto de demonstrar de que forma as ações desses agentes impactam a natureza e, portanto, os recursos por eles próprios utilizados. Tal modelo, assim como o Modelo de Fluxo de Renda, expressa dois fluxos que se auto complementam: um fluxo que segue do meio ambiente para a economia, representando a vasão de recursos extraídos da natureza pelas famílias; e outro, oposto ao primeiro, que segue da economia para o meio ambiente, representando tanto resíduos gerados pelas famílias como empresas. No segundo fluxo, pode-se perceber a presença de um extravio, representado pela recuperação por meio da reciclagem que surti efeitos efêmeros, uma vez que cedo ou tarde tais bens reciclados tornar-se-ão, invariavelmente, resíduos (CALLAN; THOMAS, 2009).

Este é o ponto de partida sobre o entendimento de como se devem prosseguir as interpretações sobre as relações entre economia e meio ambiente, visto que toda e qualquer atividade relativa à produção ou ao consumo é suscetível à geração de resíduos, que podem comprometer aspectos como a disponibilidade e a qualidade destes e de outros recursos oriundos do meio ambiente (CALLAN; THOMAS, 2009).

FIGURA 2 – Modelo do Balanço de Materiais



FONTE: Callan e Thomas (2009, p. 7)

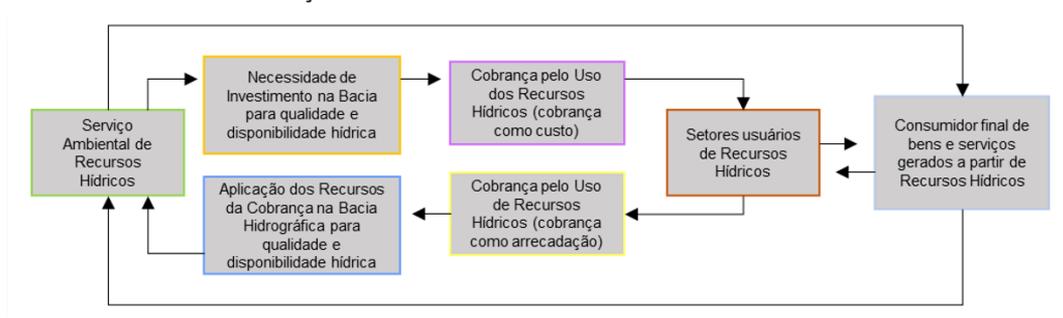
Nota – Informação original: Kneese, Ayres e D'Arge (2017), com sucessivas adaptações.

Entretanto, atenta-se para todas as causas que possam vir a interferir em qualquer uma dessas variáveis tão caras à economia ambiental. A partir dessa perspectiva, economistas e ambientalistas, depois de anos de discussão, traçaram alguns objetivos gerais com o intuito de conciliar questões como a poluição dos recursos e o crescimento econômico (CALLAN; THOMAS, 2009).

Desse modo, foram desenvolvidos três objetivos cuja finalidade seria guiar todo processo decisório sobre questões relacionadas ao meio ambiente: qualidade ambiental, desenvolvimento sustentável e biodiversidade (CALLAN; THOMAS, 2009, p. 14). Tais objetivos dizem respeito: ao consenso de se procurar reduzir a contaminação antropogênica, causada direta ou indiretamente pelo homem, a um nível aceitável para a sociedade; à gestão dos recursos de forma que suas respectivas qualidade e disponibilidade, e tudo aquilo necessário ao bem-estar, sejam asseguradas para as gerações vindouras; e à preocupação em preservar as diversas espécies e ecossistemas do planeta (CALLAN; THOMAS, 2009).

De modo adaptado para o uso dos recursos hídricos, na FIG. 3 está o Fluxo do Serviço Ambiental de Recursos Hídricos com a função da cobrança aos setores usuários que repassam esses valores aos consumidores finais de bens e serviços. Nota-se que, no centro está a função da PNRH, com a arrecadação e aplicação dos valores cobrados ao meio ambiente, ou “serviço ambiental” de recursos hídricos.

FIGURA 3 – Fluxo do Serviço Ambiental de Recursos Hídricos



FONTE: CEIVAP (2019). Adaptado pelos Autores (2021)

## 1.1 POLÍTICAS DE RECURSOS HÍDRICOS, GESTÃO E VALORAÇÃO AMBIENTAL

Ao longo dos anos, certos países procuraram se adaptar a uma nova realidade de preocupação com os recursos oriundos do meio ambiente e, a partir disso, moldaram e estruturaram diversos tipos de políticas e planejamentos cuja principal função seria, em última instância, administrar e preservar os recursos naturais em seus territórios de maneira eficiente e economicamente viável, por vezes levando em consideração a dicotomia custo-benefício. Para tanto, a fim de que estes processos ocorram da maneira desejada, é imprescindível a participação “[...] de muitos segmentos da sociedade, incluindo agências governamentais, indústria privada, comunidade científica e ambientalistas”, uma vez que “cada grupo de participantes [...] exercem um papel significativo na formulação de políticas, cada qual com sua contribuição de conhecimento especializado” (CALLAN; THOMAS, 2009, p. 19).

Nesse sentido, a questão acerca dos recursos hídricos, apesar de conter suas próprias peculiaridades, assume uma lógica comum à economia ambiental, na medida que é necessário se atentar para uma série de variáveis que podem influenciar, negativa ou positivamente, tanto a disponibilidade (oferta) e a demanda, quanto a própria qualidade desses recursos. O lançamento de poluentes por meio de fontes pontuais e não pontuais; sazonalidades; boas ou más práticas por parte dos consumidores; média de chuvas na região; número de demandantes; hábitos dos demandantes; cultura dos demandantes; além de diversos outros fatores podem vir a impactar exclusivamente a demanda e oferta ou, como pode ser visto em diversos casos, tanto a demanda quanto a oferta dos recursos hídricos de maneira simultânea (ANA, 2017).

O primeiro passo para a implementação de certa política ambiental é a análise precisa de seus objetivos, impactos, bem como eventuais *trade-offs*, o que deve garantir que os recursos investidos e os benefícios deles decorrentes sejam, de fato, satisfatórios

para a sociedade em questão. Essencialmente, a valoração ambiental aborda estes fatores, tendo em vista que tal processo visa, em última instância,

[...] avaliar o valor econômico de um recurso natural ou serviço ecossistêmico por meio da determinação do que é equivalente, em termos de outros recursos disponíveis na economia, e que a sociedade estaria disposta a abrir mão de maneira a obter uma melhoria de qualidade ou quantidade do recurso natural e dos serviços ecossistêmicos associados a este recurso (MAY; LUSTOSA e VINHA, 2010, p. 110).

De maneira geral, a finalidade consiste na realização de uma medição relativamente precisa acerca da contribuição do recurso ou serviço avaliado – no caso, recursos hídricos – para a satisfação de preferências humanas.

Em suma, conforme a experiência verificada em bacias hidrográficas interestaduais no Brasil, a lógica por trás da manutenção e preservação dos recursos hídricos envolve a análise das variáveis já utilizadas a fim de estabelecer um modelo de precificação condizente com a oferta e a demanda hídrica. Isso se faz necessário na medida que só é possível assegurar a qualidade e a disponibilidade hídrica por meio de investimentos em infraestrutura, preservação, instalações de tratamento e demais elaborações de políticas voltadas à administração desse recurso (CEIVAP, 2019).

Dessa forma, muito embora os corpos hídricos possuam a capacidade de receber certos tipos de poluentes, por exemplo, há de se levar em conta de que existe um limite para esse despejo, sendo, portanto, necessários investimentos para assegurar a manutenção de níveis aceitáveis de qualidade e disponibilidade dos corpos hídricos (CEIVAP, 2019). Nesse sentido, a precificação dos recursos hídricos se mostra, novamente, indispensável, na medida em que é por intermédio dessa prática que se faz possível captar recursos financeiros e, conseqüentemente, direcionar investimentos necessários à manutenção dos rios, aquíferos e demais corpos hídricos (BRASIL, 1997).

A fim de garantir recursos hídricos suficientes e de qualidade para toda a população de um país, são necessárias medidas que garantam a preservação desses recursos de maneira eficiente e viável, uma vez que se faz necessário que os benefícios tenham maiores impactos que os custos de aplicação destes processos, como os custos financeiros e de oportunidade (CEIVAP, 2019b).

Em sua operacionalização, a PNRH deve conter objetivos não muito ambiciosos que possam, com efeito, ser alcançados (ANA, 2017). Caso contrário, há de se ter em mente que práticas ineficientes, ou ambiciosas demais, podem tornar todo o processo de preservação da qualidade e disponibilidade desses recursos mais complicado, o que se justifica pela busca da simplificação da fórmula da cobrança (CEIVAP, 2019).

De acordo com Callan e Thomas (2009), no caso dos Estados Unidos, a Lei Federal de Controle da Poluição de Águas (FWPCA), após ser aprovada pelo Congresso em 1972, se mostrou relativamente ineficaz. Tal lei visava passar a responsabilidade das questões ambientais relacionadas à água do âmbito estadual para o federal. Embora o projeto definisse novos objetivos nacionais e limitações de efluentes baseados na tecnologia e uma série de outras mudanças bastante radicais, “logo ficou evidente [...] que essa nova lei era ambiciosa demais, deixando muito a desejar quanto a seus objetivos” (CALLAN; THOMAS, 2009, p. 366). Desse modo, com o tempo foram sendo realizados ajustes na legislação estadunidense a fim de fazer com que as medidas previstas em lei fossem efetivamente cumpridas pelas empresas e demais agentes poluidores e consumidores. Em 1977, por exemplo, foi promulgada a Lei da Água Limpa (CWA), o que fez com que os prazos de cumprimento dos limites de efluentes fossem alongados, bem como as exigências relacionadas às quantidades de agentes tóxicos na água se tornassem mais rígidas.

No que tange às medidas a serem tomadas, há de se levar em consideração que, antes de qualquer decisão, se faz necessária a realização de análises econômicas a fim de estipular a real eficiência de tais medidas. Pressupõe-se, de fato, que sejam adotadas políticas com o melhor retorno possível e, ao mesmo tempo, o menor custo possível. De acordo com Callan e Thomas (2009), é necessária a elaboração de medidas com base nas análises de custo-benefício e em critérios ambientais. Portanto, políticas que não se utilizem de tais métodos podem ser incoerentes e, conseqüentemente, apresentar resultados decepcionantes, culminando no desperdício de recursos.

Um exemplo de uma medida inconsistente nos Estados Unidos é a limitação de efluentes com base na tecnologia. O foco dessa política recai sobre fontes pontuais e o principal problema desse ocorre na medida que, por ser baseado em determinada tecnologia acessível em certo período, sua motivação não se verifica mediante uma análise custo-benefício, mas exclusivamente pela tecnologia que se apresenta economicamente viável. Este processo ainda conta com o fato de que “[...] os limites tecnológicos são aplicados uniformemente dentro de grupos definidos de fontes pontuais e [...] não consideram as condições variáveis nem atribuições de uso entre os corpos hídricos”, captação, consumo e lançamento, por exemplo. Contudo, inicialmente, o direcionamento de recursos para a implementação de uma medida que visasse garantir a qualidade da água para certa finalidade, como consumo, navegação, etc., em uma análise *a posteriori*, mostra que os objetivos do projeto foram apenas parcialmente alcançados. Sendo assim, poderiam ter sido aplicadas outras medidas que teriam alcançado uma maior eficiência e justificado a quantidade de recursos investida, visto que o custo dessas aplicações pode gerar impactos na forma como tais recursos hídricos são precificados (CALLAN; THOMAS, 2009, p. 377).

Outro aspecto que há de se levar em conta são as análises custo-benefício para aplicações dos recursos, que visem preservar aspectos como a qualidade e a disponibilidade de recursos hídricos. Elas podem ser realizadas de diversas formas diferentes, desde observações de impactos diretos como indiretos, e isto pode ser exemplificado a partir do caso do Novo Padrão do Arsênico nos EUA. De acordo com Callan e Thomas (2009), no ano de 2000 a *Environmental Protection Agency (EPA)*, depois de sucessivas análises, pôde verificar que a quantidade máxima permitida de arsênio em águas para o consumo poderia implicar em graves danos à saúde dos consumidores como cânceres, por exemplo. Logo, em maio do mesmo ano a EPA propôs a diminuição da quantidade máxima permitida de lançamento de arsênico de 50 para 5 partes por bilhão. Com o intuito de verificar se uma mudança na quantidade máxima permitida implicaria em gastos cujo benefício fosse justificado, a administração Bush sugeriu uma análise econômica sobre o fato. Depois disto, pôde-se verificar que os benefícios do novo padrão do arsênio seriam traduzidos em mais de US\$258,9 milhões de dólares por ano, poupados em despesas médicas, enquanto seus custos giraram em torno de US\$262,6 milhões de dólares anuais. Por fim, a EPA concluiu que “[...] considerando que uma quantidade significativa de possíveis benefícios não foi monetizada na Análise Econômica [...] os benefícios reais provavelmente seriam maiores do que as estimativas” (CALLAN; THOMAS, 2009, p. 427), fazendo com que os benefícios alcançados excedessem os custos de preservação dos recursos em questão.

Portanto, a fim de se preservar os recursos hídricos da melhor forma possível e garantir que suas finalidades de uso sejam atendidas, é necessário trabalhar na busca de um padrão adaptativo a cada identidade de bacia hidrográfica na precificação. A partir da análise de vetores que possam vir a impactar nos fatores como sua disponibilidade, qualidade e demanda, é possível iniciar a busca por um padrão de precificação condizente com a necessidade de investimento de um ou mais corpos hídricos com o objetivo final de preservá-los da maneira mais eficiente possível, fazendo com que os investimentos se justifiquem ante os gastos realizados. Para tanto, é necessário ficar atento a condições como as boas práticas de agentes poluidores, sazonalidades, hábitos e culturas dos consumidores, bem como outras variáveis que podem impactar a qualidade e a disponibilidade da água no Planeta.

## 1.2 EXTERNALIDADES NEGATIVAS E VALORAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A questão acerca dos recursos hídricos envolve, também, outro tipo de peculiaridade: as externalidades. Em suma, quando se trata de bacias, rios e outros afluentes, é necessário atentar para o fato de que “os consumidores estarão

preocupados com a produção ou consumo de outro agente”, bem como para “quando as possibilidades de produção de uma empresa são influenciadas pelas escolhas de outra empresa ou consumidor” (VARIAN, 1987, p. 679).

Desse modo, os problemas decorridos de externalidades no consumo e na produção devem dimensionados para a formulação de um modelo de precificação condizente com as reais condições dos diversos agentes envolvidos. Nesse sentido, ainda segundo Varian (1987), o cerne dos problemas relacionados às externalidades diz respeito aos direitos de propriedade precariamente definidos, como é o caso dos recursos hídricos, por exemplo.

Certos obstáculos podem ser entendidos a partir do fato de as atividades de certa empresa pesqueira, por exemplo, serem substancialmente prejudicadas por uma empresa metalúrgica responsável por lançar uma quantidade excessiva de certos resíduos em determinada bacia, por exemplo. Logo, no caso dos recursos hídricos, o que há de ser observado são os resultados dos impactos ambientais no cotidiano dos consumidores daquele determinado recurso, sejam eles empresas, pessoas físicas, agricultores, entre outros. Desse modo, não é difícil de se entender a real necessidade de realizar um levantamento desses impactos e, com isso, considerá-los no processo de precificação final, afinal, a simples existência de externalidades pode prejudicar tanto o meio ambiente como a própria eficiência do mercado livre e competitivo (VARIAN, 1987, p. 701).

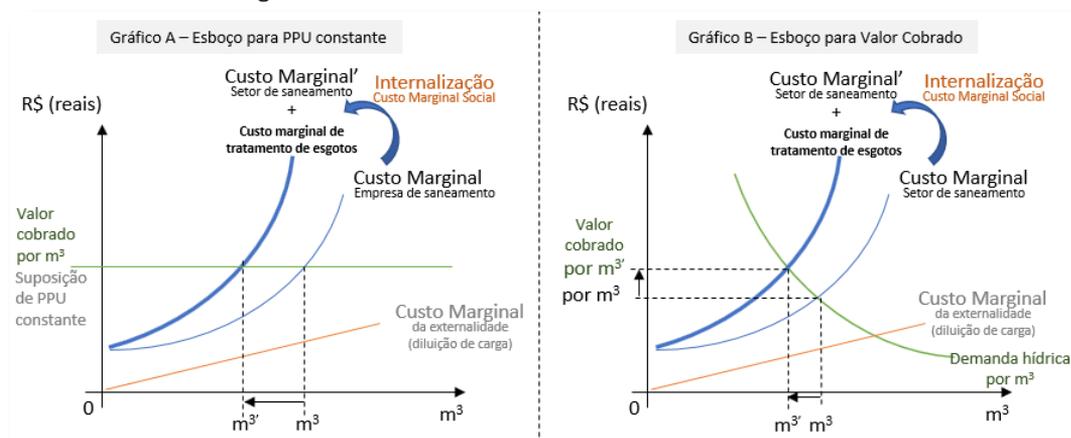
Todavia, muito embora as externalidades, por si só, já representem um sério risco aos recursos e à atividade econômica propriamente dita, o caso dos recursos hídricos pressupõe, na maioria das vezes, a existência de um caso especial de externalidade. Isso ocorre, pois, tais recursos são exemplos de bens públicos, caracterizado pelo fato de haver mais de dois agentes econômicos diretamente envolvidos ou ligados a esse bem. Em suma, a maioria das bacias, rios e afins possuem mais de duas empresas instaladas em suas margens. Com isso, a ação de tais empresas impactam os demais agentes consumidores de recursos hídricos concomitantemente. Logo, os lucros das empresas podem ser diretamente prejudicados em decorrência de uma excessiva quantidade de efluentes lançados por outra empresa, por exemplo. Em outras palavras, a condição de eficiência dos bens públicos não funciona de maneira análoga aos bens privados, uma vez que o que garante seu funcionamento ótimo é justamente o fato de “[...] a soma das taxas marginais de substituição [...] igualar-se ao custo marginal” (VARIAN, 1987, p. 741). Portanto, a fim de maximizar os lucros conjuntos e minimizar o custo social total da poluição com o objetivo de preservar o recurso para os demais consumidores, o autor diz poder ser necessária a adoção de medidas como a elaboração de impostos de Clarke, por exemplo, que, naturalmente, devem ser levadas em consideração no modelo de precificação final.

Isto posto, a lógica do custo marginal se refere ao entendimento de quanto custa limpar percentuais adicionais de efluentes, ou, quanto custa reduzir o lançamento de cargas poluidoras, por exemplo. Estes são custos, normalmente externos, aos cálculos dos custos marginais das empresas, que viabilizam sua permanência no mercado, mediante a otimização de resultados. Por isso, são tratados como custos sociais que devem ser internalizados, quando da precificação de bens públicos (PINDYCK, 2005).

Uma das necessidades de amadurecimento do conhecimento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (ANA, 2017) trata da simulação do custo marginal (CMg) pela incorporação das externalidades. Este avanço consiste em estudos quantitativos das externalidades calculadas conforme custos de lançamento de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos. Um exemplo seriam os cálculos do custo marginal, ou mensurações de proxies qualitativas, quando pertinente, conforme a característica e a natureza da externalidade identificada, como o custo ou metas de reduções de cargas poluidoras que podem ser medidos por meio do percentual de carga poluente tratada (R\$/Kg).

Na FIG. 4, está uma adaptação do modelo teórico de externalidades, que devem ser internalizados, ao caso PNRH com o esboço de duas lógicas que podem ser simuladas em próximos estudos econômicos. No gráfico A o esboço foi construído supondo o preço público unitário (PPU) constante e uma empresa de saneamento; no gráfico B o esboço foi construído supondo valor cobrado e o conjunto de empresas de saneamento da bacia. A internalização das externalidades pode ser observada por meio da adição do custo marginal da externalidade com o custo marginal da empresa de saneamento. Esta adição forma o custo marginal social. A partir da adição do custo marginal da externalidade é possível observar a redução da demanda hídrica em  $m^3$ .

FIGURA 4 – Esboço de metodologia para externalidades negativas a serem internalizadas via custo marginal



FONTE: Pindyck (2005). Adaptado pelos Autores (2021)

A partir das análises do custo marginal, é possível decidir sobre a regulação econômica da bacia, estipulando ações que serão de ordem pública ou privada, por

exemplo. Quando de ordem pública, os cálculos das externalidades negativas e custos marginais devem ser cruzados com as análises de custo-benefício, para aproximação do valor da cobrança à realidade social e capacidade de pagamento dos usuários da bacia.

Entretanto, a estimativa da curva de custo marginal, de internalizações específicas como a de lançamentos de esgotos ou abatimento de cargas (R\$/Kg ou R\$/m<sup>3</sup>), por exemplo, quando contraposta aos benefícios gerados (atingimento de metas de redução do uso da água ou diminuição do lançamento de efluentes) validam as estimativas dos valores cobrados, ou as simulações da arrecadação. Indicam, portanto, o momento do ponto de equilíbrio dos retornos sobre os investimentos dos Planos das Bacias Hidrográficas.

As simulações das variações dos custos nos valores da cobrança, mediante a internalização de externalidades podem ser realizadas por meio de cálculo do custo marginal. Os resultados dessas análises podem trazer a possibilidade de avaliação da gradualidade da implementação da cobrança nas bacias hidrográficas porque tratam de mais uma forma de avaliar os impactos das oscilações dos valores cobrados nos custos dos setores usuários. Os custos marginais podem ser cruzados com os benefícios marginais, principalmente de modo qualitativo, sustentando mais uma forma de tomada de decisão dos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs). Além disso, essas projeções do custo marginal, apoiam os estudos da redução do uso, bem como a definição de metas e operacionalização orçamentária do Plano de Aplicação Plurianual (PAP) das bacias.

## **2 ANÁLISE DE REDES NEURAIIS (ARN) E EQUAÇÕES SIMULTÂNEAS**

Tendo em vista os objetivos almejados pela pesquisa, a lógica estrutural da Análise de Redes Neurais (ARN) podem vir a ser utilizadas a fim de compor uma etapa da organização de variáveis de valoração de recursos hídricos, para posterior amadurecimento de modelos que se utilizem de Equações Simultâneas, utilizadas em precificação de mercados, de modo a aprimorar o processo de precificação da água.

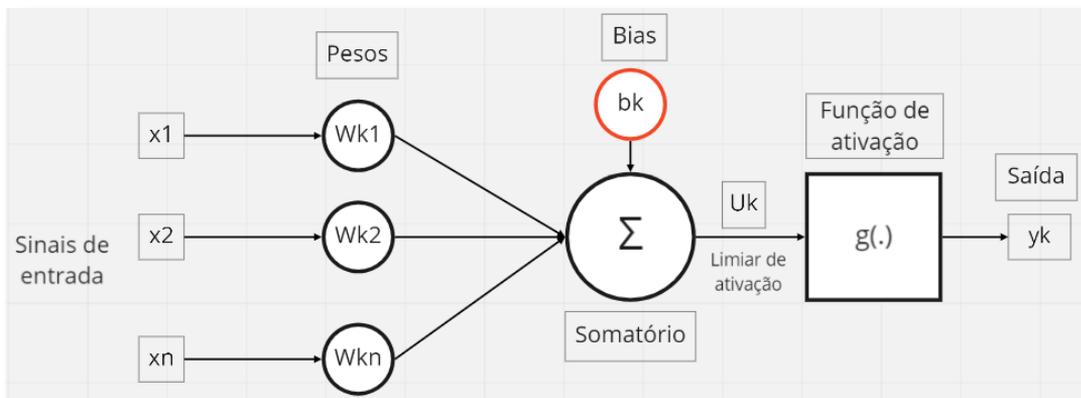
### **2.1 ANÁLISE DE REDES NEURAIIS**

Em suma, uma rede neural se trata de um sistema de computação em específico cuja estrutura é composta por uma série de nós interconectados que, juntos, funcionam de maneira análoga aos neurônios do cérebro humano. Isto posto, uma Rede Neural pode ser definida como “[...] um processador maciçamente paralelamente distribuído

constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso [...]” (HAYKIN, 2009, p. 28). Nesse sentido, ainda de acordo com Haykin (2009), as Redes Neurais se assemelham com o cérebro humano em dois aspectos: o conhecimento, tanto no que diz respeito à rede como para nosso cérebro, é adquirido a partir do ambiente em que eles se encontram por meio de um processo de aprendizagem; além do fato de que, para ambos, o armazenamento desse conhecimento adquirido se dá por meio das forças de conexão entre neurônios – ou seja, pesos sinápticos.

As estruturas de um único neurônio que integra uma Rede Neural envolvem, segundo Haykin (2009) basicamente, três diferentes componentes. Em primeiro lugar, há de se considerar um conjunto de elos de conexão – também chamados de sinapses –, responsáveis por determinar a força de conexão, cuja principal função é atribuir certo peso multiplicador a um sinal de entrada específico captado pelo neurônio. Ademais, os neurônios individuais também têm de contar com um combinador linear responsável por, basicamente, somar todos os sinais de entrada – ponderados, naturalmente, por suas respectivas sinapses – captadas pelo neurônio. A terceira parte de uma unidade de Rede Neural envolve uma função de ativação, ou função restritiva. Em suma, este último componente assume o papel de “[...] restringir a amplitude da saída de um neurônio [...] já que restringe (limita) o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída a um valor finito” (HAYKIN, 2009, p. 28). Ademais, cabe ressaltar que são vários os tipos de função de ativação – cada um ideal para certo tipo de atividade –, tal como a função de limiar, a função linear por partes e a função sigmoide. Por fim, também há de se apontar para a existência de um viés – também conhecido como bias –, que se resume a um efeito externo que – caso positivo – aumenta ou – caso negativo – diminui a entrada da função de ativação (FIG. 5).

FIGURA 5 – Modelo não linear de um neurônio artificial



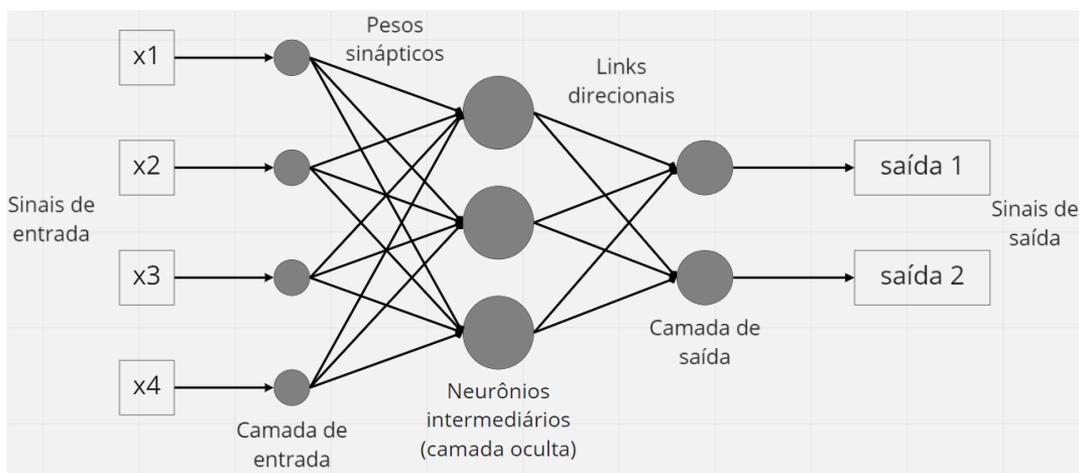
FONTE: Os Autores (2021)

Nota – Informação original: Haykin (2009), com sucessivas adaptações.

Logo, juntos, uma quantidade “n” de neurônios acabam por compor uma Rede Neural que, conforme o especificado, pode ser voltada para a resolução de uma série de operações. No entanto, é preciso estar atento para o fato de que há uma vasta gama de diferentes arquiteturas de rede que, por sua vez, geralmente estão ligadas a diferentes algoritmos de aprendizagem utilizados com o intuito de treiná-la. Nesse sentido, partindo do pressuposto que as Redes Neurais são dispostas em camadas, há sistemas mais simples, estruturados por neurônios de fonte – também chamado de camada de entrada, responsável pela captação dos sinais, não efetuando qualquer tipo de cálculo computacional – e uma única camada de neurônios – a camada de saída, que gera o valor final a partir da recepção de dados não ou parcialmente calculados, a depender da existência de camadas ocultas –, e mais complexos, organizados por duas ou mais camadas intermediárias – também chamadas de camadas ocultas (FIG. 6).

Pode-se dizer que uma rede de camada única é composta por uma camada de entrada (neurônios de fonte), bem como por uma camada de saída (nós computacionais), sendo que, de acordo com que diz Haykin (2009), tal modelo se trata, em última instância, de uma rede acíclica – uma vez que ela é unicamente alimentada adiante. Já uma rede de múltiplas camadas, por sua vez, é substancialmente mais complexa pois, além da existência dos neurônios de fonte e de nós computacionais, temos uma ou mais camadas ocultas, caracterizadas pelo fato de serem um nível intermediário. Dessa forma, “[...] adicionando-se uma ou mais camadas ocultas, tornamos a rede capaz de extrair estatísticas de ordem elevada [...] uma habilidade particularmente valiosa quando o tamanho da camada de entrada é grande”, sendo assim, “[...] a rede adquire uma perspectiva global apesar de sua conectividade local, devido ao conjunto extra de interações neurais” (HAYKIN, 2009, p. 47).

FIGURA 6 – Rede acíclica totalmente conectada com uma camada oculta e uma camada de saída



FONTE: Os Autores (2021)

Nota – informação original: Haykin (2009), com sucessivas adaptações

Isto posto, devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo de precificação dos recursos hídricos, uma Rede Neural de múltiplas camadas seria, virtualmente, um valioso instrumento no desenvolvimento de um processo de cálculo eficiente.

## 2.2 EQUAÇÕES SIMULTÂNEAS

Segundo Gujarati (2011), geralmente as relações econômicas se mostram como sendo uniequacionais, podendo ser explicadas por apenas uma equação. Dessa forma, muitas vezes essas relações se dão a partir de uma variável dependente (Y) representada por uma função linear composta, por sua vez, por uma ou mais variáveis explanatórias (X1; X2; ... ; Xn). Logo, para muitos desses modelos, prevalece a noção de que a relação entre essas variáveis é unidirecional – na medida em que X impacta em Y, ou vice-versa, mas nunca de maneira recíproca. No entanto, há de se observar casos bastante peculiares em que as relações estabelecidas por ambas estas variáveis assumem um fluxo de influência de “mão dupla”.

Isto posto, diversos autores de Econometria caracterizaram as Equações Simultâneas como quando “[...] uma variável econômica afeta outra(s) variável(eis) econômica(s) e é, por sua vez, afetada por ela(s)”, logo, modelos de equações simultâneas podem ser resumidos a “[...] modelos nos quais há mais do que uma equação de regressão, uma para cada variável independente [X1; X2; ... ; Xn]” (GUJARATI, 2011, p. 665) (QUADRO 1).

QUADRO 1 – Exemplo de modelo de equações simultâneas

Funções:	
Função de demanda:	$Q_t^d = \alpha_0 + \alpha_1 * P_t + u_{1t}$
Função de oferta:	$Q_t^s = \beta_0 + \beta_1 * P_t + u_{2t}$
Condição de equilíbrio:	
Termos:	
Quantidade demandada	$Q^d$
Quantidade ofertada	$Q^s$
Parâmetros ( e )	$\alpha$ e $\beta$
Termos de erro estocásticos	$u_1$ e $u_2$
Observações:	
<i>P e Q são variáveis conjuntamente dependentes, i. e., um deslocamento na curva de demanda altera tanto P quanto Q (e vice-versa).</i>	
<i>Em virtude da dependência simultânea entre Q e P, <math>u_{1t}</math> e <math>P_t</math> (na equação de demanda) e <math>u_{2t}</math> e <math>P_t</math> (na equação de oferta) não podem ser independentes.</i>	

FONTE: Gujarati (2009, p. 668)

Em suma, alguns exemplos de modelos de Equações Simultâneas podem envolver, até mesmo, aspectos bastante triviais da Teoria Econômica, como é o caso das funções de oferta e demanda. Nesse sentido, há de se observar o fato de que, havendo, no modelo estudado, simultaneidade entre as equações apresentadas, “[...] uma regressão de Q contra P [como se observa na figura 3], violaria uma importante premissa do modelo clássico de regressão linear, ou seja, a premissa de que não há correlação entre a(s) variável(eis) explanatória(s) e o termo de erro” (GUJARATI, 2011, p. 668).

### **3 METODOLOGIA DE PESQUISA**

Conforme esclarecido nas seções anteriores, o cerne da presente pesquisa consiste em estabelecer, bem como caracterizar, uma gama de variáveis para que seja possível realizar o cálculo de precificação dos recursos hídricos em diferentes regiões. Portanto, pretende-se, em suma, fundamentar os alicerces que baseiem, em última instância, uma “fórmula” geral de precificação da água. Para tanto, a fim de se estabelecer estas bases qualitativas, fez-se necessário a utilização de uma série de ferramentas, sendo duas as principais: as Redes Neurais (RN) e as Equações Simultâneas (ES).

Dessa forma, em um primeiro momento, com base no referencial teórico, e analisando, portanto, os principais aspectos da valoração ambiental relacionada ao tema, foi possível verificar os pilares que diziam respeito às questões que envolvem a manutenção e administração dos recursos hídricos. Nesse sentido, a pesquisa seguiu na compreensão de como se dava a administração dos efluentes lançados aos rios e bacias, como foi o caso da observação da evolução da política de recursos hídricos nos Estados Unidos. Também foram observados os fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), bem como pesquisado o instrumento da cobrança que resulta na precificação das bacias hidrográficas brasileiras. Por fim, a última etapa do referencial teórico envolveu a pesquisa de determinados tópicos de microeconomia, tais como questões acerca de externalidades e bens públicos, tendo em vista que ambos estes conteúdos, como exposto nas seções anteriores, desempenham importante papel quando o tema tratado é a administração de recursos hídricos.

Em seguida, a partir de todo o conhecimento acumulado na elaboração e desenvolvimento do referencial teórico, buscou-se listar as principais variáveis relacionadas, direta ou indiretamente, ao processo de precificação dos recursos hídricos. Nesta etapa foram observados os principais aspectos responsáveis pela alteração da demanda, oferta e qualidade hídrica, definindo-as como as três principais variáveis dependentes do modelo. Entretanto, também foi verificada a importância de outra variável que, em última instância, poderia vir a interferir nos resultados obtidos pelo modelo, as Expectativas de tecnologias e soluções futuras. Nesse sentido, foram listadas

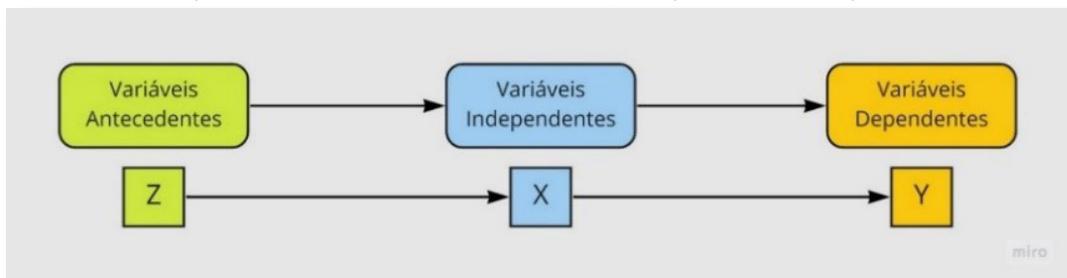
vinte variáveis independentes, além de um termo de erro, que poderiam, de forma ou de outra, impactar no valor cobrado, a fim de garantir os investimentos necessários à qualidade, disponibilidade e demanda hídrica.

Depois da definição das variáveis independentes a serem consideradas no modelo, estas foram categorizadas de acordo com o impacto gerado por cada uma delas nas variáveis dependentes.

Na sequência foram estabelecidos três graus de relação entre as variáveis independentes e as variáveis dependentes às quais estas apresentavam certa relação. Os três gradientes de relação foram: próxima, intermediária e distante.

Como forma de aprimoramento da qualidade da discussão, organização e classificação das variáveis, foram definidas as principais variáveis antecedentes que, efetivamente, “[...] têm por finalidade explicar a relação X-Y”, na medida em que “colocam-se na cadeia causal antes da variável independente, indicando uma influência eficaz e verdadeira”, fazendo com que estas “não ‘afastem’ a relação X-Y, mas esclareçam as influências que precederam essa relação” (FIG. 7) (MARCONI, LAKATOS, 2003, p. 231).

FIGURA 7 – Relações entre as variáveis antecedentes, independentes e dependentes.



FONTE: Marconi, Lakatos (2003, p. 231)

Por fim, depois da elaboração do referencial teórico e da definição das variáveis a serem utilizadas nas equações do modelo, conforme o que foi verificado no levantamento bibliográfico acerca das redes neurais e equações simultâneas, foi elaborado um diagrama visando exemplificar visualmente as formas e categorias de relações estabelecidas entre as variáveis dependentes e independentes compreendidas pelo modelo, gerando o resultado principal da proposta deste artigo.

#### 4 APRESENTAÇÃO DAS BASES DE UM MODELO DA VALORAÇÃO DA ÁGUA A PARTIR DA ANÁLISE DE REDES NEURAIS (ARN)

Para a estruturação das bases de um modelo de valoração ambiental de recursos hídricos (precificação) as variáveis dependentes são: demanda (usos da água); disponibilidade (oferta), qualidade hídrica e expectativas oriundas de boas práticas e tecnologia futura. As

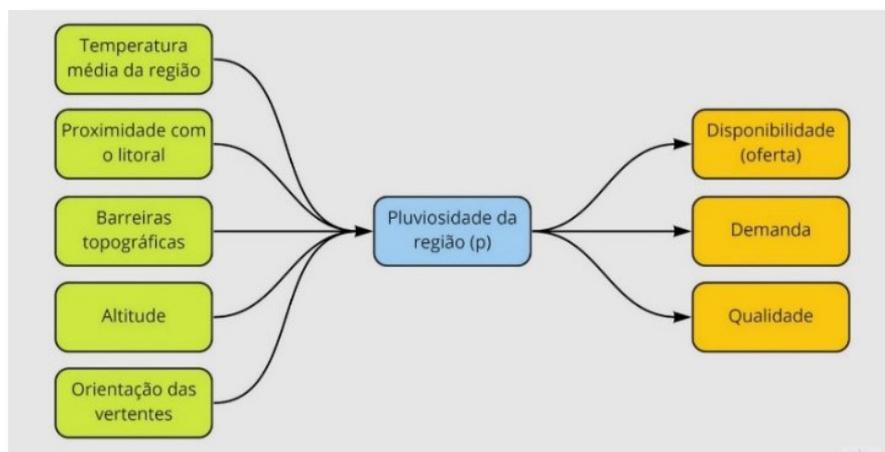
vaiáveis independentes que alteram as dependentes estão listadas a seguir, explicadas, classificadas com relação próxima, intermediária e distante no Quadro 2. Elas foram listadas a partir dos estudos da revisão da cobrança da bacia interestadual hidrográfica do rio Paraíba do Sul, que revisou a metodologia de cálculo e a fórmula do valor cobrado.

Pluviosidade da região (p)	<b>Expectativas de boas práticas das indústrias (bt+x)</b>
Temperatura média da região (T)	Más práticas das indústrias no período atual (mt)
Sazonalidades (s)	Más práticas das indústrias nos períodos anteriores (mt-x)
Número de famílias consumidoras (nf)	<b>Expectativas de más práticas das indústrias (mt+x)</b>
Número de indústrias consumidoras (ni)	Capacidade de armazenamento do recurso (ca)
Eficiência dos processos das indústrias (ei)	Capacidade de recuperação natural do recurso (cr)
Hábitos das famílias (hf)	Tecnologia(s) atual(is) (tect)
Atividades das indústrias (ai)	<b>Expectativas de tecnologias futuras (tect+x)</b>
Boas práticas das indústrias no período atual (bt)	Fatores não pontuais (f)
Boas práticas das indústrias nos períodos anteriores (bt-x)	Termo de erro (e)

Como forma de melhor organizar a relação entre as variáveis na lógica de estruturação da Análise de Redes Neurais (ARN), na primeira coluna do Quadro 2, foram listadas as possíveis variáveis antecedentes de cada variável independente, conforme o exemplo da FIG. 6.

Nem todas as vinte variáveis independentes interferem em todas as variáveis dependentes. A título de exemplo, foi observado que a variável independente pluviosidade da região (p) poderia ter correlação com todas as três variáveis dependentes (oferta, demanda e qualidade hídrica). De outra forma, a variável independente capacidade de armazenamento do recurso (ca), por sua vez, tem relação com a variável dependente oferta, somente (FIG. 8).

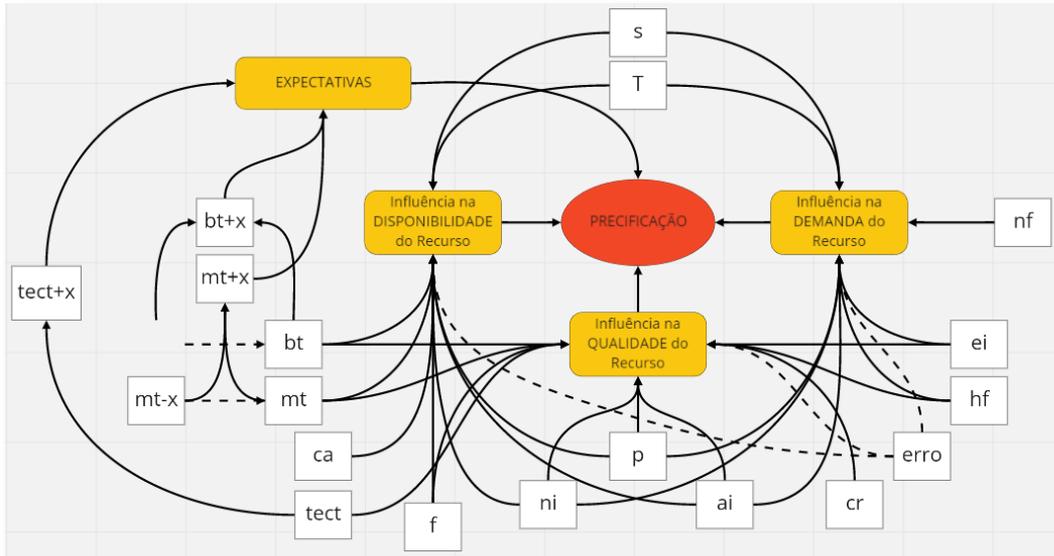
FIGURA 8 – Exemplo de relações entre as variáveis antecedentes, independentes e dependentes



FONTE: Os Autores (2021)

A organização e classificação das variáveis culminou em um diagrama que contém a lógica da ARN (FIG. 9). Tal diagrama abrange basicamente todos os aspectos, com as variáveis antecedentes agrupadas por conveniência em algumas variáveis independentes. O modelo qualitativo de precificação desenvolvido, se formou a partir das relações que cada variável independente possui com cada variável dependente, até o grau dessas relações (seja ele próximo, intermediário ou distante).

FIGURA 9 – Relações entre as variáveis dependentes e independentes do modelo



FONTE: Os Autores (2021)

Nota: as setas vermelhas representam relações próximas; as setas roxas, relações intermediárias; as setas pretas, relações distantes; e as setas cinzas, qualquer um dos três tipos de relação, a depender da situação. As setas contínuas representam o estabelecimento obrigatório de uma relação; e as setas pontilhadas indicam uma relação facultativa.

Dessa forma, é possível compreender de maneira mais clara e objetiva as relações de interdependência estabelecidas entre as diferentes variáveis de um modelo qualitativo de precificação da água, bem como faz-se possível observar a maneira pela qual estas mesmas variáveis interferem, ao final, na precificação do recurso hídrico. Esta base qualitativa pode ser utilizada no desenvolvimento e aprimoramento de modelos quantitativos.



QUADRO 2 – Variáveis independentes, dependentes e antecedentes envolvidas no processo de precificação dos recursos hídricos continua

		VARIÁVEIS DEPENDENTES												
VARIÁVEIS ANTECEDENTES	VARIÁVEIS INDEPENDENTES	EXPLICAÇÃO	INFLUÊNCIA NA DISPONIBILIDADE (OFERTA) DO RECURSO			INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DO RECURSO			INFLUÊNCIA NA DEMANDA DO RECURSO					
			Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante			
7	Aspectos Culturais da Sociedade.	Hábitos das famílias (hf)												
8	-	Atividades das indústrias (ai)		H.C			H.C							
9	Número de Empresas no Mercado; Legislação Vigente; Existência de Multas; Boas Práticas das Indústrias nos Períodos Anteriores.	Boas práticas das indústrias no período atual (bt)												
10	Número de Empresas no Mercado; Legislação Vigente; Existência de Multas.	Boas práticas das indústrias no(s) período(s) anterior(es) (bt-x)												
11	Número de Empresas no Mercado; Legislação Vigente; Existência de Multa; Boas Práticas das Indústrias nos Períodos Anteriores.	Expectativas de boas práticas das indústrias (bt+x)												

QUADRO 2 – Variáveis independentes, dependentes e antecedentes envolvidas no processo de precificação dos recursos hídricos continua

		VARIÁVEIS DEPENDENTES												
VARIÁVEIS ANTECEDENTES	VARIÁVEIS INDEPENDENTES	EXPLICAÇÃO	INFLUÊNCIA NA DISPONIBILIDADE (OFERTA) DO RECURSO			INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DO RECURSO			INFLUÊNCIA NA DEMANDA DO RECURSO					
			Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante			
12	Tipos de Infração; Ausência de Legislação; Legislação Vigente Branda; Ausência de Controle do Lançamento de Efluentes; Inexistência de Multas; Más Práticas das Indústrias nos Períodos Anteriores.	Más práticas das indústrias no período atual (mt)		H.C			H.C							
13	Tipos de Infração; Ausência de Legislação; Legislação Vigente Branda; Ausência de Controle do Lançamento de Efluentes; Inexistência de Multas.	Más práticas das indústrias no(s) período(s) anterior(es) (mt-x)												
14	Tipos de Infração; Ausência de Legislação; Legislação Vigente Branda; Ausência de Controle do Lançamento de Efluentes; Inexistência de Multas.	Expectativas de más práticas das indústrias (mt+x)												
15	Tipos de Infração; Ausência de Legislação; Legislação Vigente Branda; Ausência de Controle do Lançamento de Efluentes; Inexistência de Multas; Más Práticas das Indústrias nos Períodos Anteriores.	Capacidade de armazenamento do recurso (ca)												
16	Área do Terreno; Profundidade do Terreno.													

QUADRO 2 – Variáveis independentes, dependentes e antecedentes envolvidas no processo de precificação dos recursos hídricos continua

		VARIÁVEIS DEPENDENTES											
VARIÁVEIS ANTECEDENTES	VARIÁVEIS INDEPENDENTES	EXPLICAÇÃO	INFLUÊNCIA NA DISPONIBILIDADE (OFERTA) DO RECURSO		INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DO RECURSO		INFLUÊNCIA NA DEMANDA DO RECURSO						
			Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante			
17	-	Capacidade que um sistema possui de se recuperar (sem interferência humana) de fontes poluidoras pontuais e não pontuais (i. e. ciclo hidrológico, por ex.)				H.C							
18	Número de Empresas no Mercado; Investimentos.	<b>Tecnologia(s) atual(is) (tect)</b>				H.C							
19	Número de Empresas no Mercado; Capacidade Empresarial; investimentos; Subsídios; Parcerias Público-Privadas.	<b>Expectativas de tecnologias futuras (tect+x)</b>											
20	Número de Empresas no Mercado; Atividades das Indústrias; Legislação Vigente; Más Práticas das Indústrias; Tecnologia Atual.	<b>Fatores não pontuais (f)</b>											H.C

QUADRO 2 – Variáveis independentes, dependentes e antecedentes envolvidas no processo de precificação dos recursos hídricos conclusão

	VARIÁVEIS ANTECEDENTES	VARIÁVEIS INDEPENDENTES	EXPLICAÇÃO	VARIÁVEIS DEPENDENTES								
				INFLUÊNCIA NA DISPONIBILIDADE (OFERTA) DO RECURSO		INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DO RECURSO		INFLUÊNCIA NA DEMANDA DO RECURSO				
				Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante
21	Psicológico dos Usuários; Eventos Aleatórios (estiagens, pandemia, contaminações etc).	<b>Termo de erro (e)</b>	Qualquer processo estocástico não relacionado com as demais variáveis que, no entanto, impacte na demanda, oferta e/ou qualidade do recurso (ex: pandemia da COVID-19)	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante	Relação próxima	Relação intermediária	Relação distante

FONTE: Os Autores (2021)

\* Nota — H.C foi a forma utilizada para abreviar o termo: “Há Correlação”.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Qual modelo qualitativo organizaria de modo mais apropriado as relações entre variáveis para os cálculos de valoração ambiental, pertinentes à precificação dos recursos hídricos? Com o intuito de responder à indagação desta pesquisa, foi alcançado o objetivo de organizar sistematicamente e qualitativamente as relações entre as variáveis dos cálculos de valoração ambiental para precificação de recursos hídricos, utilizando como base a lógica da Análise de Redes Neurais (ARN).

Foi detectado na pesquisa a inexistência de aplicação clara do uso de técnicas econométricas de ARN ou Equações Simultâneas para a precificação da água no Brasil. Os modelos de equações simultâneas, assim como as redes neurais, podem ser utilizados no processo de desenvolvimento de um modelo de precificação de recursos hídricos. De maneira objetiva, quando os aspectos da precificação são elaborados a partir de três variáveis dependentes principais – demanda, oferta e qualidade da água –, há de se atentar para o fato de que tais fatores podem vir a se influenciar simultânea e reciprocamente, assumindo um fluxo de influência de “mão dupla”. Assim, é de praxe que, com o intuito de se estruturar um modelo condizente com as necessidades dos agentes envolvidos e que, de fato, reflita as condições reais dos recursos observados. Então, a partir desta pesquisa verificou-se a necessidade de realização de entrevistas com profissionais da área de hidrologia para que o modelo apresentado seja validado por engenheiros da área.

Os modelos de equações simultâneas podem ser foco de próximos estudos, porque são apropriados para precificação de mercados. Esta pesquisa contribuiu para preparar suas bases e auxiliar no avanço do conhecimento de seu uso em cálculos da fórmula da cobrança. Então aponta-se como resultado que a ARN fornece bases tanto para que cálculos da precificação sejam realizados a partir dela, quanto para futuras evoluções de cálculos por equações simultâneas, visto que a lógica da ARN é apropriada para organizar qualitativamente variáveis de um modelo.

O amadurecimento de modelos qualitativos tende a desencadear aprimoramentos em modelos quantitativos. Tendo isso em vista, as propriedades das Redes Neurais podem, invariavelmente, auxiliar de maneira substancial no processo de precificação de recursos hídricos. A medida em que uma das principais características das redes neurais envolvem sua capacidade de adaptação, por meio de seus pesos sinápticos, a diferentes ambientes, os benefícios de sua utilização envolvem, de acordo com Haykin (2009), aspectos como: a generalização, fator esse intimamente atrelado à aprendizagem da rede; a não-linearidade; e o mapeamento de entrada e saída, bem como sua adaptabilidade.

Em suma, tais atributos fazem com que essa tecnologia seja capaz de reconhecer padrões ocultos e correlações em dados agrupados, agrupar e classificar grandes quantidades de informações, além de aprender e melhorar seus processos de maneira constante.

Assim, estas propriedades facilitariam, de maneira bastante expressiva, a elaboração dos pilares e alicerces fundamentais de um modelo cuja principal função esteja voltada para a precificação dos recursos hídricos. Naturalmente, a maneira pela qual tais redes captam, administram e lidam com uma grande quantidade de dados tornaria todo o processo referente ao desenvolvimento de um algoritmo responsável por calcular o preço desses recursos significativamente mais simples e eficaz. Enfim, este artigo tratou da relação entre economia, sustentabilidade e tecnologia.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Arquivos cobrança**. 2018. Disponível em: <[https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/cobranca/arquivos-cobranca/sitcobrcbhsinterestaduais\\_30\\_04\\_2018.pdf](https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/cobranca/arquivos-cobranca/sitcobrcbhsinterestaduais_30_04_2018.pdf)>. Acesso em: 29 jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cobrança pelo uso de recursos hídricos**. Brasília: SAG, 2013. v. 7. Disponível em: <<http://www.cbhmedioparaiba.org.br/downloads/capacitacao-vol7.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cobrança pelo uso de recursos hídricos no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNDAYMWQwZTAtYzRlNy00ZWl3LTlkNzEtOTc4NzY2MDE0MwY0IiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGItNDY5YS04YjRkLTky2N2ZjZDFiYWY4OCJ9>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura recursos hídricos**. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Disponibilidade de demanda de recursos hídricos no Brasil: estudo técnico**. Caderno de Recursos Hídricos. Brasília: ANA, 2005. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Gestão das águas**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/o-que-e>>. Acesso em: 11 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **O que é o SINGREH?** Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/o-que-e-o-singreh>>. Acesso em: 18 out. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de recursos hídricos da região hidrográfica do Paraguai PRH Paraguai**. Brasília: ANA/SPR, 2017. Disponível em: <[https://arquivos.ana.gov.br/portal/RH-Paraguai/processo\\_elaboracao/arranjo\\_institucional.pdf](https://arquivos.ana.gov.br/portal/RH-Paraguai/processo_elaboracao/arranjo_institucional.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Planos de recursos hídricos e enquadramento dos corpos de água. **Cadernos de capacitação em Recursos Hídricos**, Brasília, v. 5, p. 4-73, 2013. Acesso em: 11 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Valores cobrados e arrecadados com a cobrança pelo uso de recursos hídricos no país**. 2018. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNDY5YS04YjRkLTky2N2ZjZDFiYWY4OCJ9>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

BRASIL. Lei n. 9.344, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 09 de janeiro de 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm)>. Acesso em: 14 mar. 2021.

CALLAN, S. J.; THOMAS, J. M. **Economia ambiental**: aplicações, políticas e teoria. Tradução da 6ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522125210>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

CBH DOCE. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**: apresentação. Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/cbh-doce/apresentacao>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

CBH PARANAÍBA. **A bacia/principais características**. Disponível em: <<https://www.cbhparanaiba.org.br/a-bacia/caracteristicas>>. Acesso em: 29 nov. 2020.

CEIVAP. **Elaboração de estudos visando o aprimoramento da cobrança pelo uso dos recursos hídricos de domínio da União na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul**: Relatório das propostas de aperfeiçoamento da metodologia da cobrança. 2020. Disponível em: <[http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arbq\\_pubMidia\\_PRODUTO\\_4\\_1-30012020\\_v8.pdf](http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arbq_pubMidia_PRODUTO_4_1-30012020_v8.pdf)>. Acesso em: 24 mar. 2021.

CEIVAP. **Estudos visando o aprimoramento da cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio da União na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul**: Resumo Executivo. Disponível em: <[http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arbq\\_pubMidia\\_Processo\\_196-2017\\_P07.pdf](http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arbq_pubMidia_Processo_196-2017_P07.pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2021.

EOS. **Principais pautas da política nacional de recursos hídricos**. 2017. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/pautas-da-politica-nacional-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

FURTADO, R. D. O. **O poder da economia na Gestão Ambiental**: os métodos de Valoração como suporte à formulação de políticas públicas e ambientais. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Direito Ambiental e Políticas Públicas) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2010. Disponível em: <<https://www2.unifap.br/ppgdapp/files/2013/04/DISSERTA%25C3%2587%25C3%25830-Definitiva-LENE.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria básica-5**. São Paulo: Amgh, 2011. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580550511/cfi/678!/4/2@100:0.00>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

HAYKIN, Simon. **Redes neurais**: princípios e prática. Porto Alegre: Bookman, 2007. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577800865/cfi/23!/4/2@100:0.00>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

INTERÁGUAS. **Programa de desenvolvimento do setor água**. Brasília, 2018. Disponível em: <[https://arquivos.ana.gov.br/interaguas/INTERAGUAS\\_ProgramadeDesenvolvimentodoSetorAgua.pdf](https://arquivos.ana.gov.br/interaguas/INTERAGUAS_ProgramadeDesenvolvimentodoSetorAgua.pdf)>. Acesso em: 11 mar. 2021.

KURTZ, F. C. **Valoração econômica e ambiental pelo uso da água como instrumento de Gestão de Recursos Hídricos**. 2004. 191 f. Tese (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de água e Solo) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3561/FABIOKURTZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

LEAL, L. V. M.; RODRIGUES, A. L. Outorga e Cobrança pelo uso dos Recursos Hídricos como Instrumento de Gestão da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. **Revista de Direito**, Viçosa, v. 11, n. 01, p. 61-101, 2019. Disponível em: <<https://com-mendeley-prod-publicsharing-pdfstore.s3.eu-west-1.amazonaws.com/9ebf-CC-BY-2/10.32361/20191116423.pdf?X-Amz-Security-Token=FwoGZXIvYXdzED0aDN8z1%2BWZkDExz%2BvExiKaAzzB1MakZWjbyJdDe7yYIHSZZGv8TuJy4Rpz6Uxgdq%2BFjL3%2BOSNcPRkrxgLjGgWx0%2BVL6lpo8i09jpvz7P9Zpl46hAnWSwNv2%2BXZL5EK7MFLwGMQNvul>>. Acesso em: 11 nov. 2020.

MAY, P.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, Valéria. **Economia do meio ambiente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=zgj43XNhYugC&oi=fnd&pg=PT26&dq=May,+Lustosa,+Vinha&ots=IJyxK6YlpD&sig=YbhFbttHS1288S8miy\\_SqUVEI\\_A#v=onepage&q=May%2C%20Lustosa%2C%20Vinha&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=zgj43XNhYugC&oi=fnd&pg=PT26&dq=May,+Lustosa,+Vinha&ots=IJyxK6YlpD&sig=YbhFbttHS1288S8miy_SqUVEI_A#v=onepage&q=May%2C%20Lustosa%2C%20Vinha&f=false)>. Acesso em: 15 fev. 2021.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/sistema-de-informacoes-sobre-recursos-hidricos>>. Acesso em: 12 nov. 2020.

MUNCK, R. de C. **Uso dos recursos hídricos: o caso da cobrança na Bacia do Rio Paraíba do Sul**. 2006. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Política) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Acesso em: 14 nov. 2020.

VERDE GRANDE. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande**. Disponível em: <<http://www.verdegrande.cbh.gov.br>>. Acesso em: 29 nov. 2020.